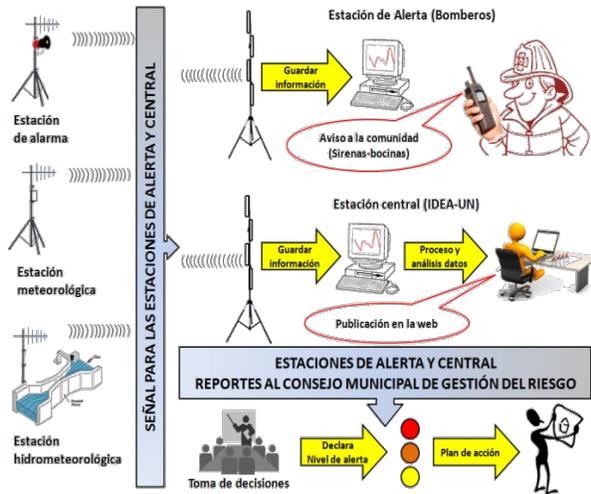


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES
INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEA



PROYECTO:
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO
PREVENTIVO Y CORRECTIVO A
LAS REDES HIDROMETEOROLÓGICAS,
DE CALIDAD DEL AIRE Y SÍSMICA
EN EL DEPARTAMENTO
DE CALDAS

CONVENIO 221 de 2016

INFORME DE AVANCE:
UMBRALES PRELIMINARES
PARA LA ACTIVACIÓN DEL SAT
PARA LAS CUENCAS QUEBRADA
EL GUAMO,
OLIVARES Y MANIZALES



Elaborado por:
Antonio Castillo R.

Mayo 2018

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	11
OBJETIVOS	13
1 MARCO TEÓRICO.....	14
1.1 Generalidades de la Modelación Hidrológica:	14
1.2 Generalidades de la Precipitación:.....	15
1.3 Generalidades de las Lluvias de diseño para las diferentes cuencas.....	16
1.4 Generalidades de las crecientes súbitas o repentinas:	17
1.5 Generalidades de los Sistemas de Alerta Temprana:.....	17
1.6 Generalidades de las Metodologías para la determinación de Umbrales de precipitación: 19	
1.7 Generalidades de la Modelación Hidráulica:	23
2 METODOLOGÍA.....	24
3 DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA EL GUAMO.	28
3.1 Procesamiento cartográfico:	28
3.2 Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada El Guamo:.....	31
3.3 Tormentas de diseño para la cuenca quebrada El Guamo.	33
3.4 Modelación Hidrológica cuenca quebrada El Guamo.	36
3.5 Pre-proceso modelación hidráulica cuenca quebrada El Guamo.	41
3.6 Modelación hidráulica quebrada El Guamo.....	45
3.6.1 Resultados modelación hidráulica Tramo 1.....	46
3.6.2 Resultados modelación hidráulica Tramo 2.....	49
3.6.3 Resultados modelación hidráulica Tramo 3.....	51
3.6.4 Resultados modelación hidráulica Tramo 4.....	54
3.6.5 Resultados modelación hidráulica Tramo 5.....	56
3.6.6 Resultados modelación hidráulica Tramo 6.....	58
3.7 Análisis de secciones transversales Quebrada El Guamo:	60
3.8 Umbrales preliminares Quebrada El Guamo	73
3.9 Interpretación de los Umbrales de precipitación para emisión de Alarmas.....	75
4 DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA OLIVARES.	77
4.1 Procesamiento cartográfico:	77
4.2 Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada Olivares:	79
4.3 Tormentas de diseño para la cuenca Quebrada Olivares.	83

4.4	Modelación Hidrológica cuenca Quebrada Olivares.....	85
4.5	Pre-proceso modelación hidráulica cuenca quebrada El Guamo.	91
4.6	Modelación hidráulica quebrada Olivares.	95
4.6.1	Resultados modelación hidráulica Tramo 1.....	97
4.6.2	Resultados modelación hidráulica Tramo 2.....	101
4.6.3	Resultados modelación hidráulica Tramo3.....	104
4.7	Análisis de secciones transversales Quebrada El Olivares:.....	108
4.8	Umbrales preliminares Quebrada Olivares.....	116
5	DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA MANIZALES.	117
5.1	Procesamiento cartográfico:.....	117
5.2	Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada Olivares:	118
5.3	Tormentas de diseño para la cuenca Quebrada Manizales.	120
5.4	Modelación Hidrológica cuenca Quebrada Manizales.....	121
5.5	Análisis Hidráulico Quebrada manizales	122
5.5.1	Resultados modelación hidráulica quebrada Manizales.....	125
5.6	Umbrales de precipitación preliminares para la Quebrada Manizales.....	134
6	VALIDACIÓN MODELO CON DATOS HISTÓRICOS:.....	136
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	139
	BIBLIOGRAFIA.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de tanques del modelo TETIS en cada celda. 15

Figura 2. Características del hietograma y patrones de distribución de precipitación. 16

Figura 3. Patrones de distribución de lluvia registrados para la estación Posgrados de Manizales.16

Figura 4. Ejemplo del cálculo de umbrales por métodos empíricos. 19

Figura 5. Diagrama de flujo para modelación hidrológica inversa en la estimación de umbrales de precipitación..... 20

Figura 6. Determinación del umbral de escorrentía (TreshR). 21

Figura 7. Determinación del umbral de precipitación a partir de TreshR. 21

Figura 8. Ejemplo de función de utilidad para una cuenca determinada. La línea solida representa los costos cuando la alarma no es accionada y la línea punteada los costos cuando la alarma es accionada. 22

Figura 9. Valores de umbrales de precipitación evaluados por medio de una función de riesgo y su incertidumbre asociada..... 23

Figura 10. Ecuaciones de St. Venant bidimensionales incorporando los efectos de turbulencia y rozamiento superficial por viento del módulo hidrodinámico de Iber. 24

Figura 11. Metodología para la determinación de los umbrales de precipitación de las quebradas Manizales, Olivares y El Guamo. 26

Figura 12. Mapa Cuenca quebrada olivares y el Guamo. 28

Figura 13. Ubicación estaciones hidrometeorológicas pertenecientes a la Red SAT de Manizales para las cuencas Olivares y El Guamo. 29

Figura 14. Mapa de pendientes cuencas El Guamo y Olivares. 30

Figura 15. Perfil longitudinal del cauce principal Quebrada el Guamo. 31

Figura 16. Curva hipsométrica Quebrada El Guamo..... 32

Figura 17. Curvas de distribución para las estaciones hidrométricas CDI-San Sebastián y Lavadero Los Puentes. 34

Figura 18. Hietogramas de diseño para la estación CDI-San Sebastián usando la distribución de lluvia 1. 35

Figura 19. Hietogramas de diseño para la estación Lavadero Los Puentes usando la distribución de lluvia 3. 35

Figura 20. Hidrogramas de salida del modelo TETIS para las estaciones CDI – San Sebastián y Lavadero Los Puentes. A) Distribución 1. B) Distribución 2. C) Distribución 3..... 37

Figura 21. Resultados de caudales máximos obtenidos con TETIS para los diferentes escenarios de distribución del patrón de lluvias y humedad antecedente. 38

Figura 22. Resultados de caudales máximos obtenidos con TETIS para los diferentes escenarios de distribución del patrón de lluvias y humedad antecedente. 39

Figura 23. Tramos seleccionados para modelación Hidráulica en IBER..... 40

Figura 24. Curvas de ajuste para el caudal pico en función del área acumulada de la cuenca. 41

Figura 25. Mapas de uso de suelo para los tramos de la quebrada El Guamo..... 42

Figura 26. Mallas de volúmenes finitos para cada tramo en IBER de la quebrada El Guamo. 43

Figura 27. Registro fotográfico, visita de campo Quebrada El Guamo 15/11/2017..... 43

Figura 28. Proceso modelación hidráulica quebrada El Guamo. 45

Figura 29. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=2.33 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 46

Figura 30. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 47

Figura 31. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=40 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 47

Figura 32. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=100 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 48

Figura 33. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=2.33 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 49

Figura 34. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 49

Figura 35. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=40 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 50

Figura 36. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=100 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 50

Figura 37. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=2.33 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 51

Figura 38. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 52

Figura 39. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 52

Figura 40. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=100 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 53

Figura 41. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para Tr=2.33 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 54

Figura 42. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 54

Figura 43. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 55

Figura 44. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 55

Figura 45. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para Tr=2.33 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 56

Figura 46. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 56

Figura 47. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para Tr=40 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 57

Figura 48. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para Tr=100 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 57

Figura 49. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para Tr=2.33 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 58

Figura 50. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 58

Figura 51. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para Tr=40 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas. 59

Figura 52. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para Tr=100 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.	59
Figura 53. Secciones transversales Tramo 1 – Quebrada El Guamo.....	61
Figura 54. Perfil Sección transversal 1- Tramo 1-Quebrada El Guamo.....	61
Figura 55. Perfil Sección transversal 2- Tramo 1-Quebrada El Guamo.....	62
Figura 56. Perfil Sección transversal 3- Tramo 1- Quebrada El Guamo	62
Figura 57. Secciones transversales Tramo 2 – Quebrada El Guamo.....	63
Figura 58. Perfil Sección transversal 1- Tramo 2-Quebrada El Guamo	63
Figura 59. Perfil Sección transversal 2- Tramo 2-Quebrada El Guamo.....	64
Figura 60. Perfil Sección transversal 3- Tramo 2- Quebrada El Guamo.....	64
Figura 61. Secciones transversales Tramo 3 – Quebrada El Guamo.....	65
Figura 62. Perfil Sección transversal 1- Tramo 3 – Quebrada El Guamo	65
Figura 63. Perfil Sección transversal 3- Tramo 3- Quebrada El Guamo	66
Figura 64. Perfil Sección transversal 3- Tramo 3- Quebrada El Guamo.....	66
Figura 65. Perfil Sección transversal 4- Tramo 3- Quebrada El Guamo.....	67
Figura 66. Perfil Sección transversal 5- Tramo 3. Quebrada El Guamo.	67
Figura 67. Secciones transversales Tramo 4 – Quebrada El Guamo.....	68
Figura 68. Perfil Sección transversal 1- Tramo 4- Quebrada El Guamo.....	68
Figura 69. Perfil Sección transversal 2- Tramo 4- Quebrada El Guamo.....	69
Figura 70. Perfil Sección transversal 3- Tramo 4-Quebrda El Guamo.....	69
Figura 71. Secciones transversales Tramo 5 – Quebrada El Guamo.....	70
Figura 72. Perfil Sección transversal 1- Tramo 5- Quebrada El Guamo.....	70
Figura 73. Perfil Sección transversal 2- Tramo 5 Quebrada El Guamo.	71
Figura 74. Perfil Sección transversal 3- Tramo 5 Quebrada El Guamo.	71
Figura 75. Secciones transversales Tramo 6 – Quebrada El Guamo.....	72
Figura 76. Perfil Sección transversal 1- Tramo 6- Quebrada El Guamo.....	72
Figura 77. Perfil Sección transversal 2- Tramo 6- Quebrada El Guamo.....	73
Figura 78. Determinación de los umbrales de precipitación para la Quebrada El Guamo.....	74
Figura 79. Ejemplo de precipitación y cálculo de umbrales.....	75
Figura 80. Ejemplo ventana de visualización de la variable UTTP para la emisión de alarmas.	76
Figura 81. Mapa de alturas cuenca Olivares.	77
Figura 82. Mapa de pendientes cuenca Olivares.....	78
Figura 83. División subcuencas quebrada Olivares.....	79
Figura 84. Resultados de tiempos de concentración para la estación Bocatoma Río Blanco.	81
Figura 85. Resultados de tiempos de concentración para la estación Popal.....	81
Figura 86. Resultados de tiempos de concentración para la estación Aguas de Manizales.....	82
Figura 87. Resultados de tiempos de concentración para la estación Bomberos.....	82
Figura 88. Resultados de tiempos de concentración para Olivares - desembocadura.....	83
Figura 89. Distribuciones de precipitación para la Quebrada Olivares.	84
Figura 90. Hietogramas de diseño para Tr 2.33, 15, 40 y 100 años en la estación Bocatoma Río Blanco.....	84
Figura 91. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC I y Distribución I.	86
Figura 92. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC I y Distribución II.	87
Figura 93. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC I y Distribución III.	87

Figura 94. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC II y Distribución I. 88

Figura 95. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC II y Distribución II. 88

Figura 96. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC II y Distribución III. 89

Figura 97. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC III y Distribución I. 89

Figura 98. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC III y Distribución II. 90

Figura 99. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC III y Distribución III. 90

Figura 100. Definición de tramos quebrada olivares para la modelación hidráulica. 92

Figura 101. Mapa usos del suelo para el Tramo 1 quebrada Olivares. 92

Figura 102. Mapa usos del suelo para el Tramo 2 quebrada Olivares. 92

Figura 103. Mapa usos del suelo para el Tramo 3 quebrada Olivares. 93

Figura 104. Mallado en IBER del modelo digital de elevación para los diferentes tramos de la quebrada Olivares. 94

Figura 105. Ejemplo corrección malla MDT por viviendas del Tramo 2- sector Carabineros. 95

Figura 106. Ejemplo corrección malla MDT por obstrucciones tramo 3 – Sector puente vía El Guamo. 95

Figura 107. Delimitación de los tramos para la modelación hidráulica de la quebrada Olivares. 96

Figura 108. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=2.33 años. Mapa de calados máximos. 97

Figura 109. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=2.33 años. Mapa de velocidades. 97

Figura 110. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=15 años. Mapa de calados máximos. 98

Figura 111. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=15 años. Mapa de velocidades. 98

Figura 112. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos. 98

Figura 113. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=40 años. Mapa de velocidades. 99

Figura 114. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=100 años. Mapa de calados máximos. 99

Figura 115. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=100 años. Mapa de velocidades. 100

Figura 116. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=2.33 años. Mapa de calados máximos. 101

Figura 117. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=2.33 años. Mapa de velocidades. 101

Figura 118. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=15 años. Mapa de calados máximos. 101

Figura 119. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=15 años. Mapa de velocidades. 102

Figura 120. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos. 102

Figura 121. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=40 años. Mapa de velocidades. 102

Figura 122. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=100 años. Mapa de calados máximos. 102

Figura 123. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=100 años. Mapa de velocidades. 103

Figura 124. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=2.33 años. Mapa de calados máximos. 104

Figura 125. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=2.33 años. Mapa de velocidades.	104
Figura 126. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=15 años. Mapa de calados máximos.	105
Figura 127. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=15 años. Mapa de velocidades...	105
Figura 128. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos.	106
Figura 129. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de velocidades...	106
Figura 130. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos.	107
Figura 131. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de velocidades..	107
Figura 132. Secciones transversales Tramo 1- Quebrada Olivares.....	109
Figura 133. Perfil Sección transversal 1- Tramo 1- Quebrada Olivares.	109
Figura 134. Perfil Sección transversal 2- Tramo 1- Quebrada Olivares.	110
Figura 135. Perfil Sección transversal 2- Tramo 1- Quebrada Olivares.	110
Figura 136. Secciones transversales Tramo 2- Quebrada Olivares.....	111
Figura 137. Perfil Sección transversal 1- Tramo 2- Quebrada Olivares.	111
Figura 138. Perfil Sección transversal 2- Tramo 2- Quebrada Olivares.	111
Figura 139. Perfil Sección transversal 3- Tramo 2- Quebrada Olivares.	112
Figura 140. Perfil Sección transversal 4- Tramo 2- Quebrada Olivares.	112
Figura 141. Perfil Sección transversal 5- Tramo 2- Quebrada Olivares.	112
Figura 142. Perfil Sección transversal 6- Tramo 2- Quebrada Olivares.	113
Figura 143. Secciones transversales Tramo 3- Quebrada Olivares.....	113
Figura 144. Perfil Sección transversal 1- Tramo 3- Quebrada Olivares.	113
Figura 145. Perfil Sección transversal 2- Tramo 3- Quebrada Olivares.	114
Figura 146. Perfil Sección transversal 3- Tramo 3- Quebrada Olivares.	114
Figura 147. Perfil Sección transversal 4- Tramo 3- Quebrada Olivares.	114
Figura 148. Perfil Sección transversal 5- Tramo 3- Quebrada Olivares.	115
Figura 149. Perfil Sección transversal 6- Tramo 3- Quebrada Olivares.	115
Figura 150. Determinación de los umbrales de precipitación para la Quebrada Olivares.....	117
Figura 151. Localización Estaciones Cuenca Quebrada Manizales.	118
Figura 152. Subcuencas Quebrada Manizales.	118
Figura 153. Patrón de distribución temporal para lluvias de diseño Subcuenca Manizales – Skinco.	121
Figura 154. hietograma de diseño Tr 100 años para la subcuenca Q. Manizales – Skinco.	121
Figura 155. Hidrogramas de salida subcuenca Q. Manizales-Skinco.....	122
Figura 156. Tramos de análisis Onda Cinemática para la quebrada Manizales.....	124
Figura 157. Ejemplo resultado modelo Onda Cinemática tramo 3- Tr40 años.....	124
Figura 158. Preproceso modelación hidráulica quebrada Manizales.....	125
Figura 159. Mapa de calados máximos quebrada Manizales Tr=2.33 años.....	125
Figura 160. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=2.33 años.....	126
Figura 161. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=2.33 años.....	126
Figura 162. Tramo 3 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=2.33 años.....	126
Figura 163. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=2.33 años.....	127

Figura 164. Mapa de calados máximos quebrada Manizales Tr=15 años. 127

Figura 165. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=15 años..... 128

Figura 166. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=15 años..... 128

Figura 167. Tramo 3 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=15 años..... 128

Figura 168. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=15 años. 129

Figura 169. Mapa de calados máximos quebrada Manizales Tr=40 años. 129

Figura 170. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=40 años..... 130

Figura 171. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=40 años..... 130

Figura 172. Tramo 3 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=40 años..... 130

Figura 173. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=40 años. 131

Figura 174. Mapa de calados máximos quebrada Manizales Tr=100 años. 131

Figura 175. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=100 años..... 131

Figura 176. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=100 años..... 132

Figura 177. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=100 años..... 132

Figura 178. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=100 años. 132

Figura 179. Ejemplo Sección 00+868m y 01+058 m. 133

Figura 180. Ejemplo Secciones nivel de lámina de agua para cada periodo de retorno. 133

Figura 181. Ejemplo Niveles de desbordamiento e inundación sección 00+217m- Quebrada Manizales. 134

Figura 182. Umbral preliminar cuenca Quebrada Manizales 135

Figura 183. Resultados simulación Q.Manizales- Hietograma Hospital Caldas 138

Figura 184. Resultados simulación Q. Manizales – Hietograma La Nubia. 138

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Componentes típicos en alertas, pronósticos y proceso de respuesta y emergencia para inundaciones .	18
Tabla 2. Resumen de los parámetros fisiomorfométricos de la cuenca Quebrada El Guamo.	31
Tabla 3. Cálculo tiempo de concentración para la quebrada El Guamo.	33
Tabla 4. Parámetros Estado Inicial TETIS para cada condición de humedad Antecedente.	38
Tabla 5. Resumen dimensiones estructuras hidráulicas.	44
Tabla 6. Parámetros fisiomorfométricos para las subcuencas Quebrada Olivares (cálculo del Tc).	80
Tabla 7. Parámetros Estado Inicial TETIS para cada condición de humedad Antecedente Olivares.	86
Tabla 8. Valores de n de Manning para los diferentes usos del suelo de la quebrada Olivares.	91
Tabla 9. Coordenadas de las estaciones hidrométricas de la Cuenca quebrada Manizales.	118
Tabla 10. Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada Manizales	119
Tabla 11. Parámetros fisiomorfométricos Subcuencas.	119
Tabla 12. Tiempos de Concentración.	120
Tabla 13. Resumen de caudales máximos en cada subcuenca para avenidas torrenciales.	122
Tabla 14. Ejemplo Condiciones iniciales tramo 1. Estación Skinco.	124
Tabla 15. Resumen caudales y niveles de desbordamiento e inundación Quebrada Manizales.	134

INTRODUCCIÓN

Las comunidades asentadas en la ribera de las Quebradas Manizales, El Guamo y Olivares se encuentran en alto riesgo hidromorfológico, debido a la exposición de elementos vulnerables (viviendas, edificaciones e infraestructura) en zonas con clara posibilidad de presentarse eventos de inundación, remociones en masa y avenidas torrenciales. Esta situación se ha puesto en evidencia en períodos anteriores de precipitación, como los ocurridos en los años 2008 y 2011, en los cuales se reportó la afectación de viviendas y pérdidas materiales de los habitantes de la zona. Los eventos acontecidos se caracterizan por el incremento súbito de los niveles en las quebradas, producto de precipitaciones de alta intensidad y corta duración. En respuesta a estos acontecimientos, las autoridades locales han aunado esfuerzos para realizar un diagnóstico y tomar medidas sobre las cuencas con el fin de adoptar acciones que permitan la adaptabilidad, reducción y respuesta frente al riesgo de inundación. Si bien se han intervenido las cuencas con la construcción de obras para el control de avenidas torrenciales y obras de estabilidad de taludes, el riesgo de inundación de estas poblaciones aún persiste, debido a que se trata de una problemática compleja que involucra aspectos sociales, culturales, económicos y ambientales.

En este sentido, se han realizado convenios interinstitucionales entre la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS) y la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales con el fin de implementar un Sistema de Alerta Temprana (SAT) por Inundación sobre las cuencas Quebrada Manizales, Quebrada Olivares y Quebrada El Guamo. Un SAT por inundación constituye una medida no estructural que permitirá a los habitantes de estas comunidades y a los organismos de atención de emergencias, la posibilidad de evacuación anticipada de las áreas de riesgo frente a eventos hidrometeorológicos. Lo anterior, ha permitido la instalación de estaciones de monitoreo en tiempo real de las variables hidrometeorológicas, además de estaciones de alarma sonora en puntos estratégicos de la ciudad. Sin embargo, aún no se cuenta con un sistema de predicción de inundaciones riguroso, ni de los criterios para la emisión de alertas que permitan el adecuado funcionamiento del SAT.

Por lo tanto, este informe tiene como objetivo principal la determinación de los umbrales preliminares de alerta basados en la precipitación acumulada de diez minutos para las quebradas mencionadas anteriormente. A continuación, se describe el proceso de determinación de los umbrales de precipitación obtenidos a través de una serie de estudios y metodologías que involucra una modelación hidrológica distribuida, modelación hidráulica bidimensional y correlación de

niveles y precipitación sobre las secciones críticas de cada quebrada. Finalmente, a partir de estos resultados se espera realizar la automatización e integración de los mismos a las plataformas digitales del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC), y por lo tanto dar inicio a la activación del SAT por inundación de Manizales, constituyendo así una herramienta que contribuya a la mitigación del riesgo de la ciudad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar los umbrales de precipitación para la emisión de alarmas del Sistema de Alerta Temprana por inundación en las Quebradas Manizales, Olivares y El Guamo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos de este proyecto se tienen los siguientes:

- Actualizar la modelación hidrológica, a través del modelo TETIS, de las cuencas quebrada Manizales, Olivares y El Guamo.
- Realizar la modelación hidráulica en los tramos urbanos de las quebradas Manizales, Olivares y El Guamo para diferentes períodos de retorno.
- Determinar las márgenes y niveles de inundación ocasionados por diferentes eventos en las quebradas anteriormente mencionadas.
- Correlacionar los niveles y la precipitación sobre las secciones más críticas en cada una de las quebradas.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Generalidades de la Modelación Hidrológica:

La modelación hidrológica es una herramienta que permite la simplificación de los fenómenos ocurridos en el ciclo hidrológico, y cuyo objetivo es obtener mediante formulaciones matemáticas y físicas resultados confiables en cuanto a las cantidades e interrelaciones entre los procesos de precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración[1]. Debido a que el ciclo hidrológico es complejo, cada modelo hidrológico realiza diferentes simplificaciones que permiten reducir algunos procesos basados en el interés específico de cada estudio de acuerdo a la escala temporal que se quiera simular, así pues, los modelos hidrológicos se dividen en continuos o de eventos, siendo estos últimos de interés para el caso de las avenidas en donde se desea simular periodos cortos de tiempo y los procesos de evapotranspiración pueden ser simplificados pues no es preponderante para la tiempo de análisis.

Es importante mencionar que la modelación hidrológica de este trabajo consistió en una actualización de los eventos de lluvia para el modelo TETIS, puesto que este modelo había sido implementado sobre la cuenca del Río Chinchiná (a la cual pertenecen las cuencas de las quebradas de estudio) en estudios anteriores realizado por la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales [2].

TETIS es un modelo hidrológico desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia, es un modelo lluvia-escorrentía de tipo conceptual y distribuido, de simulación continua o para eventos, que se puede representar con 5 tanques que simulan los almacenamientos y flujos en cada una de las etapas del ciclo hidrológico, y que realiza un balance hidrológico en cada celda. Se requiere como datos de entrada el mapa Raster del modelo de elevación digital (MED), mapas con propiedades y características de los suelos, cobertura vegetal, y mapas hidrogeológicos. Además, emplea la metodología de la onda cinemática en conjunto con características geomorfológicas de la cuenca, para realizar la traslación de flujo por el cauce. En la Figura 1 se muestra el esquema conceptual del modelo. Este modelo tiene 9 parámetros de calibración que corresponde a cada una de las siguientes etapas del ciclo hidrológico: Almacenamiento estático máximo- FC1 (Hu); factor de vegetación para la evapotranspiración- FC2 (λ_v); infiltración -FC3 (Ks); escorrentía directa-FC4(Vladera); percolación- FC5(Kp); interflujo- FC6 (Ks); pérdidas subterráneas - FC7 (0,1 Kp); flujo base - FC8 (Kp) y velocidad de Cauces-FC9 (Vcauces) [3].

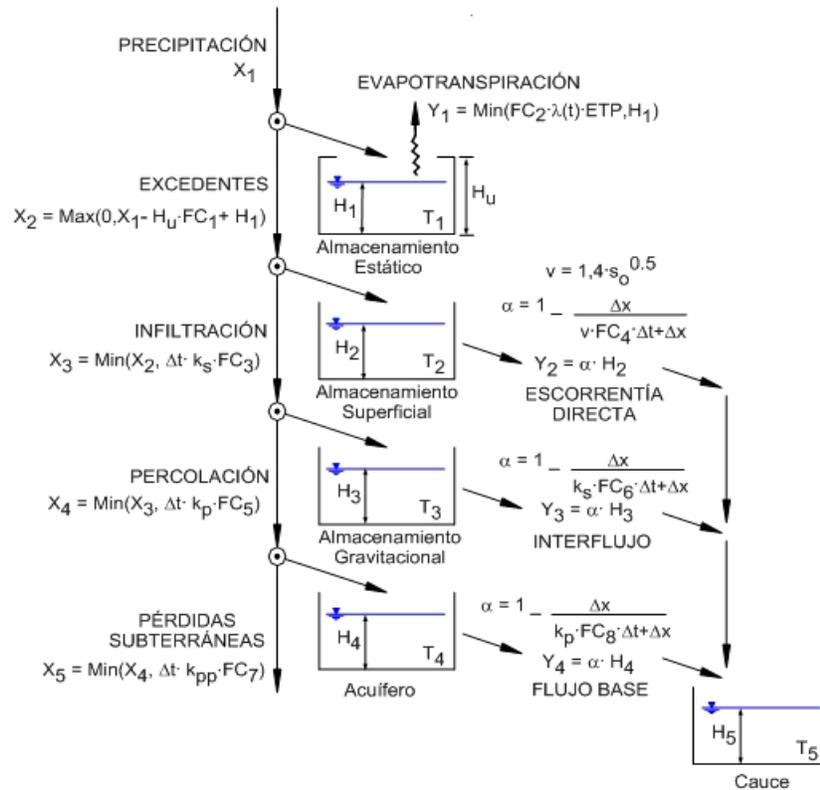


Figura 1. Esquema de tanques del modelo TETIS en cada celda.

Fuente: [3]

1.2 Generalidades de la Precipitación:

La precipitación se define como la porción de agua que es condensada y depositada en la superficie de la tierra, es uno de los procesos más importantes en el ciclo hidrológico, y aunque es relativamente fácil de medir (con pluviómetros que registran la cantidad de lluvia en mm sobre un determinado tiempo) comparada a otros procesos, se caracteriza por tener una alta variabilidad temporal y espacial. Debido a esta variabilidad, representa una dificultad para propósito de diseño estimar la precipitación más probable sobre un área [4].

En general, los eventos de precipitación registrados en los pluviómetros se muestran en hietogramas que corresponden a la gráfica de la cantidad de precipitación acumulado en un intervalo de tiempo: Se representa generalmente en un histograma, que en muchas ocasiones se registra en intensidad de precipitación (mm/hr). Del hietograma interesa la duración del evento, la intensidad media, la precipitación acumulada, así como la distribución temporal de la lluvia.

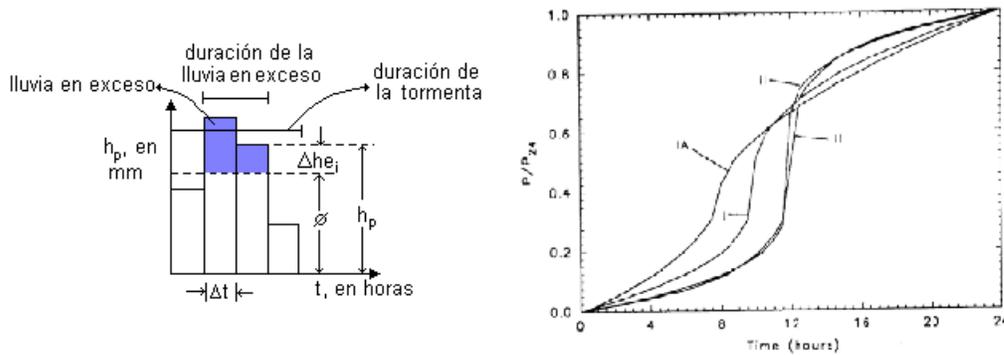


Figura 2. Características del hietograma y patrones de distribución de precipitación.
Fuente: [4]

1.3 Generalidades de las Lluvias de diseño para las diferentes cuencas.

Las tormentas de diseño se calcularon para los periodos de retorno de 2.33 años, 15 años, 40 años y 100 años. Además, a cada uno de estos periodos de retorno se le aplicaron 3 distribuciones temporales de lluvia. Los patrones de distribución de la lluvia fueron obtenidos a partir del estudio “Spatio-temporal description of the rainfall in the Andean city of Manizales (Colombia) for storm design” realizado por [5]. Se escogió el patrón de distribución de lluvia (correspondiente a la media y al percentil del 5%) de la estación Yarumal debido a su cercanía y la media de las estaciones de la ciudad de Manizales, para una duración de evento igual al tiempo de concentración de la cuenca. Por lo tanto, los patrones de distribución de la lluvia serán los siguientes:

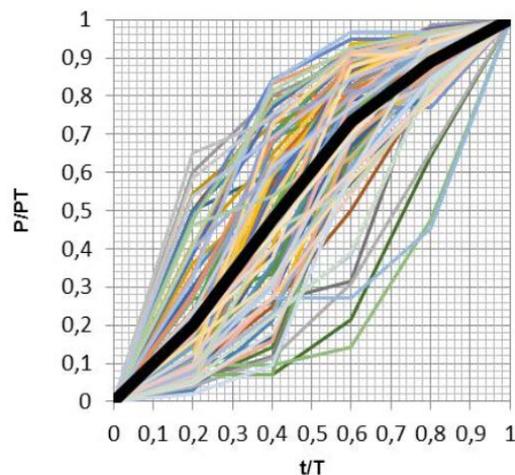


Figura 3. Patrones de distribución de lluvia registrados para la estación Posgrados de Manizales.
Fuente: [5]

Distribución 1 = el promedio de distribuciones de lluvia sobre la estación dentro de la cuenca o más cercana.

Distribución 2 = el percentil 5% de distribuciones de lluvia sobre la estación dentro de la cuenca o más cercana.

Distribución 3 = la media de las distribuciones de lluvia de las estaciones de la ciudad de Manizales.

1.4 Generalidades de las crecientes súbitas o repentinas:

La Organización Meteorológica Mundial (OMM), define las crecidas repentinas (flash flood) como el fenómeno hidrometeorológico caracterizado por un caudal pico considerable que produce una inundación rápida. De acuerdo a la American Meteorology Society y U.S National Weather Service, la inundación crece y baja rápidamente, como resultado de una alta intensidad de precipitación sobre un área relativamente pequeña, lo que se traduce en una muy limitada oportunidad para emitir alarmas, además, el incremento del nivel de agua del río o quebrada ocurre típicamente en un tiempo menor a las 6 horas siguientes del evento causante (lluvia intensa, ruptura de presa). Finalmente, las crecientes repentinas se caracterizan por tener una alta energía cinética y por lo tanto un alto poder destructivo. Lo anterior significa que estos eventos representan una amenaza considerable para la población civil [6].

El impacto, ubicación y severidad de las crecientes repentinas están relacionadas con las siguientes influencias hidrológicas; siendo la precipitación el factor más importante en la generación de las mismas, sin embargo, los procesos de producción de escorrentía, en especial las características del suelo como: humedad, permeabilidad y tasa de infiltración juegan un papel preponderante. Así mismo las características físicas de la cuenca como: tamaño, forma, pendiente, densidad de drenaje y coberturas del suelo influyen en la generación de crecientes repentinas [6].

1.5 Generalidades de los Sistemas de Alerta Temprana:

Los sistemas de alerta temprana (SAT), son el conjunto de herramientas, dispositivos de control, capacidades de gestión e instrumentos tecnológicos que usan las instituciones con el fin de monitorear una amenaza previsible, difundiendo la información de manera oportuna, sobre pronósticos de eventos y sus posibles efectos a las comunidades en riesgo y a las entidades de emergencia, buscando reducir el riesgo de muerte de la población civil, así como la protección de sus propiedades [7].

Tabla 1. Componentes típicos en alertas, pronósticos y proceso de respuesta y emergencia para inundaciones [8].

Etapas	Componente	Ejemplos
Alerta de Inundación	Detección	Monitoreo de condiciones meteorológicas, niveles de caudales, mareas y pronóstico meteorológico.
	Umbrales	Las condiciones meteorológicas, del río y de la costa bajo las cuales son tomadas las decisiones de emitir una alarma de inundación.
	Divulgación	Procedimientos y técnicas para la información de alerta al público, autoridades locales, servicio de emergencia y otros.
Pronóstico de Inundación	Ríos, Costas	Modelos conceptuales, empíricos o físicamente basados para pronóstico de las condiciones futuras del río y de la costa.
Respuesta de Emergencia	Respuesta	Trabajos de emergencia, barreras temporales, control de flujos, evacuación, rescate, gestión de incidencias, soporte de decisiones.
	Restauración	Reparaciones, remoción de escombros, reunir a las familias, aporte de subsidios, proporcionar refugio, alimentos, agua, atención médica, restauración de servicios.
	Evaluación	Evaluación del desempeño de todos los componentes del sistema, y recomendaciones para mejoras.
	Preparación	Planeación de emergencias, campañas de sensibilización, simulacros, mejoras de los sistemas, mitigación del riesgo de inundación.

Fuente: Adaptado de [8]

De acuerdo al grado de desarrollo tecnológico que se use para el monitoreo de las variables hidrometeorológicas, se presentan tres tipos de SAT: el Tipo I, que se basa en niveles observados de la corriente aguas arriba para pronosticar el nivel de aguas abajo. El Tipo II, que a partir de la precipitación observada en la parte alta de cuenca pronostica el nivel de la corriente en la parte baja. Y el Tipo III, que con ayuda de modelos meteorológicos y radares, se pronostica la precipitación sobre la cuenca para posteriormente pronosticar el nivel de la corriente, logrando conocer un evento de inundación con mayor anticipación [6].

Por último, es importante resaltar que un SAT es un proceso cíclico, y que la eficiencia en su funcionamiento depende de una evaluación y retroalimentación de las experiencias adquiridas en cada evento de inundación, que permitan la implementación de mejoras en el sistema [8]. Por lo anterior, se hace necesario e indispensable el compromiso de las autoridades locales para su mantenimiento, desarrollo y sostenibilidad en el tiempo.

1.6 Generalidades de las Metodologías para la determinación de Umbrales de precipitación:

Dentro de los componentes de un SAT, los umbrales se definen como las condiciones hidrológicas bajo la cual se toma la decisión de emitir las respectivas alertas a las comunidades [8]. Para el caso de las inundaciones en donde la precipitación es el factor más importante existen numerosas metodologías que permiten determinar los umbrales en función de la información disponible, grado de tecnología y complejidad del sistema.

Como primer acercamiento se encuentran los métodos empíricos, en donde a partir de un análisis detallado de los datos históricos (incluye información del conjunto de eventos de lluvia en donde se diferencian aquellos que produjeron inundación y los que no) se plantea una gráfica en donde se representan la lluvia acumulada contra la duración del evento. Por lo tanto, se puede obtener una línea crítica y su ecuación potencial que representa el umbral de precipitación en función de la duración del evento [9].

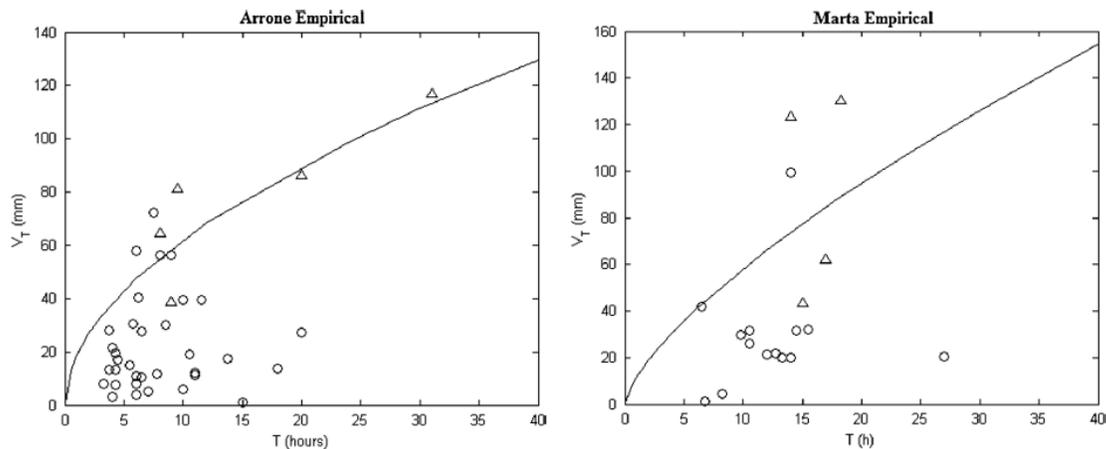


Figura 4. Ejemplo del cálculo de umbrales por métodos empíricos.

Fuente: [10]

La siguiente familia de métodos para la determinación de umbrales se basa en los modelos hidrológicos. El concepto se fundamenta en que la modelación hidrológica permite determinar la cantidad de lluvia acumulada que podría producir un caudal crítico sobre una sección transversal específica (sección crítica del canal). En adición, debido a que la respuesta de la cuenca está supeditada a la humedad del suelo, la mayoría de estos modelos utilizan el concepto de Condición de Humedad Antecedente (AMC: *Antecedent moisture condition*) para la simulación de varios escenarios. Así mismo, la variabilidad en la distribución de la precipitación es tomada en cuenta al simular diferentes hietogramas. Como se puede inferir, esta metodología puede variar ampliamente

de acuerdo al tipo de modelo hidrológico que se escoja, constituyendo a la calidad de la información disponible como el elemento que demarca la complejidad del modelo. Asimismo, en conjunto con el grado de tecnología que se emplea para la recolección de la información hidrometeorológica y climatológica se puede establecer modelos de predicción y sistemas que determinen los umbrales en tiempo real y en función de la duración de cada evento [10]. En la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo que describe la metodología de umbrales basados en modelos hidrológicos.

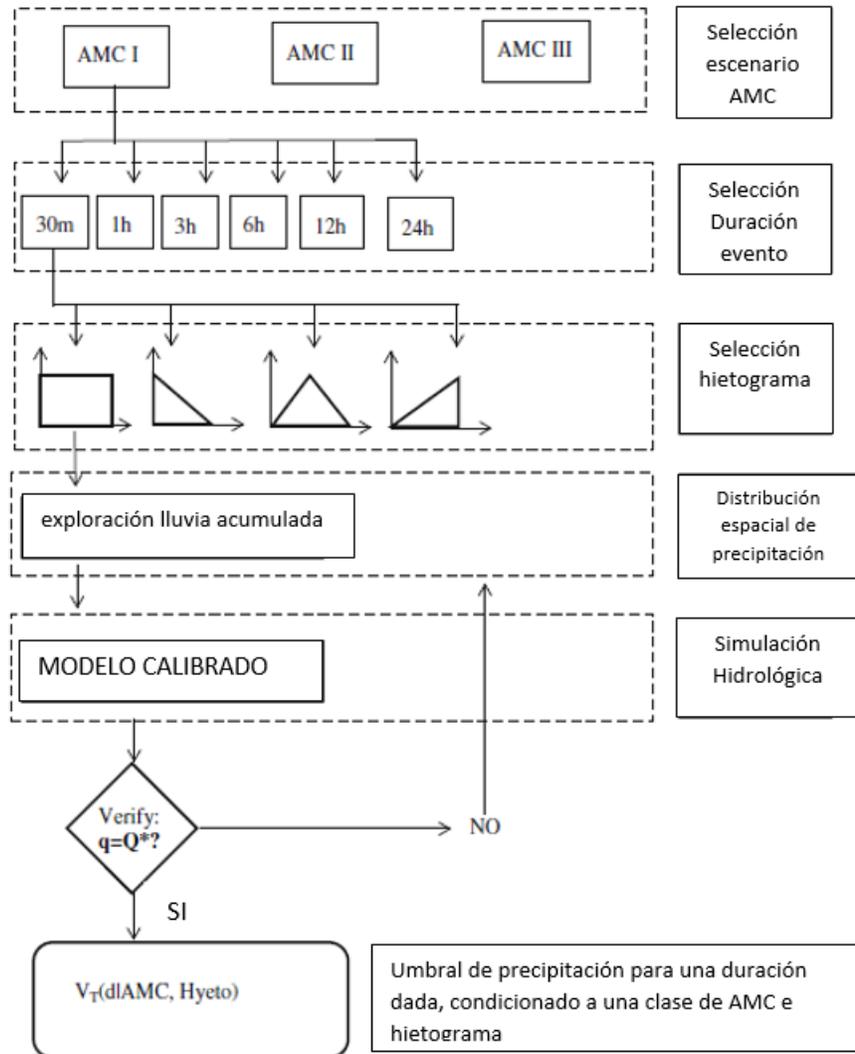


Figura 5. Diagrama de flujo para modelación hidrológica inversa en la estimación de umbrales de precipitación.

Fuente: Adaptado de [10]

En esta clase de metodología se encuentra uno de los modelos más conocidos y aplicados alrededor del mundo, este modelo fue adoptado por la World Meteorological Organization (WMO) y se conoce

como el método *Flash Flood Guidance* (FFG). El FFG propone el cálculo de la cantidad de lluvia en función de la humedad del suelo y un umbral de escorrentía (TreshR), definido este último como un valor fijo del caudal necesario para iniciar una inundación que depende de las características geográficas e hidrológicas [11]. Por lo tanto, se aplica la modelación hidrológica inversa a través del cálculo del umbral de escorrentía sobre la sección crítica del canal como se muestra en la *Figura 6*. Una vez obtenido el valor de TreshR se plantean las curvas de lluvia-escorrentía (*Figura 7*) para diferentes duraciones de evento y se obtiene así la precipitación asociada al umbral de escorrentía.

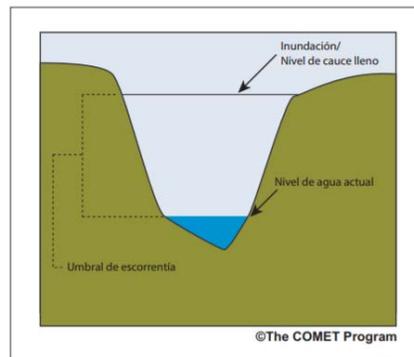


Figura 6. Determinación del umbral de escorrentía (TreshR).

Fuente: [11]

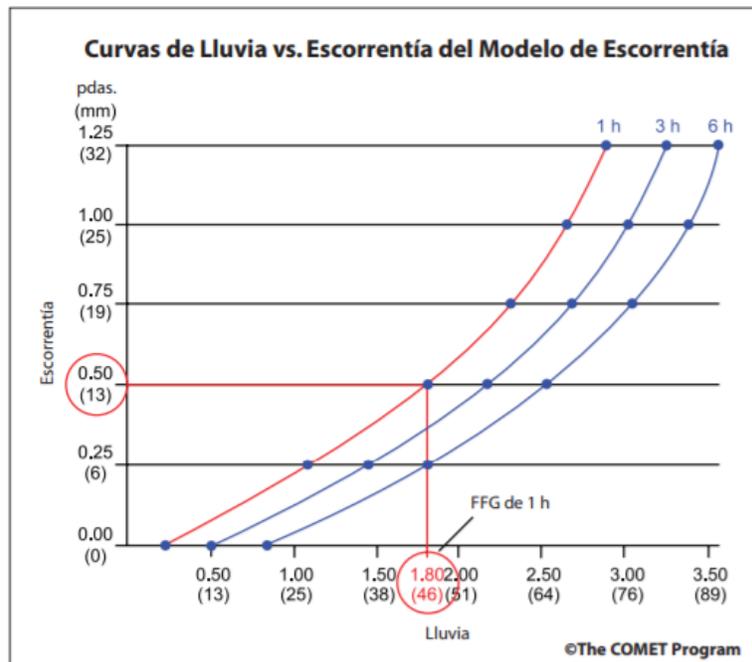


Figura 7. Determinación del umbral de precipitación a partir de TreshR.

Fuente: [11]

Finalmente, la familia metodológica más avanzada para el cálculo de umbrales de precipitación se basa en los métodos probabilísticos. En estos métodos los umbrales son valores definidos mediante la minimización de dos funciones. Por lo general, una de las funciones involucra la relación beneficio-costos del sistema (Figura 8), y una segunda función la evaluación del riesgo. Ambas funciones se asocian respectivamente a una función de probabilidad en función de la lluvia acumulada para diferentes duraciones y su correspondiente caudal pico [12]. Esta metodología que se desarrolla bajo el enfoque de la gestión del riesgo integral presenta como ventaja la posibilidad de asociar a cada curva del umbral de precipitación sus respectivas franjas de incertidumbre (Figura 9). Por lo tanto, se puede apreciar que esta metodología mejora significativamente la toma de decisiones político-administrativas puesto que implica la inserción de variables económicas y evaluación del riesgo.

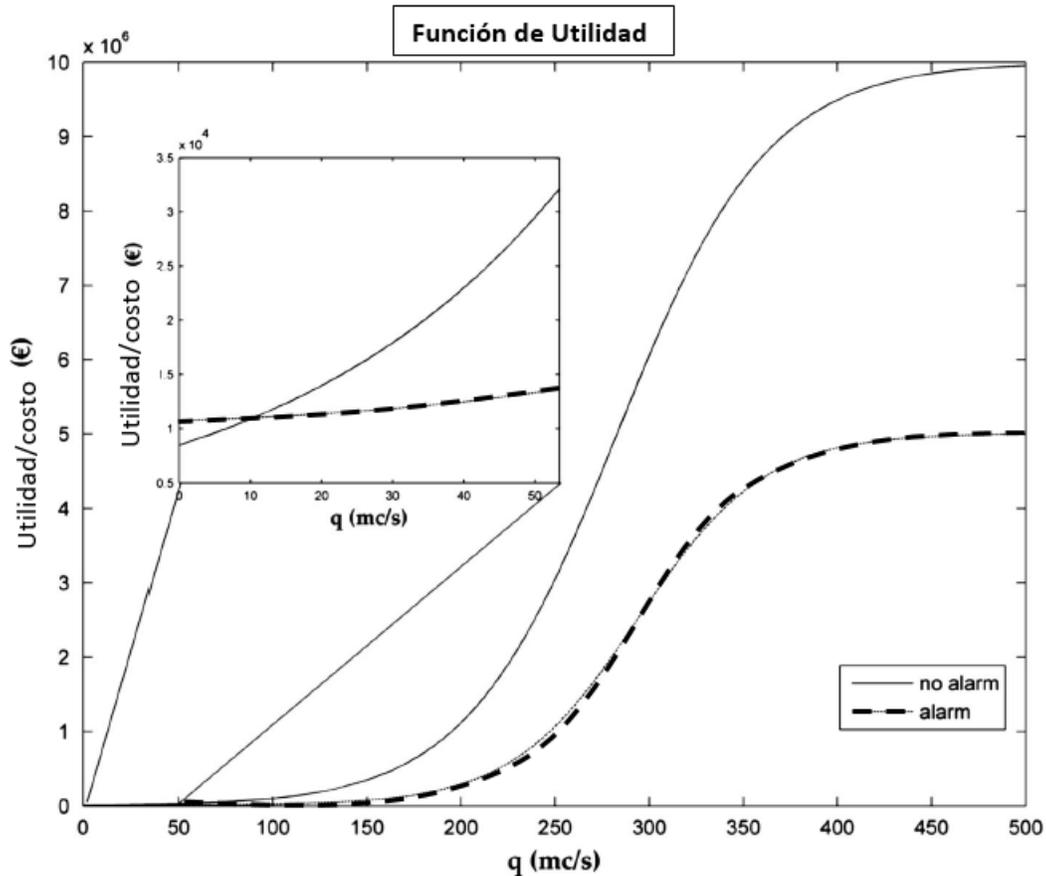


Figura 8. Ejemplo de función de utilidad para una cuenca determinada. La línea sólida representa los costos cuando la alarma no es accionada y la línea punteada los costos cuando la alarma es accionada.

Fuente: adaptado de [10]

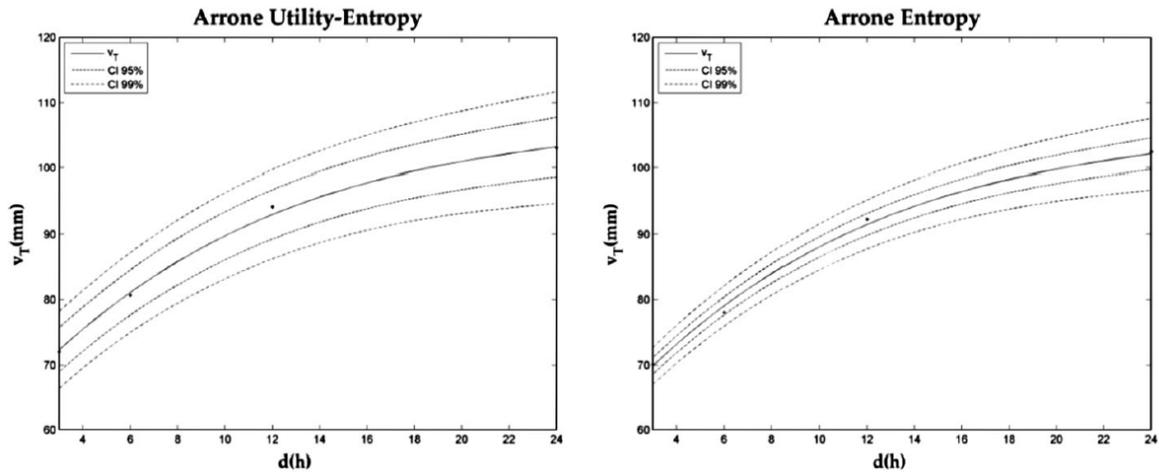


Figura 9. Valores de umbrales de precipitación evaluados por medio de una función de riesgo y su incertidumbre asociada.

Fuente: [10]

1.7 Generalidades de la Modelación Hidráulica:

El objetivo de la modelación matemática en canales naturales pretende determinar las variables hidráulicas (profundidad de lámina de agua, velocidades, caudal, etc) a partir de ecuaciones que se han formulado bajo determinadas hipótesis, por medio de la resolución de métodos numéricos de las ecuaciones de Saint Venant. En este sentido, la aproximación de la modelación matemática a las condiciones reales del flujo dependerá directamente de que las ecuaciones, hipótesis y el método numérico empleado se relacionen con el fenómeno que se requiere estudiar [13]. Por lo anterior, es necesario definir las características hidráulicas más importantes que gobiernan los flujos en canales naturales y más específicamente los fenómenos de inundación. A continuación se describe las características del modelo hidráulico IBER usado en este trabajo.

IBER es un modelo hidráulico desarrollado en conjunto por la integración de los modelos CARPA (Universidad Politécnica de Cataluña) y TURBILLON (Universidad de Coruña). Además, es un modelo numérico bidimensional para la simulación de flujo turbulento en régimen variable. IBER incorpora el método de volúmenes finitos formados por una malla no estructurada de elementos triangulares o rectangulares para la resolución de las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (Ecuaciones de Saint Venant) en su módulo hidrodinámico. Las aplicaciones de este modelo son diversas y se pueden mencionar: hidrodinámica fluvial, simulación de rotura de presas, evaluación de zonas inundables, cálculo de transporte de sedimentos y flujo de marea en estuarios [14].

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} (h U_x) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h U_x^2 + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h U_x U_y) &= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_x}{\partial y} \right) & \\ \frac{\partial}{\partial t} (h U_y) + \frac{\partial}{\partial x} (h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2} \right) &= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t h \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) & \end{aligned}$$

Figura 10. Ecuaciones de St. Venant bidimensionales incorporando los efectos de turbulencia y rozamiento superficial por viento del módulo hidrodinámico de Iber.

En donde h es el calado, U_x, U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y ν_t es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{4/3}} \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{4/3}}$$

2 METODOLOGÍA

Una vez definido las generalidades correspondientes al marco teórico de este trabajo se procede a realizar la descripción de la metodología utilizada, que se resumen en la *Figura 11*. Las actividades iniciales estuvieron enfocadas en la recolección de información acerca de las condiciones actuales de las cuencas Quebrada Manizales, Olivares y El Guamo, seguido de la localización cartográfica e identificación de las zonas de riesgo por inundación. Además de la revisión de artículos y estudios que se hayan ejecutado sobre dichas zonas por las entidades locales durante los últimos años, en especial los que contemplan diagnósticos, obras y planes de gestión con la finalidad de disminuir el riesgo de inundación.

A través de la bodega de datos del Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC) y el Instituto de estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales se recopiló la información concerniente a las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las cuencas

y se realizó un procesamiento y análisis de la serie de datos histórica de estas variables. Es importante mencionar que el período de registro de estas estaciones es corto, debido a que la red de estaciones del SAT de Manizales fueron instaladas aproximadamente en el 2014. Por lo tanto, aunque la información almacenada es robusta (registro de datos cincominutal) y presenta buena calidad en sus datos, aún no es suficiente para realizar un análisis estadístico riguroso de las series temporales.

Se realizó un procesamiento cartográfico, a partir del levantamiento LIDAR (resolución de 1.00 m) de la ciudad de Manizales, sin embargo, los límites de este levantamiento no cubren la totalidad de las cuencas (en especial la parte alta en donde se encuentran las zonas rurales), por lo tanto, fue necesario trabajar simultáneamente con el DEM de la NASA (Resolución 30.0 m). De esta forma, se determinaron las generalidades de las tres cuencas, estableciendo la delimitación de su divisoria de aguas, parámetros fisiomorfológicos, redes de drenaje, mapa de pendientes, ubicaciones de las estaciones hidrometeorológicas y de alarma sonora.

A partir de lo anterior, se procedió a establecer las lluvias de diseño para los periodos de retorno comprendido entre los 2.33 años y 100 años. Además, la información base para el desarrollo de este procedimiento fue la precipitación acumulada para cada periodo de retorno, datos obtenidos a través de una modelación hidrológica sobre la cuenca del Río Chinchiná con el modelo TETIS, que se realizó en estudios anteriores por parte de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales [2]. Simultáneamente, para la definición de las tormentas de diseño de cada periodo de retorno se tomó como referencia los patrones de distribución de la precipitación locales, basados en el estudio *“Spatio-temporal description of the rainfall in the Andean city of Manizales (Colombia) for storm design”*[5], y la duración del evento fue definido igual al tiempo de concentración al punto de salida de cada cuenca. A partir de este estudio se seleccionaron 3 patrones de distribución de la lluvia de las estaciones meteorológicas más cercanas a las cuencas estudiadas. La decisión para la selección de los patrones de distribución se basó en la representación de un amplio rango de tipos de lluvia, es decir que cada distribución refleje el pico de intensidad de la lluvia en diferentes momentos de la duración del evento.

Una vez obtenido las lluvias de diseño, se realizó la modelación hidrológica en el modelo TETIS sobre las diferentes cuencas. La calibración del modelo fue realizada en el trabajo mencionado anteriormente, por lo tanto, la obtención de los hidrogramas de salida en las estaciones

hidrométricas de cada una de las quebradas (para diferentes periodos de retorno) fue obtenida mediante la actualización de los eventos de precipitación. Los hidrogramas de salida fueron afectados en general con un incremento del 40%, esto con el fin de representar los flujos hiperconcentrados (alto transporte de sedimentos, rocas y troncos, pero con una alta energía cinética) característicos de las avenidas súbitas que se generan sobre estas quebradas de alta montaña. Finalmente, estos hidrogramas constituyeron el insumo para la modelación hidráulica.

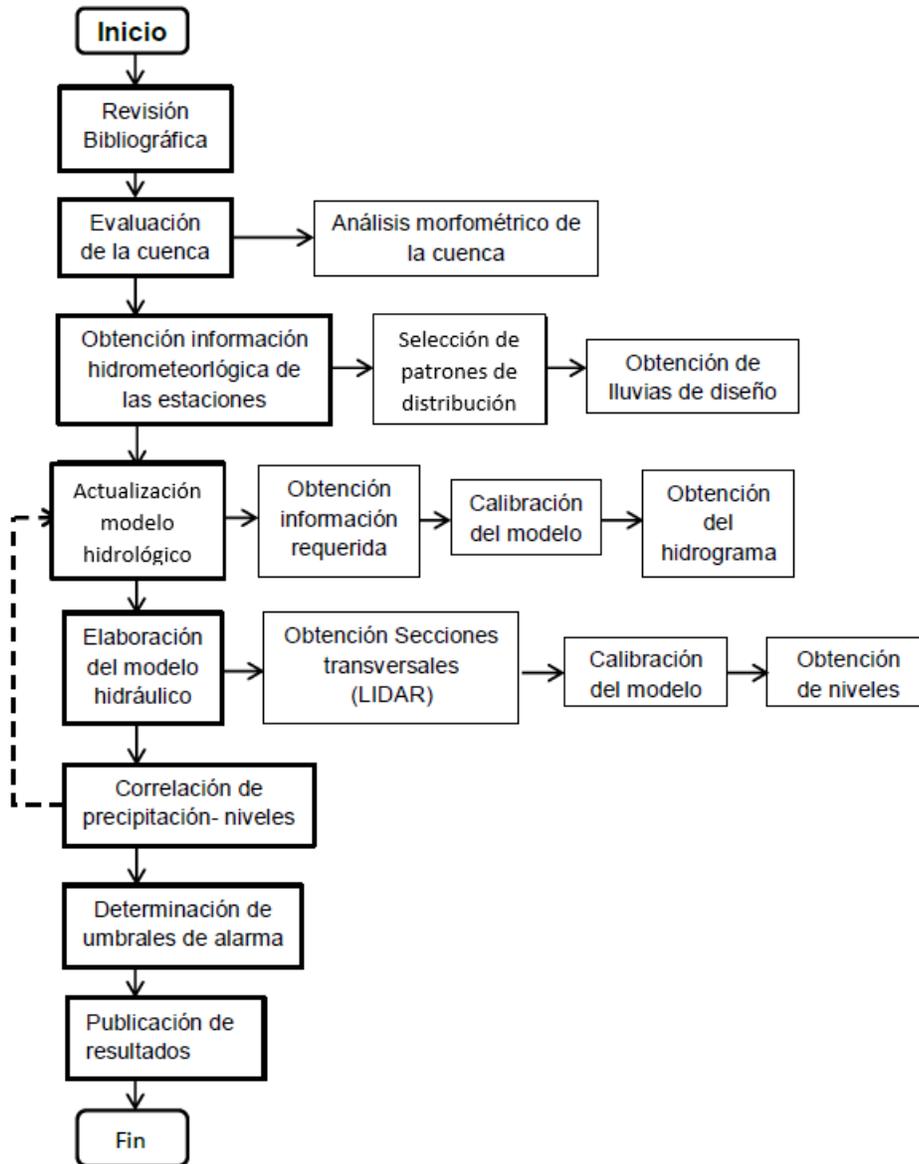


Figura 11. Metodología para la determinación de los umbrales de precipitación de las quebradas Manizales, Olivares y El Guamo.

En cuanto a la modelación hidráulica, se realizaron dos metodologías: para la quebrada Manizales se optó por el tránsito de la onda cinemática hacia aguas abajo, mientras que para los tramos de las quebradas Olivares y El Guamo se realizó la modelación en el software IBER. La quebrada Manizales fue simulada bajo la teoría de la onda cinemática mediante la resolución de las ecuaciones unidimensionales de Saint Venant a través de la aplicación de un esquema de diferencias finitas de primer orden, en donde las consideraciones más importantes se describen a continuación:

- La aplicación de la onda cinemática debió a la razón de aplicar un modelo sencillo que se adapte a las condiciones de alta montaña de la cuenca, teniendo en cuenta que autores como Lighthill and Witham, han concluido que “Bajo condiciones apropiadas para el flujo de avenida, las ondas dinámicas (solución completa a las ecuaciones de Saint Venant) se atenúan muy rápidamente, mientras que las ondas cinemáticas, viajando a una velocidad menor, son las que asumen el rol preponderante.
- Se optó un caudal base igual a la mitad del caudal de banca llena.
- Se determinó una celeridad de onda constante de $5/3$ de la velocidad media del caudal base.
- Se realizó el cálculo de la velocidad media del flujo a través de una geometría del canal promedio en cada tramo, calculado por medio de la fórmula de Manning.
- Debido a las fuertes pendientes del cauce, y en especial por presentarse un lecho rocoso con diámetros de gran tamaño, se optó por un valor alto del coeficiente de Manning.

Los tramos de las quebradas Olivares y El Guamo fueron simulados bajo el software IBER. Por lo tanto, para estos casos se realizaron las respectivas actividades de preprocesamiento de la información que requiere el modelo, determinándose así: la digitalización de los mapas de uso del suelo asociado a un coeficiente de rugosidad, la creación y corrección del modelo digital del terreno de cada uno de los tramos formada por la malla no estructurada, la determinación de las obras hidráulicas y la definición de las condiciones de contorno.

Además, para todos los modelos se determinaron las secciones críticas sobre las quebradas, teniendo en cuenta viviendas, infraestructura y vías cercanas al cauce que presenten un grado de riesgo elevado. En este sentido, se evaluaron sobre estas secciones el caudal y nivel de lámina de agua para los diferentes eventos, estableciendo además los niveles y caudales que producen inundación, y los niveles de desbordamiento del cauce sin afectación a la infraestructura.

Finalmente, como se puede inferir de la descripción anterior, la determinación de los umbrales de precipitación se realizó mediante la metodología basada en modelos hidrológicos. Por lo tanto, se realizó la correlación entre la precipitación y los niveles de agua sobre las secciones más desfavorable. Es importante resaltar que el cálculo final del umbral fue obtenido mediante la lluvia acumulada móvil de 10 minutos durante el evento. Lo anterior, debido a los resultados obtenidos en el tiempo del tránsito del pico de la creciente, puesto que presentan valores bajos y como consecuencia los tiempos de reacción para la emisión de alarmas son menores a media hora.

3 DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA EL GUAMO.

3.1 Procesamiento cartográfico:

Se realizó un breve análisis de las características de la cuenca (mapa de pendientes, mapa de direcciones de flujo y mapa de flujos acumulados) en coordenadas con Datum Bogotá_Zone y en base al modelo de elevación digital del terreno de la NASA (con una resolución de 30m), lo anterior, debido a que el levantamiento LIDAR que se realizó sobre la ciudad de Manizales no cubre en totalidad el área de estudio, sino únicamente la parte media y baja de la cuenca, es decir, la zona urbana.

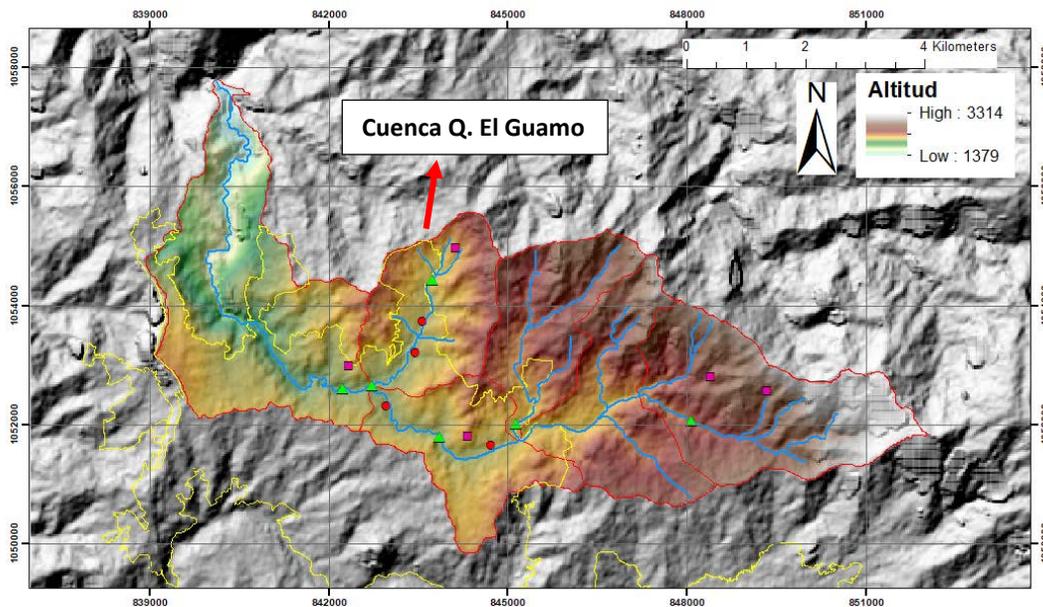


Figura 12. Mapa Cuenca quebrada olivares y el Guamo.

Fuente:propia

Para establecer la red de drenaje de la cuenca, se procedió a realizar el cálculo de direcciones de flujo basado en la convención de Jenson and Domingue (1988), el cual usa el mapa de elevación digital para calcular la salida el flujo en cada una de las celdas. A partir de la *Figura 12*, se puede observar que la red de drenaje presenta un patrón dendrítico, como consecuencia de sus procesos erosivos en torno a los efectos combinados del clima y la geología [15].

En la *Figura 12*, se muestra la localización de la cuenca quebrada El Guamo (Subcuenca de la quebrada Olivares). De manera general, la cuenca El Guamo tiene un área de 5.06 Km², Un perímetro de 11.60 Km, y altitudes que van de los 2044 m.s.n.m en su desembocadura (sobre la Quebrada Olivares) hasta los 2446 m.s.n.m en la parte alta de la cuenca (Antenas Alto del Guamo). La cuenca El Guamo está localizada entre las coordenadas 842000 m al oeste, 845000 al este, 1052000 m al sur y 1056000 al norte, bajo el sistema de coordenadas proyectadas Colombia_Bogota_Zone con DATUM en Bogotá. La línea de color amarillo representa el perímetro urbano y se observa que los asentamientos urbanos están concentrados sobre la parte media y en dirección noroeste.

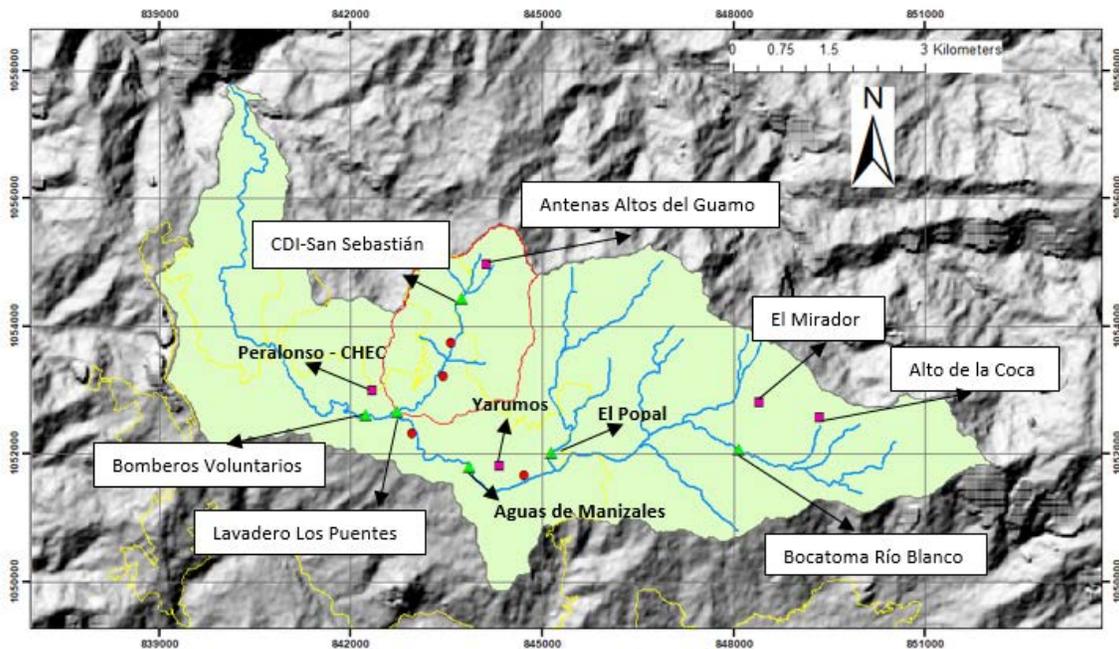


Figura 13. Ubicación estaciones hidrometeorológicas pertenecientes a la Red SAT de Manizales para las cuencas Olivares y El Guamo.

En la *Figura 13*, se muestran las estaciones ubicadas sobre la quebrada Olivares y el Guamo. Las estaciones de alarma sonora están representadas con círculo rojo, las estaciones meteorológicas

con un cuadrado violeta y las hidrométricas con un triángulo verde. Para la quebrada el Guamo se tienen dos estaciones hidrométricas, una sobre la parte alta de cuenca, y otra cercana a la desembocadura en la quebrada Olivares. Así mismo, se tienen dos estaciones meteorológicas con la misma distribución.

En la asdfasdf, se puede observar el cambio sobre la parte alta de la cuenca, presentándose fuertes pendientes, lo que permite inferir que en el inicio de los drenajes se presentan grandes velocidades del flujo y por lo tanto capacidad de arrastre de sedimentos. También las fuertes pendientes aumentan la probabilidad de deslizamientos de los márgenes hacia el cauce, con la consecuencia de producir obstrucciones sobre la quebrada y eventuales flujos de lodos. Además, para el caso de la quebrada Olivares se evidencia altas pendientes sobre los márgenes del cauce en la parte baja de la cuenca, producto del encajonamiento del cauce.

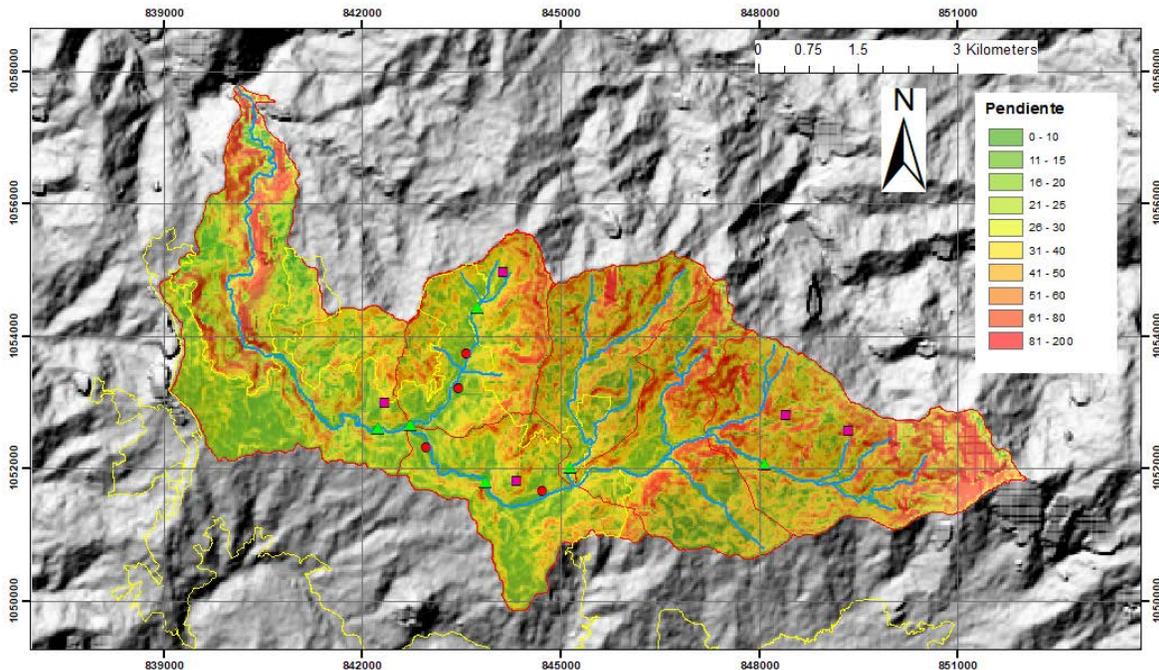


Figura 14. Mapa de pendientes cuencas El Guamo y Olivares.

La Figura 14 muestra el mapa de pendientes de las cuencas en grados, se puede observar el cambio sobre la parte alta de la cuenca, presentándose fuertes pendientes, lo que permite inferir que en el inicio de los drenajes se presentan grandes velocidades del flujo y por lo tanto capacidad de arrastre de sedimentos. También las fuertes pendientes aumentan la probabilidad de deslizamientos de los márgenes hacia el cauce, con la consecuencia de producir obstrucciones sobre la quebrada y eventuales flujos de lodos. Además, para el caso de la quebrada Olivares se evidencia altas

pendientes sobre los márgenes del cauce en la parte baja de la cuenca, producto del encajonamiento del cauce sobre esa zona.

3.2 Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada El Guamo:

A continuación, se muestran los resultados fisiomorfométricos de la cuenca Quebrada El Guamo.

Tabla 2. Resumen de los parámetros fisiomorfométricos de la cuenca Quebrada El Guamo.

Parámetro	Unidad	Valor
Área cuenca	Km ²	5.06
Perímetro	Km	11.60
Cota máxima de la cuenca	m.s.n.m	2446.00
Cota de salida	m.s.n.m	2044.00
X centroide cuenca	m	843725.10
Y centroide cuenca	m	1053972.60
Z centroide cuenca	m.s.n.m	2245.00
DA (cota max – cota min)	m	402.00
Índice de Compacidad o de GRAVELIUS	Un	1.45
Factor de forma adimensional de HORTON	Un	0.44
Altura con mayor frecuencia	m	2154.90
Altura promedio	m	2244.74
Pendiente media de la cuenca	%	29.50
Longitud Cauce	Km	3.09
Cota mínima Cauce	m.s.n.m	2044.00
Cota máxima cauce	m.s.n.m	2164.50
Pendiente media del cauce	%	3.91

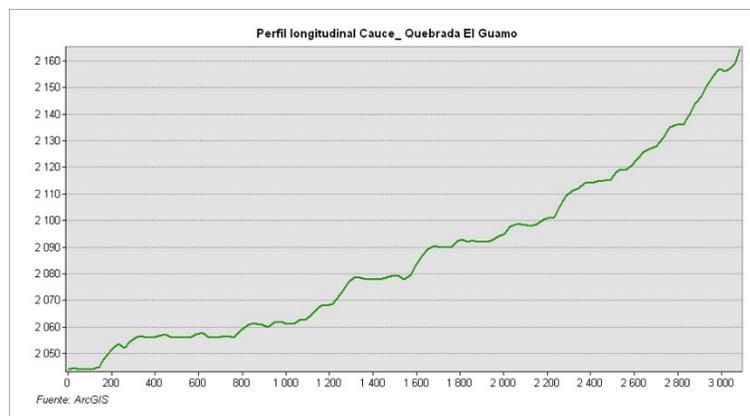


Figura 15. Perfil longitudinal del cauce principal Quebrada el Guamo.

De los resultados obtenidos a partir del perfil de cauce principal (*Figura 15*) se observa una pendiente moderada entre las abscisas 250m y 1200m, a partir de este punto la pendiente empieza a incrementar a medida que se acerca a la parte alta de la cuenca, presentando un valor promedio del 4%. Sin embargo, en algunos puntos intermedios, existen cambios abruptos de pendiente que son de interés en el comportamiento del flujo. En cuanto a los resultados obtenidos en la *Tabla 2*. Se encontró que el índice de compacidad presenta un valor aceptable y cercano a la unidad, debido a la forma cuasi circular de la cuenca. De forma general, el área de la cuenca es pequeña y la pendiente de la cuenca promedio es alta, por lo tanto, de acuerdo a estas características se puede inferir que existe una alta probabilidad para la generación de flujos torrenciales, típicos de cuencas de alta montaña.

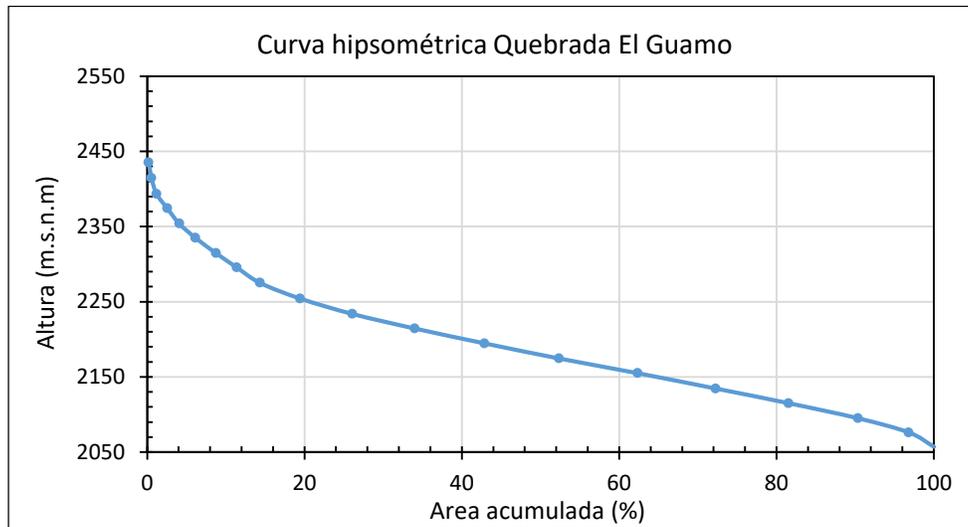


Figura 16. Curva hipsométrica Quebrada El Guamo.

De la curva hipsométrica de la cuenca quebrada El Guamo (*Figura 16*) que generalmente se asocia a la edad de los ríos, se puede decir que debido a su forma característica se trata de una corriente madura, asociada principalmente a cuencas con procesos de sedimentación importantes. Lo anterior explica la diferencia importante que hay entre los valores de la pendiente media del cauce principal y la pendiente media de la cuenca, además, los procesos de sedimentación del cauce se pueden observar específicamente en el tramo canalizado de la quebrada.

Finalmente se calculó el tiempo de concentración de la cuenca El Guamo, con la aplicación de varias fórmulas empíricas que han propuesto distintos autores, de las cuales algunas se eliminaron por presentar resultados que no tienen sentido físico (por ejemplo, resultados de segundos o de más de 8 horas). Y se optó por trabajar con 9 fórmulas, de las cuales el resultado final para el tiempo de

concentración se obtuvo sacando un promedio. En general el tiempo de concentración de la cuenca es pequeño (aproximadamente una hora), y permiten inferir que la respuesta de la cuenca es rápida frente a eventos de precipitación.

Tabla 3. Cálculo tiempo de concentración para la quebrada El Guamo.

Método	tc (min)	Tc (Horas)
Bransby-Williams	83.09	1.38
FAA Federal Aviation Agency	68.85	1.15
Giandotti	91.34	1.52
Kerby-Hathaway	34.38	0.57
Kirpich	36.38	0.61
Passini	85.42	1.42
Pilgrim y McDermott	84.44	1.41
Témez	86.35	1.44
Ventura-Heras	46.80	0.78
	68.56	1.14

3.3 Tormentas de diseño para la cuenca quebrada El Guamo.

Las tormentas de diseño se calcularon para los periodos de retorno de 2.33 años, 15 años, 40 años y 100 años. Además, a cada uno de estos periodos de retorno se le aplicaron 3 distribuciones temporales de lluvia. Se escogió el patrón de distribución de lluvia (correspondiente a la media y al percentil del 5%) de la estación Yarumal debido a su cercanía y la media de las estaciones de la ciudad de Manizales, para una duración de evento igual al tiempo de concentración de la cuenca. Por lo tanto, los patrones de distribución de la lluvia serán los siguientes:

Distribución 1 = el promedio de distribuciones de lluvia sobre la estación Yarumal.

Distribución 2 = el percentil 5% de distribuciones de lluvia sobre la estación Yarumal.

Distribución 3 = el promedio de las distribuciones de lluvia de las estaciones de la ciudad de Manizales.

A continuación, se muestran las curvas con el patrón de distribución de la lluvia para cada una de las estaciones.

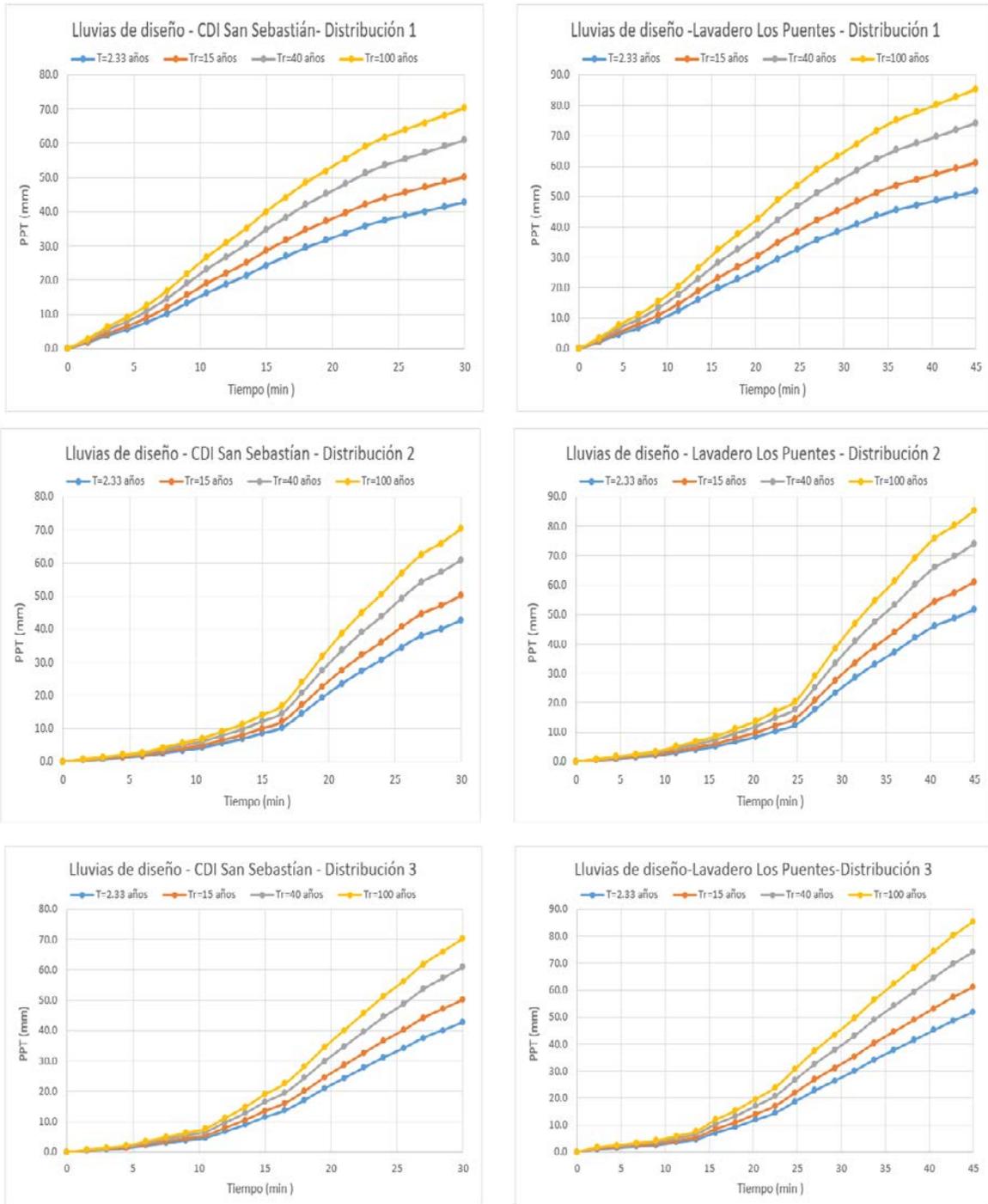


Figura 17. Curvas de distribución para las estaciones hidrométricas CDI-San Sebastián y Lavadero Los Puentes.

A partir de las curvas de distribución de precipitación se construyeron los hietogramas de diseño teniendo en cuenta el tiempo de concentración para estación como duración del evento. A continuación, se muestran ejemplos de las tormentas de diseño.

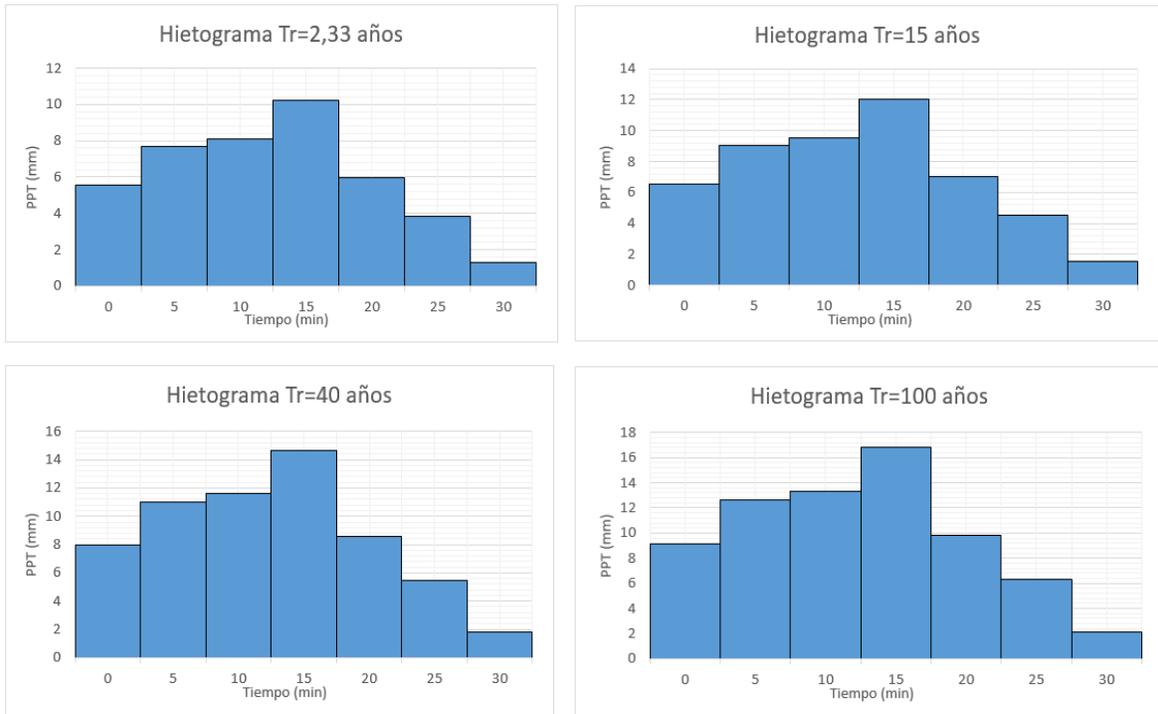


Figura 18. Hietogramas de diseño para la estación CDI-San Sebastián usando la distribución de lluvia 1.

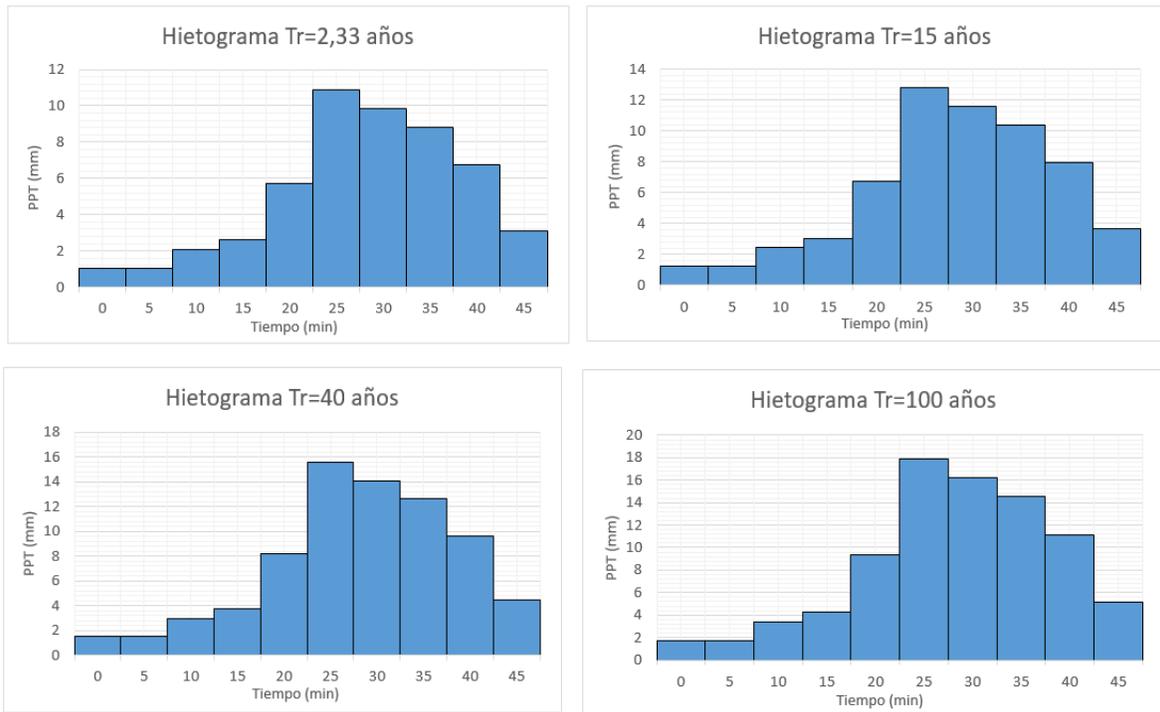


Figura 19. Hietogramas de diseño para la estación Lavadero Los Puentes usando la distribución de lluvia 3.

3.4 Modelación Hidrológica cuenca quebrada El Guamo.

Una vez obtenido las tormentas de diseño para la cuenca de la quebrada el Guamo, se procedió a realizar la modelación hidrológica con el fin de determinar el caudal generado en las estaciones CDI-San Sebastián (parte alta de la cuenca) y Lavadero Los Puentes (parte baja de cuenca, cercana a la desembocadura de la quebrada El Guamo a la quebrada Olivares) para los diferentes periodos de retorno de cada una de las distribuciones temporales de la precipitación.

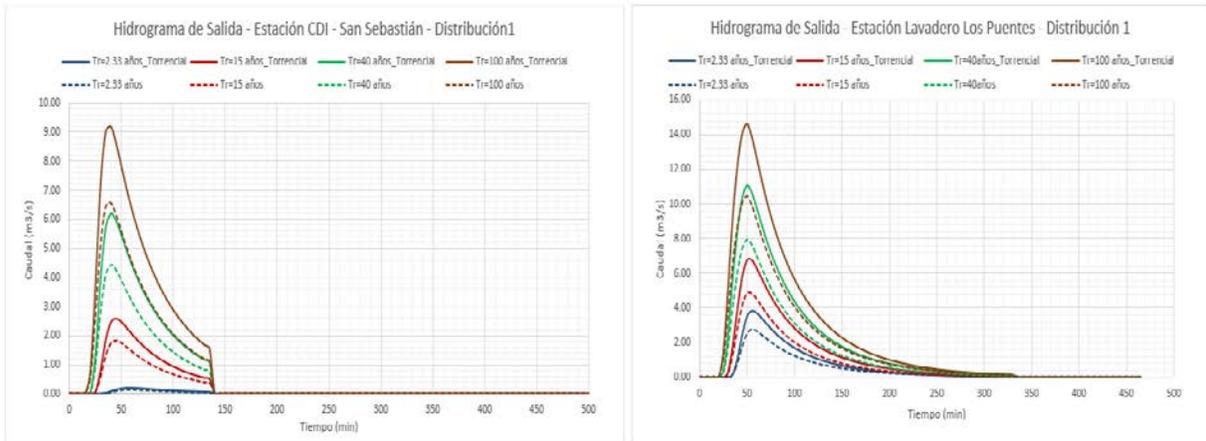
Las simulaciones se realizaron usando el modelo hidrológico TETIS, el cual es un modelo distribuido espacialmente y de tipo conceptual basado físicamente. La información requerida por el modelo consiste en: Modelo de elevación digital, mapa de pendientes, mapa de direcciones de flujo, mapa de celdas acumuladas, mapa de almacenamiento estático, capacidad de infiltración de los suelos, capacidad de percolación, contenido óptimo de humedad en el suelo, mapa de usos de suelos, y conductividad hidráulica. Es importante mencionar que en trabajos anteriores realizados por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, el modelo TETIS fue implementado para la totalidad de la cuenca del río Chinchiná con su respectiva calibración y validación. En este sentido, la modelación hidrológica consistió en la utilización de este modelo para la simulación de los eventos de precipitación de interés anteriormente calculados.

A continuación se muestran los hidrogramas de salida del modelo TETIS para la estación CDI – San Sebastián y Lavadero Los Puentes, además los resultados obtenidos fueron afectados con un incremento del 40% con el fin de representar los flujos hiperconcentrados (alto transporte de sedimentos, rocas y troncos) característicos de las avenidas repentinas que ocurren sobre la quebrada.

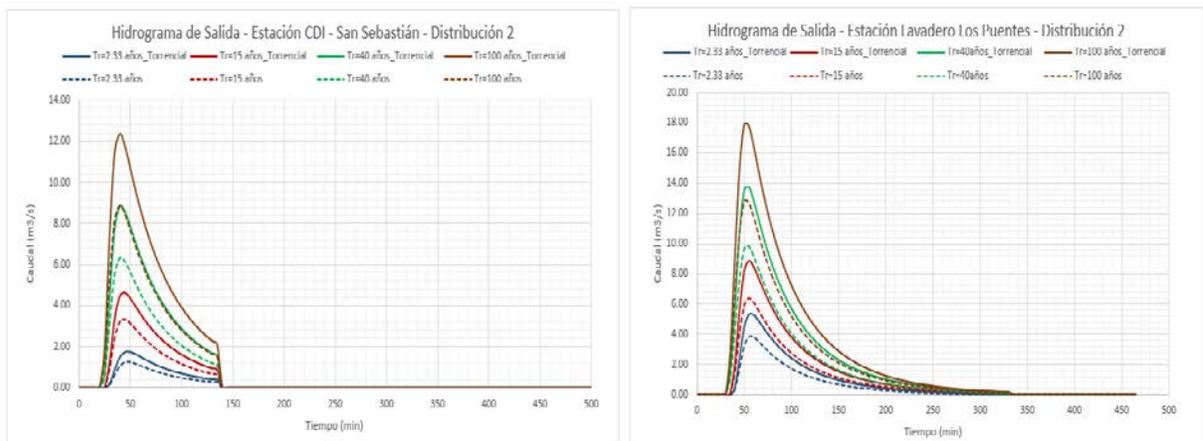
De los resultados obtenidos se puede observar que la respuesta de la quebrada es sensible a las variaciones en los cambios del patrón de precipitación, especialmente para la distribución 2, es decir, para el percentil del 5% de lluvias de la estación Yarumal, mostrando los mayores resultados de caudal pico. Esta distribución de precipitación se caracteriza por presentar las intensidades de lluvias de valores más altos sobre el final del evento, a diferencia de la distribución 1, en donde el evento inicia con una intensidad considerable y el pico de precipitación se produce aproximadamente a la mitad del evento.

En las siguientes figuras se muestran los hidrogramas de salidas obtenidos en el modelo TETIS (línea continua) y los hidrogramas para avenidas torrenciales (línea punteada).

A)



B)



C)

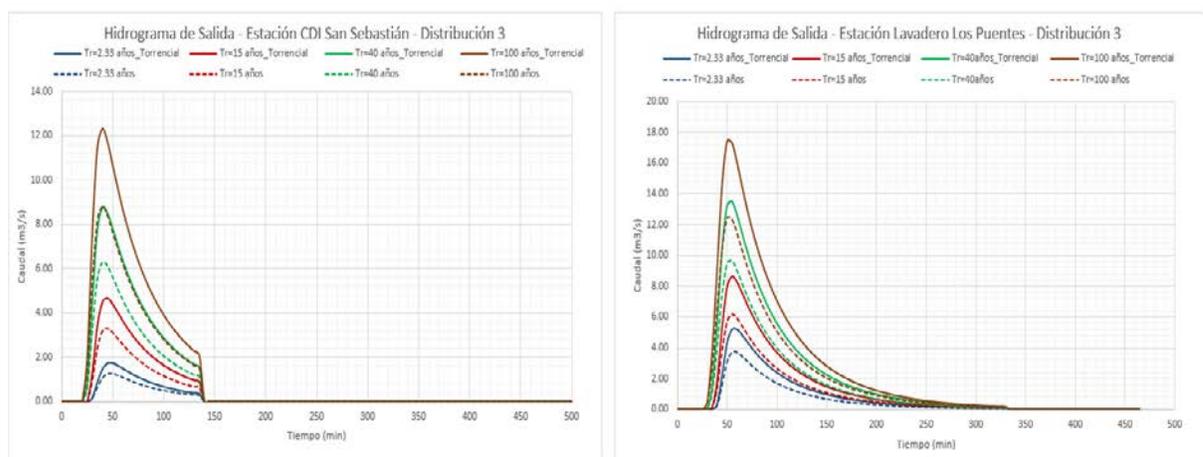


Figura 20. Hidrogramas de salida del modelo TETIS para las estaciones CDI – San Sebastián y Lavadero Los Puentes. A) Distribución 1. B) Distribución 2. C) Distribución 3.

De la modelación hidrológica anteriormente realizada se concluyó que la cuenca es sensible a las variaciones en los cambios del patrón de precipitación, sin embargo no se consideró el cambio en las condiciones iniciales de humedad, por lo tanto se procedió a realizar las simulaciones correspondientes teniendo en cuenta tres escenarios de humedad antecedente; AMC I = condición de humedad antecedente para un periodo seco, AMC II = condición de humedad antecedente para un periodo normal y AMC III = condición de humedad antecedente para un periodo húmedo. Además, para cada uno de estos escenarios se simuló nuevamente las tres distribuciones de lluvia para los diferentes periodos de retorno, teniendo finalmente para cada estación 36 hidrogramas de salida. A continuación, se muestran los valores de los parámetros adoptados en TETIS para definir los estados iniciales en cada una de las simulaciones y los resultados obtenidos en el modelo TETIS:

Tabla 4. Parámetros Estado Inicial TETIS para cada condición de humedad Antecedente.

Parámetro	AMC I	AMC II	AMC III
H1- Almacenamiento estático	50	80	100
H2- Agua en superficie	0	0	0
H3- Almacenamiento gravitacional	10	10	10
H4- Estado inicial del acuífero	50	50	50
H5- Caudal en el cauce	20	50	100
H6- Intercepción por la vegetación	0	0	0

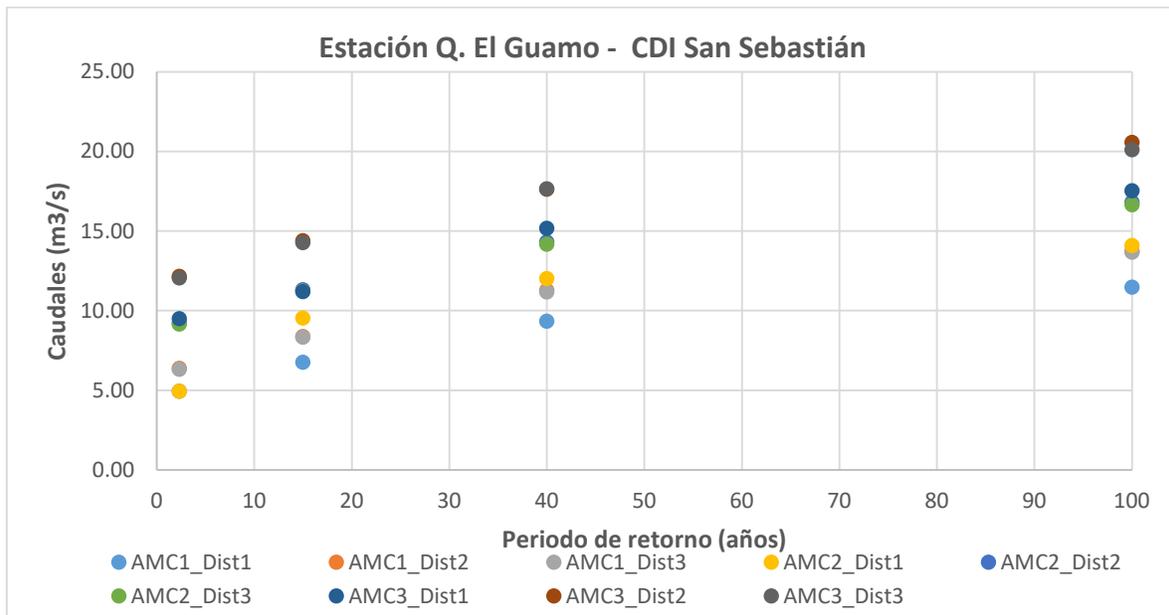


Figura 21. Resultados de caudales máximos obtenidos con TETIS para los diferentes escenarios de distribución del patrón de lluvias y humedad antecedente.

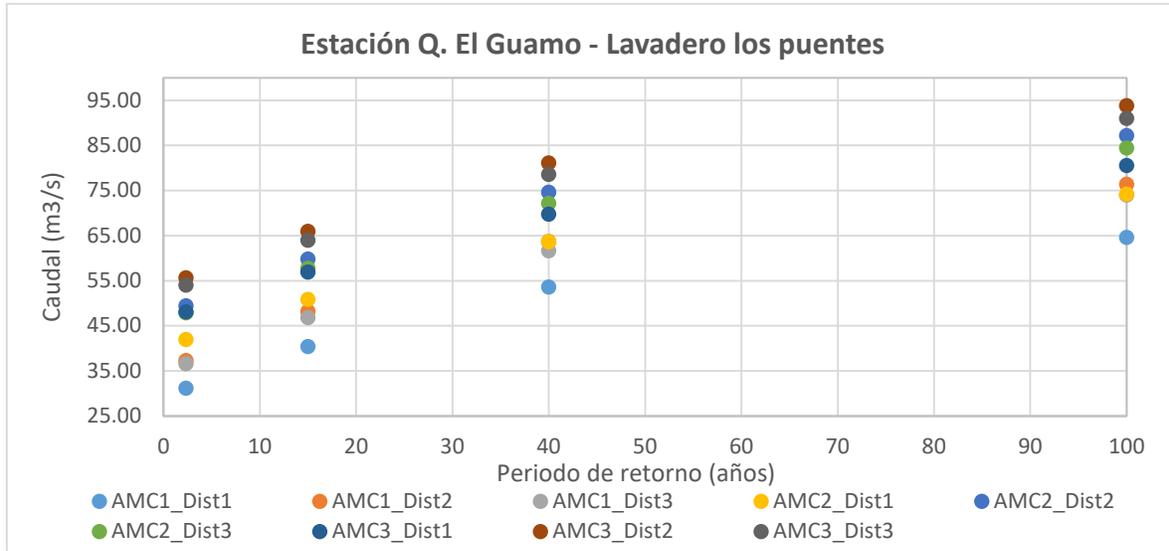


Figura 22. Resultados de caudales máximos obtenidos con TETIS para los diferentes escenarios de distribución del patrón de lluvias y humedad antecedente.

En las Figura 21 y Figura 22 se muestran los resultados obtenidos en el modelo TETIS, se evidencia que la cuenca además de ser sensible a los cambios del patrón de precipitación, también presenta variabilidad en su respuesta de acuerdo a las condiciones iniciales de humedad anteriores al evento. Esta situación se explica debido a que la capacidad de infiltración está directamente afectada por el contenido de humedad del suelo al momento de presentarse un evento de precipitación, por lo tanto, la escorrentía también se verá afectada y como es de esperarse en condiciones de suelo saturado se presentarán los mayores picos de caudal.

Además, al realizar las simulaciones bajo diferentes escenarios de AMC y distribuciones temporales de lluvia se encontró que para cada periodo de retorno existe un rango de respuesta de la cuenca. Es decir, que para una misma cantidad de precipitación acumulada los caudales picos varían en función de la forma del hietograma y las condiciones iniciales de la cuenca. Para el caso de las simulaciones realizadas se observa que la condición más desfavorable se obtiene para la distribución 2 (el percentil 5% de distribuciones de lluvia sobre la estación Yarumal) y para el AMC III (período húmedo), y los valores promedios se obtienen para la distribución 1 (el promedio de distribuciones de lluvia sobre la estación Yarumal) y el AMC II (periodo normal).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la modelación hidrológica se observa que la diferencia entre los caudales picos obtenidos para la estación CDI-San Sebastián y Lavadero Los Puentes es significativa, por lo que realizar la modelación hidráulica teniendo en cuenta únicamente los hidrogramas de estas estaciones no representaría adecuadamente las condiciones reales de

escorrentía sobre la cuenca. Por lo anterior, se decidió dividir el canal en 6 tramos con el fin de representar el aumento gradual en la escorrentía a medida que el área aferente de la cuenca aumenta. En la Figura 23 se muestran los tramos seleccionados bajo los criterios establecidos: 1) cada uno los tramos no supera una distancia de 550 metros, y 2) para el inicio o final de cada tramo no existan estructuras aguas arriba o aguas debajo que afecten las condiciones y comportamiento hidráulico.

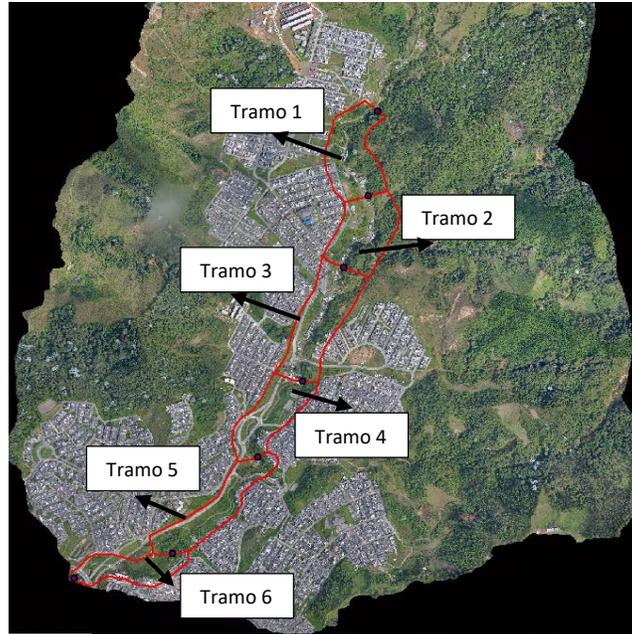


Figura 23. Tramos seleccionados para modelación Hidráulica en IBER.

Por lo anterior, Los hidrogramas de entrada para los tramos fueron calculados teniendo en cuenta el área de drenaje hasta el punto de interés, de esta manera, se observa un incremento gradual en el caudal pico para el inicio de cada tramo. Además, los hidrogramas de diseño se eligieron en base a la condición más crítica, representada por un AMC III (condición de humedad antecedente para estado húmedo, es decir suelos saturados), y para el patrón de distribución de lluvia 2. A continuación, en la Figura 24, se muestra el ajuste potencial realizado para los caudales picos en función del área de drenaje acumulada, adoptados para las diferentes simulaciones en IBER, correspondientes a los periodos de retorno de 2.33, 15, 40 y 100 años.

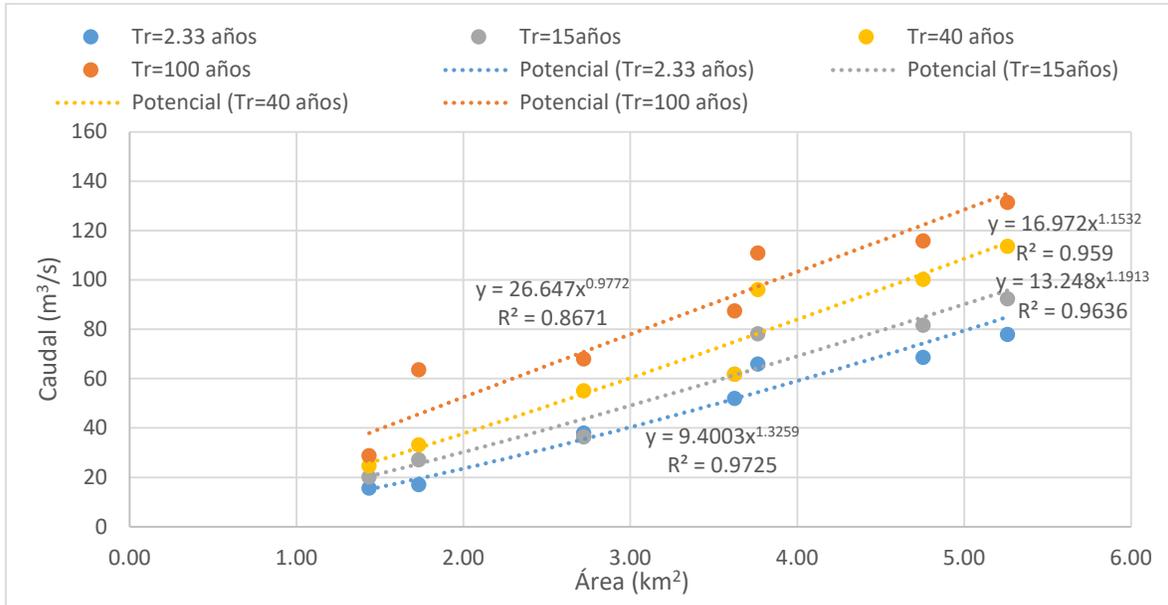


Figura 24. Curvas de ajuste para el caudal pico en función del área acumulada de la cuenca.

3.5 Pre-proceso modelación hidráulica cuenca quebrada El Guamo.

La modelación hidráulica de la quebrada El Guamo se realizó a través del software IBER, el cual se caracteriza por ser un modelo matemático bidimensional (resolución de ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones) para la simulación de cauces en lámina libre. Se realizaron las siguientes actividades correspondientes al aprestamiento de la información requerida por el modelo.

para cada tramo se procedió a digitalizar el uso de suelos con el fin de determinar el coeficiente de rugosidad asociado a cada material. En total se usaron 7 tipos de materiales correspondientes a: material aluvial rocoso, bosques, pastos, arbustos, vía terciaria, vía pavimentada e infraestructura. Los valores asignados para cada uno de los materiales corresponden inicialmente a una estimación realizada en base a valores teóricos seleccionados de tablas, sin embargo, estos valores corresponden a un parámetro de calibración del modelo que deben ajustarse en base los resultados obtenidos. A continuación, se resumen los valores inicialmente adoptados:

Río=0.045	Bosques=0.12	Arbustos=0.06	Infraestructura=0.018
Pastos= 0.04	Vía terciaria= 0.03	Vía Pavimentada=0.016	

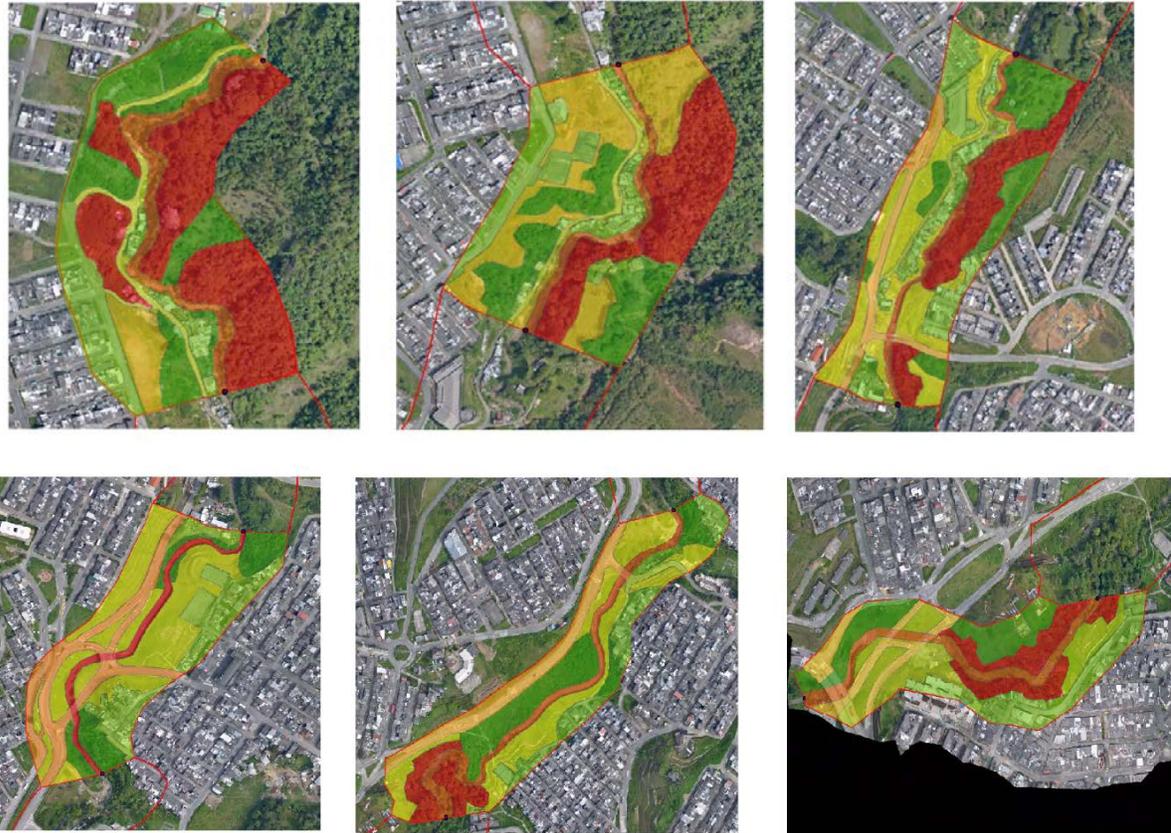
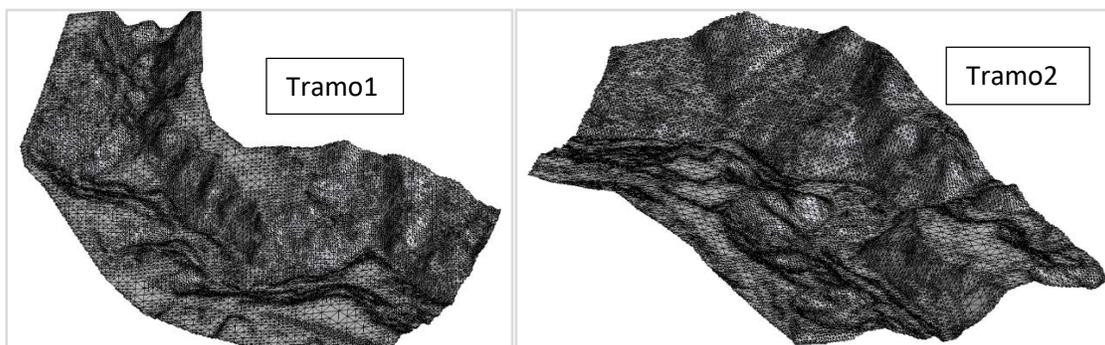


Figura 25. Mapas de uso de suelo para los tramos de la quebrada El Guamo.

Además, para cada tramo se procedió a crear el modelo de mallado no estructural de volúmenes finitos con el fin de representar cada uno de los modelos de elevación digital. Los parámetros usados para la creación de la malla fueron: la tolerancia máxima de interpolación en la triangulación de elevación para dos puntos será de 0.05 m, el lado máximo de cada elemento no superará los 10.0m y el lado mínimo será de 1.0 m (nota: el lado mínimo de cada elemento de la malla está condicionado por la resolución del levamiento LIDAR para la ciudad de Manizales).



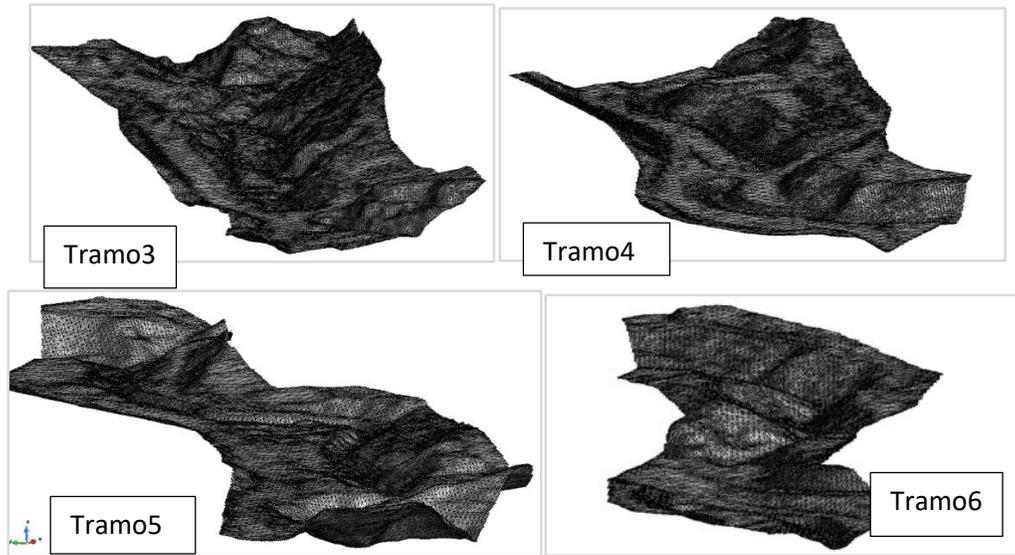


Figura 26. Mallas de volúmenes finitos para cada tramo en IBER de la quebrada El Guamo.

Finalmente, se identificaron puntos de interés correspondientes a estructuras hidráulicas y zonas del ortofotomapa que requerían una inspección visual para mejorar el detalle del modelo hidráulico. Por lo anterior, se realizó una visita de campo el día 15 de noviembre de 2017. En esta visita se obtuvieron las dimensiones de 5 estructuras hidráulicas, correspondientes a 3 box culverts y 2 puentes. Además, durante el recorrido se identificaron condiciones problemáticas sobre el canal. A continuación, se resumen los hallazgos y conclusiones de la visita.

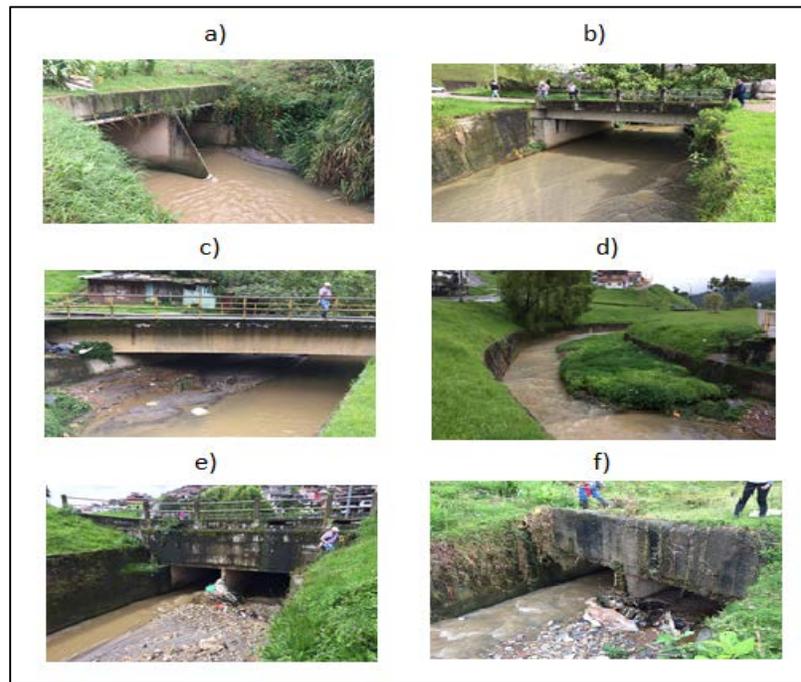


Figura 27. Registro fotográfico, visita de campo Quebrada El Guamo 15/11/2017.

En la Figura 27 se muestra el estado actual de las estructuras hidráulicas sobre la quebrada El Guamo. En general se pudo observar una acumulación de sedimentos y basuras en las entradas, que reducen su capacidad hidráulica y afectan el comportamiento bajo las cuales fueron diseñadas. Por lo anterior, se genera un incremento en la probabilidad de desbordamientos e inundaciones frente a eventos fuertes de precipitación

Tabla 5. Resumen dimensiones estructuras hidráulicas.

Estructura	Ubicación	Altura (m)	Ancho (m)
a)Box culvert, doble celda	Avenida El Guamo, cercano a la desembocadura.	3.00 c/u	3.90 c/u
b)Puente	Cra 8A- Entrada B. Comuneros	3.25	9.00
c)Puente	Glorieta Calle 49	2.40	10.00
e)Box culvert, doble celda	Cra 7B-Entrada B. Solferino.	3.00 c/u	2.20 c/u
f)Box culvert, doble celda	Cra6- Entrada B. Samaria	3.00 c/u	2.00 c/u

En la Tabla 5, se resumen los resultados obtenidos en la visita de campo. Las dimensiones obtenidas de las estructuras hidráulicas tienen como finalidad refinar la información del modelo de elevación digital del terreno obtenido de la imagen LIDAR de Manizales en cada uno de los tramos. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la visita de campo:

- La visita de campo sobre la quebrada El Guamo corresponde a una inspección general para la obtención de algunos parámetros hidráulicos en busca de mejorar la información de la modelación hidráulica que se está desarrollando, y no constituyen un diagnóstico detallado de las estructuras presentes, por lo tanto, se recomienda realizar un diagnóstico riguroso de las estructuras y condiciones actuales de la quebrada el Guamo que permitan desarrollar un plan de acción adecuado para la misma.
- En general, se observa una alta acumulación de sedimentos, basura, escombros y ramas sobre las estructuras y la zona canalizada de la quebrada El Guamo. Esta acumulación de sedimentos representa una disminución de la capacidad hidráulica de las estructuras y por lo tanto un aumento de la probabilidad de desbordamiento e inundaciones frente a eventos de precipitación.

- Por lo anterior, se recomienda realizar una limpieza y remoción de los sedimentos sobre las estructuras y canal con el fin de mejorar su capacidad hidráulica y disminuir la probabilidad de desbordamiento. Además, se recomienda que el mantenimiento de las estructuras sea periódico, y en especial, se realicen con anterioridad a las temporadas de mayor de precipitación.

3.6 Modelación hidráulica quebrada El Guamo.

Como se indicó anteriormente en la Figura 23. la quebrada El Guamo fue dividida en 6 tramos para simular el incremento de la escorrentía a medida que aumenta el área de drenaje de la cuenca, además, el criterio para la división de estos tramos se basó en identificar, en la medida de lo posible, que las condiciones de frontera de cada uno de los tramos no influyan de manera significativa en el comportamiento hidráulico con zonas de interés o estructuras de control.

Utilizando el modelo hidráulico bidimensional IBER, se construyó para cada uno de los tramos: a) la topografía representada por una malla no estructurada de elementos finitos a partir del DEM en formato ASCII obtenido del LIDAR de Manizales con resolución 1.00m, así mismo, b) se ingresó al modelo los mapas de uso del suelo también en formato ASCII, c) se introdujo las dimensiones de las estructuras hidráulicas como box culverts y puentes a través del módulo de hidrodinámica con el que cuenta el software, y finalmente, d) se definieron las condiciones de contorno correspondiente a las entradas (hidrogramas) y salidas.

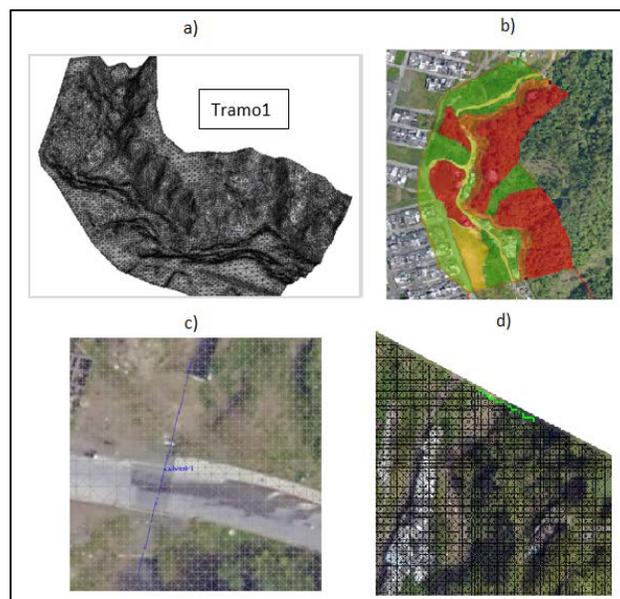


Figura 28. Proceso modelación hidráulica quebrada El Guamo.

Una vez determinado y definido el régimen de flujo para las condiciones de contorno, también se definió el tiempo máximo de simulación del problema con un valor promedio de 12000 segundos y un intervalo de resultados de 10 segundos. Así mismo, se optó por un esquema numérico de primer orden para la solución de las ecuaciones de Saint Venant. Por lo anterior, el tiempo promedio de simulación para cada uno de los tramos y cada hidrograma de entrada correspondiente a los diferentes periodos de retorno tardó entre 4:00 y 5:00 horas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones en IBER, en donde se indican los mapas de calados máximos alcanzado por la lámina de agua en cada tramo.

3.6.1 Resultados modelación hidráulica Tramo 1.

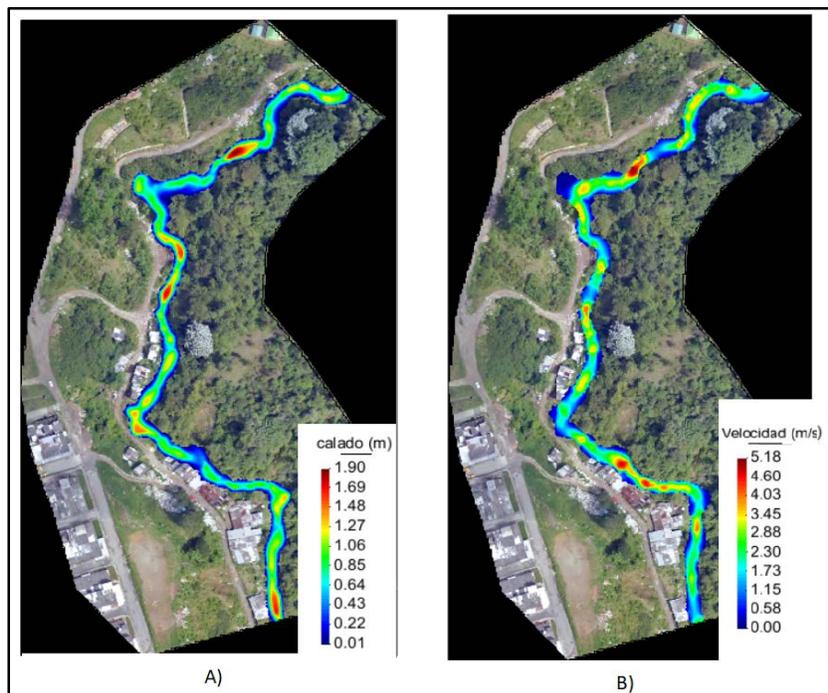


Figura 29. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para $T_r=2.33$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

En las *Figura 29, 30, 31 y 32*, se muestran los mapas de manchas de inundación obtenidos en el modelo IBER para el tramo 1 de la quebrada El Guamo, correspondientes a los periodos de retorno de 2.33, 15, 40 y 100 años respectivamente.

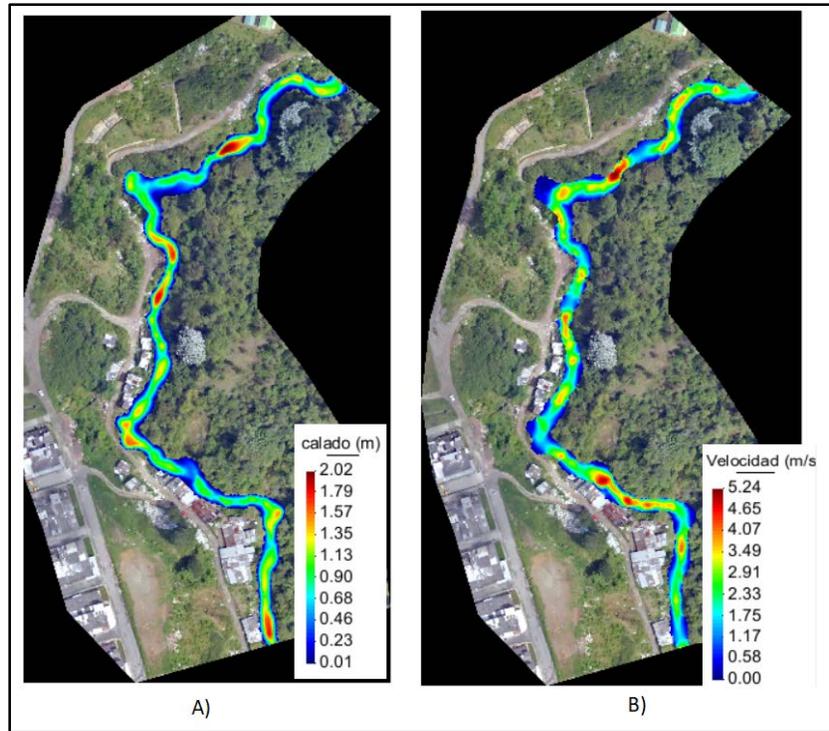


Figura 30. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para $Tr=15$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

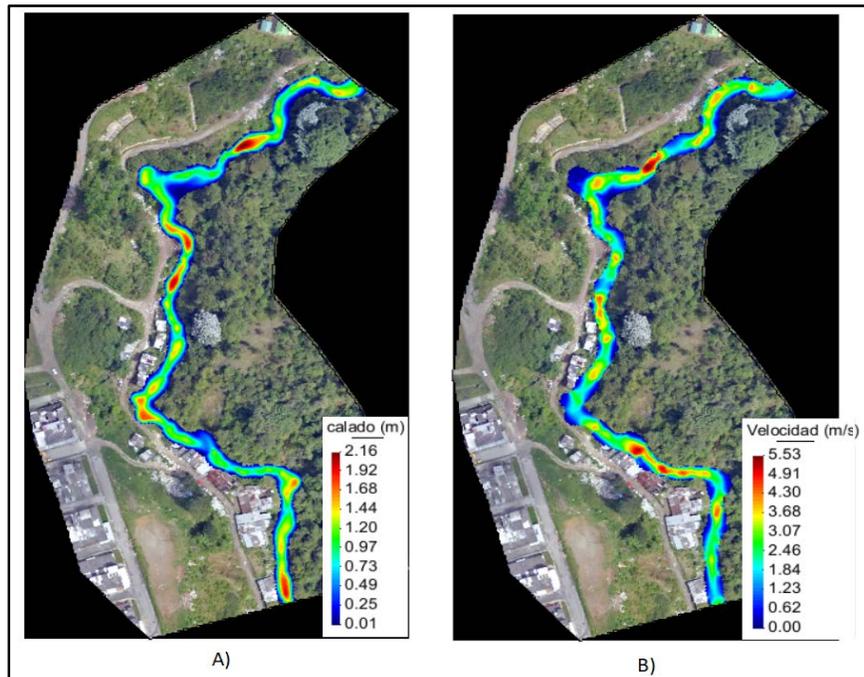


Figura 31. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para $Tr=40$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

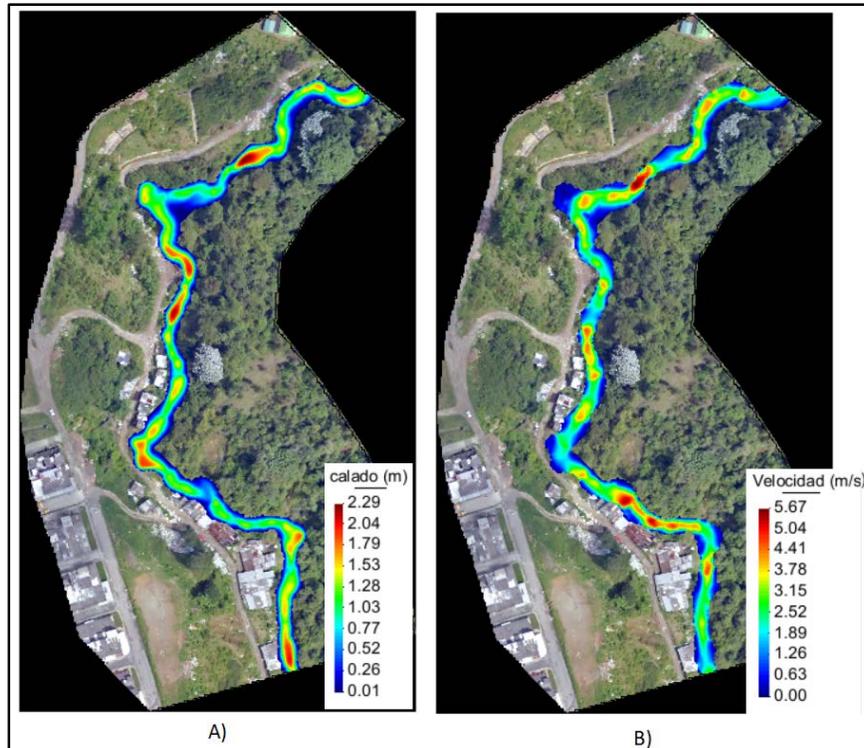


Figura 32. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para $Tr=100$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

Se observa que para un $Tr=2.33$ años, en el tramo no se presentan afectaciones a la infraestructura, alcanzando un calado máximo en algunas zonas de 1.90m y en promedio de 1.20m, debido en parte, que para este tramo la sección transversal de la quebrada se caracteriza por tener una forma de V, correspondiente a una clasificación aproximada de Rosgen A3, y por lo tanto, no permitiendo el desbordamiento del flujo. Para el $Tr=15$ años, se observa que los incrementos del calado se acercan considerablemente a zonas críticas y debido al incremento en la velocidad del flujo, se supone una mayor capacidad de erosión en las paredes del canal que afectan directamente a las casas cercanas ubicadas sobre las pequeñas zonas de inundación presentes (*floodplain pockets*). Para los $Tr=40$ y 100 años se observa que existe un meandro aproximadamente a unos 150m aguas abajo del inicio del tramo, que funciona como una zona de amortiguamiento de la creciente, permitiendo que esta zona de inundación evite un incremento de los niveles en las zonas donde se encuentran los caseríos. Sin embargo, se evidencia que los niveles del agua alcanzan la cota sobre las cuales se encuentran las primeras casas al final del tramo y adicionalmente las velocidades del flujo en esta zona incrementan la posibilidad de deslizamiento de las paredes del canal y por lo tanto una desestabilización de las viviendas.

3.6.2 Resultados modelación hidráulica Tramo 2.

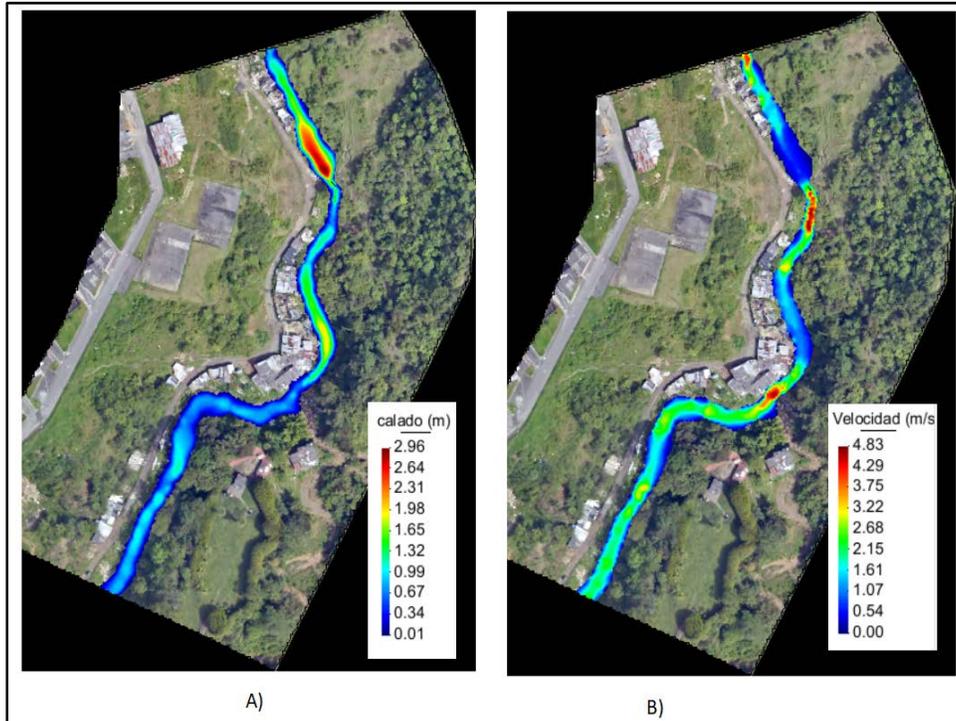


Figura 33. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para $T_r=2.33$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

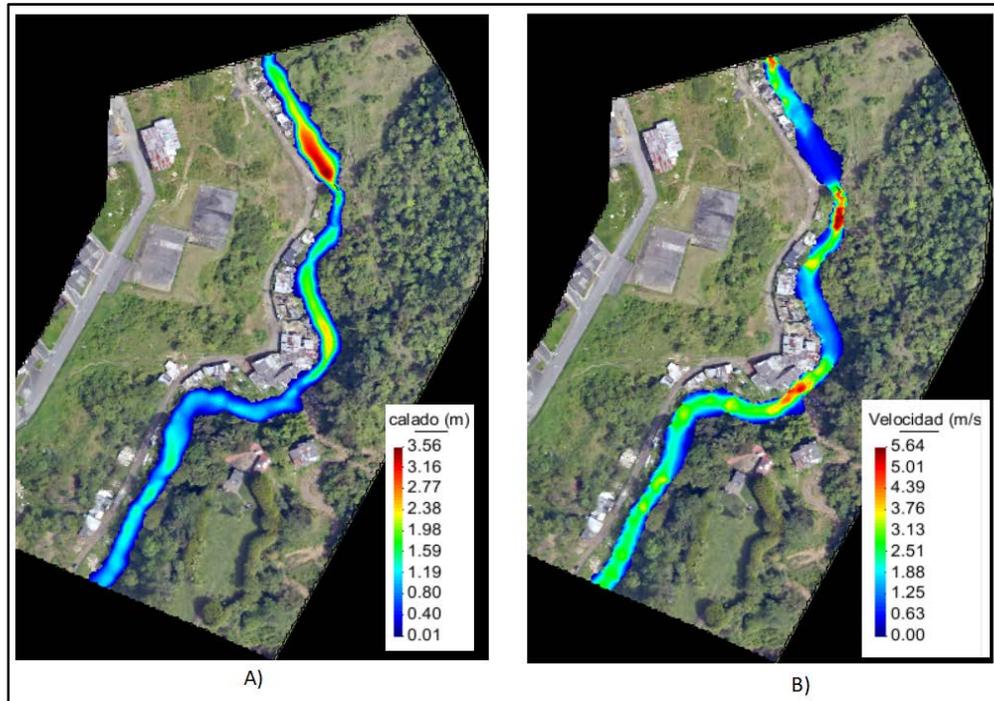


Figura 34. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para $T_r=15$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

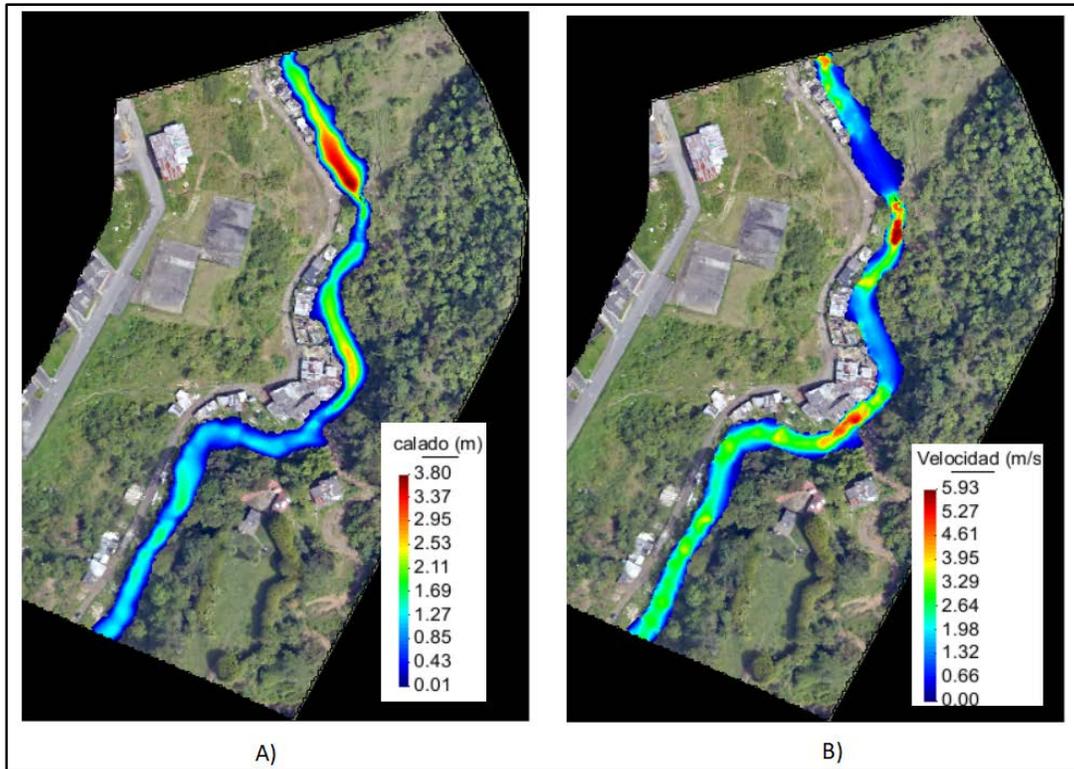


Figura 35. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para $T_r=40$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

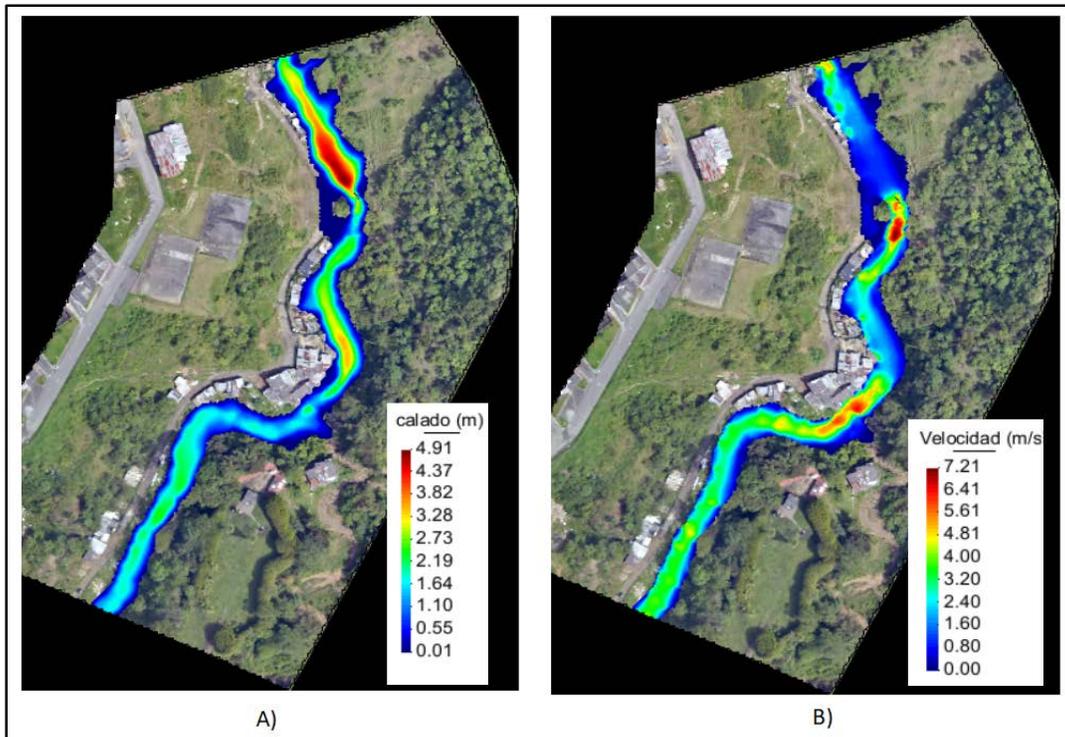


Figura 36. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para $T_r=100$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

Este tramo se caracteriza por presentar un estrechamiento importante a unos 100 m aguas abajo del inicio, lo que implica un represamiento del flujo y un incremento del calado hacia aguas arriba, afectando las casas ubicadas en este sector. En la Figura 33, se observa que dicho estrechamiento provoca un incremento en el calado de 2.96m para un $Tr=2.33$ años, además, se evidencia un incremento en la velocidad del flujo considerable justo después de este punto. Para la Figura 34 y Figura 35, se observa que existe una afectación a las estructuras ubicadas en la parte superior del punto de estrechamiento e incluso alcanzando el nivel del agua a la cota de la vía. En cuanto a la zona intermedia del tramo se observa que los niveles afectan directamente el caserío, lo que supone que los pobladores de esta zona se encuentran en un alto riesgo por inundación. Para el $Tr=100$ años, correspondiente a la Figura 36, se observa que existe una afectación total sobre las casas en el inicio del tramo, e incluso el agua llega a circular por la Antigua Vía El Guamo. Además, se observa una expansión generalizada en las manchas de inundación, y en especial, sobre la zona intermedia del tramo, donde se evidencia de igual manera una afectación severa de las viviendas. Respecto a la parte final de tramo no se evidencia que los niveles alcanzados representen un riesgo considerable, sin embargo, se observan unas altas velocidades de flujo sobre esa zona.

3.6.3 Resultados modelación hidráulica Tramo 3.

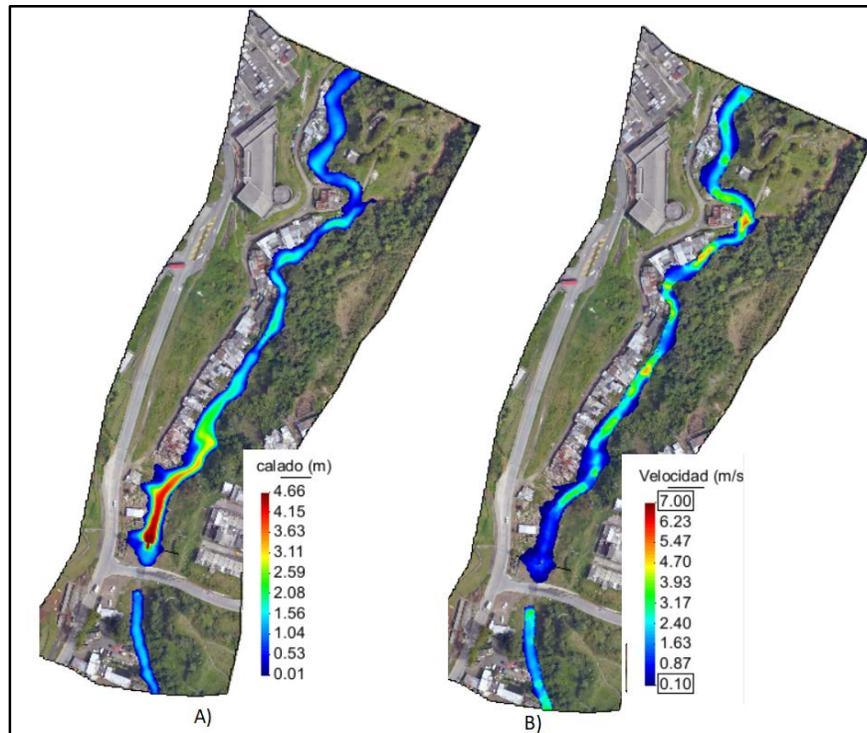


Figura 37. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para $Tr=2.33$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

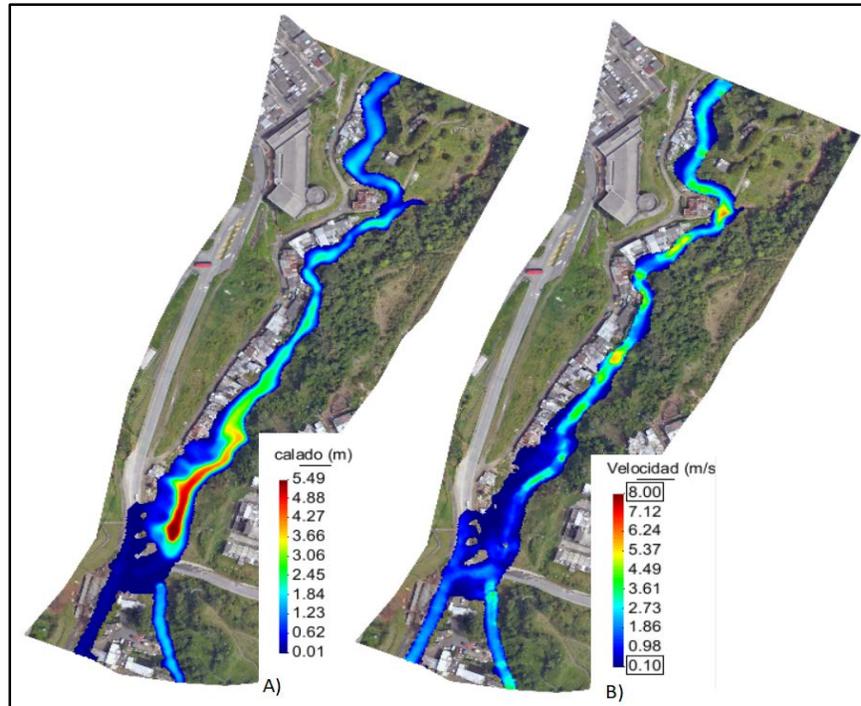


Figura 38. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para $Tr=15$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

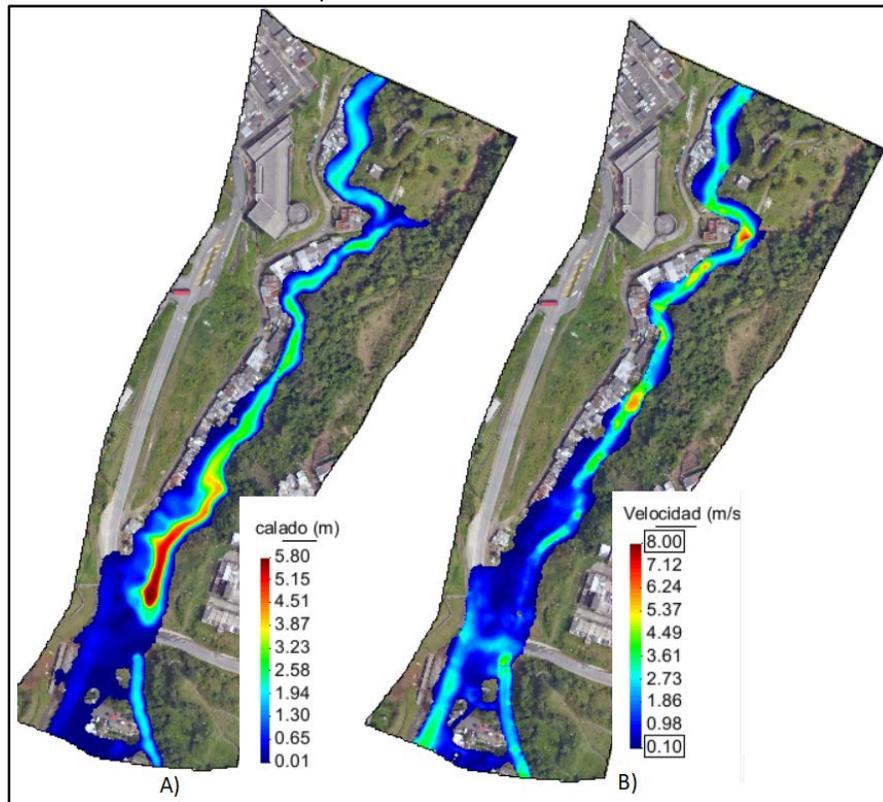


Figura 39. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para $Tr=40$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

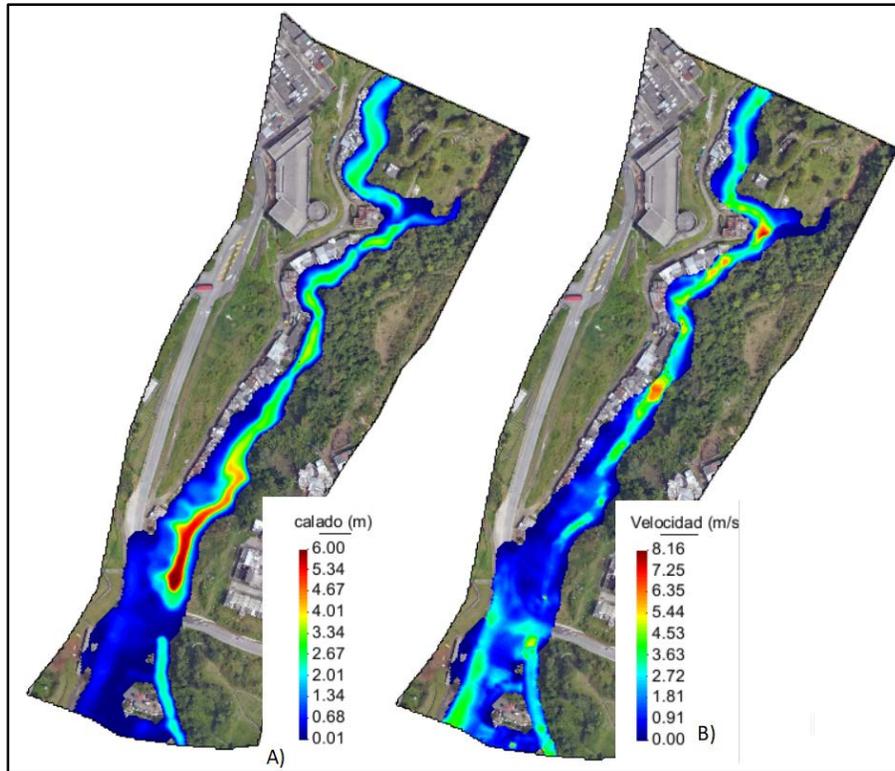


Figura 40. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para $Tr=100$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

El tramo 3 se caracteriza por la presencia continua de casas ubicadas sobre la llanura de inundación en la margen derecha de la quebrada, además, 80 m aguas arriba del final del tramo existe un box culvert de doble celda sobre la Carrera 6. En la Figura 37, correspondiente al $Tr=2.33$ años, se observa que para este evento el box culvert trabaja bajo la condición de entrada sumergida y hay un incremento del nivel en el encole de manera que sobrepasa la altura del canal, sin embargo la mancha de inundación no alcanza a afectar considerablemente a viviendas o vías. Por el contrario, para la Figura 38, Figura 39 y Figura 40, se observa que debido a la capacidad hidráulica insuficiente del box culvert, se produce un desbordamiento hacia la vía principal El Guamo, y que además el flujo circula por esta vía hacia aguas abajo como una nueva especie de canal. Aunque las manchas de inundación sean similares para los diferentes periodos de retorno, se puede observar que la diferencia principal radica en el valor de las velocidades con la que el flujo circula por la calle, esto supone una mayor capacidad de arrastre y por lo tanto un mayor peligro para los vehículos que transitan por la zona. Finalmente, cabe recordar que durante la visita de campo se observó una acumulación importante de sedimentos y basura sobre la estructura que incrementa la probabilidad de desbordamiento.

3.6.4 Resultados modelación hidráulica Tramo 4.

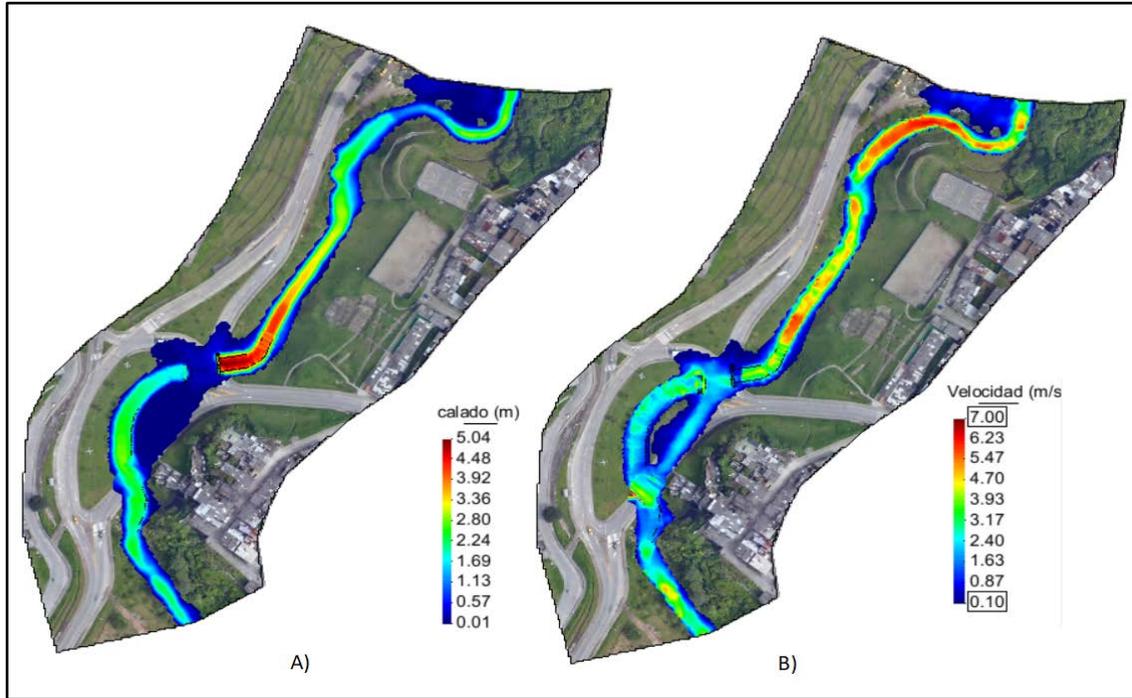


Figura 41. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para $Tr=2.33$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

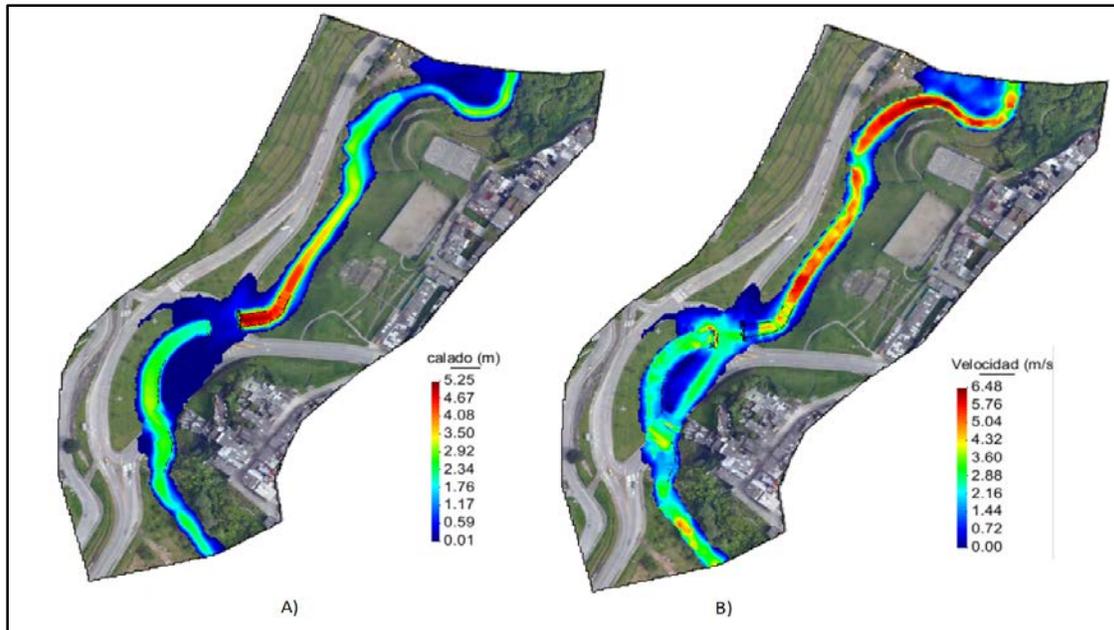


Figura 42. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para $Tr=15$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

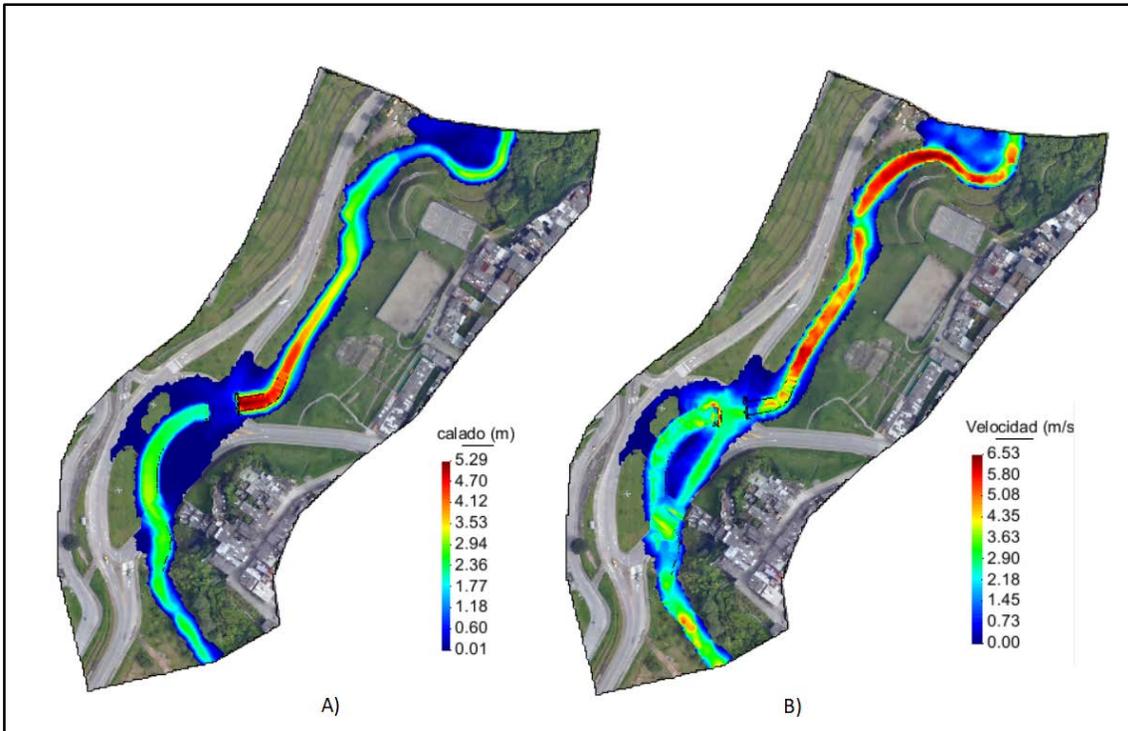


Figura 43. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

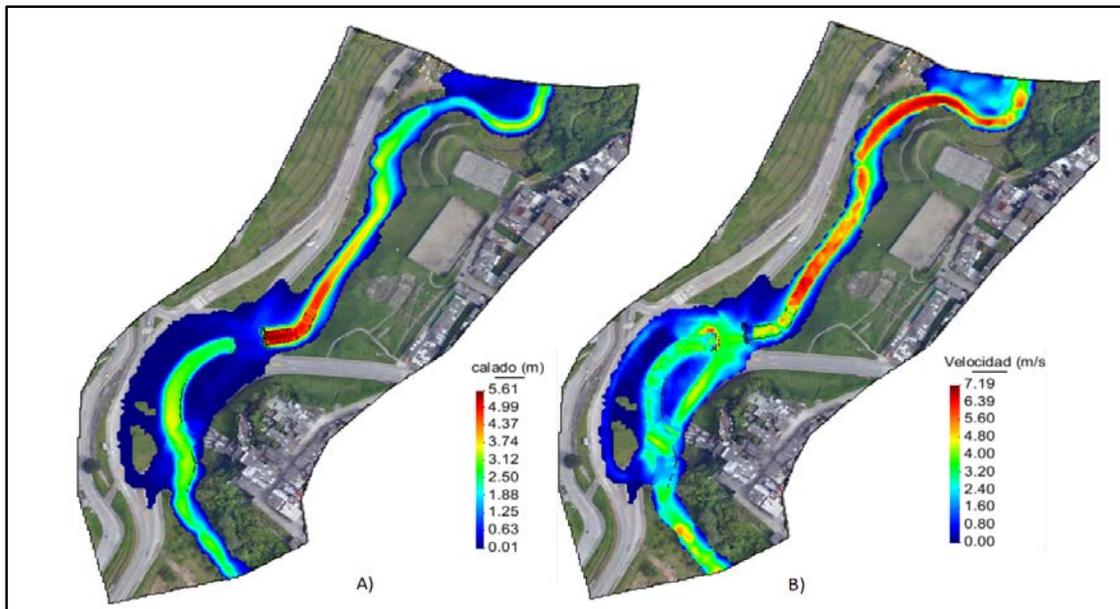


Figura 44. Resultados modelación hidráulica Tramo4 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

El tramo 4 presenta dos estructuras hidráulicas muy cercanas (box culvert de doble celda y un puente) pertenecientes a un intercambiador vial. La presencia de estas estructuras incrementa el riesgo de inundación como se observa claramente en las imágenes anteriores, además, se mencionó en el informe de salida de campo, que tanto el canal como las entradas de estas estructuras presentan una acumulación severa de sedimentos permitiendo la probabilidad de desbordamiento para eventos de menor magnitud. Si bien la infraestructura vial en este tramo resulta afectada, representado un riesgo para la movilidad de la ciudad, es importante resaltar que no existe una amenaza significativa para las viviendas sobre el tramo 4.

3.6.5 Resultados modelación hidráulica Tramo 5.

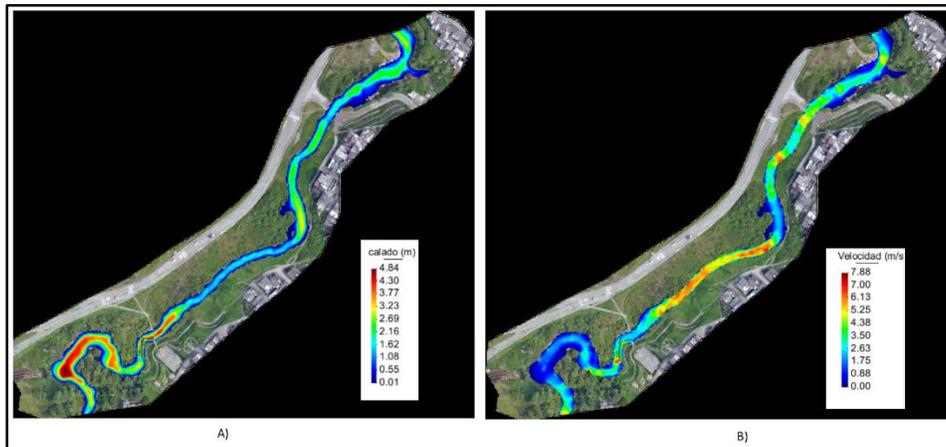


Figura 45. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para Tr=2.33 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

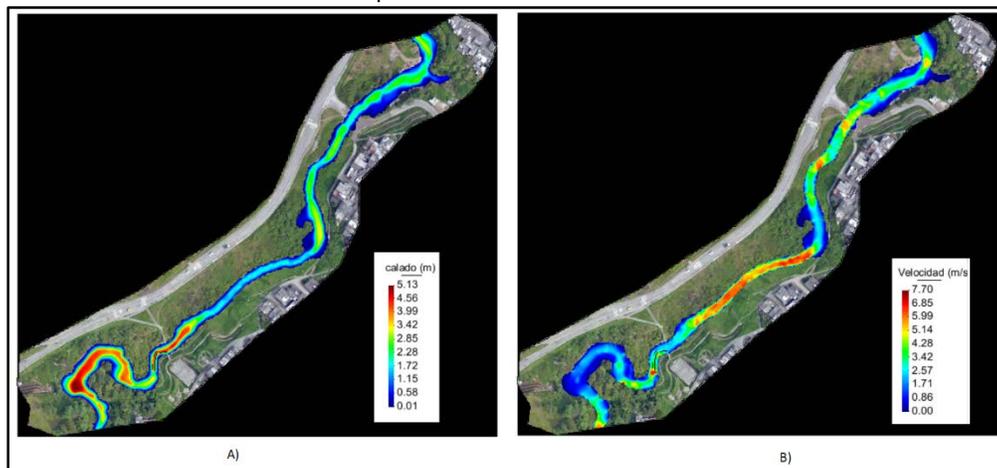


Figura 46. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para Tr=15 años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

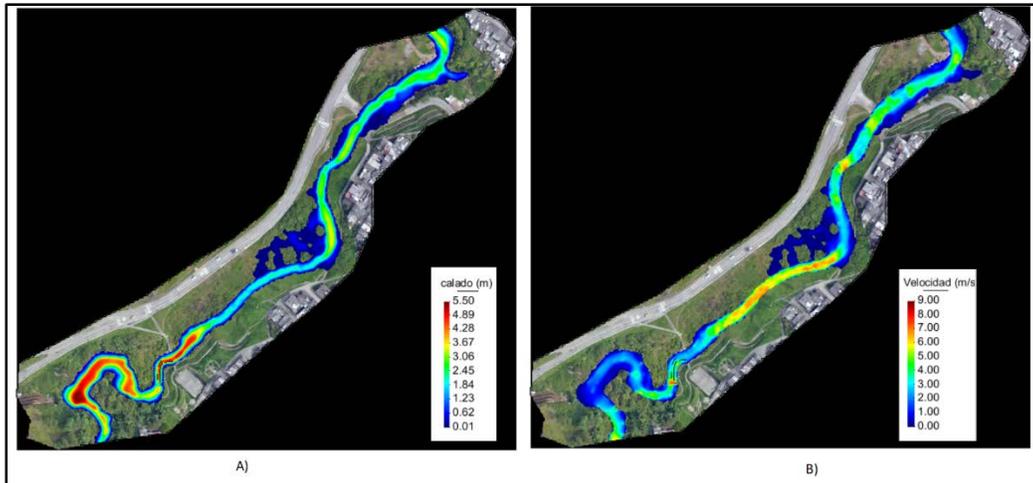


Figura 47. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para $Tr=40$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

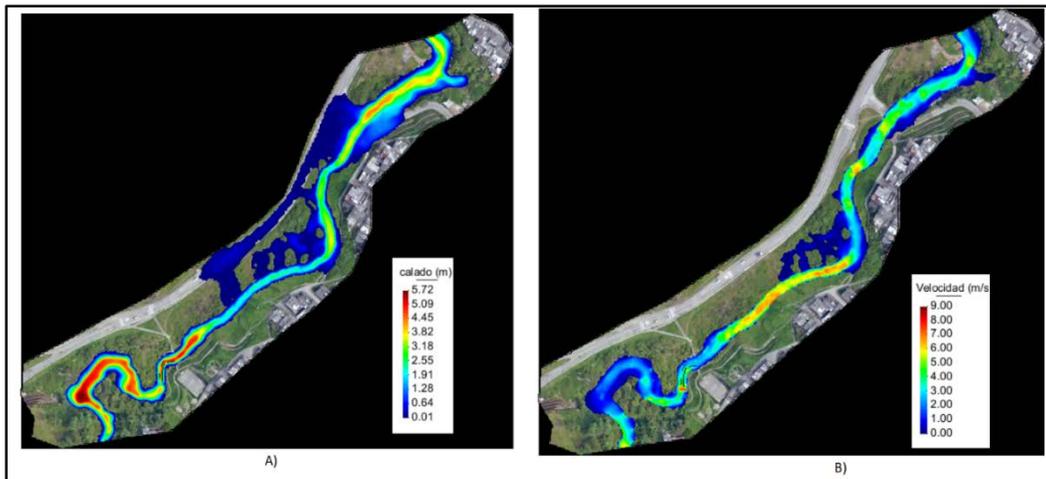


Figura 48. Resultados modelación hidráulica Tramo5 para $Tr=100$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

El tramo 5 se caracteriza por presentar un puente correspondiente a la carrera 8A (entrada al barrio Comuneros), además, no presenta viviendas que se encuentren muy cercanas a las orillas del canal, principalmente porque en este tramo la quebrada inicia nuevamente un proceso de encajonamiento debido a la topografía abrupta de las laderas aledañas. Por lo anterior, se observa que para este tramo en periodos de retorno bajos no existe un incremento de calado que comprometa a las estructuras cercanas, y por lo tanto, los desbordamientos ocurren en zonas de vegetación densa presentando una amortiguación del caudal pico. Sin embargo, para el periodo de retorno de 100 años, Figura 48, se observa que el puente no posee la suficiente capacidad hidráulica para este evento, produciéndose un represamiento y desbordamiento hacia la vía el Guamo.

3.6.6 Resultados modelación hidráulica Tramo 6.

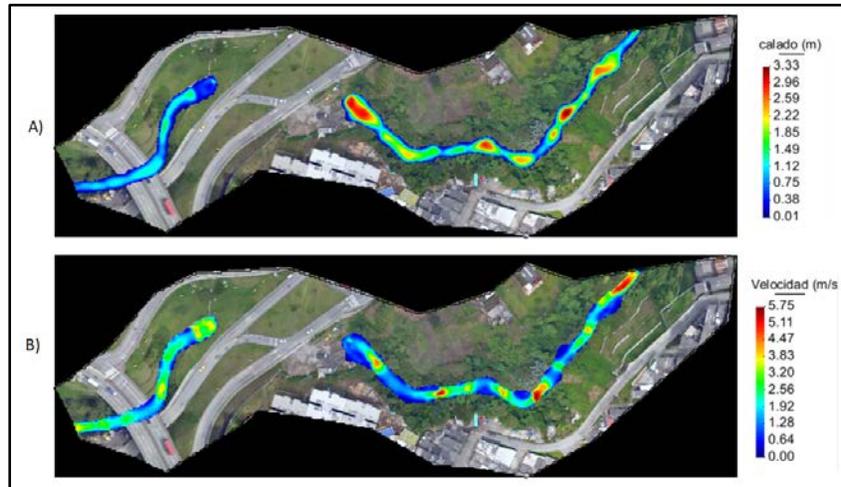


Figura 49. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para $Tr=2.33$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

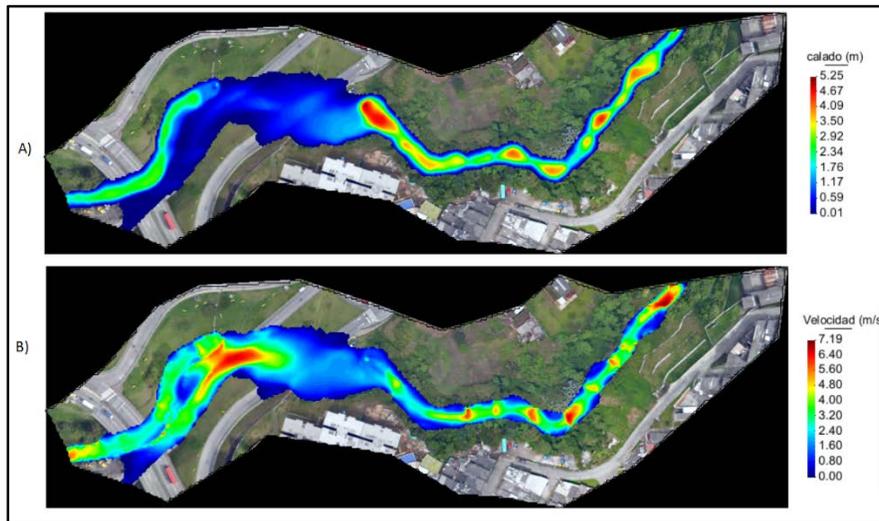


Figura 50. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para $Tr=15$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

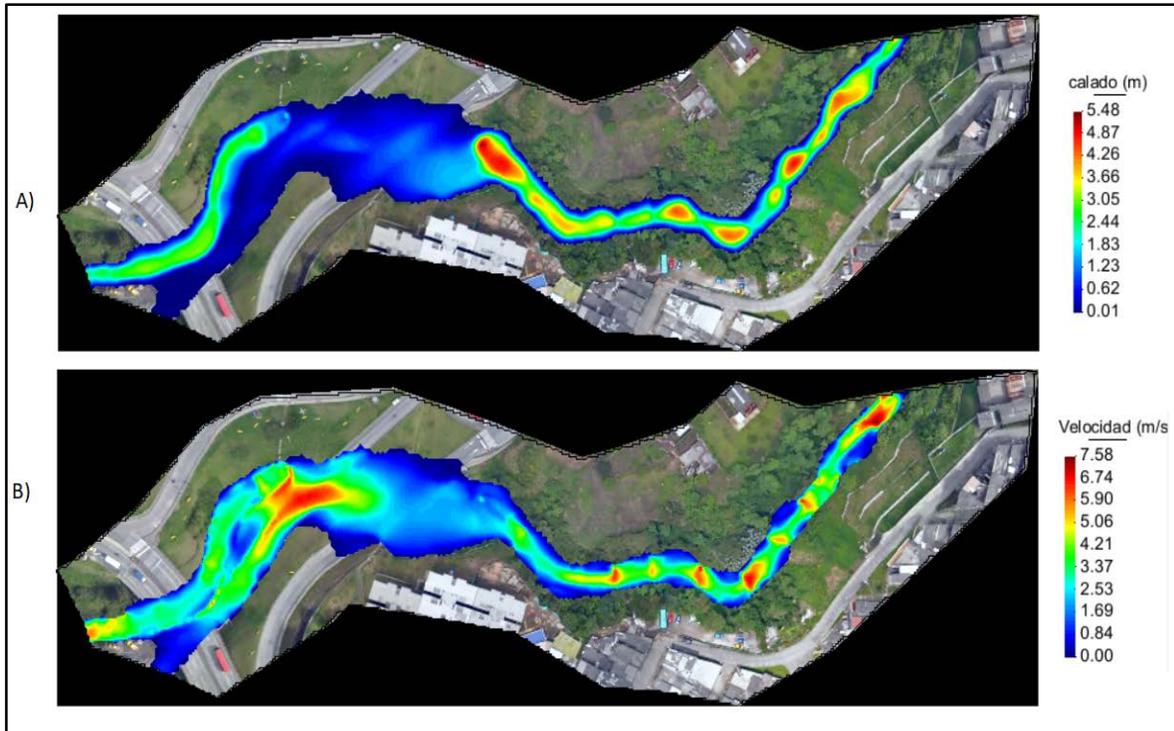


Figura 51. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para $Tr=40$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

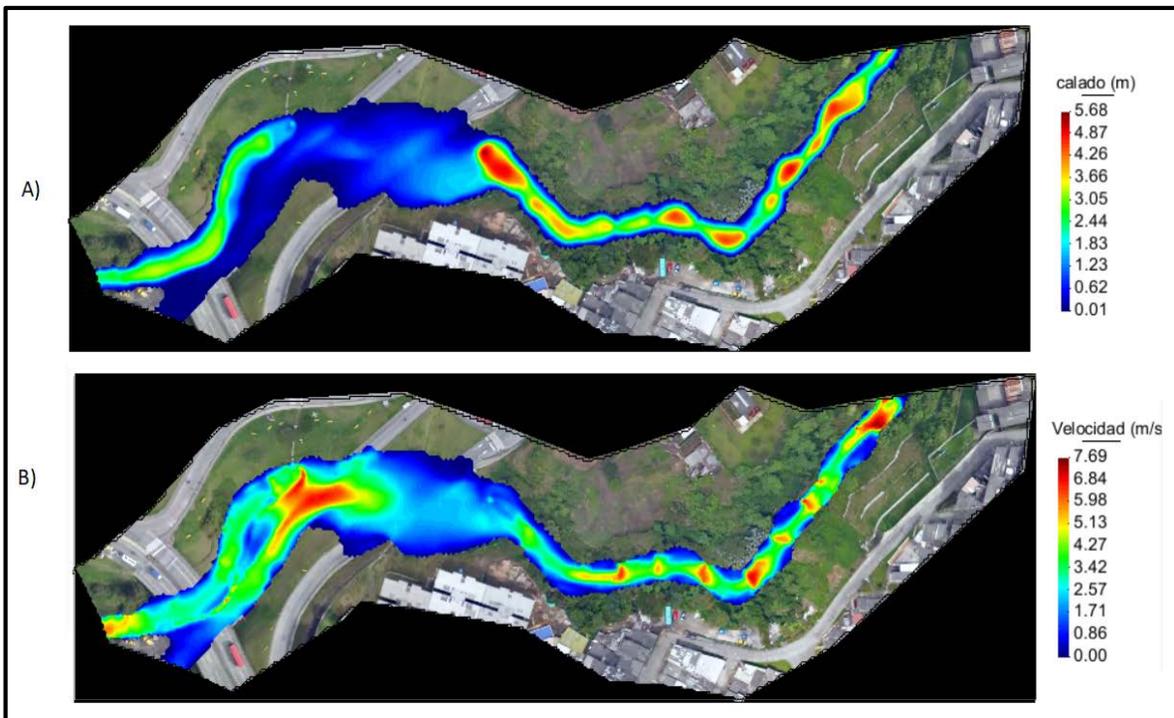


Figura 52. Resultados modelación hidráulica Tramo6 para $Tr=100$ años. A) Mapa de calados máximos. B) Mapa de velocidades máximas.

El tramo 6 inicia con un sector en donde la quebrada se encuentra encajonada, pasando luego por una corta transición para atravesar un box culvert de celda doble y terminar en la desembocadura con la quebrada Olivares. Se observa para este tramo, en la *Figura 25*, que para un $Tr=2.33$ no se presentan desbordamientos sobre la vía, sin embargo, el box culvert se encuentra bajo la condición de entrada sumergida. Para las *Figura 26*, *Figura 27* y *Figura 28* se evidencia un incremento en el calado tal que provoca un desbordamiento y afectación a la vía de la autopista El Guamo, además, a medida que incrementa el periodo de retorno, tanto la velocidad como el calado aumentan, dando como resultado un incremento capacidad de arrastre y poder destructivo del flujo.

A manera de conclusión se tiene que para los diferentes periodos de retorno simulados, los resultados muestran que los tramos más afectados de la quebrada El Guamo son: Tramo2, Tramo3, Tramo4 y Tramo6. Además, se puede observar que el riesgo hidráulico para las viviendas es mayor en la parte alta de la quebrada, mientras que aguas abajo existe una afectación más importante sobre la infraestructura vial. También es importante señalar que la mayoría de los desbordamientos se producen en los puntos donde hay presencia de estructuras hidráulicas, y como se observó en la visita de campo, la mayoría de estas estructuras presentan unas condiciones actuales que disminuyen su capacidad hidráulica debido a gran acumulación de sedimentos y basuras, por lo que se recomienda realizar actividades de mantenimiento y remoción de sedimentos. Finalmente, se resalta las hipótesis bajo las cuales fueron obtenidas las manchas de inundación mostradas en este trabajo para los diferentes periodos de retorno, ya que corresponden a la selección de una distribución de precipitación bajo un escenario de humedad antecedente AMCIII aplicado sobre un modelo digital de elevación con una resolución determinada, y por lo tanto si se requiere un refinamiento y mayor precisión, se deberá procurar optar por el levantamiento de una topografía de detalle, así como simulaciones que involucren diferentes escenarios bajo un análisis estadístico más riguroso.

3.7 Análisis de secciones transversales Quebrada El Guamo:

A continuación, para cada uno de los tramos modelados se seleccionaron secciones transversales sobre el cauce que se consideran críticas, puesto que, en estos puntos el nivel del agua afecta a la infraestructura como viviendas, puentes, vías, y además representa un riesgo para los habitantes.

En las siguientes figuras se muestra las ubicaciones de las secciones transversales seleccionadas en cada tramo y posteriormente el perfil de la sección transversal con el nivel de agua alcanzado para cada uno de los periodos de retorno simulados.



Figura 53. Secciones transversales Tramo 1 – Quebrada El Guamo.

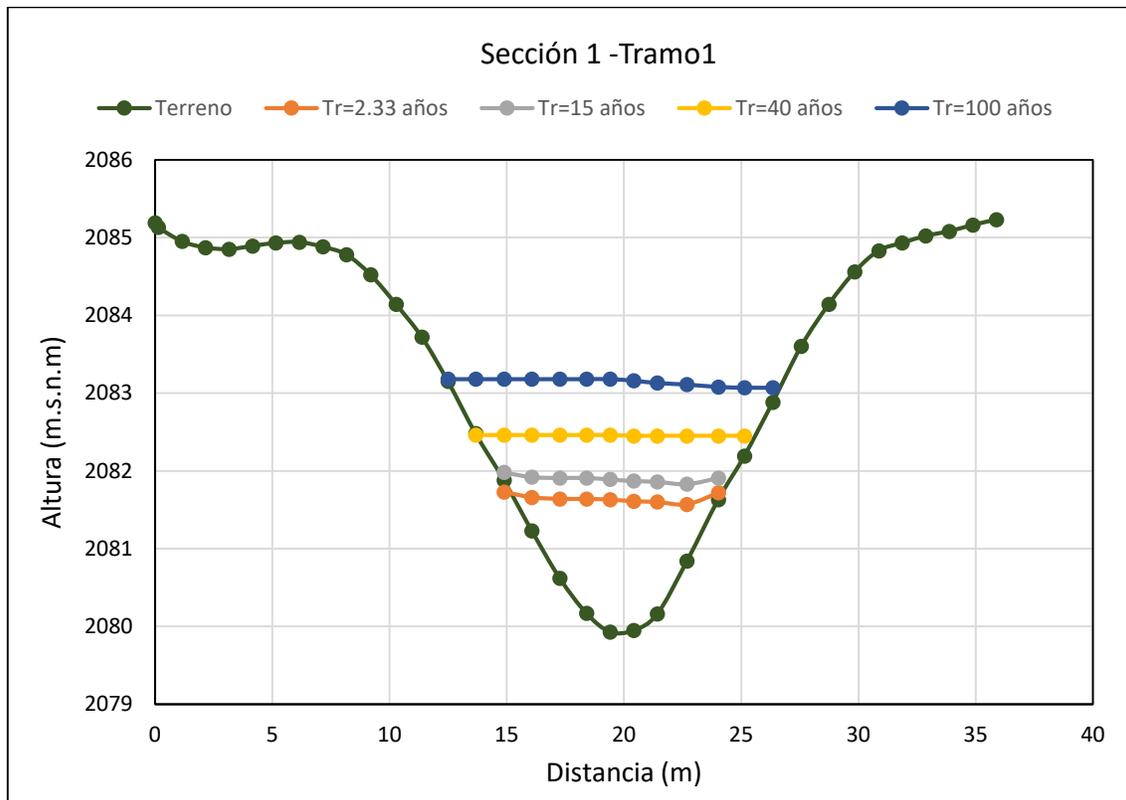


Figura 54. Perfil Sección transversal 1- Tramo 1-Quebrada El Guamo

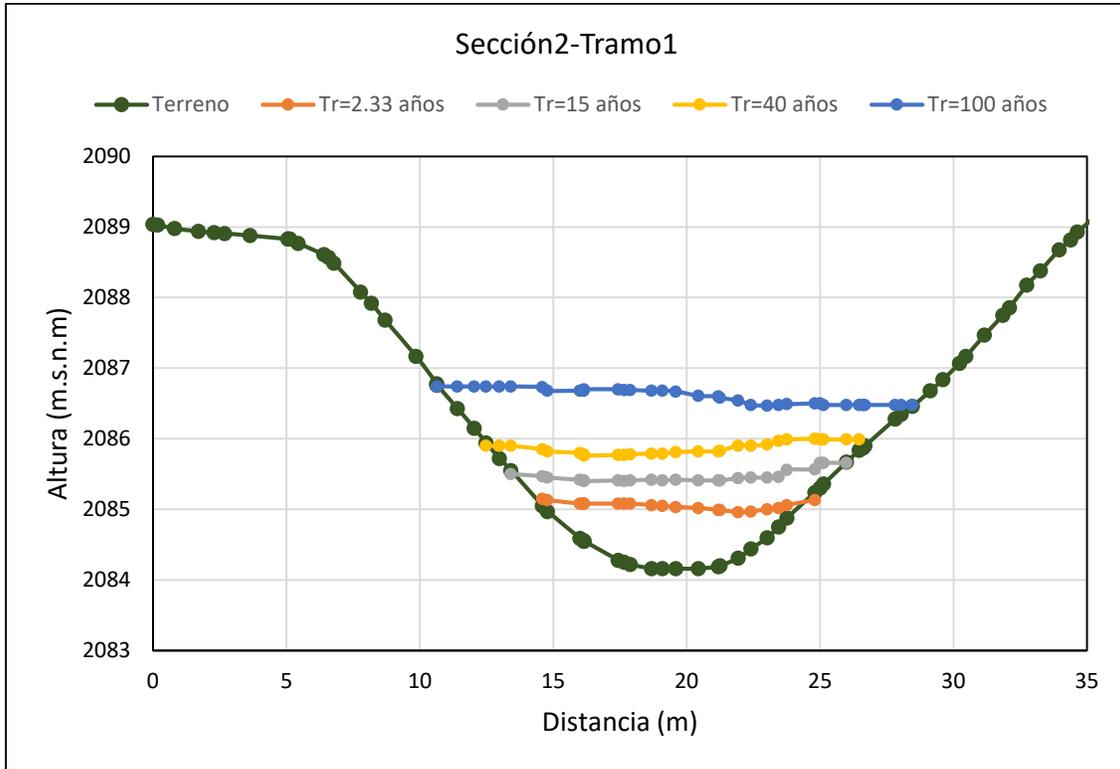


Figura 55. Perfil Sección transversal 2- Tramo 1-Quebrada El Guamo

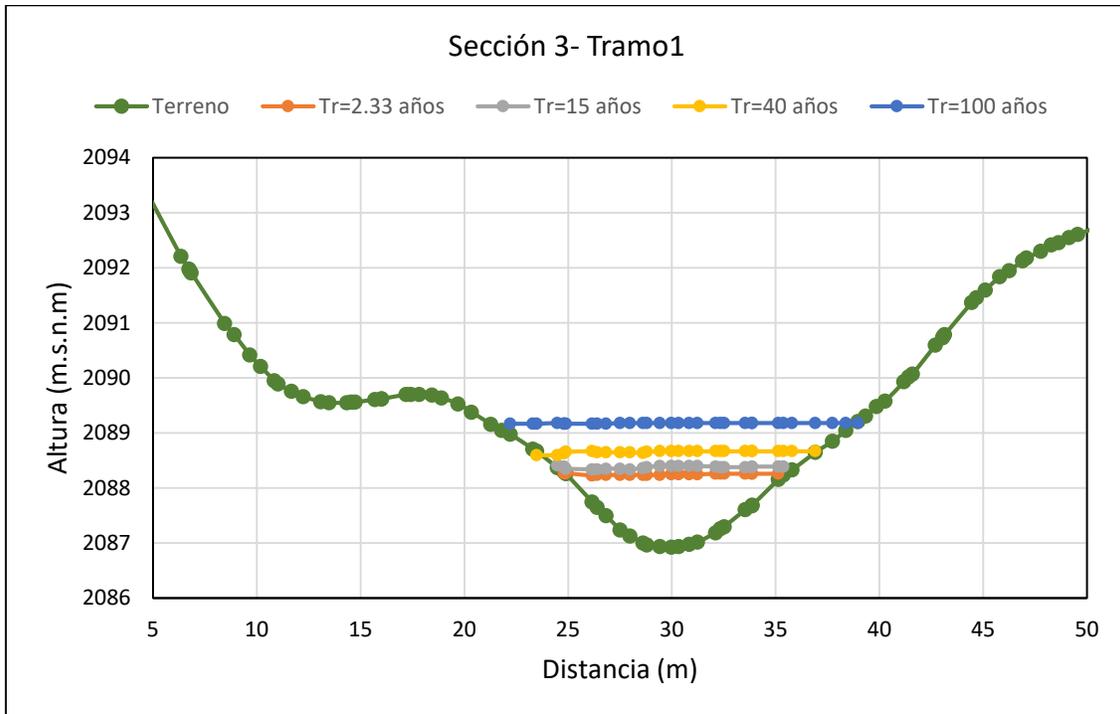


Figura 56. Perfil Sección transversal 3- Tramo 1- Quebrada El Guamo



Figura 57. Secciones transversales Tramo 2 – Quebrada El Guamo.

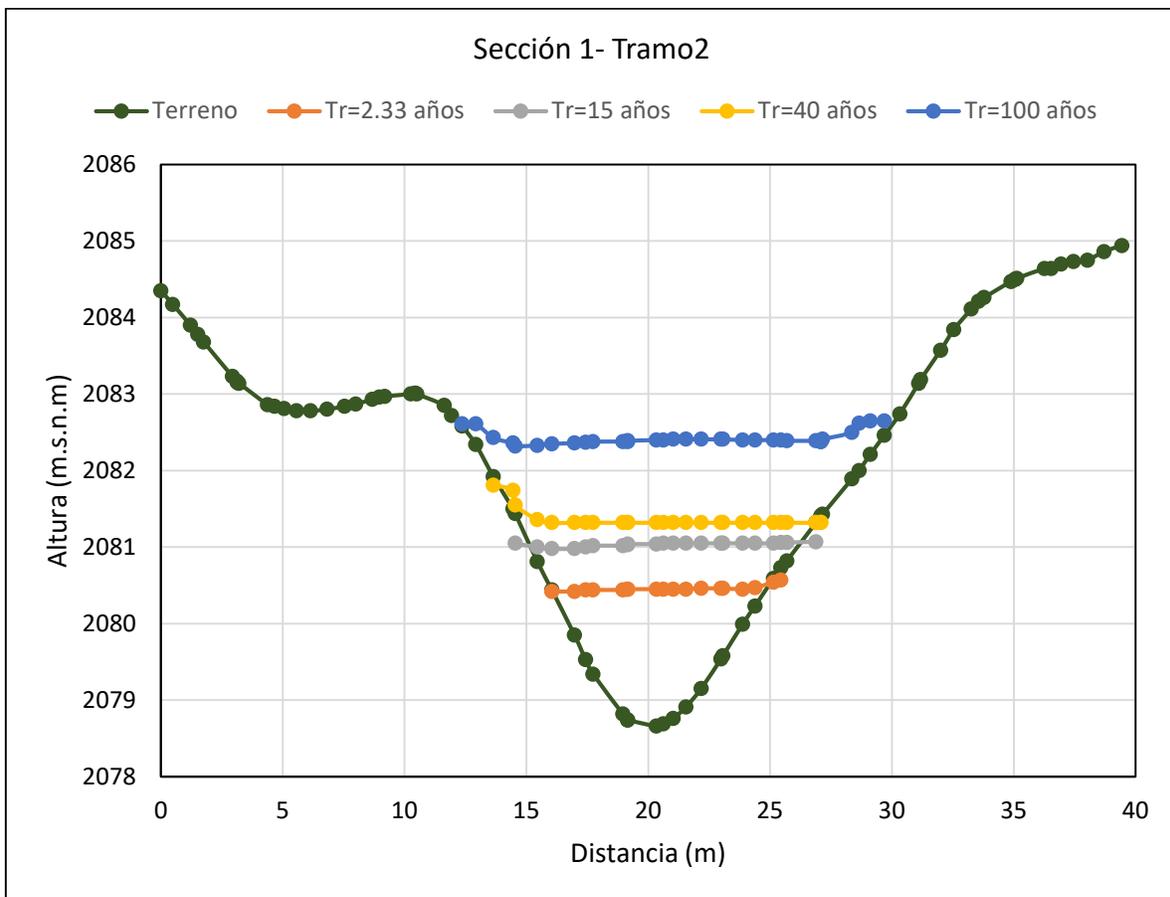


Figura 58. Perfil Sección transversal 1- Tramo 2-Quebrada El Guamo

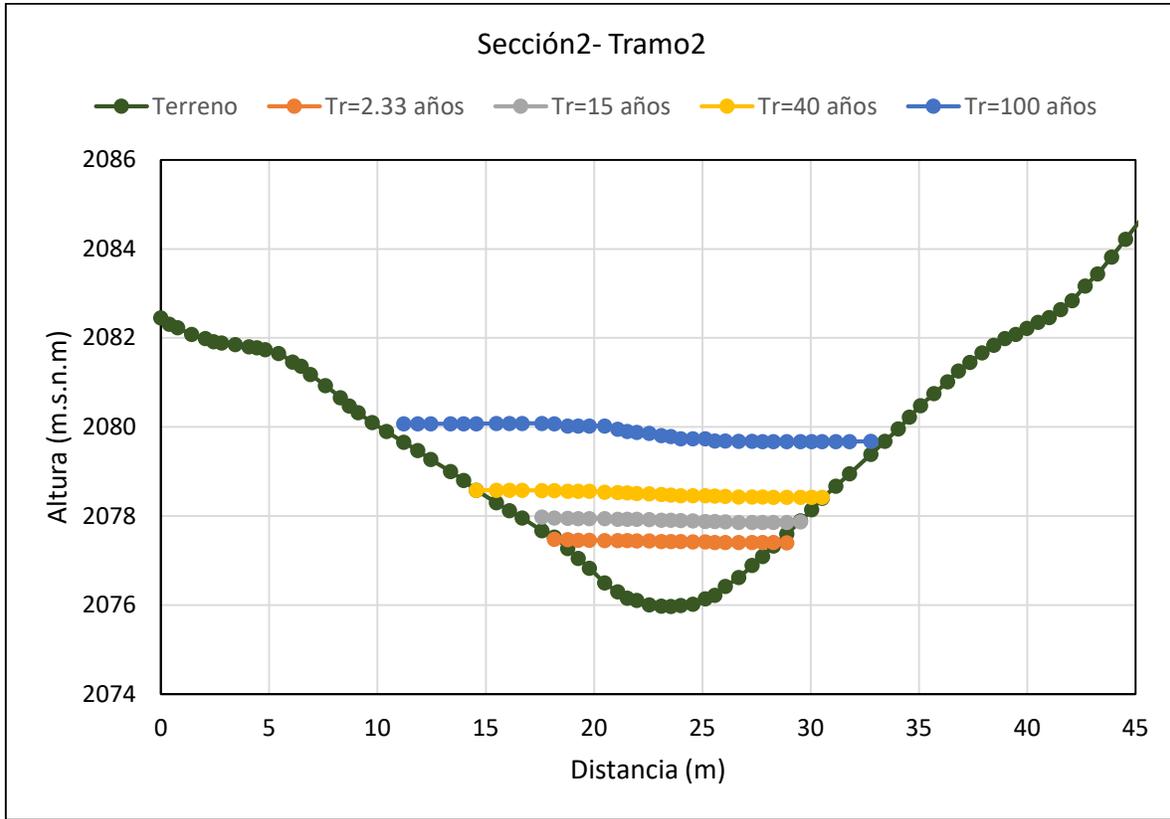


Figura 59. Perfil Sección transversal 2- Tramo 2-Quebrada El Guamo

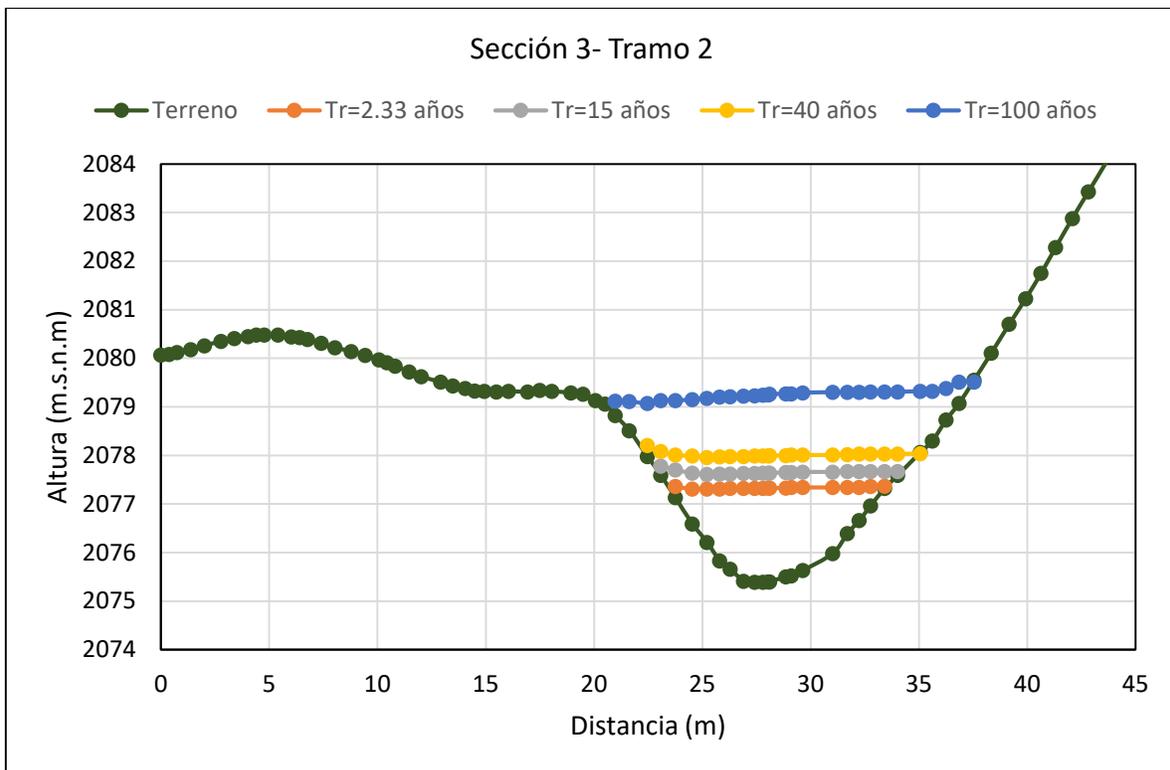


Figura 60. Perfil Sección transversal 3- Tramo 2- Quebrada El Guamo



Figura 61. Secciones transversales Tramo 3 – Quebrada El Guamo

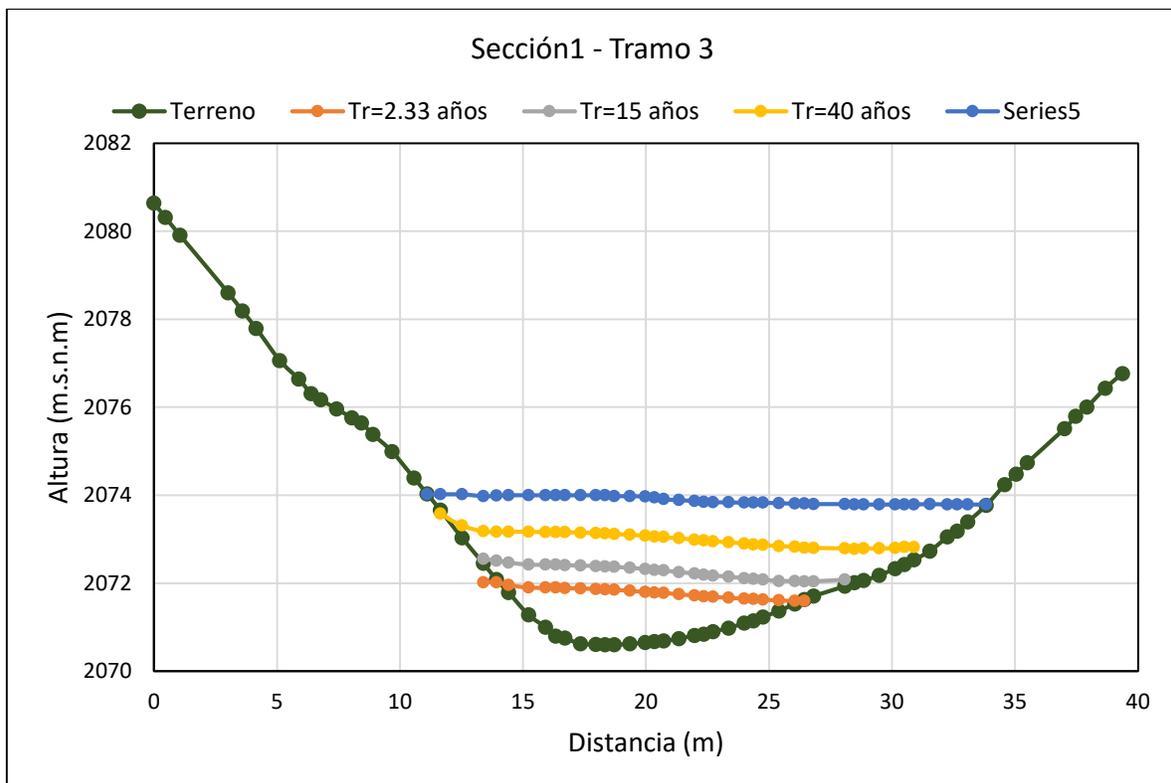


Figura 62. Perfil Sección transversal 1- Tramo 3 – Quebrada El Guamo

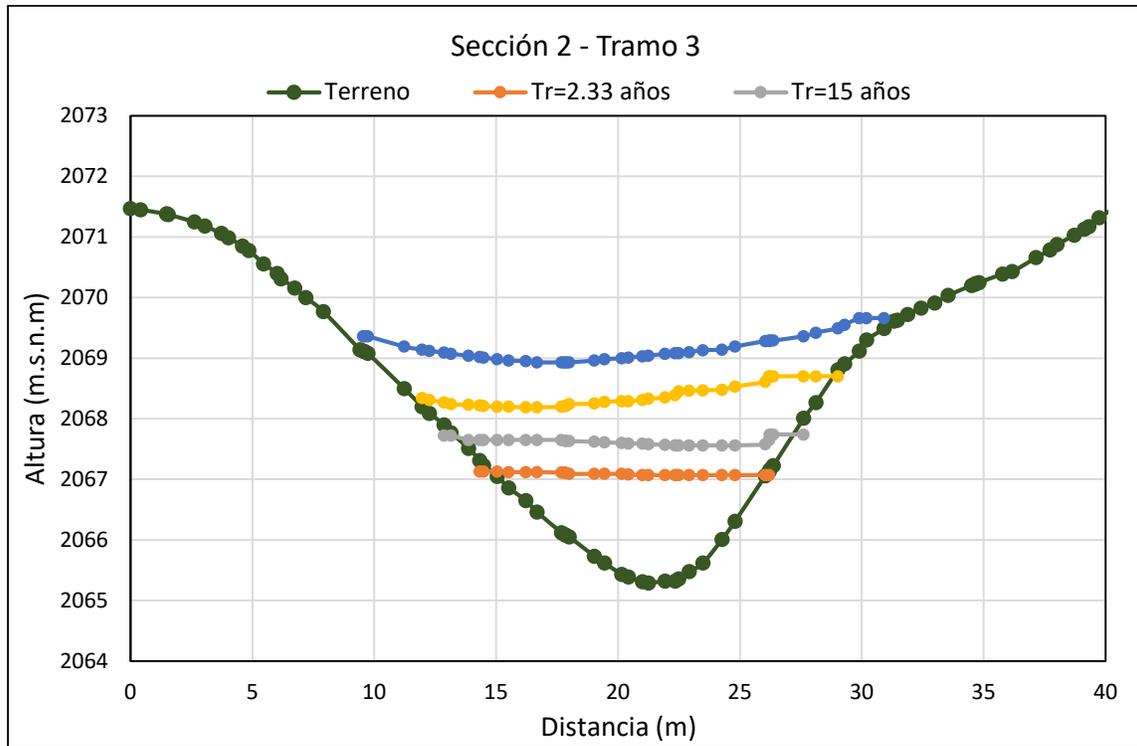


Figura 63. Perfil Sección transversal 3- Tramo 3- Quebrada El Guamo

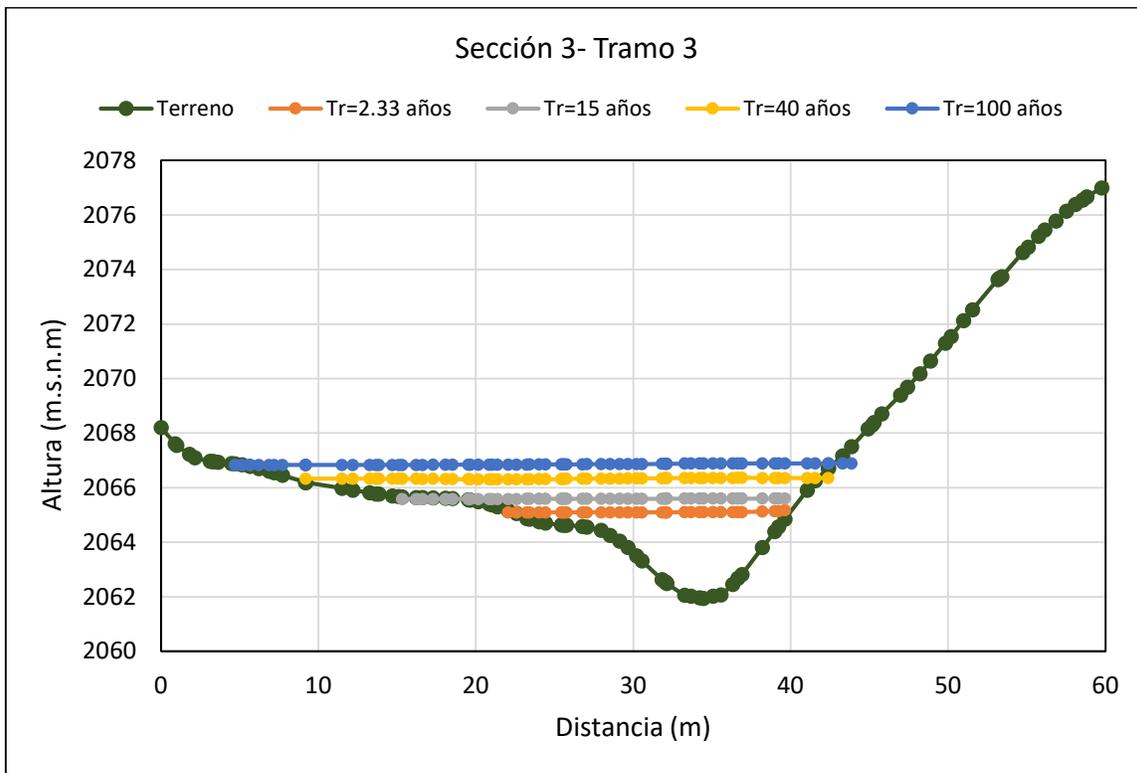


Figura 64. Perfil Sección transversal 3- Tramo 3- Quebrada El Guamo.

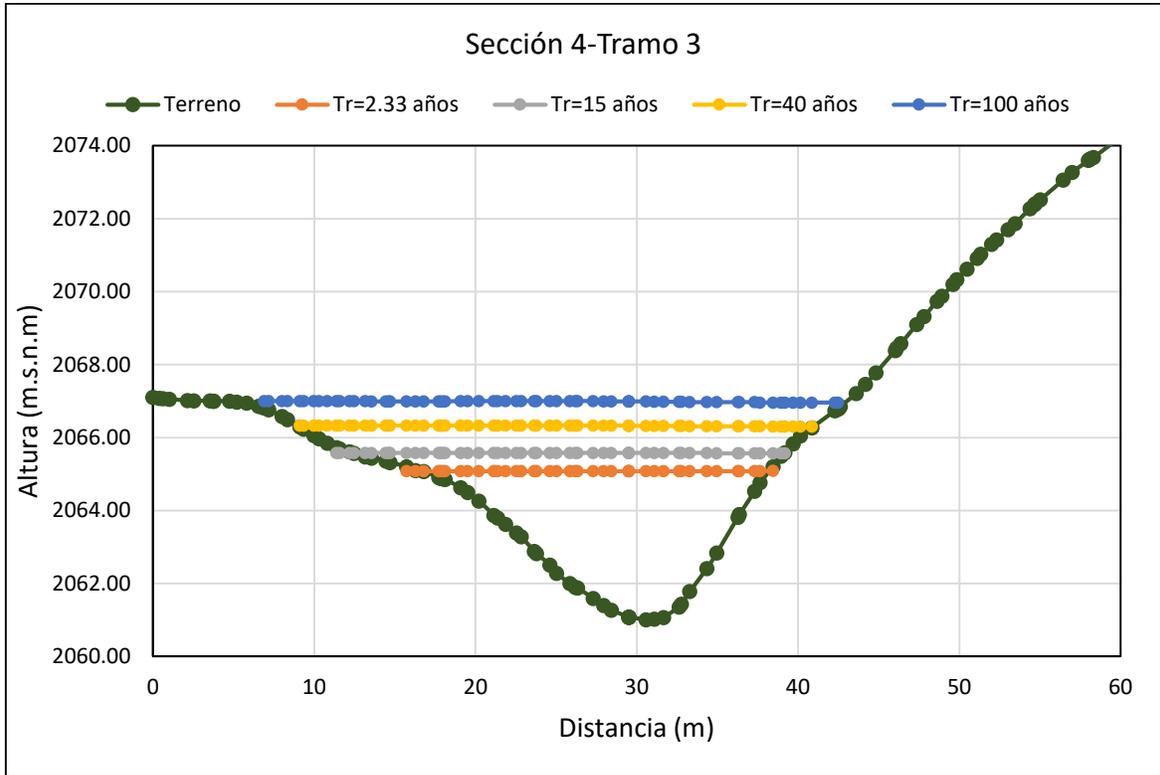


Figura 65. Perfil Sección transversal 4- Tramo 3- Quebrada El Guamo.

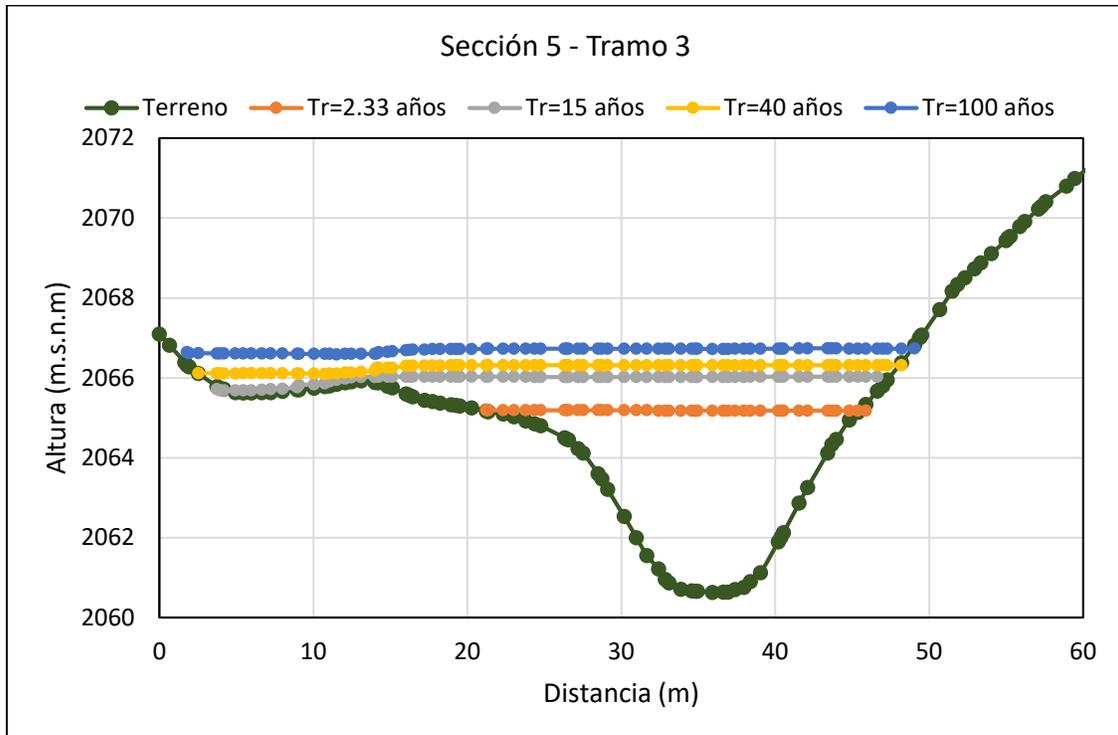


Figura 66. Perfil Sección transversal 5- Tramo 3. Quebrada El Guamo.

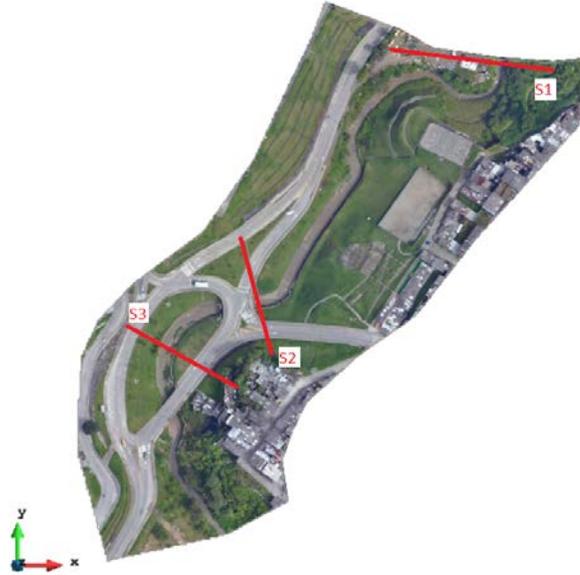


Figura 67. Secciones transversales Tramo 4 – Quebrada El Guamo.

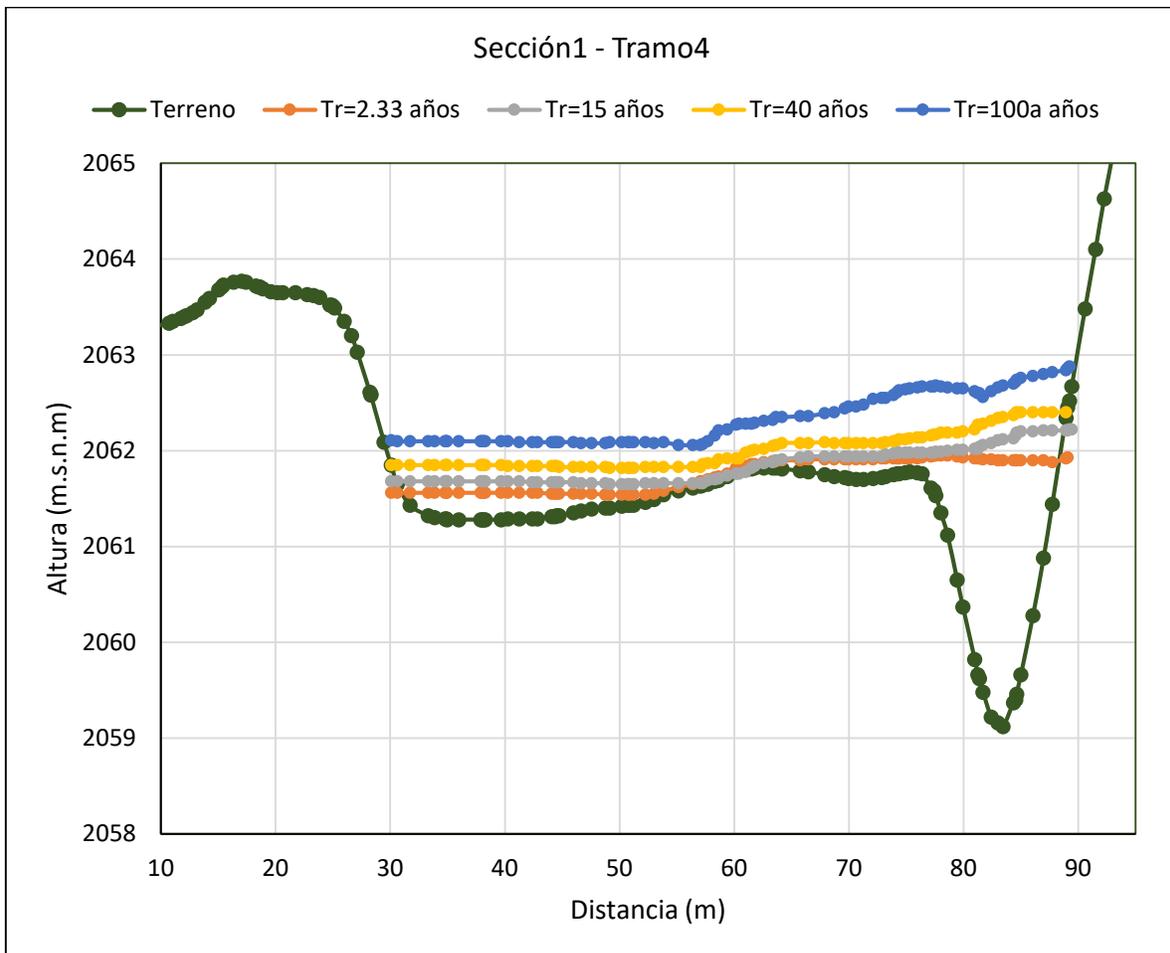


Figura 68. Perfil Sección transversal 1- Tramo 4- Quebrada El Guamo.

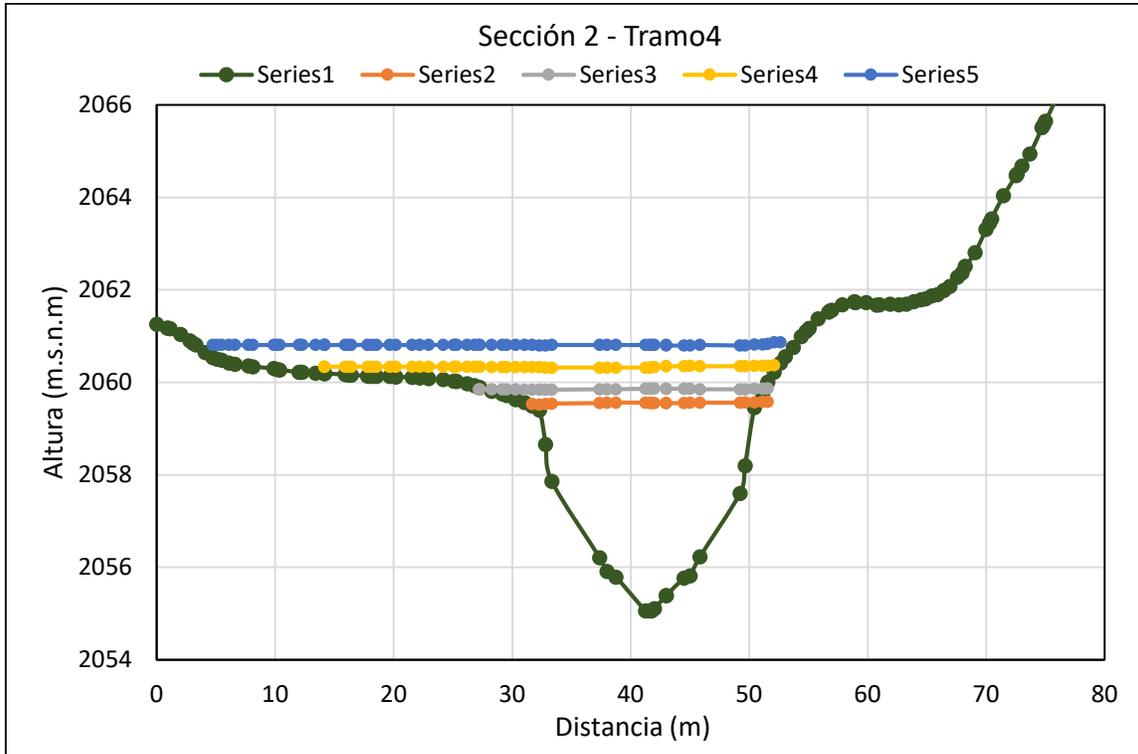


Figura 69. Perfil Sección transversal 2- Tramo 4- Quebrada El Guamo.

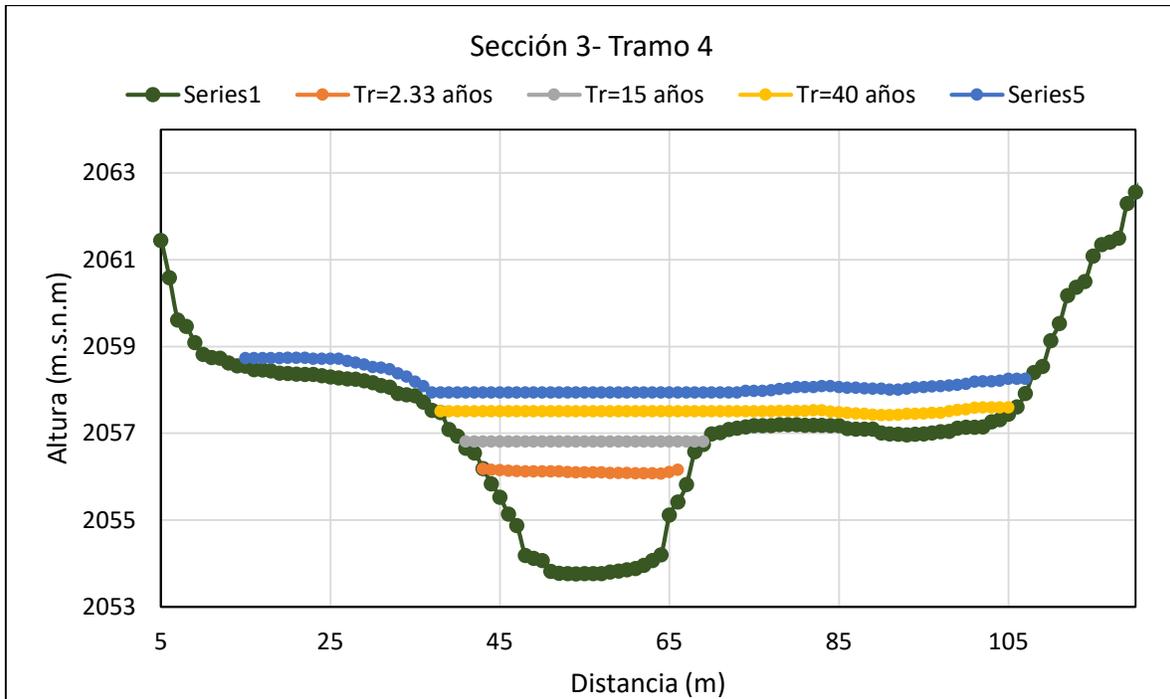


Figura 70. Perfil Sección transversal 3- Tramo 4-Quebrda El Guamo.



Figura 71. Secciones transversales Tramo 5 – Quebrada El Guamo

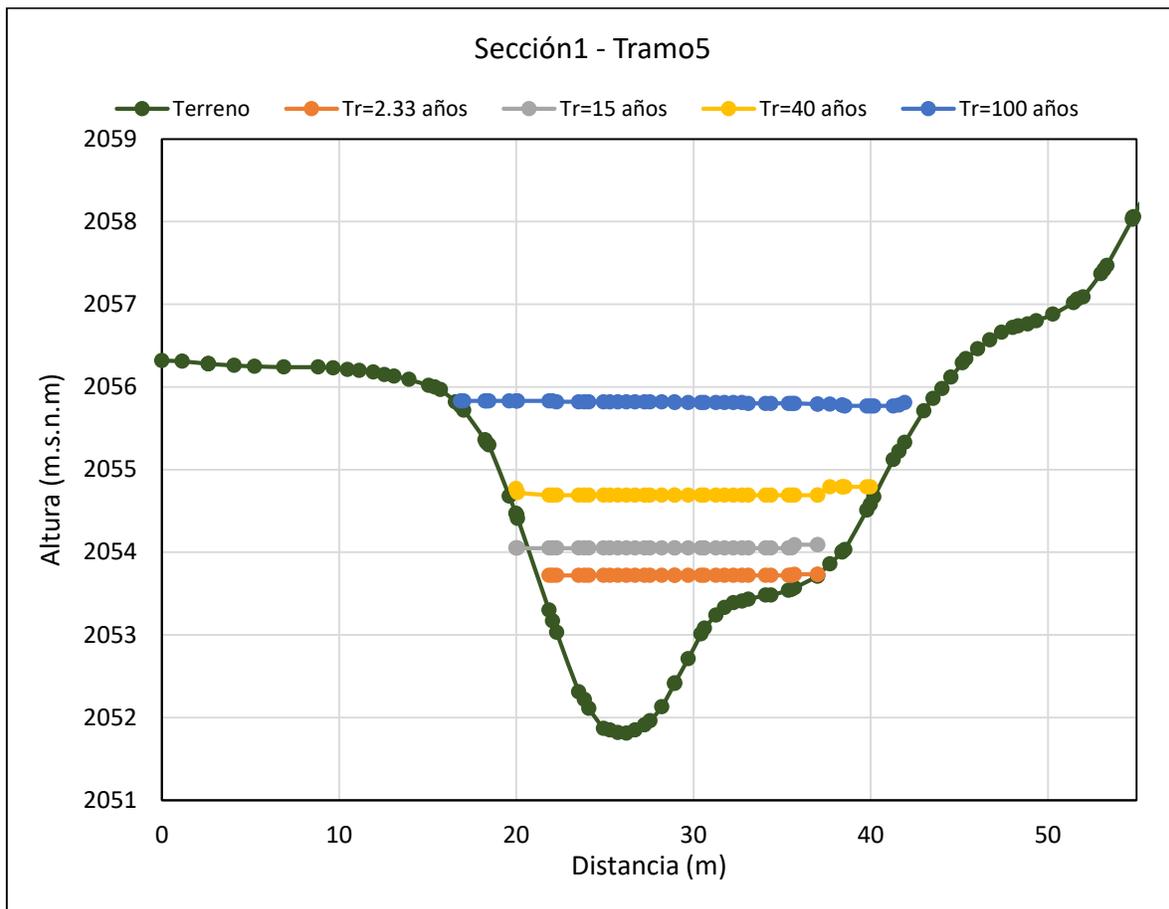


Figura 72. Perfil Sección transversal 1- Tramo 5- Quebrada El Guamo.

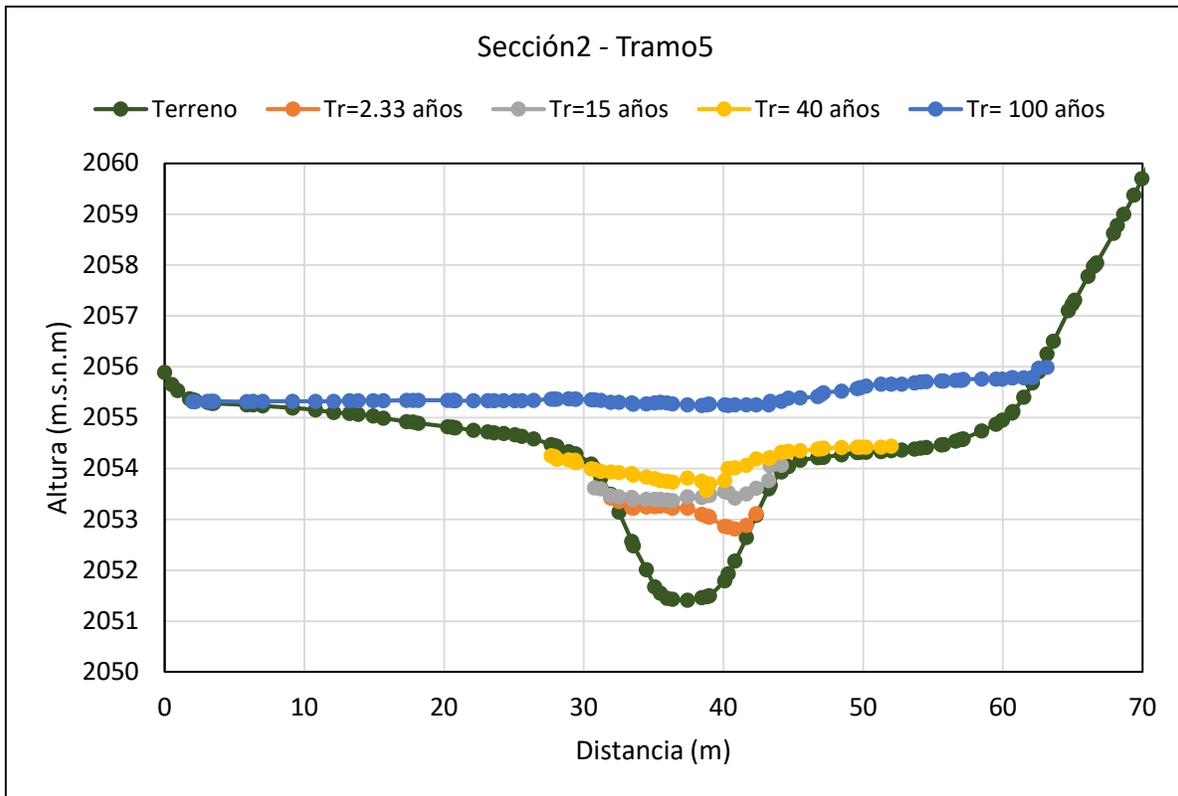


Figura 73. Perfil Sección transversal 2- Tramo 5 Quebrada El Guamo.

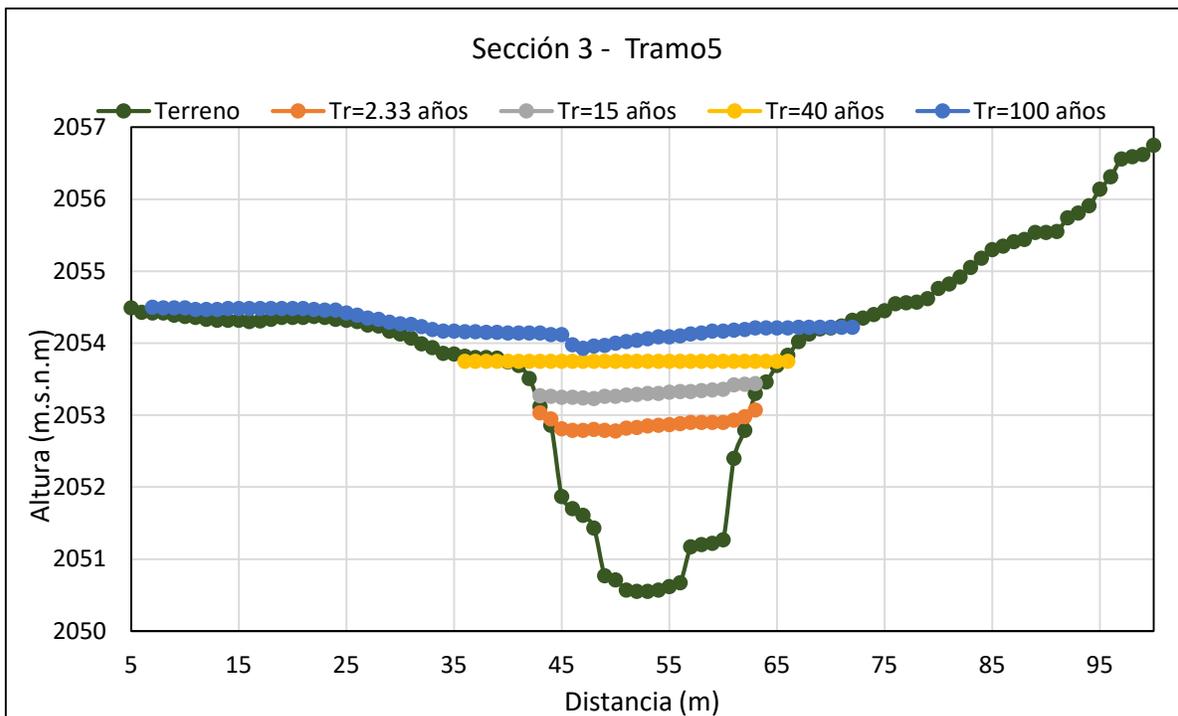


Figura 74. Perfil Sección transversal 3- Tramo 5 Quebrada El Guamo.



Figura 75. Secciones transversales Tramo 6 – Quebrada El Guamo.

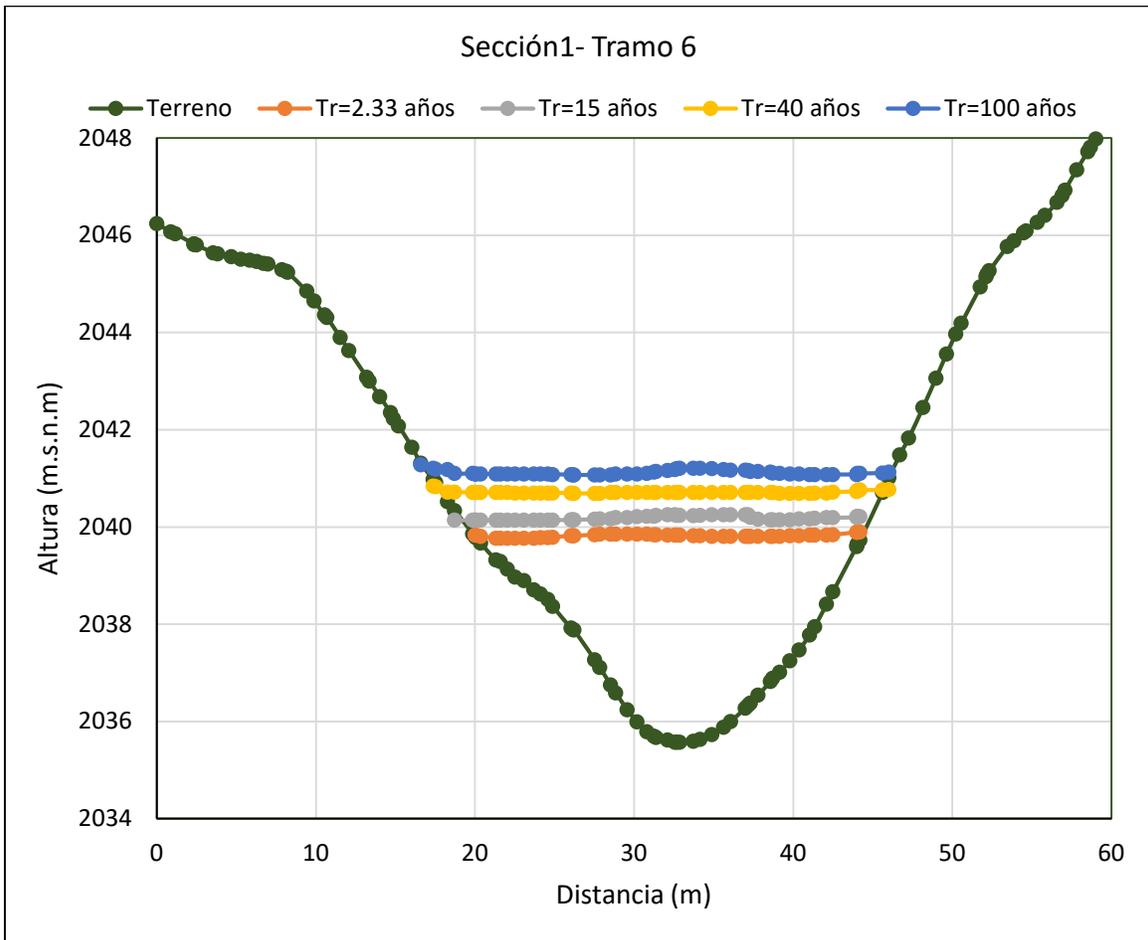


Figura 76. Perfil Sección transversal 1- Tramo 6- Quebrada El Guamo.

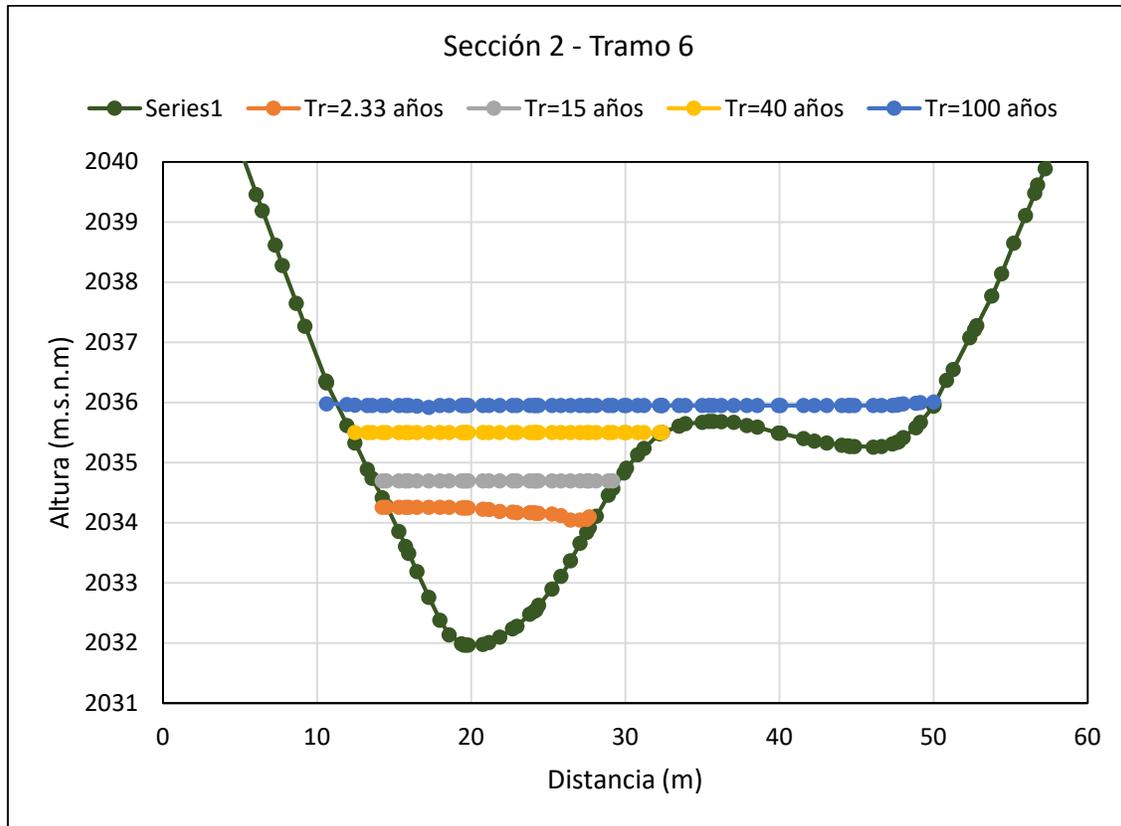


Figura 77. Perfil Sección transversal 2- Tramo 6- Quebrada El Guamo.

De las anteriores figuras se puede observar que es el tramo 3 aquel que presenta condiciones más críticas para la generación de inundaciones que afectan principalmente a la avenida El Guamo, lo anterior, debido a la presencia de un box culvert de doble celda que genera un represamiento de la onda de crecida y que se ve agravado por las condiciones de acumulación de sedimentos, basuras y vegetación. A partir de estas gráficas se realizará la correlación entre la precipitación y los niveles de las secciones más críticas con el fin de obtener los umbrales de precipitación.

3.8 Umbrales preliminares Quebrada El Guamo

La determinación de los umbrales de precipitación consistió en la selección de las secciones transversales más críticas, es decir, aquellas zonas de la quebrada en donde se presenta la inundación con mayor facilidad. Para este trabajo se seleccionaron las siguientes secciones: Las secciones número 3 de los tramos 1,2 y 3, para el tramo 3 las secciones 3,4 y 5, para el tramo 4 las secciones 1,2 y 3, y finalmente para los tramos 5 y 6 la sección número 2. El siguiente paso fue realizar una nube de puntos que relacione los niveles máximos alcanzados y la precipitación máxima en los diferentes eventos y escenarios. Además, se definieron 3 niveles de alerta basados en el nivel

de la lámina de agua sobre la sección más crítica. Por lo tanto, el primer nivel de alerta está dado como la profundidad al 80% del nivel de sección llena, el segundo nivel de alerta corresponde al nivel de sección llena y el tercer nivel de alerta será aquel nivel en donde exista una afectación a la infraestructura.

Una vez obtenido la ecuación de la línea de tendencia de la gráfica niveles vs precipitación, se procedió a encontrar la relación de precipitación para cada uno de los niveles a partir de la sección transversal más crítica. Los resultados finales para los umbrales de precipitación se muestran en la Figura 78, y es importante aclarar que estos umbrales son basados en la precipitación acumulada móvil de 10 minutos. Lo anterior debido a que en el análisis del tránsito del hidrograma sobre la quebrada se obtuvieron tiempos de concentración cortos, esto significa que el caudal pico sobre la sección crítica se presenta durante el evento de precipitación, por lo tanto, para este tipo cuencas no es posible la creación de un umbral de precipitación en función de la duración de cada evento, a menos que se mejore la tecnología de monitoreo hidrometeorológico con la implementación de Radars y modelos de predicción de clima.

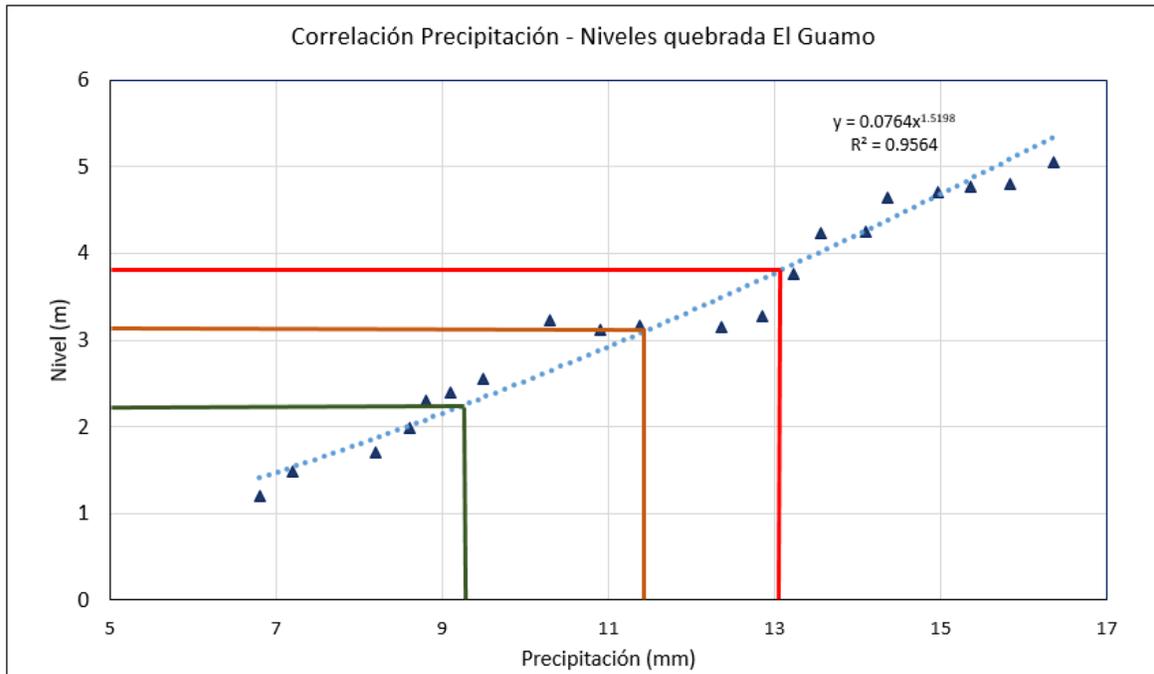


Figura 78. Determinación de los umbrales de precipitación para la Quebrada El Guamo.

1er nivel de Alerta= 9.4 mm 2do Nivel de Alerta=11.6 mm 3er Nivel de Alerta=13.2 mm

3.9 Interpretación de los Umbrales de precipitación para emisión de Alarmas.

Los umbrales preliminares fijados para la quebrada El Guamo, que se obtuvieron bajo la consideración de precipitación acumulada en una ventana de análisis de 10 minutos se reportan a continuación:

- **Primer Nivel de alerta:** [9.4 mm, 11.6 mm)
- **Segundo Nivel de Alerta:** [11.6 mm ,13.2 mm)
- **Tercer Nivel de Alerta:** > 13.2 mm.

Es decir, para cualquier evento de lluvia con duración total D (en minutos), que representa el tiempo del evento desde el inicio de la precipitación hasta la finalización del mismo, se tendrán los reportes de la precipitación acumulada ppt_i (en mm) en un intervalo de tiempo t_i reportado por las estaciones cada 5 minutos. Por ejemplo, para la *Figura 79*. se tiene un evento de duración $D=45$ min, y en el tiempo $t_1=5$ min la precipitación reportada fue de $ppt_{(t_1)} = 4.0$ mm, para el tiempo $t_2=10$ min la precipitación fue de $ppt_{(t_2)}=4.2$ mm, para el tiempo $t_3=15$ min la precipitación fue $ppt_{(t_3)}=7.4$ mm. así sucesivamente hasta el final del evento.

Sin embargo, debido a que los umbrales están calculados bajo precipitación acumulada móvil en intervalos de 10 minutos, deberá calcularse una nueva variable $UPPT_i$ = Umbral de Precipitación acumulada móvil sub i cada 10 minutos. Es decir que, el umbral de precipitación acumulada $UPPT_1$ será igual a la suma de $ppt_{(t_1)}$ (precipitación en el tiempo $t=5$ min) más $ppt_{(t_2)}$ (precipitación en el tiempo $t=10$ min), $UPPT_2=ppt_2+ppt_3$ y así sucesivamente. Para el ejemplo de la figura1, $UPPT_1= 4.2$ mm(ppt_1) + 7.4 mm (ppt_2) =11.6mm.

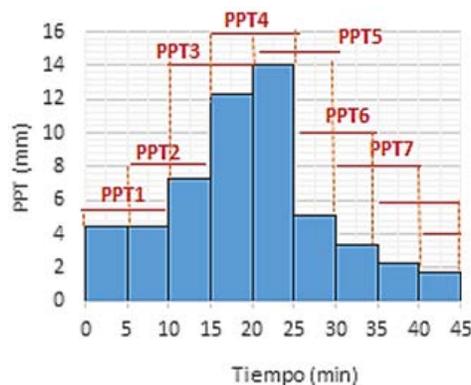


Figura 79. Ejemplo de precipitación y cálculo de umbrales.

Finalmente serán los valores que tome la variable $UPPT_i$ los que deben compararse con los diferentes niveles de alerta, si $UPPT_i$ es mayor a cualquiera de los umbrales, la alarma deberá

activarse e iniciarse los protocolos de emergencia respectivos. Para ejemplo de la figura 1, como UTPP1 es igual 11.6 mm, siendo mayor al Primer Nivel de Alerta (9.4mm), se deberá emitir una alarma.

Debido a que el anterior proceso no es práctico para ser realizado de manera manual en cada evento de lluvia, y con el fin de que el Sistema de Alerta Temprana de la ciudad trabaje de manera eficiente y eficaz, esta metodología deberá adaptarse a las plataformas y herramientas informáticas con las que cuenta el SIMAC e IDEA para el monitoreo de las variables hidrometeorológicas, y lograr así que este sistema funcione automáticamente. Además, deberá implementarse modificaciones o crear un aplicativo *software* ubicado en la estación de bomberos que permita la visualización de forma fácil y automática para la activación de los umbrales.

En este sentido, se propone la implementación de una nueva gráfica en la página web del SIMAC “Estado del tiempo en Manizales y Caldas Calidad del aire en Manizales”, únicamente para las estaciones correspondientes a la RED SAT Manizales. Las características de esta gráfica serán: se visualizará el hietograma y la curva de precipitación acumulada en una misma ventana. En el eje y, correspondiente a la variable precipitación en (mm), deberán establecerse las líneas horizontales correspondiente a los umbrales de precipitación. La escala debe ajustarse al rango de valores de la precipitación para que sea fácilmente visible.

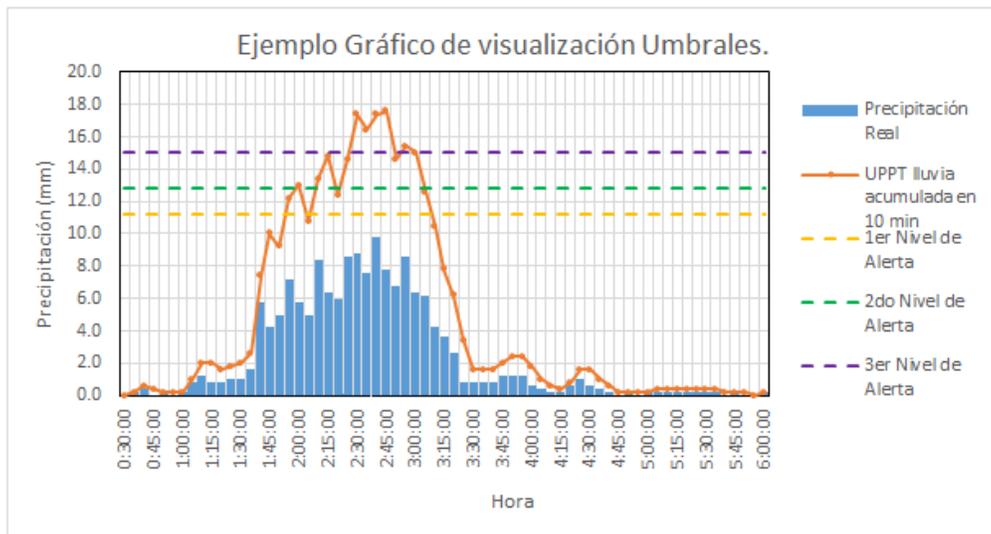


Figura 80. Ejemplo ventana de visualización de la variable UTPP para la emisión de alarmas.

En la Figura 80 se muestra un ejemplo del gráfico propuesto para implementarse en las estaciones de la red SAT de la quebrada Manizales. Para esta gráfica se tomó como ejemplo el evento ocurrido

el 19 de abril de 2017 reportado por la estación Hospital Caldas, la duración del evento fue desde las 00:30 a.m hasta las 06:00 a.m. Se evidencia el hietograma en color azul, la curva UTTP de lluvia acumulada cada 10 minutos en color anaranjado y los respectivos umbrales de alerta. Para el ejemplo se observa como aproximadamente a las 1:50:00 a.m se hubiera emitido una alarma, y a las 2:00:00 a.m se hubiera alcanzado el segundo nivel de alerta, así mismo el tercer nivel de alerta se hubiera emitido a las 2:30:00 a.m. Por lo anterior, con la implementación de la curva UTTP se permite evidenciar de forma gráfica y sencilla cuando un evento supera los umbrales de precipitación. Finalmente, esto constituiría una herramienta para la emisión de alarmas por parte de los organismos de emergencias que beneficie a la comunidad.

4 DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA OLIVARES.

4.1 Procesamiento cartográfico:

Se realizó un análisis de las características de la cuenca teniendo en cuenta los mapas de pendientes, mapa de direcciones de flujo y mapa de flujos acumulados, que fueron obtenidos a partir del modelo de elevación digital del terreno (MDT) de la NASA (con resolución de 30m). La selección del DTM de la NASA correspondió a que el levantamiento LIDAR de la ciudad de Manizales no cubre toda el área de estudio, sino solamente la parte media y baja de la cuenca, es decir, la zona urbana de la cuenca.

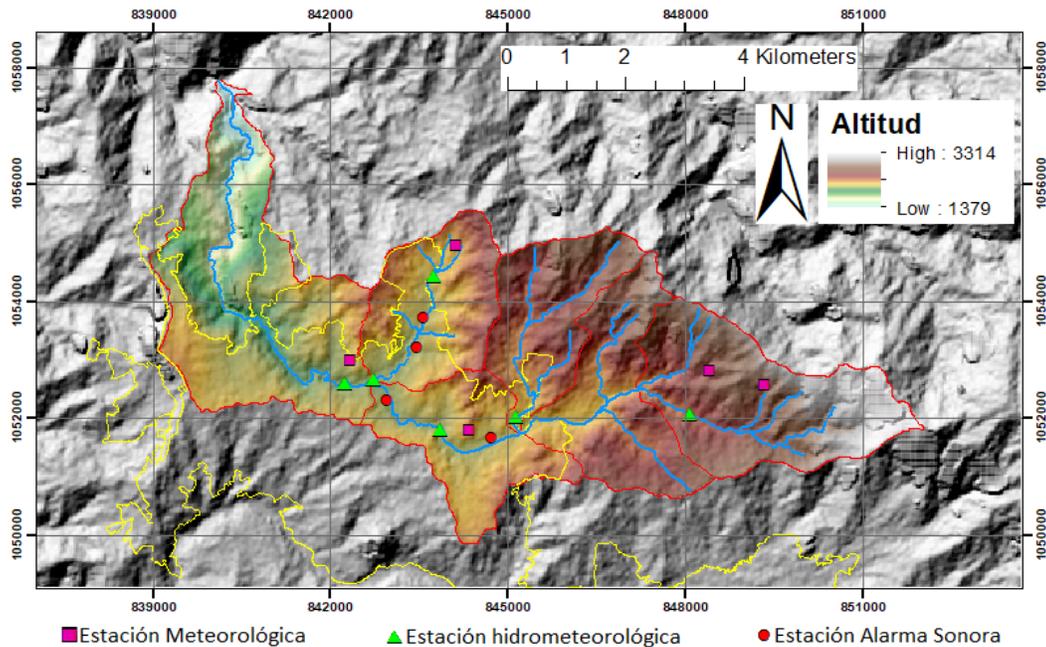


Figura 81. Mapa de alturas cuenca Olivares.

En la Figura 81, se muestra la localización de la cuenca Quebrada Olivares, y la subcuenca quebrada El Guamo. De manera general, la cuenca Olivares tiene un área de 40.75 Km², un perímetro de 40.1Km, y altitudes que van de los 1379 m.s.n.m en su desembocadura (sobre el Río Guacaica) hasta los 3314 m.s.n.m en la parte alta de la cuenca (Alto de la Coca). La cuenca Olivares está localizada entre las coordenadas 838939 m al oeste, 852027m al este, 1049859 m al sur y 1057793 m al norte, bajo el sistema de coordenadas proyectadas Colombia_Bogota_Zone con DATUM en Bogotá. La línea de color amarillo representa el perímetro urbano y se observa que los asentamientos urbanos están concentrados sobre la parte media de la cuenca Olivares.

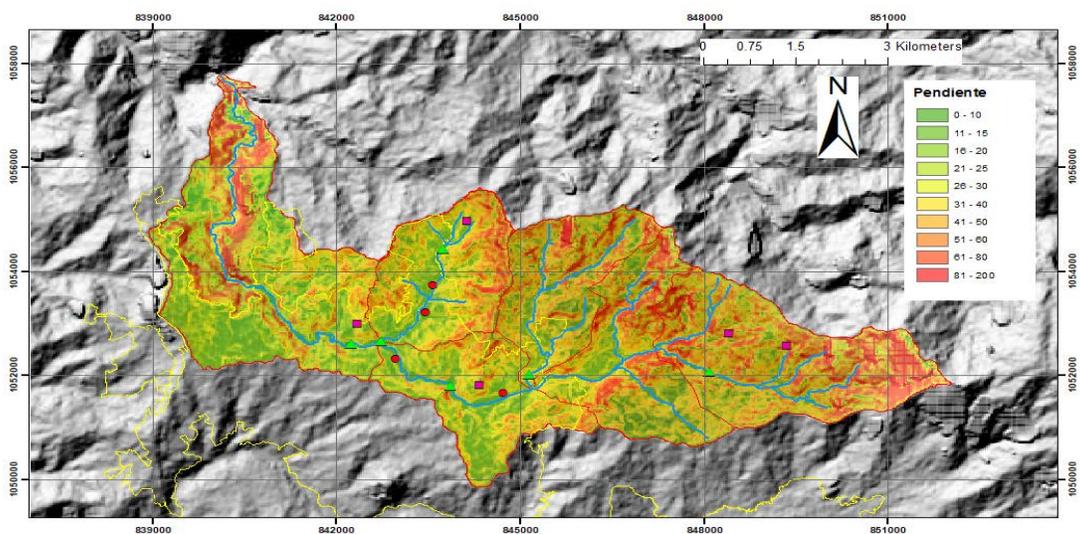


Figura 82. Mapa de pendientes cuenca Olivares.

En la Figura 81, se muestran las estaciones de monitoreo ubicadas sobre la quebrada Olivares. Las estaciones de alarma sonora están representadas con círculo rojo, las estaciones meteorológicas con un cuadrado violeta y las hidrométricas con un triángulo verde. Para la quebrada Olivares se tienen cuatro estaciones hidrométricas, una sobre la parte alta de cuenca, otra cercana a la desembocadura en la quebrada El Popal y la siguiente sobre el puente de Empresa Aguas de Manizales, y la última ligeramente después de la desembocadura de la quebrada El Guamo. Así mismo, esta cuenca presenta tres estaciones meteorológicas siguiendo el mismo patrón de distribución. Finalmente, existen dos estaciones de alarma sonora, que se ubican sobre la Escuela de Carabineros de la Policía Nacional y en el barrio Asunción.

En la Figura 82, se puede evidenciar que la parte alta de la cuenca se caracteriza por ser una zona altamente montañosa y de pendientes fuertes, permitiendo inferir que en el inicio de la red de drenaje se presentan velocidades elevadas del flujo y por lo tanto alta capacidad de arrastre de sedimentos. Además, esta característica incrementa la probabilidad de deslizamiento sobre las márgenes del cauce que pueden dar como resultado el represamiento temporal de la corriente y eventualmente la formación de un frente de onda hacia aguas abajo con una alta energía cinética. Por lo anterior, el uso del suelo juega un papel importante y se debe incentivar la conservación de los bosques presentes en la margen derecha de la quebrada y desincentivar las practicas erosivas y de deforestación que predominan en la margen izquierda producto de la ganadería. En la parte media de la cuenca y siguiendo la delimitación del perímetro urbano de Manizales se observan pendientes moderadas. Finalmente, la parte baja de la cuenca se caracteriza por el encajonamiento y la incisión del cauce, dando como resultado una topografía abrupta y por lo tanto valores altos de pendientes sobre las márgenes de la quebrada hasta su desembocadura.

4.2 Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada Olivares:

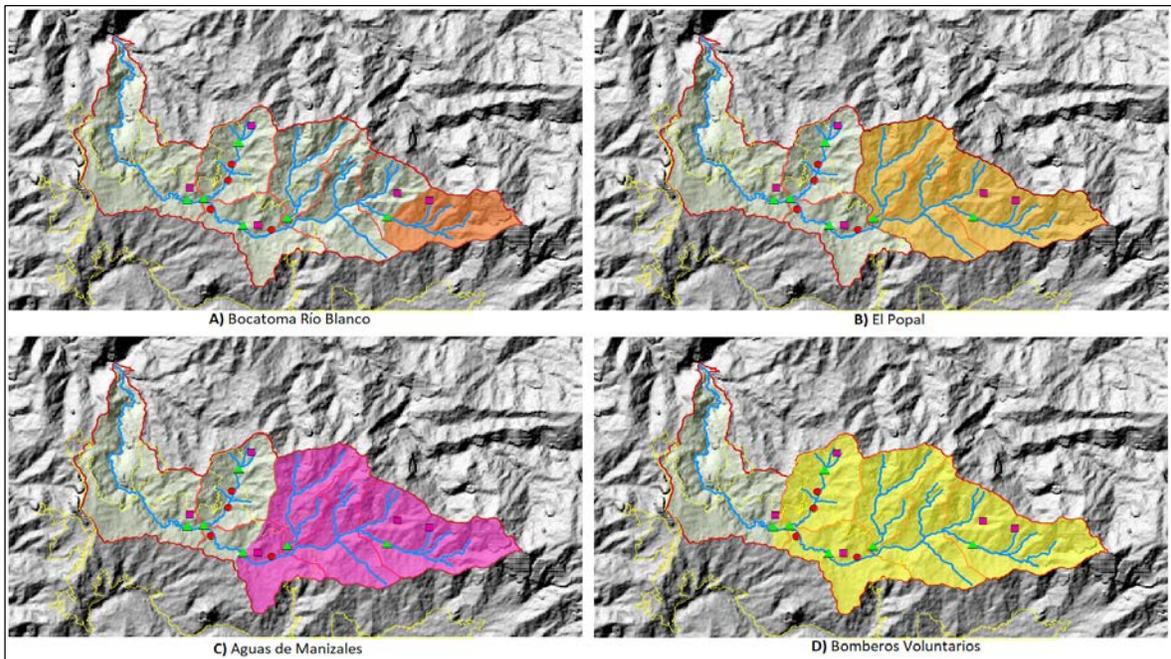


Figura 83. División subcuencas quebrada Olivares.

Con el fin de conocer el hidrograma en cada una de las estaciones hidrométricas de la quebrada Olivares, se realizó la división del área de estudio en varias subcuencas (determinadas por el área

de drenaje hasta cada una de las estaciones, como se muestra en la Figura 83. Seguidamente, para cada una de estas subcuencas se calcularon algunos parámetros fisiomorfométricos que permitan calcular los tiempos de concentración, registrados en la Tabla 6. Los tiempos de concentración fueron obtenidos a través de un promedio de los resultados, calculados para diferentes fórmulas empíricas propuestas por diversos autores, y eliminado los valores extremos que no representaban un valor físico coherente. A continuación, se muestran los resultados de los parámetros fisiomorfométricos y de los tiempos de concentración para cada una de las subcuencas.

Tabla 6. Parámetros fisiomorfométricos para las subcuencas Quebrada Olivares (cálculo del Tc)

Parámetro	Unidades	Subcuenca 1	Subcuenca 2	Subcuenca 3	Subcuenca 4
1. Area de la cuenca	A (Km ²)	5.40	19.03	22.42	29.58
	L (Km)	3.19	6.70	8.35	10.83
3. Pendiente Cuenca	S = J (adim)	0.27	0.18	0.15	0.13
	S(%)	27.17	17.88	15.33	13.16
4. Pendiente Cauce	So (%)	12.29	8.16	7.06	5.83
	So (adim)	0.12	0.08	0.07	0.06
5. Diferencia de elevación entre la divisoria de aguas y la salida	Z = H (m)	1062.81	1213.31	1254.32	1293.60
	H (pies)	3486.91	3980.68	4115.21	4244.09
6. Longitud del cauce principal	Lo (Km)	3.19	6.67	8.29	10.72
7. Alejamiento Medio	a=α=β	1.37	1.53	1.75	1.97
8. a=Constante, velocidad superficial	a (SCS)	3.24	3.24	3.24	3.24
9. Coeficiente de escorrentia	C	0.52	0.62	0.72	0.80
10. C. Rugosidad Manning	n	0.11	0.09	0.08	0.07
11. Coeficiente de retardo	m	0.25	0.25	0.25	0.25
12. Relación entre el área cubierta de vegetación y el área total de la cuenca (adim)	p	0.92	0.72	0.62	0.55

Desde la Figura 84 hasta la Figura 88 se muestran los resultados de los tiempos de concentración para cada una de las subcuencas. Se calcularon los Tc con 28 fórmulas propuestas por diversos autores, teniendo en cuenta solo los resultados con un valor físico aceptable para el cálculo del promedio. Se obtuvo que para la subcuenca Bocatoma Río Blanco el Tc es igual a 40 min, para El Popal Tc=45 min, Aguas de Manizales Tc=60 min, Bomberos Voluntarios Tc=65 min y Desembocadura Tc= 110 min.

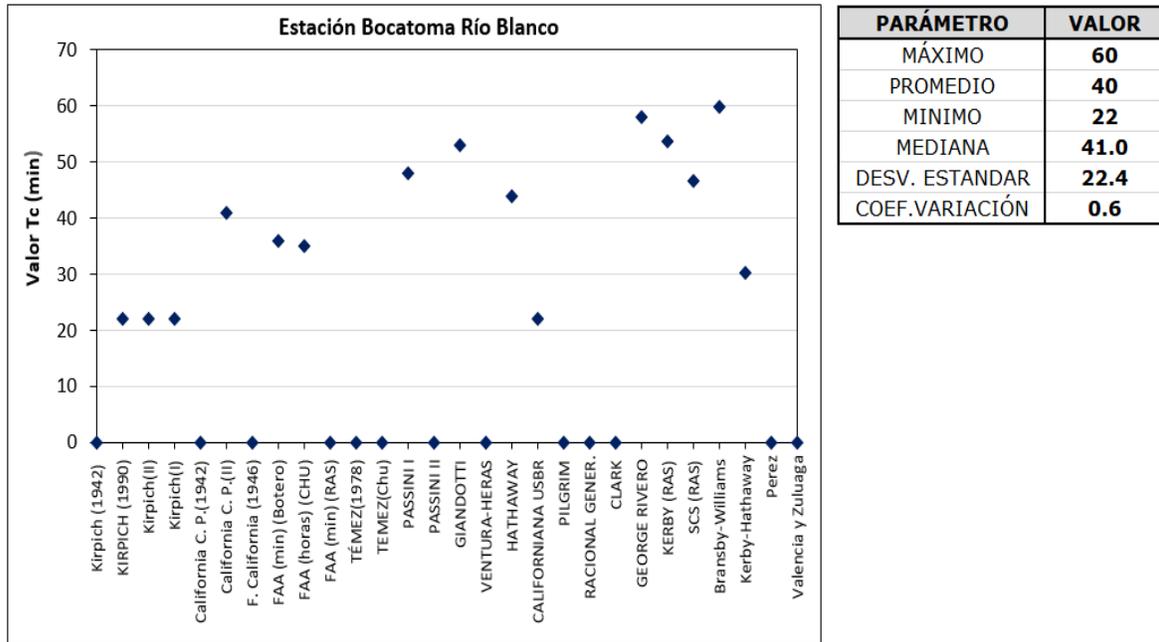


Figura 84. Resultados de tiempos de concentración para la estación Bocatoma Río Blanco.

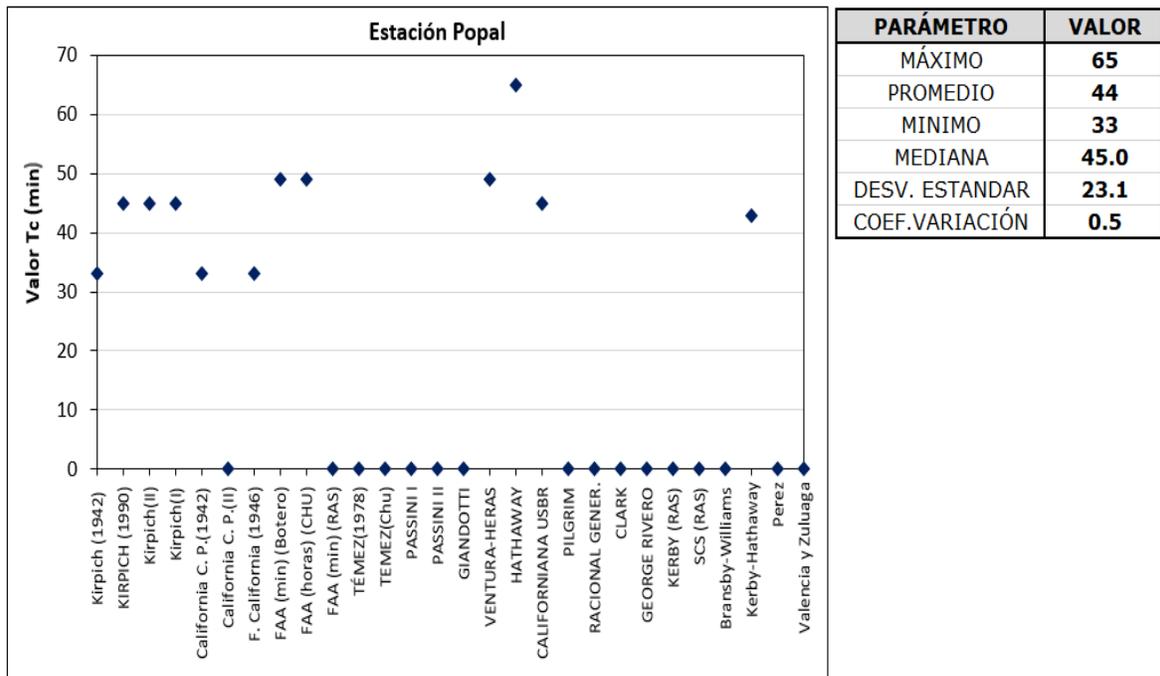
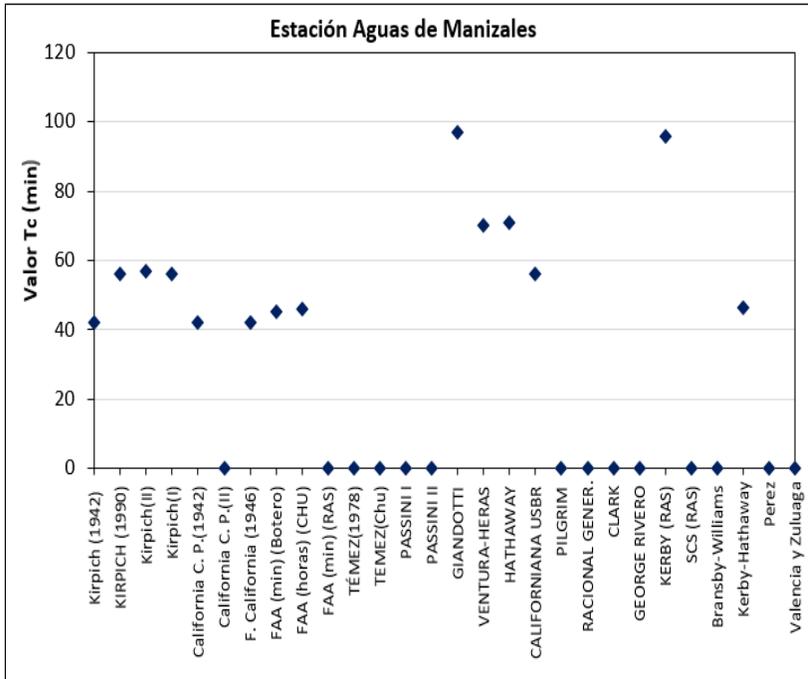
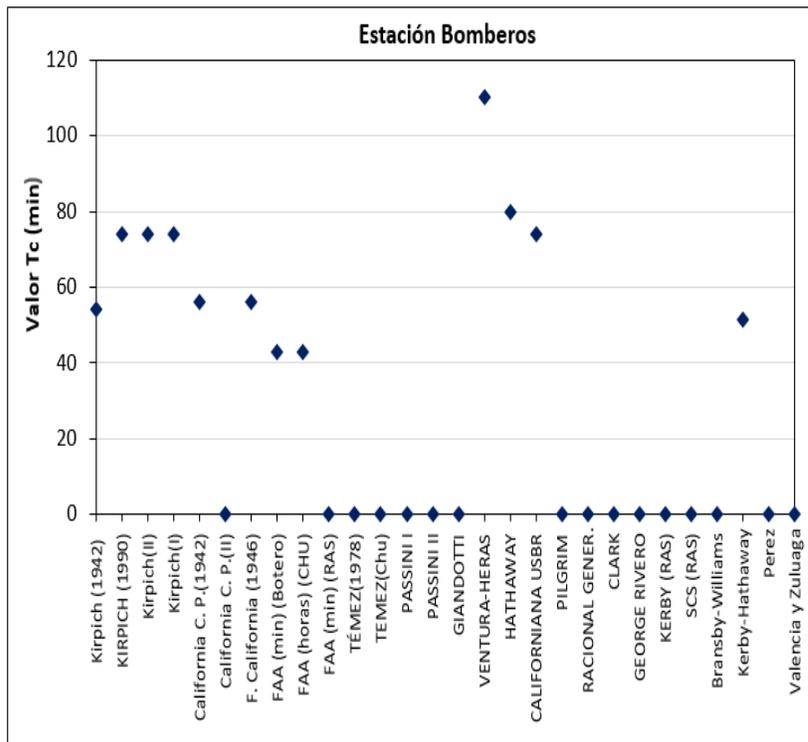


Figura 85. Resultados de tiempos de concentración para la estación Popal.



PARÁMETRO	VALOR
MÁXIMO	97
PROMEDIO	59
MINIMO	42
MEDIANA	56.0
DESV. ESTANDAR	32.6
COEF.VARIACIÓN	0.6

Figura 86. Resultados de tiempos de concentración para la estación Aguas de Manizales.



PARÁMETRO	VALOR
MÁXIMO	110
PROMEDIO	66
MINIMO	43
MEDIANA	65.0
DESV. ESTANDAR	35.3
COEF.VARIACIÓN	0.5

Figura 87. Resultados de tiempos de concentración para la estación Bomberos.

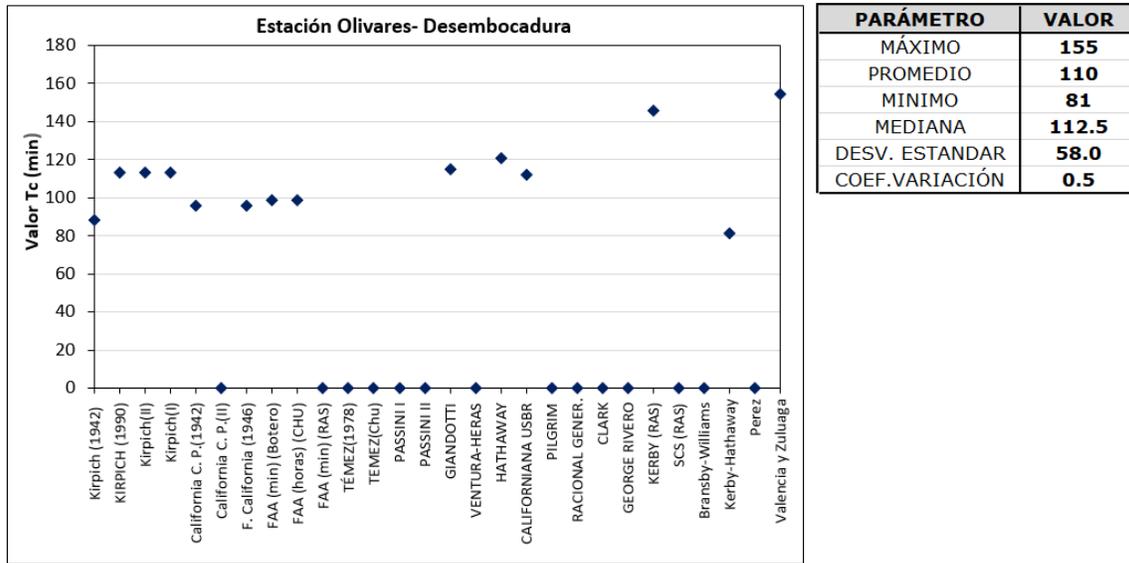


Figura 88. Resultados de tiempos de concentración para Olivares - desembocadura.

4.3 Tormentas de diseño para la cuenca Quebrada Olivares.

Las lluvias sintéticas correspondientes a los periodos de retorno modelados en TETIS se construyeron a partir de 3 patrones de distribución de precipitación. Cada uno de estos patrones busca la representación de un pico de intensidad en un instante diferente durante el evento de precipitación, es decir, cada patrón de lluvia tiene el pico de intensidad al inicio, mitad o final del evento de diseño. Finalmente, la duración del evento de diseño corresponde a los tiempos de concentración calculados anteriormente, bajo el supuesto: para un evento de esa duración, existe un aporte de escorrentía de toda la cuenca hasta el punto de interés. En la Figura 89 se muestra las curvas de distribución de la precipitación acumulada bajo las cuales se construyeron los diferentes hietogramas de diseño. Como se había mencionado anteriormente, los patrones de distribución fueron obtenidos a partir del estudio: “Descripción espacio temporal de la precipitación en la ciudad de Manizales (Colombia) para tormentas de diseño”, realizado por la Universidad Nacional de Colombia. Además, estás curvas de distribución se seleccionaron a partir de los resultados obtenidos para la estación Yarumos, la cual se encuentra sobre la parte media de la cuenca.

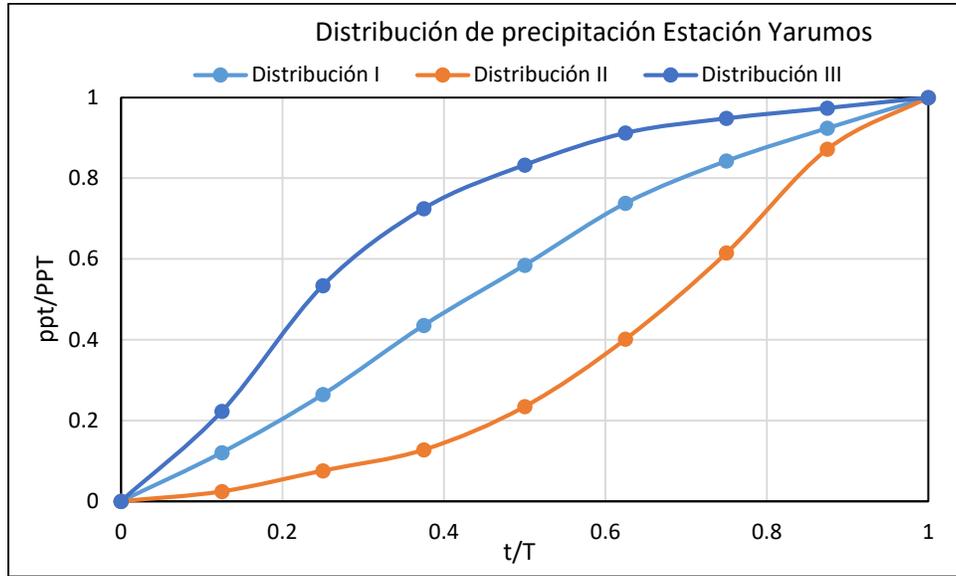


Figura 89. Distribuciones de precipitación para la Quebrada Olivares.

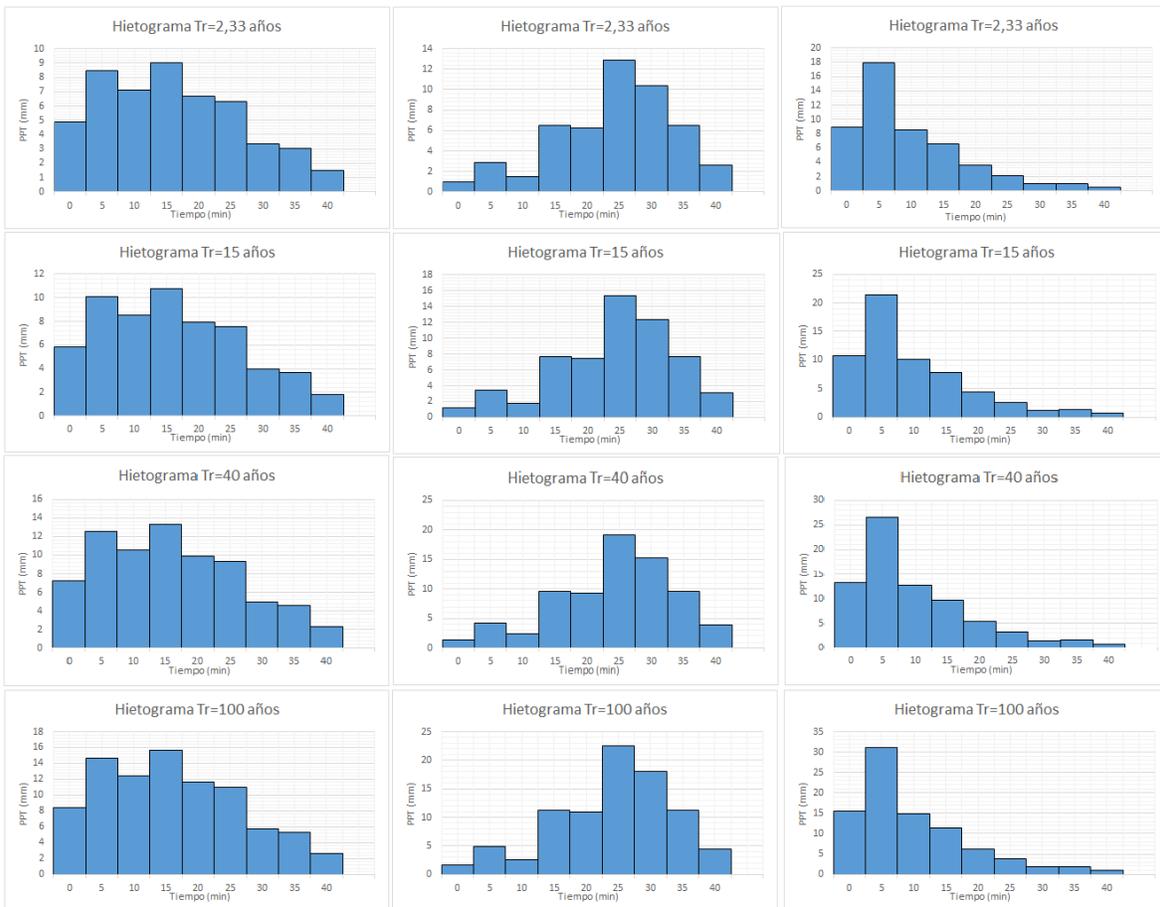


Figura 90. Hietogramas de diseño para Tr 2.33, 15, 40 y 100 años en la estación Bocatoma Río Blanco.

Los hietogramas de diseño modelados en TETIS bajo las consideraciones anteriores se muestran en la **Figura 90** (ejemplo para la estación Bocatoma Río Blanco). Se observa de izquierda a derecha el cambio en la distribución del pico de intensidad cincominutal de la precipitación; La distribución I se caracteriza por presentar una forma cuasi triangular con la mayor intensidad cincominutal en la mitad del evento, mientras que las distribuciones II y III presentan el pico de intensidad al principio y final del evento respectivamente. Las consideraciones anteriores se realizaron con el fin de modelar diferentes escenarios de lluvia para un evento de una misma duración y magnitud asociado a un periodo de retorno, que permita la evaluación de la respuesta de la cuenca en diferentes escenarios con cambios de intensidades de precipitación cincominutales.

4.4 Modelación Hidrológica cuenca Quebrada Olivares.

Una vez obtenido las tormentas de diseño para la cuenca de la quebrada Olivares, se procedió a realizar la modelación hidrológica con el fin de determinar el caudal generado en las estaciones Bocatoma Río Blanco, El Popal (parte alta de la cuenca), Aguas de Manizales y Bomberos Voluntarios (parte media de la cuenca) para los diferentes periodos de retorno de cada una de las distribuciones temporales de la precipitación y además bajos tres escenarios de condiciones de humedad antecedente (AMC).

La condición de humedad antecedente (AMC) busca representar los cambios en las condiciones de humedad del suelo inicial que afectan la sensibilidad y respuesta de la cuenca frente a los eventos de precipitación. Por lo tanto, se procedió a realizar las simulaciones correspondientes teniendo en cuenta tres escenarios de humedad antecedente; AMC I = condición de humedad antecedente para un periodo seco, AMC II = condición de humedad antecedente para un periodo normal y AMC III = condición de humedad antecedente para un periodo húmedo. Además, para cada uno de estos escenarios se simuló nuevamente las tres distribuciones de lluvia para los diferentes periodos de retorno, teniendo finalmente para cada estación 36 hidrogramas de salida. A continuación, se muestran los valores de los parámetros adoptados en TETIS para definir los estados iniciales en cada una de las simulaciones y los resultados obtenidos en el modelo TETIS:

Tabla 7. Parámetros Estado Inicial TETIS para cada condición de humedad Antecedente Olivares.

Parámetro	AMC I	AMC II	AMC III
H1- Almacenamiento estático	50	80	100
H2- Agua en superficie	0	0	0
H3- Almacenamiento gravitacional	10	10	10
H4- Estado inicial del acuífero	50	50	50
H5- Caudal en el cauce	20	50	100
H6- Intercepción por la vegetación	0	0	0

A continuación, se muestran los hidrogramas de salida del modelo TETIS para las diferentes estaciones, además los resultados obtenidos fueron afectados con un incremento del 40% con el fin de representar los flujos hiperconcentrados como se mencionó anteriormente en el procedimiento de la cuenca El Guamo.

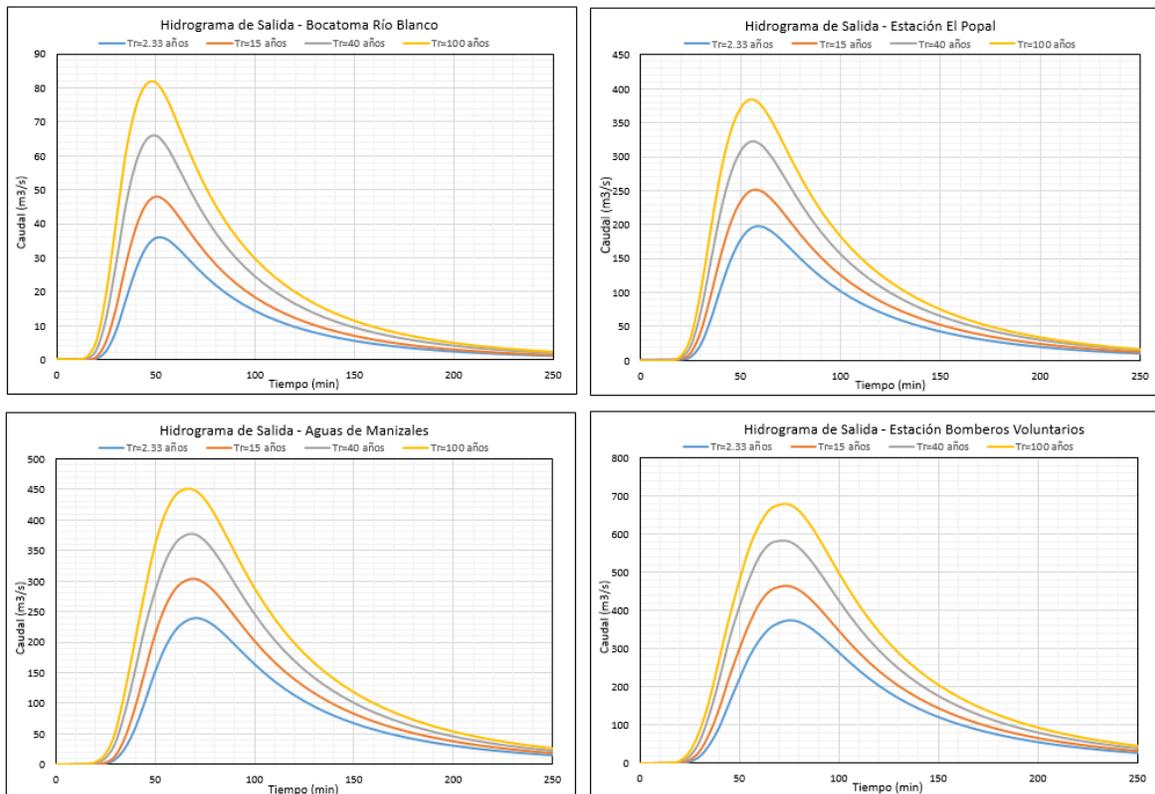


Figura 91. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC I y Distribución I.

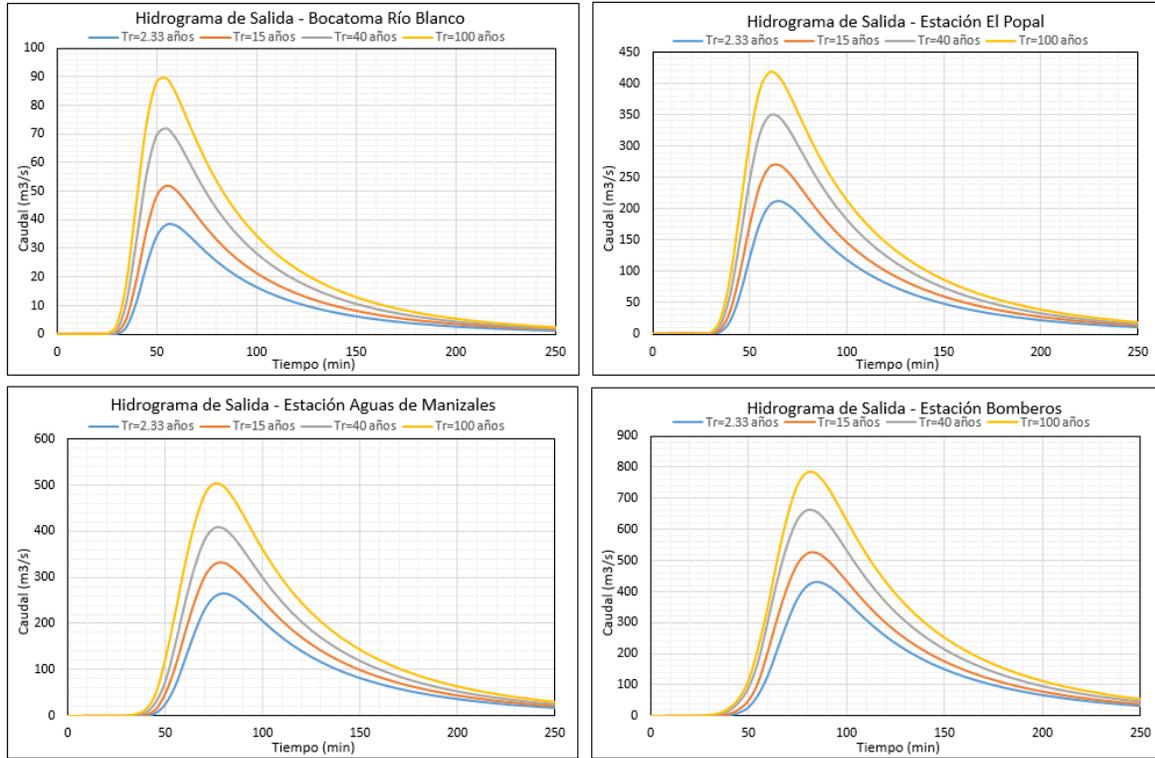


Figura 92. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC I y Distribución II.

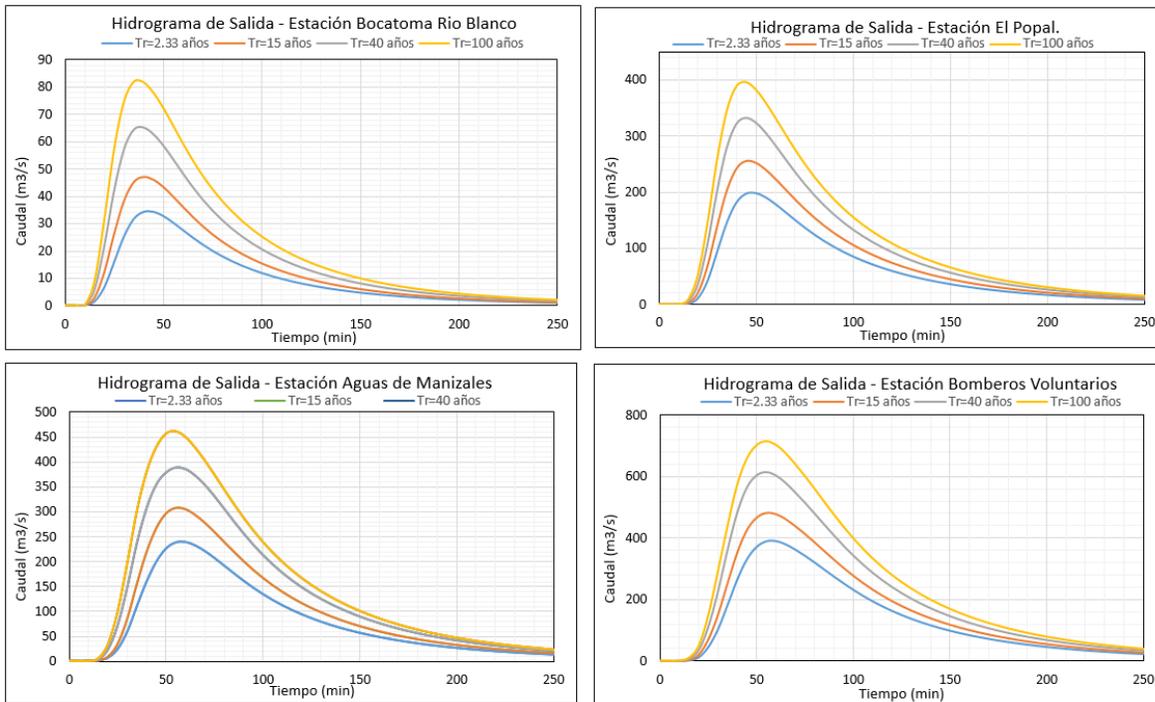


Figura 93. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC I y Distribución III.

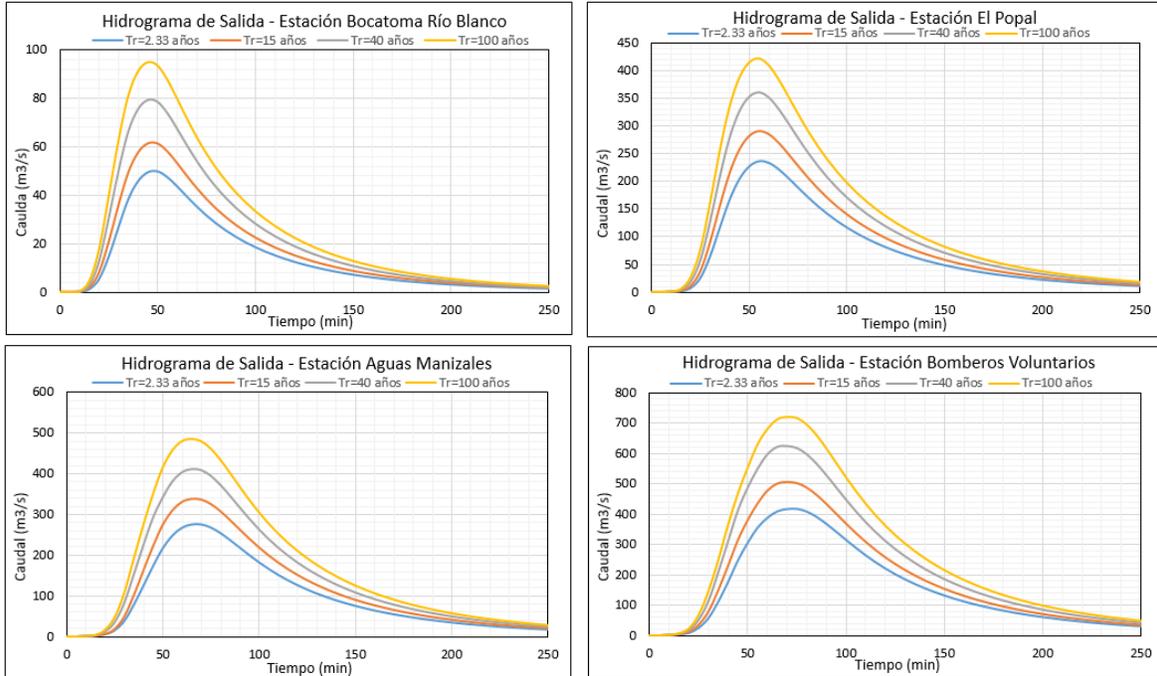


Figura 94. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC II y Distribución I.

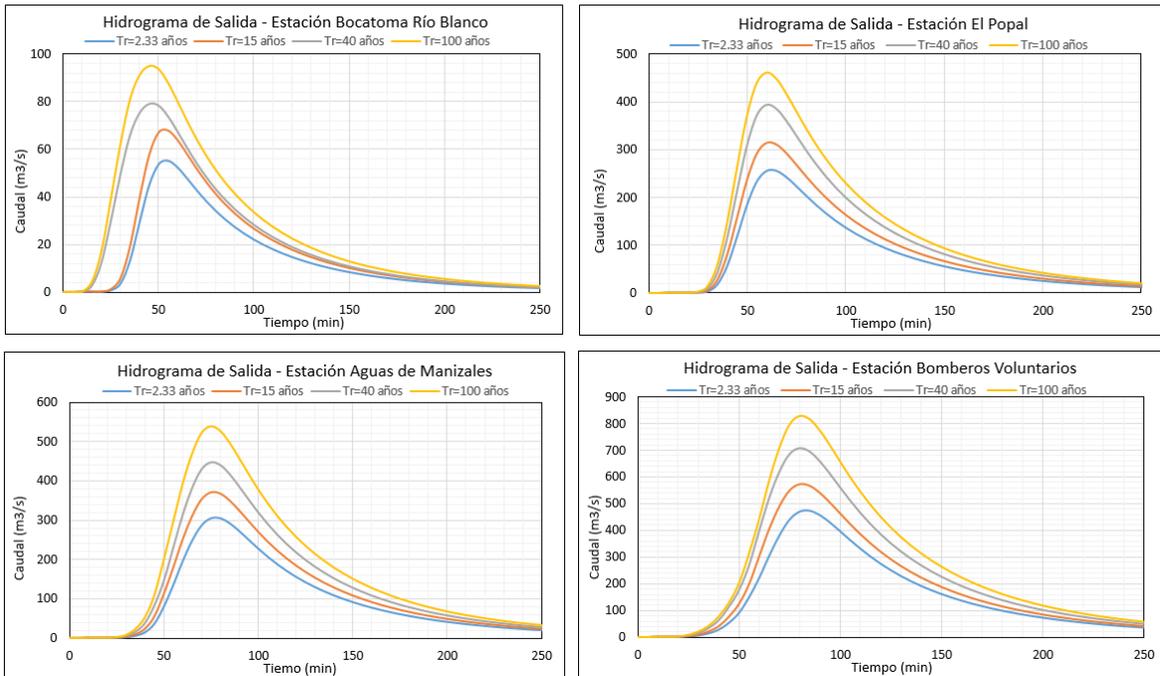


Figura 95. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC II y Distribución II.

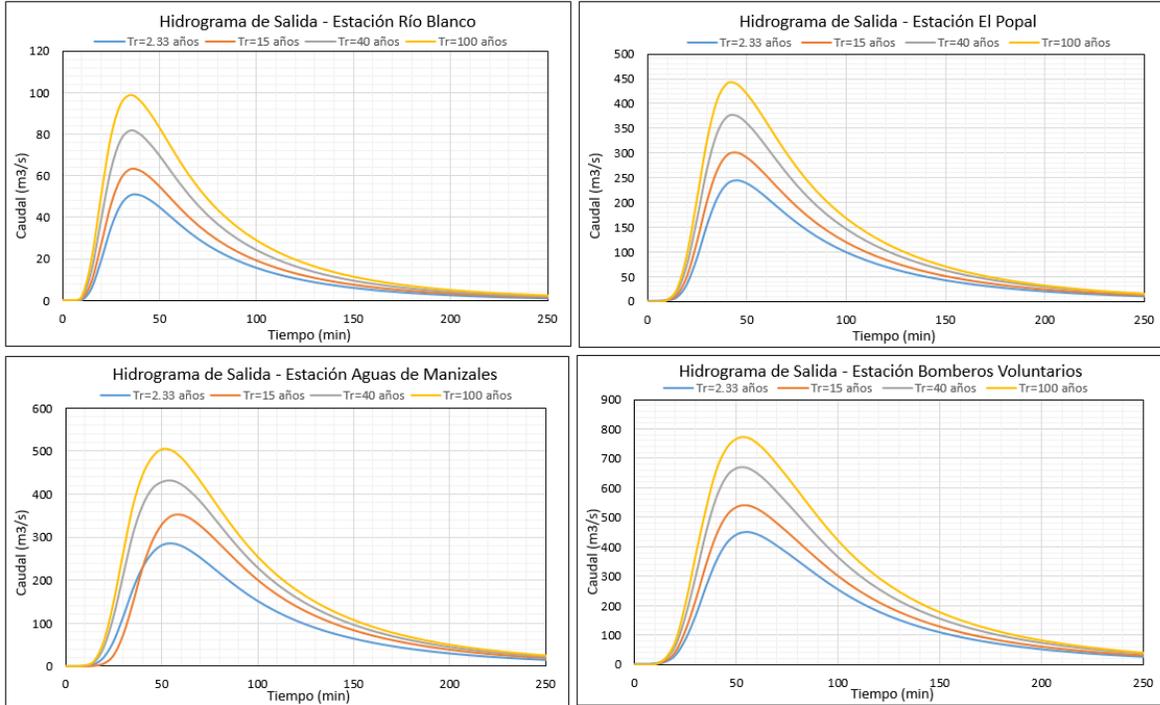


Figura 96. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC II y Distribución III.

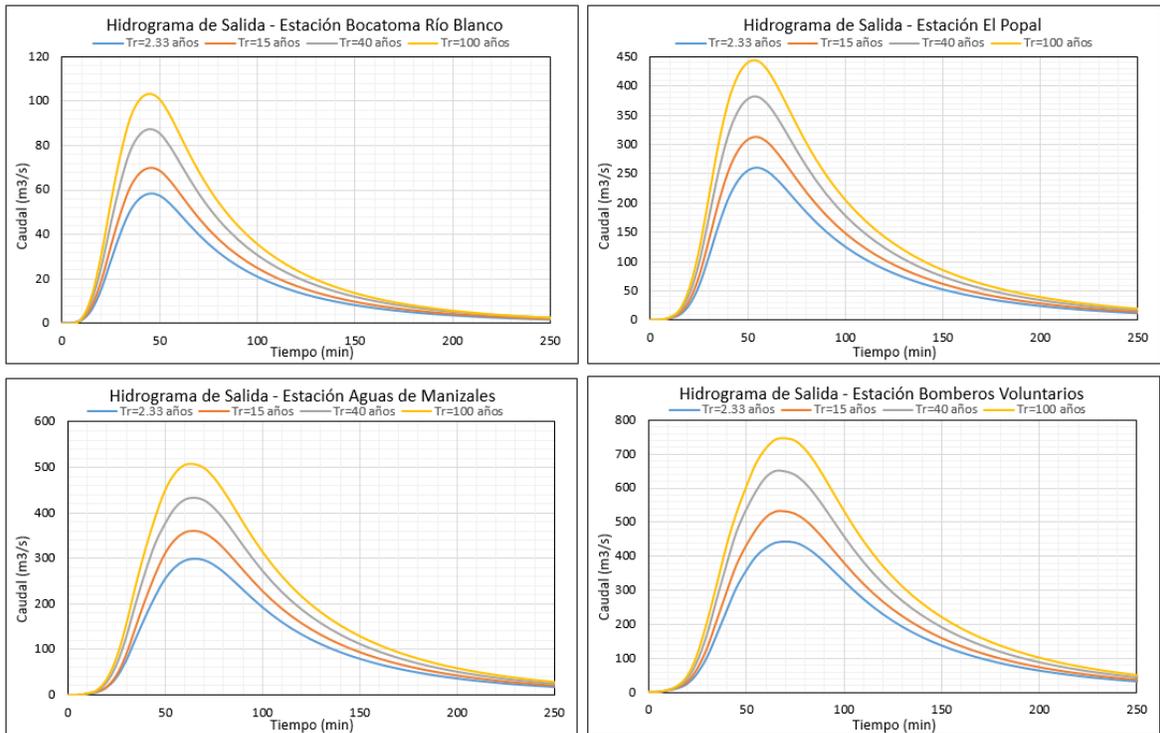


Figura 97. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC III y Distribución I.

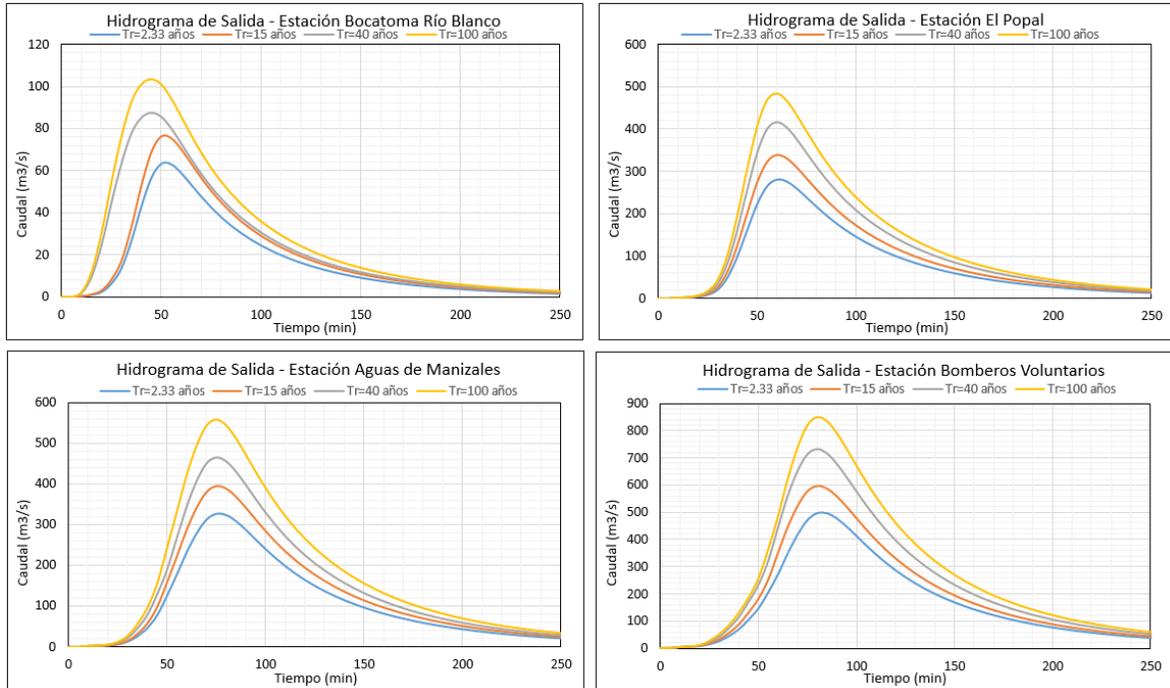


Figura 98. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC III y Distribución II.

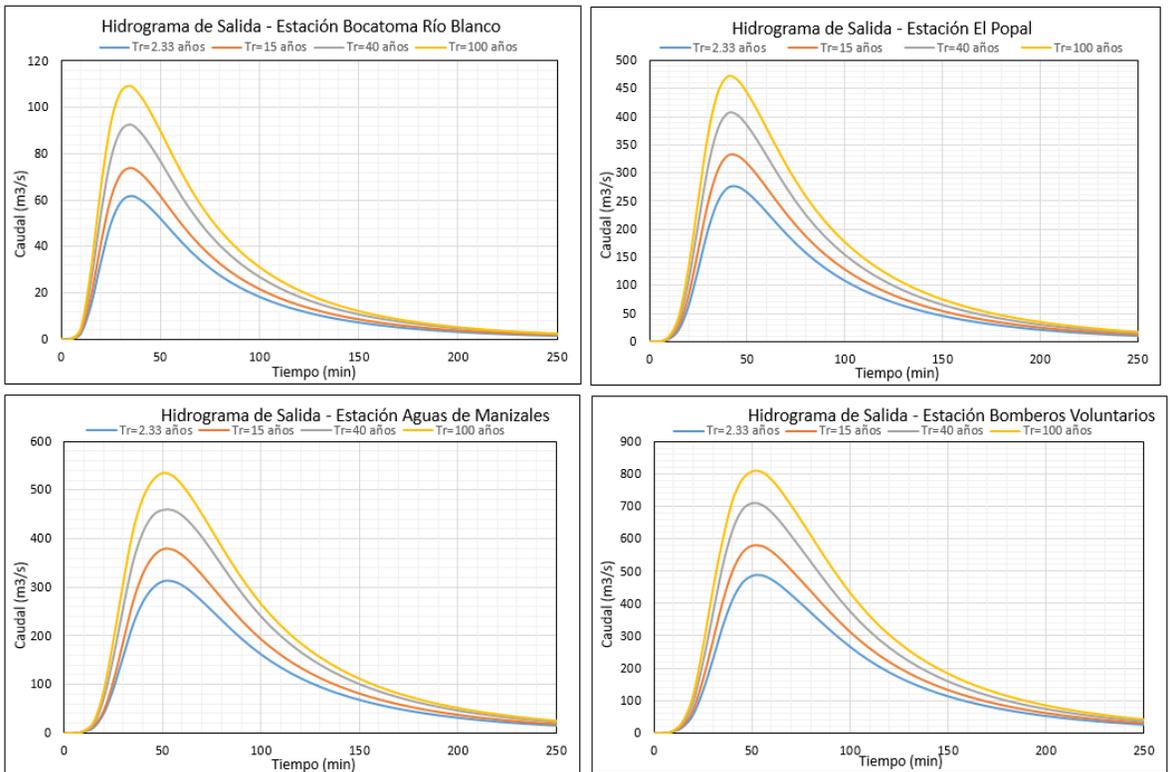


Figura 99. Resultados Modelación en TETIS para el escenario AMC III y Distribución III.

De los resultados obtenidos entre la Figura 91 y Figura 99 se puede observar que la respuesta de la quebrada es sensible a las variaciones en los cambios del patrón de precipitación, especialmente para la distribución 2. Esta distribución de precipitación se caracteriza por presentar las intensidades de lluvias de valores más altos sobre el final del evento, a diferencia de la distribución 1, en donde el evento inicia con una intensidad considerable y el pico de precipitación se produce aproximadamente a la mitad del evento. Además, las condiciones de humedad antecedente juegan un papel importante en la respuesta del caudal pico, y como es de esperarse se presentan mayores valores del caudal para la condición AMC III, correspondiente a condiciones de suelo saturadas.

4.5 Pre-proceso modelación hidráulica cuenca quebrada El Guamo.

Se procedió a digitalizar los diferentes usos del suelo de la quebrada y las riveras tomando como referencia el ortofotomapa de la ciudad de Manizales. Para cada uno de los tres tramos, se determinaron ocho clases de uso de suelo. Los valores seleccionados para el coeficiente de rugosidad “*n*” del lecho del cauce fueron determinados a partir de estudios de laboratorios correspondientes a ensayos de granulometría, realizados con anterioridad en consultorías para la quebrada Manizales [16]. Los valores para las demás clases de suelo fueron tomados de la literatura [17] haciendo una relación de las características que se pueden observar en el ortofotomapa.

A continuación, se muestran los valores supuestos para el *n* de Manning:

Tabla 8. Valores de *n* de Manning para los diferentes usos del suelo de la quebrada Olivares.

Clase del suelo	<i>n</i> Manning
Bosques	0.100
Infraestructura	0.018
Pastos	0.040
Arbustos	0.060
Lecho del cauce	0.035
vía en afirmado	0.025
Vía pavimentada	0.015
Suelo Finos	0.025



Figura 100. Definición de tramos quebrada Olivares para la modelación hidráulica.

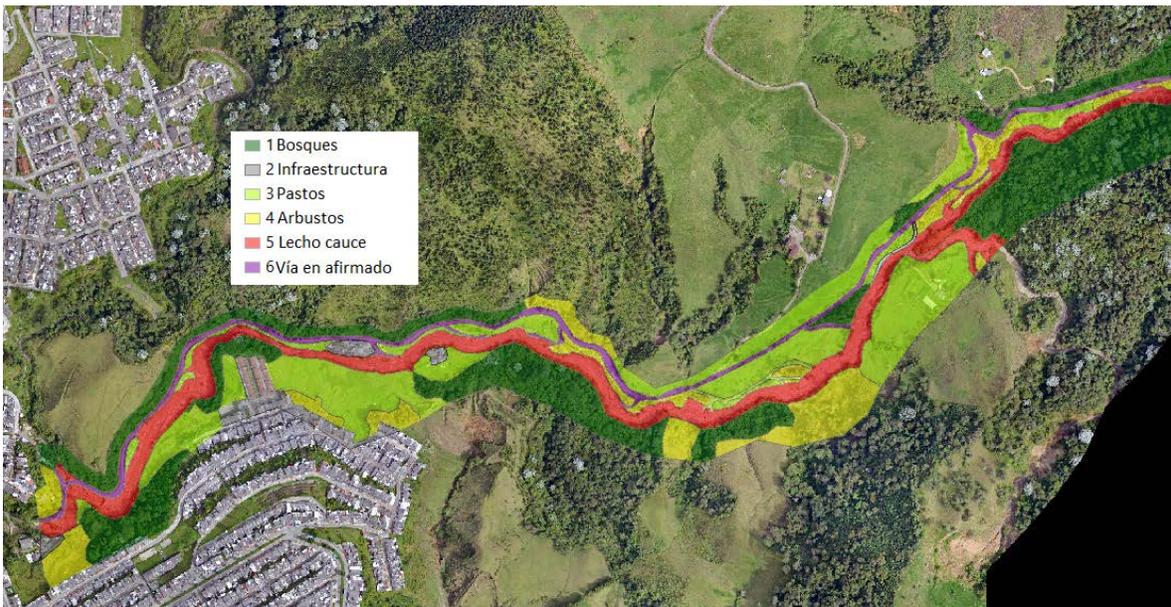


Figura 101. Mapa usos del suelo para el Tramo 1 quebrada Olivares.



Figura 102. Mapa usos del suelo para el Tramo 2 quebrada Olivares.

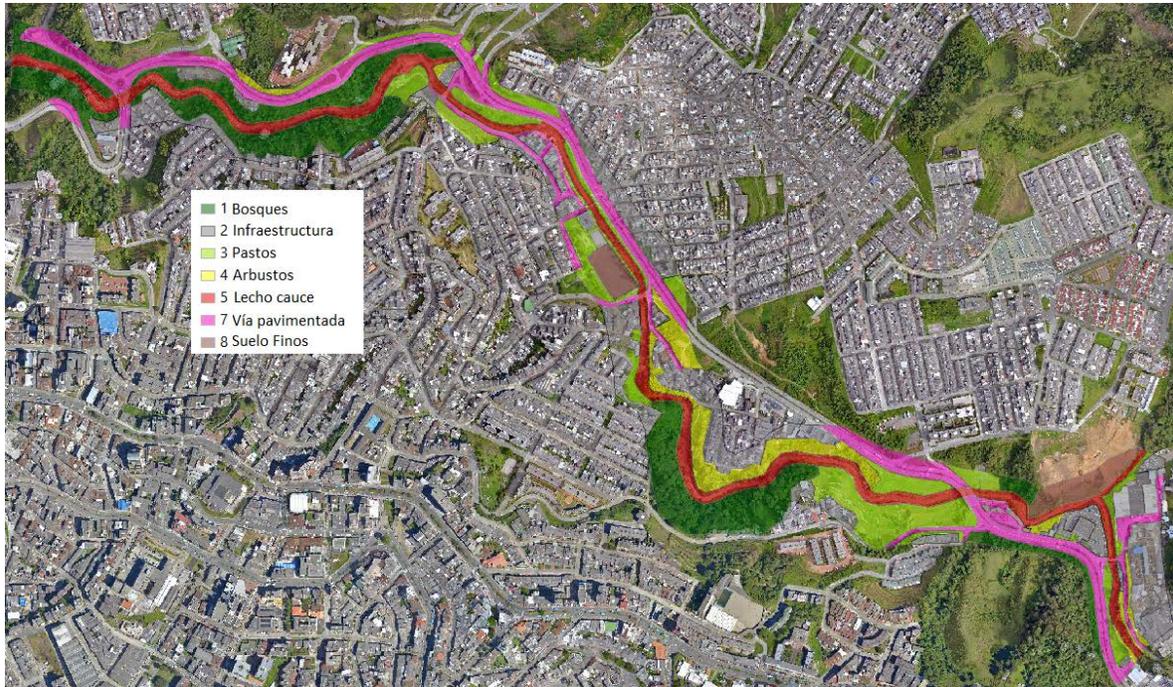


Figura 103. Mapa usos del suelo para el Tramo 3 quebrada Olivares.

Las gráficas 100 a 103 muestran los diferentes usos del suelo para cada uno de los tramos. El tramo 1 no presenta características de urbanización y por lo tanto predominan zonas de bosques, pastos para ganadería y arbustos. Además, se observa un ancho del cauce mayor en comparación a los otros tramos. El tramo 2 por el contrario corresponde al inicio de la parte urbana de la quebrada, y se tiene zonas de pastos y arbustos sobre las franjas de la quebrada seguido de vías pavimentadas e infraestructura. Por último, el tramo 3 presenta un patrón similar al anterior, especialmente en el sector de Canchas de Comfamiliares, aunque es importante resaltar que al final del tramo se presenta nuevamente un encajonamiento del cauce, y debido a las abruptas pendientes de los márgenes vuelven las zonas de vegetación densa.

Una vez establecido los mapas de uso del suelo, se procedió a crear el modelo digital de elevación del terreno MDT de cada uno de los tramos. Cada MDT fue creado a partir del levantamiento LIDAR de la ciudad de Manizales con resolución de 1.00 m. El software IBER permite la creación del MDT en una estructura mallada irregular en donde se determinaron los siguientes parámetros: Lado mínimo del elemento de la malla = 1.00 m, lado máximo del elemento de la malla = 10.00 m, tolerancia en $z = 0.05$ m. A continuación, se muestran los MDT de cada uno de los tramos.

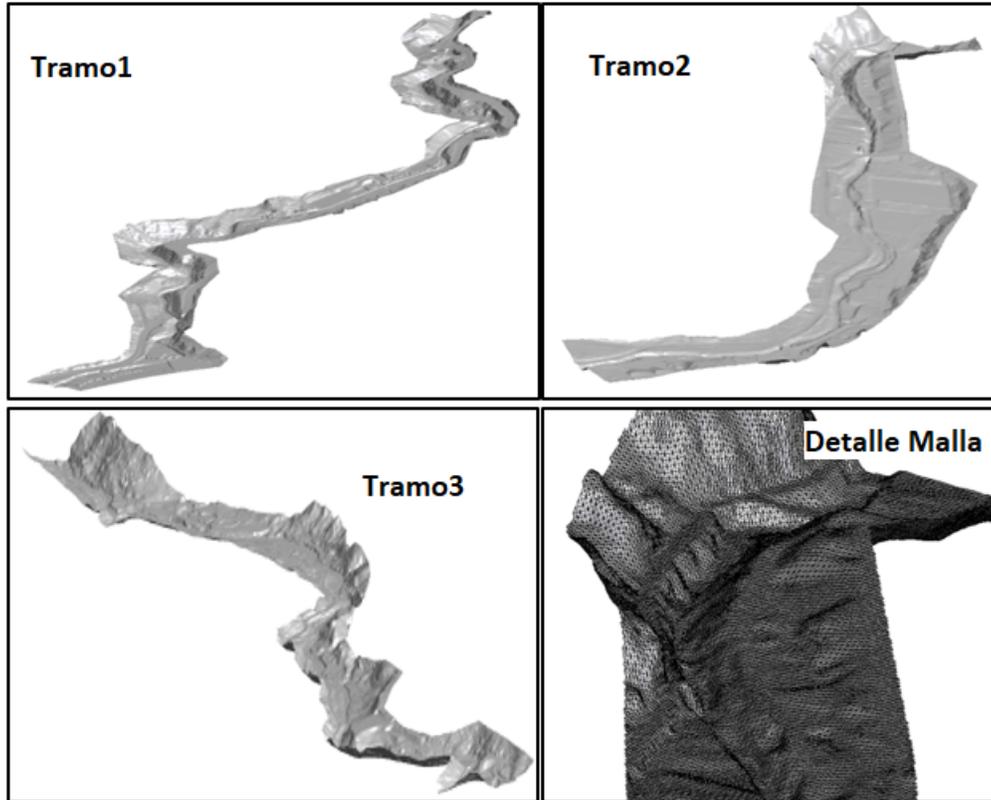


Figura 104. Mallado en IBER del modelo digital de elevación para los diferentes tramos de la quebrada Olivares.

Una vez obtenido la malla no estructurada que representa el relieve de cada uno de los tramos, se procedió a realizar las siguientes correcciones en los MDT:

- Se modificó la altura del MDT correspondiente a las edificaciones cercanas al cauce en cada uno de los tramos. Para lo anterior, se digitalizó un *shapefile* con las zonas donde existían viviendas y se le asignó una altura superior a la cota del terreno (se supuso una altura promedio de 3.00m por encima del nivel de terreno). El *shapefile* fue rasterizado y convertido a archivo ASCII con el fin de modificar los nodos de la malla del terreno en donde se encuentran ubicadas las viviendas y con esto realizar una representación más fiel del MDT con respecto a la realidad. La *Figura 105* muestra el proceso de digitalización y resultado final en la modificación del modelo digital del terreno.
- Algunas zonas del cauce fueron modificadas, en especial, zonas en donde existen puentes y vegetación densa. Estas zonas se caracterizan por incrementos localizados en las cotas del relieve que generan una obstrucción del cauce (similar a un vertedero), influyendo en el comportamiento del flujo y por lo tanto en la obtención de resultados erróneos. El proceso

para la corrección de estas elevaciones consiste en el cálculo de la pendiente local del cauce a partir de la identificación de dos nodos de la malla, y luego asignándole de forma manual los nuevos valores de z a cada uno de los nodos que se encuentran sobre estas obstrucciones. La *Figura 106* muestra un ejemplo del antes y después del MDT con la corrección de estas zonas.

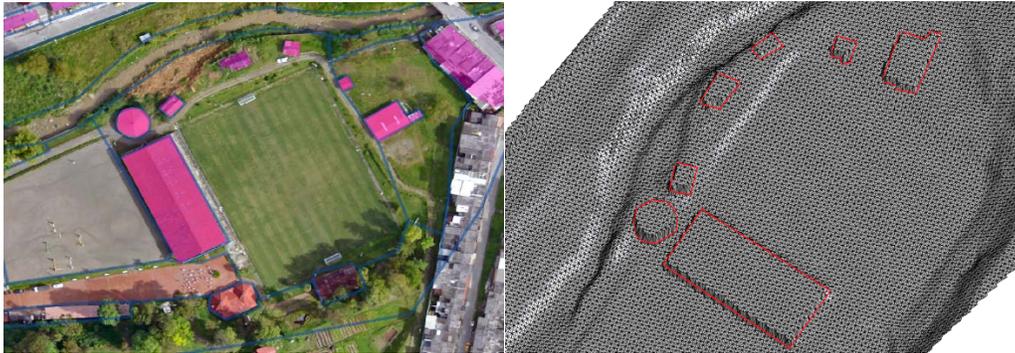


Figura 105. Ejemplo corrección malla MDT por viviendas del Tramo 2- sector Carabineros.

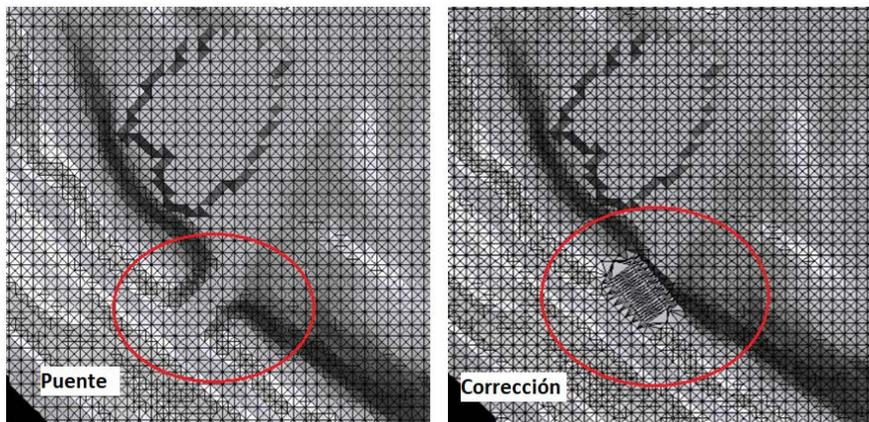


Figura 106. Ejemplo corrección malla MDT por obstrucciones tramo 3 – Sector puente vía El Guamo.

El procesamiento de la información anterior permitirá realizar la modelación hidráulica de cada uno de los tramos en el software bidimensional IBER, definiendo la configuración necesaria para realizar la modelación en régimen no permanente que pueda representar y arrojar resultados de manera adecuada para los diferentes hidrogramas de diseño establecidos en la modelación hidrológica.

4.6 Modelación hidráulica quebrada Olivares.

Como se indica en la *Figura 107*, la quebrada Olivares fue dividida en 3 tramos para simular el incremento de la escurrentía a medida que aumenta el área de drenaje de la cuenca, además, el

criterio para la división de estos tramos se basó en identificar, en la medida de lo posible, que las condiciones de frontera de cada uno de los tramos no influyan de manera significativa en el comportamiento hidráulico; en zonas de interés o estructuras de control, y que finalmente las condiciones de frontera coincidan con la ubicación de las estaciones hidrométricas a través de la de la quebrada. El primer tramo corresponde desde la estación Bocatoma-Río Blanco hasta la estación El Popal, El segundo tramo inicia en la bodega el Popal de Aguas de Manizales y finaliza cercano a al puente de la calle 64 (Aguas de Manizales), y finalmente el tramo 3 iniciando desde el punto anterior hasta la estación Bomberos Voluntarios (pasado el puente vía Neira).

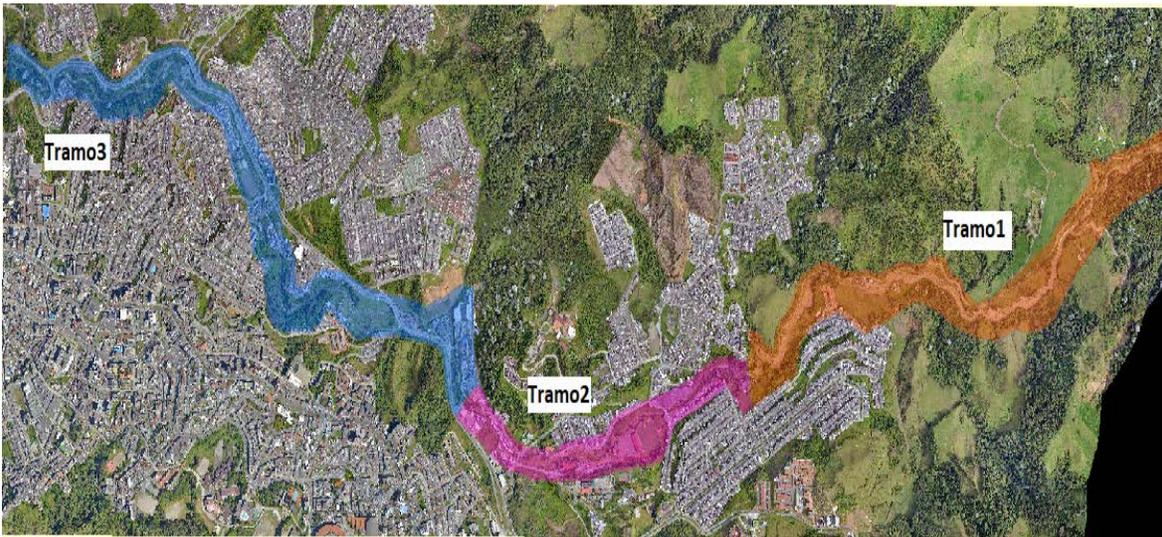


Figura 107. Delimitación de los tramos para la modelación hidráulica de la quebrada Olivares.

Utilizando el modelo hidráulico bidimensional IBER, se construyó para cada uno de los tramos: a) la topografía representada por una malla no estructurada de elementos finitos a partir del DEM en formato ASCII obtenido del LIDAR de Manizales con resolución 1.00m, así mismo, b) se ingresó al modelo los mapas de uso del suelo también en formato ASCII, c) se estableció las dimensiones de las estructuras hidráulicas como box culverts y puentes a través del módulo de hidrodinámica con el que cuenta el software, d) se modificó malla del DEM adicionando las alturas de las edificaciones por medio de un formato ASCII propio y finalmente, e) se definieron los elementos de la malla correspondiente a las condiciones de contorno para las entradas (hidrogramas) y salidas.

Una vez determinado y definido el régimen de flujo para las condiciones de contorno, también se definió el tiempo máximo de simulación del problema con un valor promedio de 25000 segundos, con un intervalo de resultados de 60 segundos. Así mismo, se optó por un esquema numérico de

primer orden para la solución de las ecuaciones de Saint Venant (por el método de aguas someras para la condición bidimensional). Por lo anterior, el tiempo promedio de simulación para cada uno de los tramos y cada hidrograma de entrada correspondiente a cada uno de los diferentes periodos de retorno (TR=2.33, 15, 40 y 100 años) tardó entre 10 y 12 horas. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones en IBER, en donde se indican las márgenes de inundación para cada tramo, así como los calados máximos alcanzado por la lámina de agua y velocidades del flujo.

4.6.1 Resultados modelación hidráulica Tramo 1.

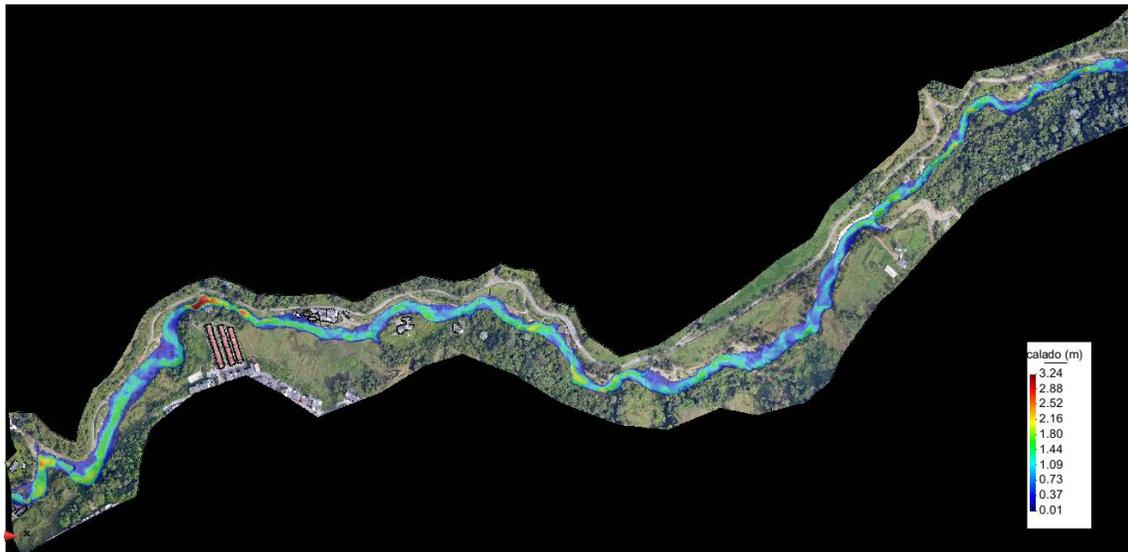


Figura 108. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=2.33 años. Mapa de calados máximos.

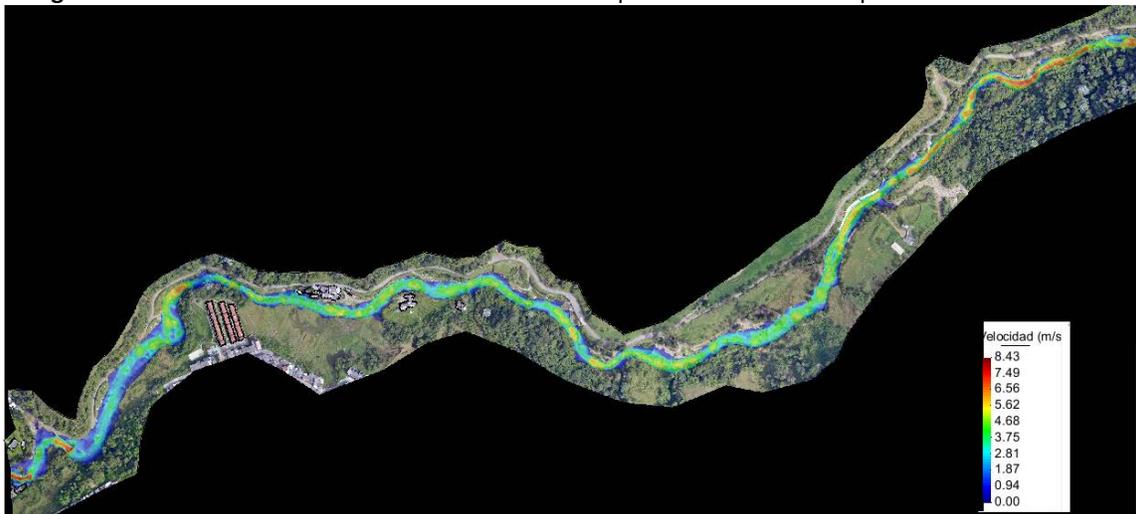


Figura 109. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=2.33 años. Mapa de velocidades.

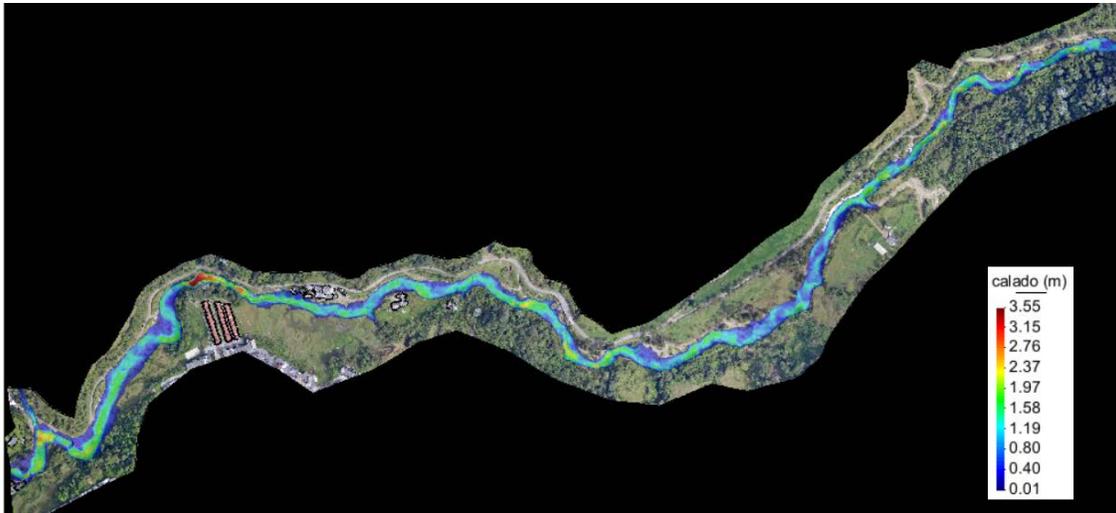


Figura 110. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=15 años. Mapa de calados máximos.

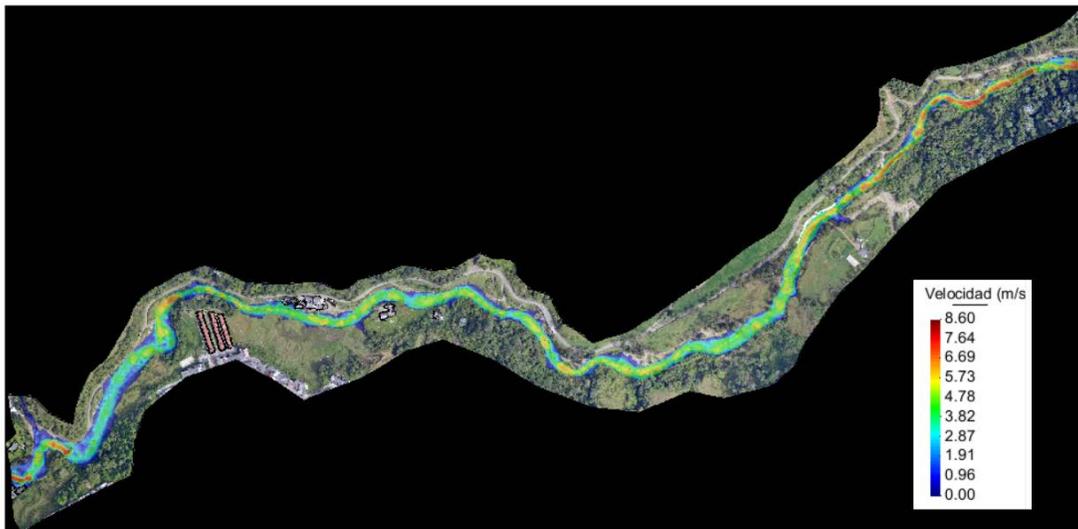


Figura 111. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=15 años. Mapa de velocidades.

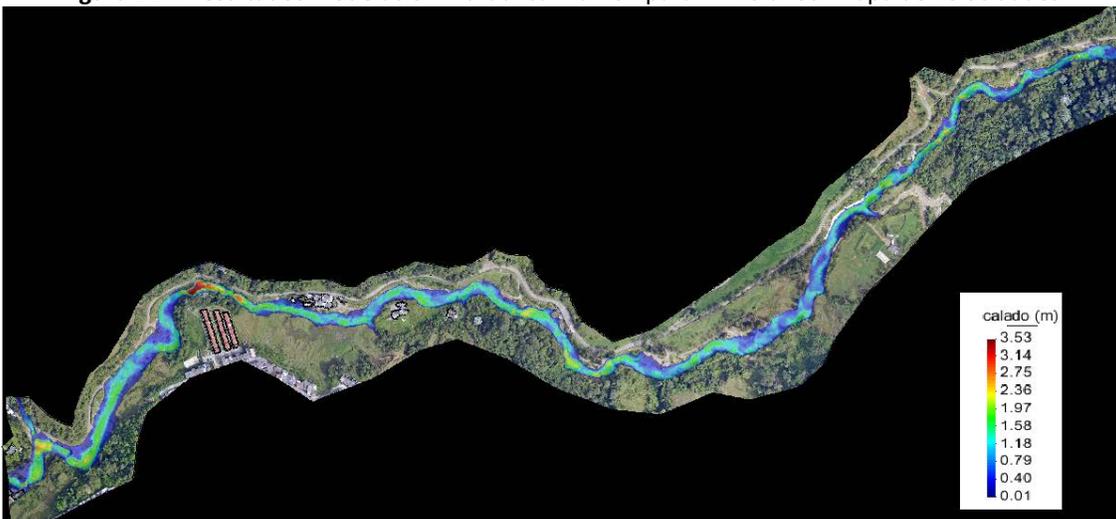


Figura 112. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos.

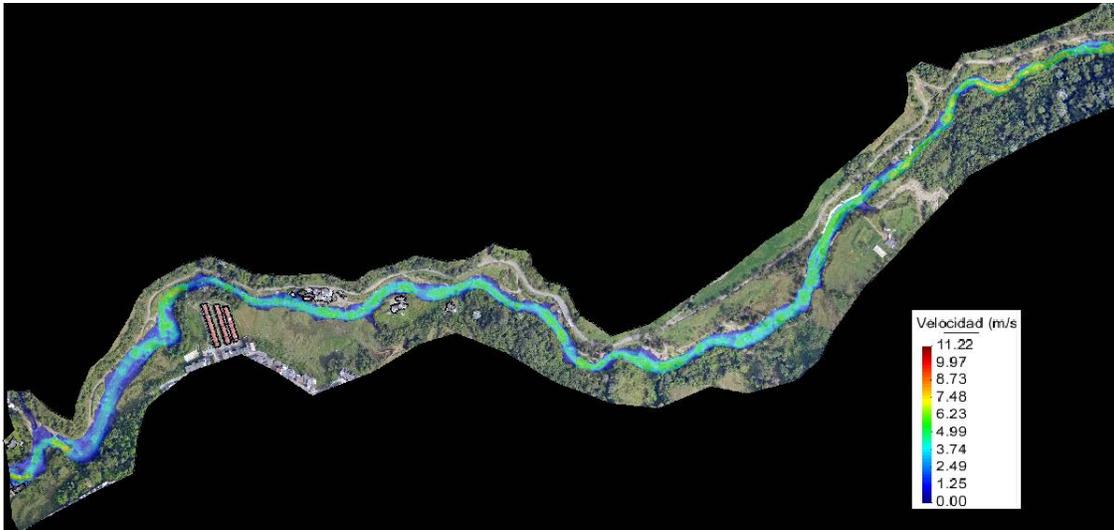


Figura 113. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=40 años. Mapa de velocidades.

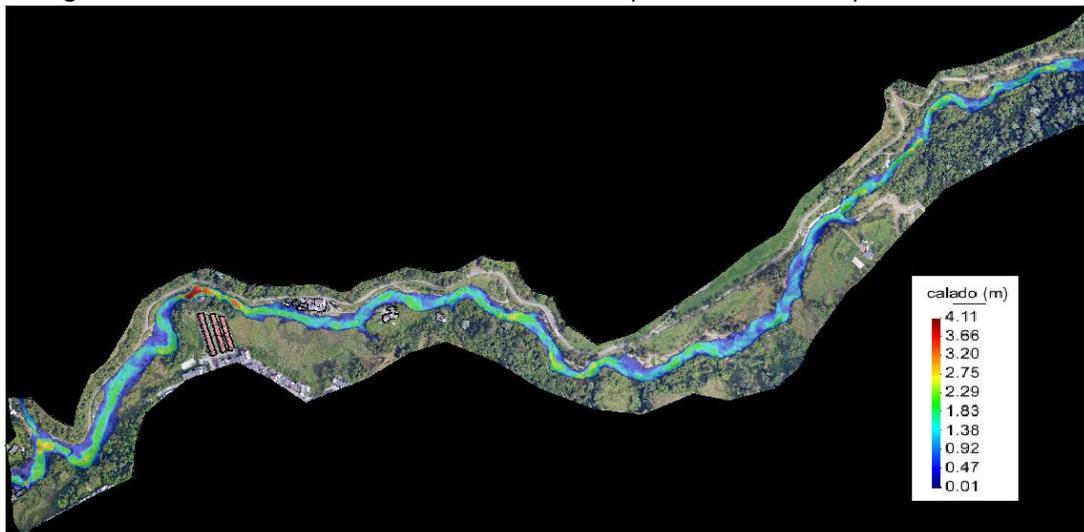


Figura 114. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para Tr=100 años. Mapa de calados máximos.

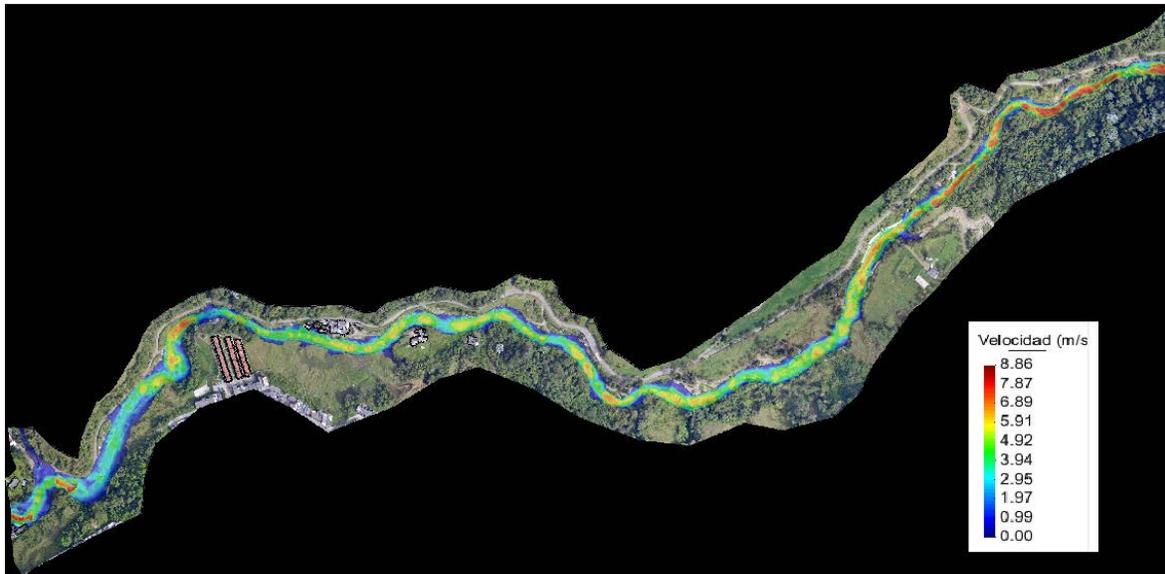


Figura 115. Resultados modelación hidráulica Tramo1 para $Tr=100$ años. Mapa de velocidades.

En las Figura 108 a Figura 115, se muestran los mapas de las márgenes de inundación obtenidos en el modelo IBER para el tramo 1 de la quebrada Olivares, correspondientes a los periodos de retorno de 2.33, 15, 40 y 100 años respectivamente. Se observa que para un $Tr=2.33$ años, el tramo no presenta afectaciones a la infraestructura (existen pequeñas zonas de vivienda cercanos al cauce), alcanzando un calado máximo en algunas zonas de estrechamiento del canal de 3.20m, y en promedio de 1.80m, debido en parte, que para este tramo la sección transversal de la quebrada se caracteriza por tener una forma de V, correspondiente a una clasificación aproximada de Rosgen A3, y por lo tanto, no permitiendo el desbordamiento del flujo, a excepción de pequeñas zonas de inundación (*floodplain pockets*). Para el $Tr=15$ años, se observa que los incrementos del calado se acercan considerablemente a zonas críticas y debido al incremento en la velocidad del flujo, se supone una mayor capacidad de erosión en las paredes del canal que afectan directamente a las casas cercanas ubicadas sobre las pequeñas zonas de inundación presentes (*floodplain pockets*). Para los $Tr=40$ y 100 años se observa que los floodplan pockets funcionan como una zona de amortiguamiento de la creciente, permitiendo que esta zona de inundación evite un incremento considerable de los niveles en las zonas donde se encuentran el caserío. Sin embargo, se evidencia que los niveles del agua alcanzan la cota sobre las cuales se encuentran las casas al final del tramo y adicionalmente las velocidades del flujo en esta zona incrementan la posibilidad de deslizamiento de las paredes del canal y por lo tanto una desestabilización de las viviendas, además, debido a los

materiales y sistemas de construcción precarios de estas viviendas, aumenta la probabilidad de colapso de las mismas.

4.6.2 Resultados modelación hidráulica Tramo 2



Figura 116. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=2.33 años. Mapa de calados máximos.

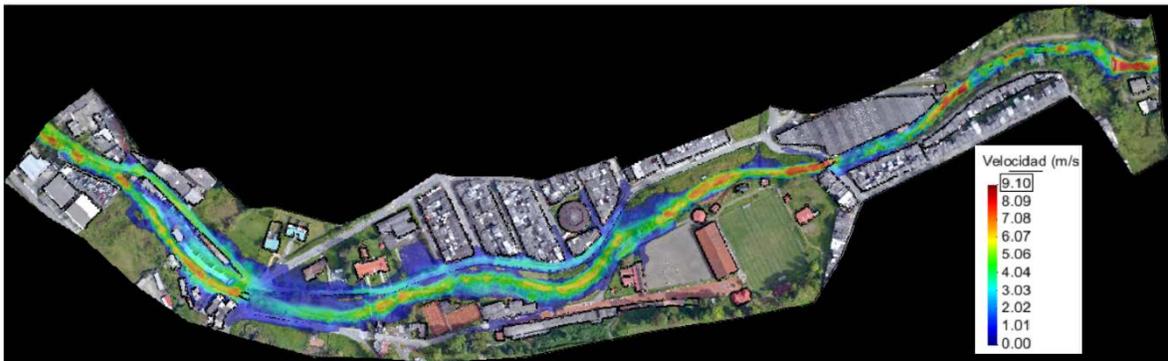


Figura 117. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=2.33 años. Mapa de velocidades.



Figura 118. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=15 años. Mapa de calados máximos.

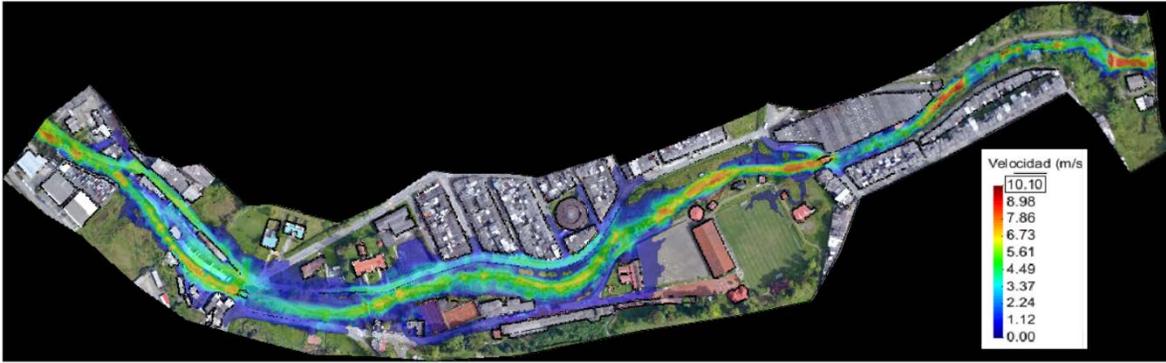


Figura 119. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=15 años. Mapa de velocidades.

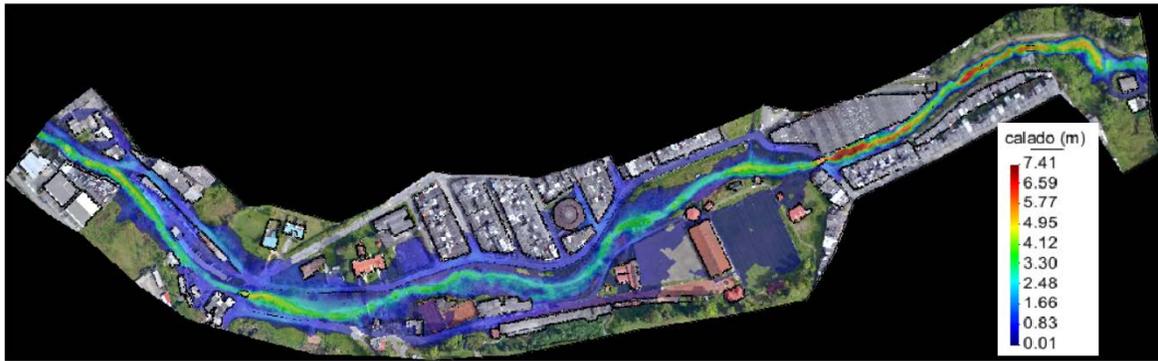


Figura 120. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos.

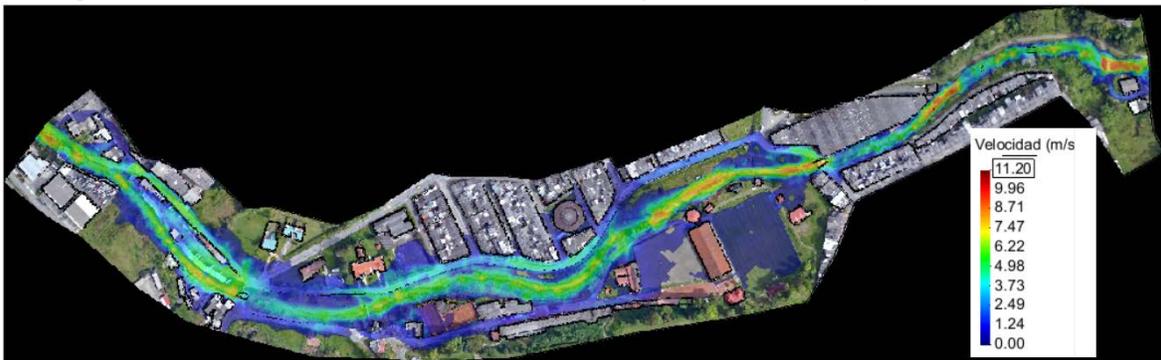


Figura 121. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=40 años. Mapa de velocidades.

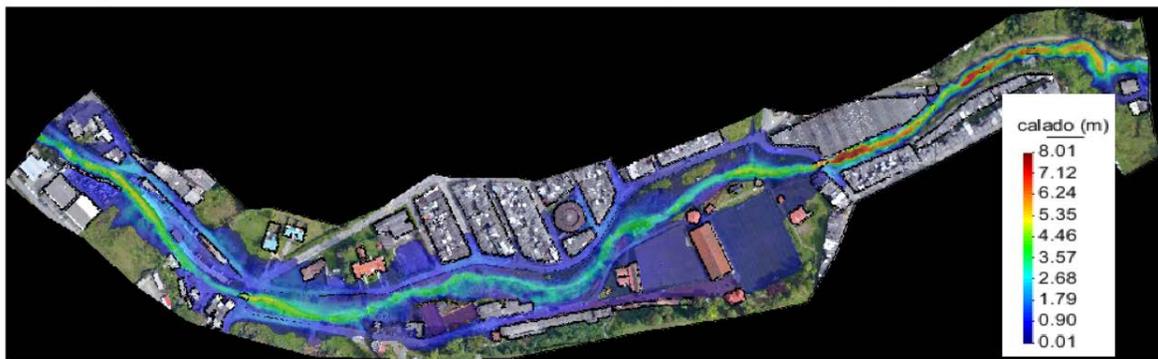


Figura 122. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=100 años. Mapa de calados máximos.

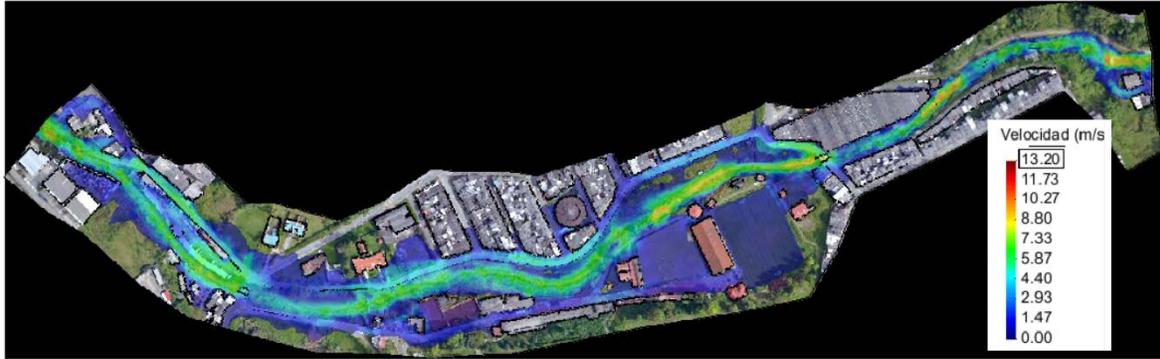


Figura 123. Resultados modelación hidráulica Tramo2 para Tr=100 años. Mapa de velocidades.

El tramo 2 muestra una inundación generalizada para el sector de la Escuela Carabineros de la Policía Nacional de Colombia, esta inundación se produce debido a la presencia de puentes tanto al inicio como al final de la zona. Para el Tr=2.33 años se observa que existe una inundación moderada sobre las instalaciones de la Escuela de carabineros, así como la vía de la calle 64. Sin embargo, en la realidad esta inundación se puede atenuar en parte, debido a la presencia del cerramiento que existe sobre esta zona y que presenta dificultades para modelarlo en el software. A medida que aumentan los periodos de retorno y por ende el caudal, se observa como la margen de inundación crece y afecta de manera considerable a la cancha de futbol de carabineros, así como las calles cercanas y en especial el sector de los lavaderos de autos ubicados después del puente de la calle 64.

En cuanto a los mapas de velocidades, se tiene un incremento considerable en los sectores de estrechamiento del canal que corresponden principalmente a los puentes anteriormente mencionados. Así mismo, se evidencia que a medida que incrementa el periodo de retorno, también lo hace la velocidad del flujo, lo que supone un aumento en su energía cinética y por tanto un alto riesgo para la población. Finalmente, se puede concluir que de forma general las instalaciones de la Escuela de Carabineros se encuentran sobre una de las *floodplain pockets* que presenta la quebrada Olivares, y por lo tanto esta zona y sus aledaños interfieren en su función de amortiguamiento de las avenidas.

4.6.3 Resultados modelación hidráulica Tramo3

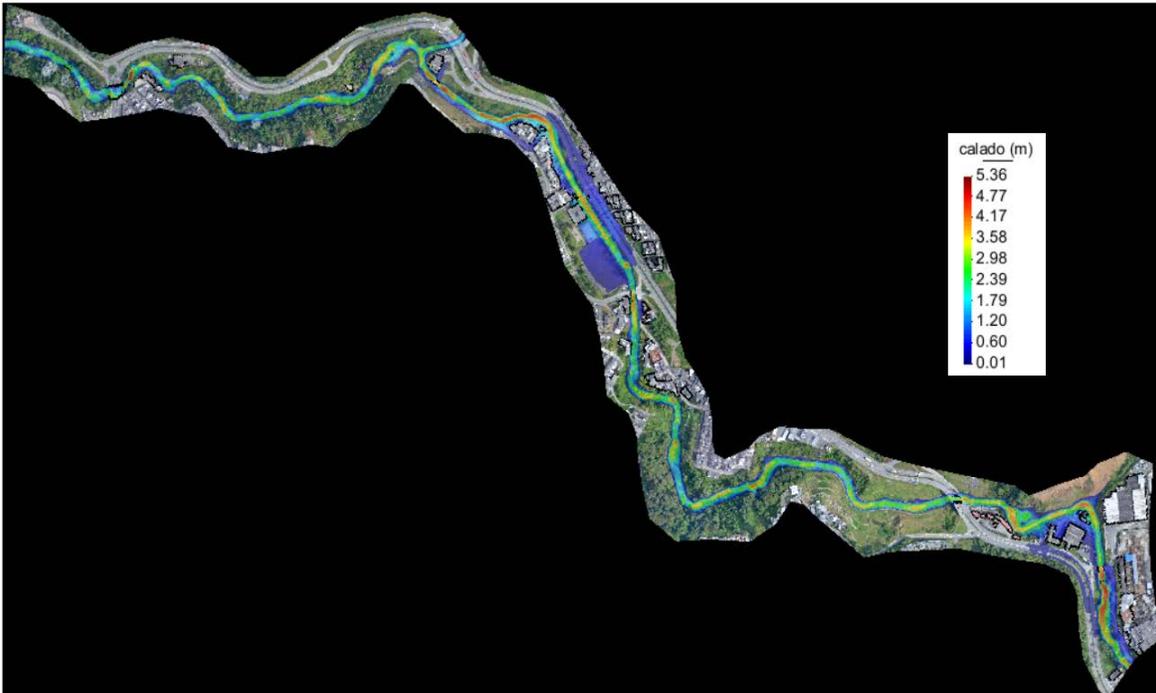


Figura 124. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para $Tr=2.33$ años. Mapa de calados máximos.



Figura 125. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para $Tr=2.33$ años. Mapa de velocidades.

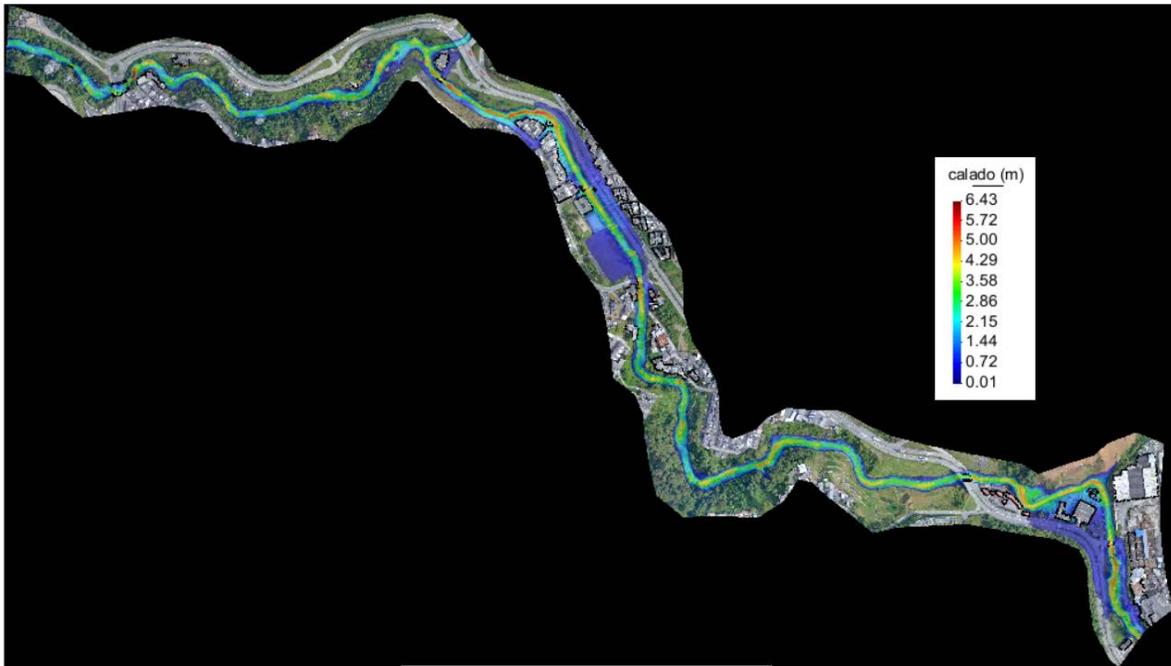


Figura 126. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=15 años. Mapa de calados máximos.

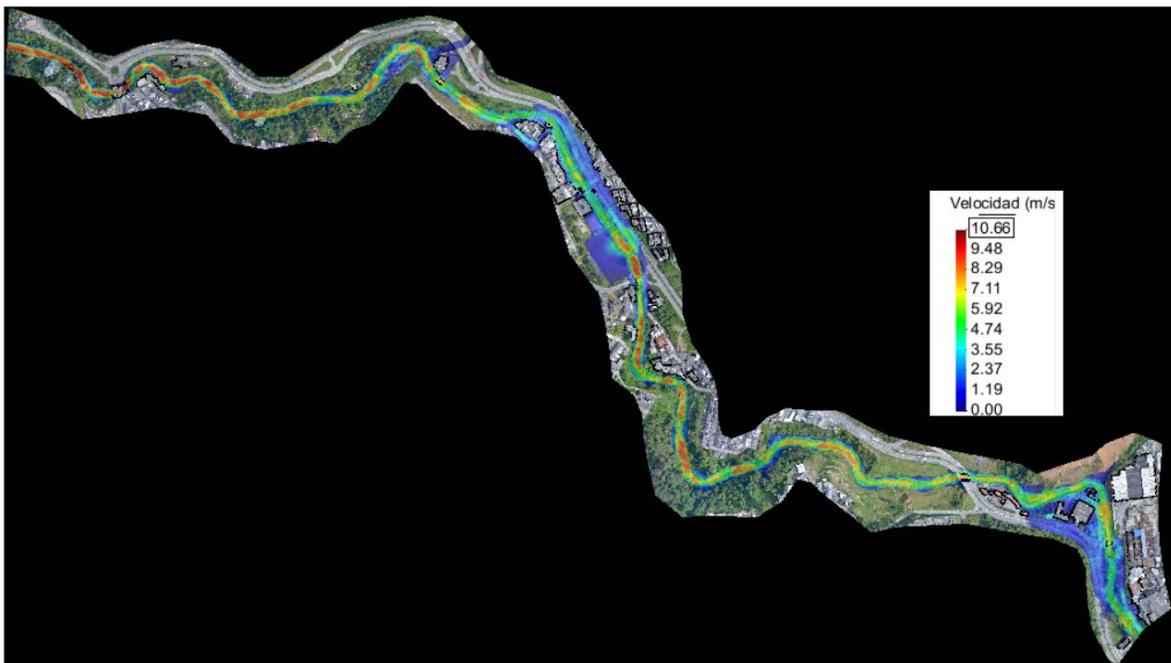


Figura 127. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=15 años. Mapa de velocidades.

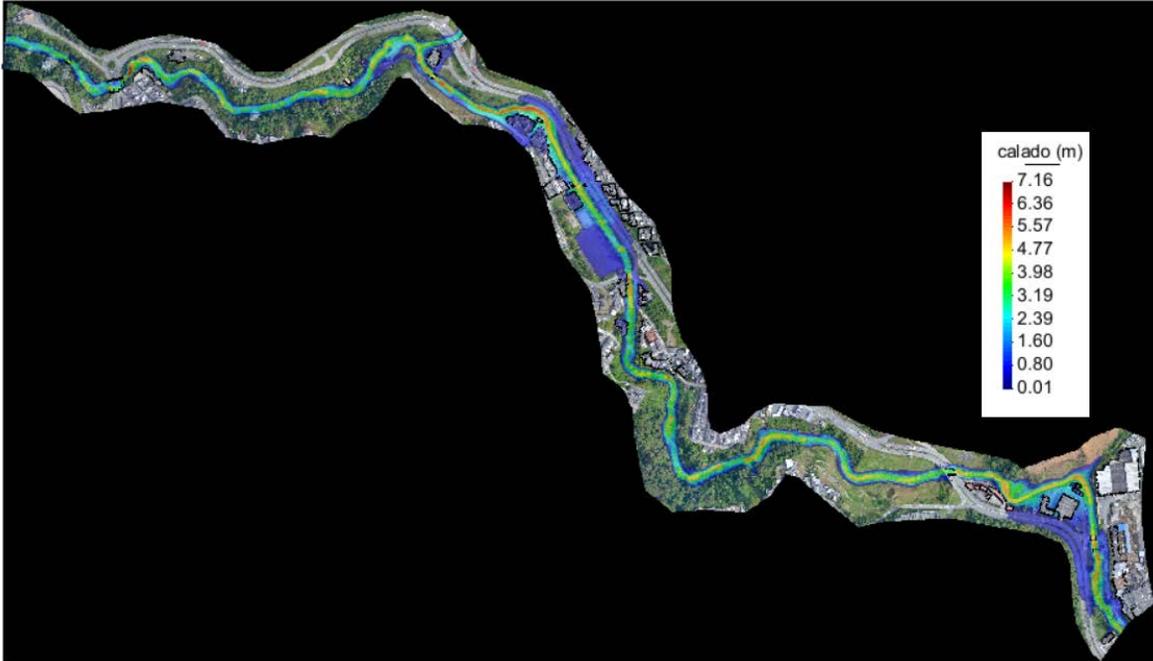


Figura 128. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos.

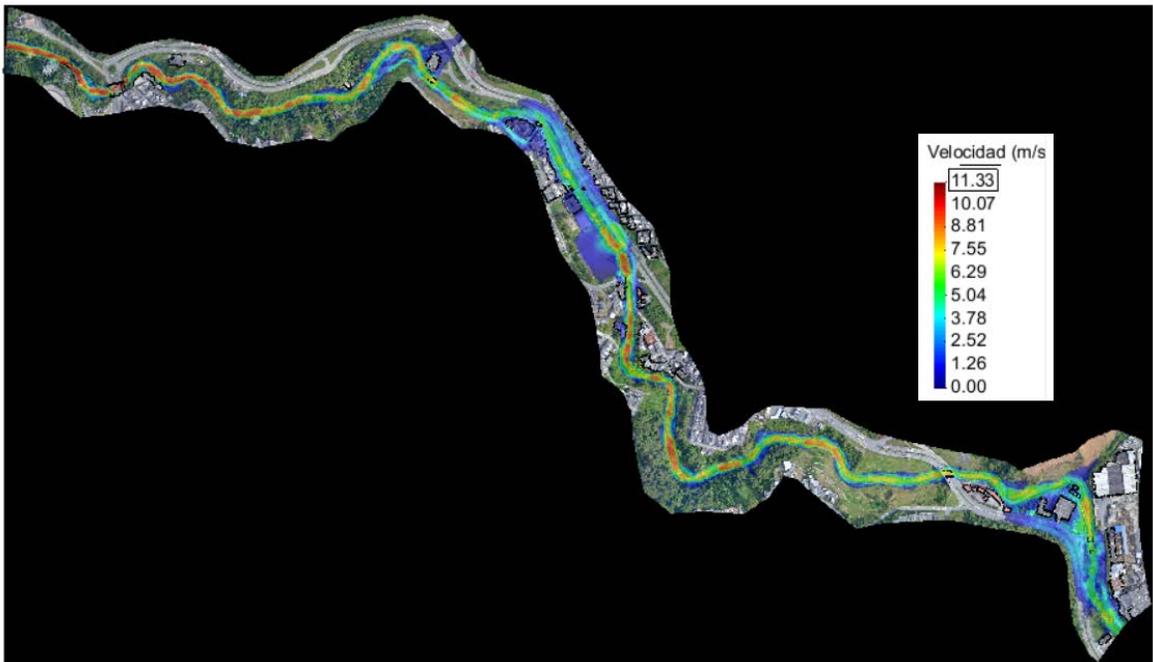


Figura 129. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de velocidades.

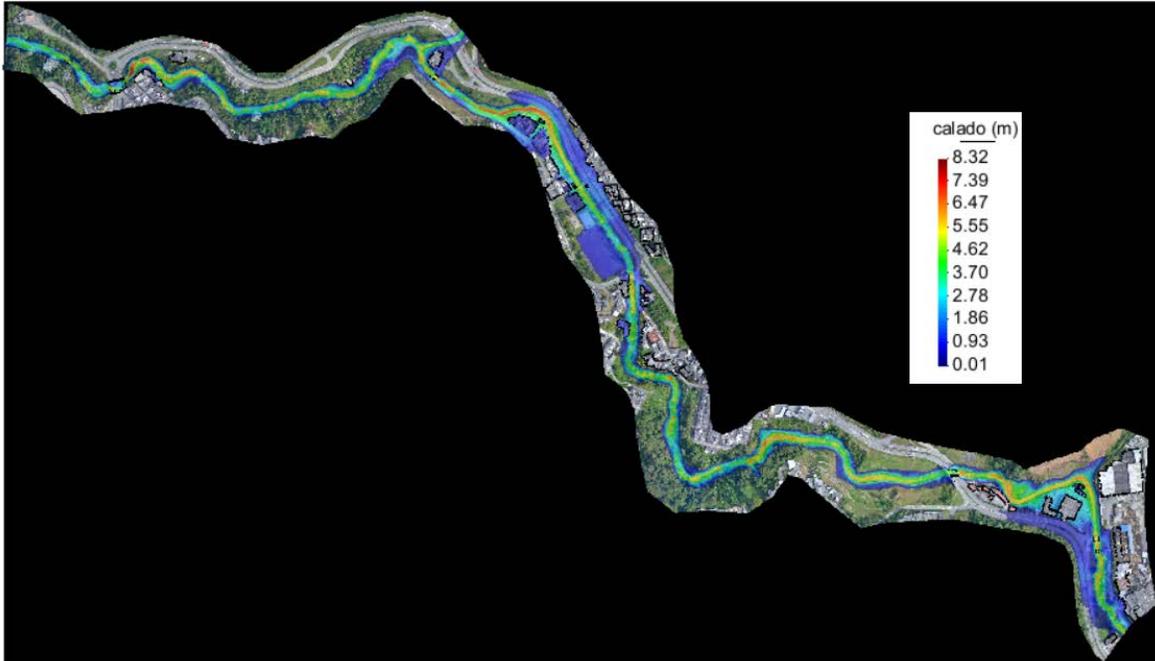


Figura 130. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de calados máximos.

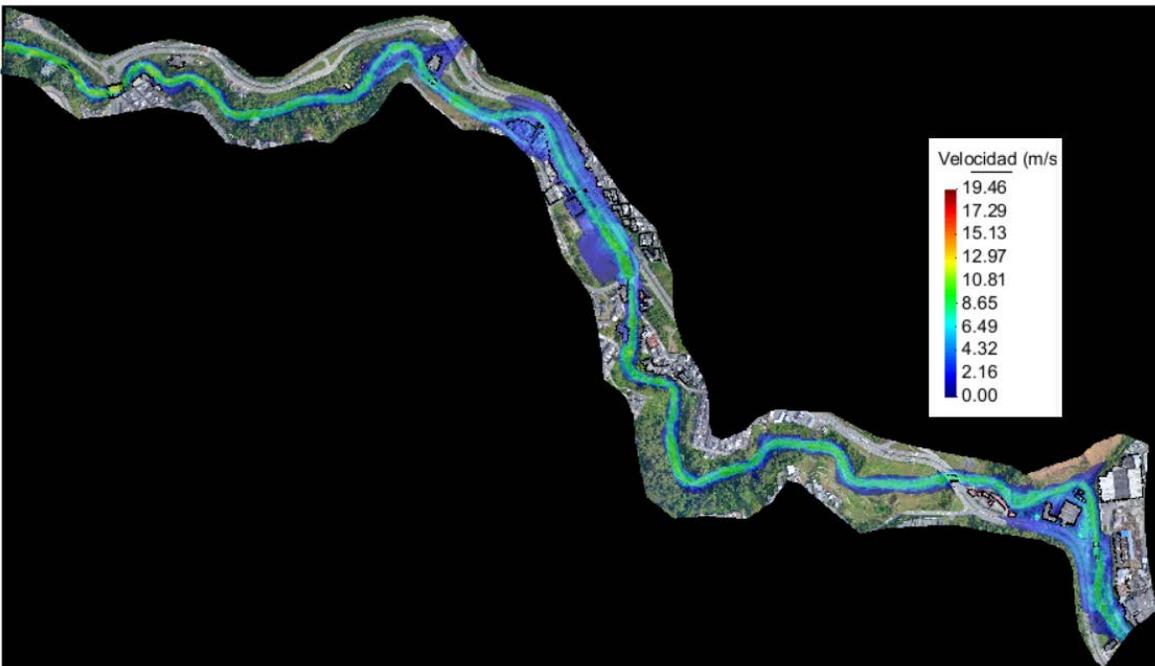


Figura 131. Resultados modelación hidráulica Tramo3 para Tr=40 años. Mapa de velocidades.

Finalmente, el tramo 3 se caracteriza por presentar dos puntos importantes en donde se presentan inundaciones. El primero corresponde al sector de Aguas de Manizales, en donde existe un meando de la quebrada en ese punto y las instalaciones de la empresa prestadora del servicio agua se ubica exactamente sobre la llanura de inundación. El segundo sector se ubica sobre el sector de Asunción,

afectando cancha Comfamiliares y la Avenida Kevin Ángel. Además, es importante resaltar que en estas zonas existen la presencia de puentes con unos gálibos pequeños, especialmente los puentes peatonales del sector Asunción. En cuanto al resto del tramo, la quebrada no presenta puntos críticos, debido a la incisión del cauce aguas abajo. Igualmente, se observa cómo evoluciona el grado de afectación de la inundación a medida que aumento el periodo de retorno. Sin embargo, como se explicó para el tramo 2, sobre el sector de Aguas de Manizales existe un muro de cerramiento que funciona como dique y que presenta dificultades para modelarse en IBER, dando como resultado final una atenuación de las manchas de inundación presentadas, especialmente para el $Tr=2.33$ años.

A manera de conclusión se tiene que para los diferentes periodos de retorno simulados, los resultados de la quebrada Olivares muestran a los tramos 2 y 3 con mayor afectación. Además, se puede observar que el riesgo hidráulico para las viviendas es mayor en la en estos mismos tramos de la quebrada (Sectores Escuela de Carabineros, Aguas de Manizales y Asunción), mientras que aguas arriba existe una afectación más importante sobre la infraestructura vial (vía Reserva Río Blanco). También es importante señalar que la mayoría de los desbordamientos se producen en los puntos donde hay presencia de estructuras hidráulicas, y como se observó en la visita de campo, la mayoría de estas estructuras presentan unas condiciones actuales que disminuyen su capacidad hidráulica debido a gran acumulación de sedimentos y basuras, por lo que se recomienda realizar actividades de mantenimiento y remoción de sedimentos. Finalmente, se resalta las hipótesis bajo las cuales fueron obtenidas las manchas de inundación mostradas en este trabajo para los diferentes periodos de retorno, ya que corresponden a la selección de una distribución de precipitación bajo un escenario de humedad antecedente AMCIII aplicado sobre un modelo digital de elevación con una resolución determinada, y por lo tanto si se requiere un refinamiento y mayor precisión, se deberá procurar optar por el levantamiento de una topografía de detalle, así como simulaciones que involucren diferentes escenarios bajo un análisis estadístico más riguroso.

4.7 Análisis de secciones transversales Quebrada El Olivares:

A continuación, para cada uno de los tramos modelados se seleccionaron secciones transversales sobre el cauce que se consideran críticas, puesto que, en estos puntos el nivel del agua afecta a la infraestructura como viviendas, puentes, vías, y además representa un riesgo para los habitantes.

En las siguientes figuras se muestra las ubicaciones de las secciones transversales seleccionadas en cada tramo y posteriormente el perfil de la sección transversal con el nivel de agua alcanzado para cada uno de los periodos de retorno simulados.



Figura 132. Secciones transversales Tramo 1- Quebrada Olivares.

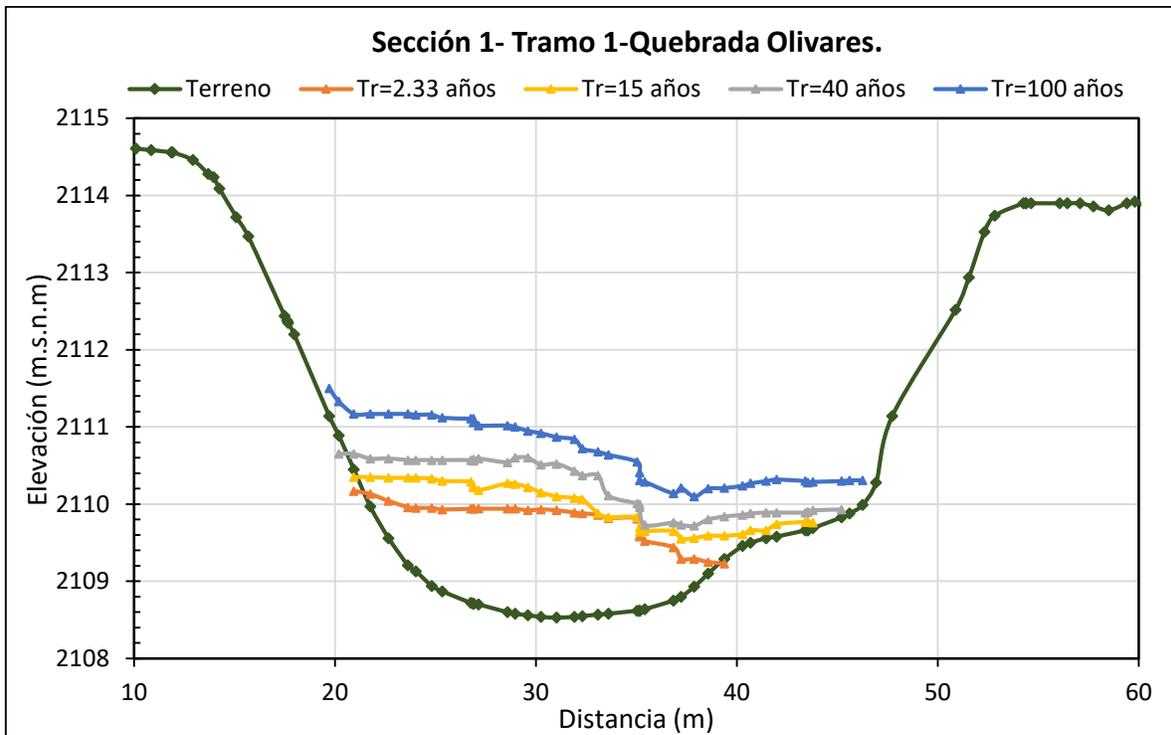


Figura 133. Perfil Sección transversal 1- Tramo 1- Quebrada Olivares.

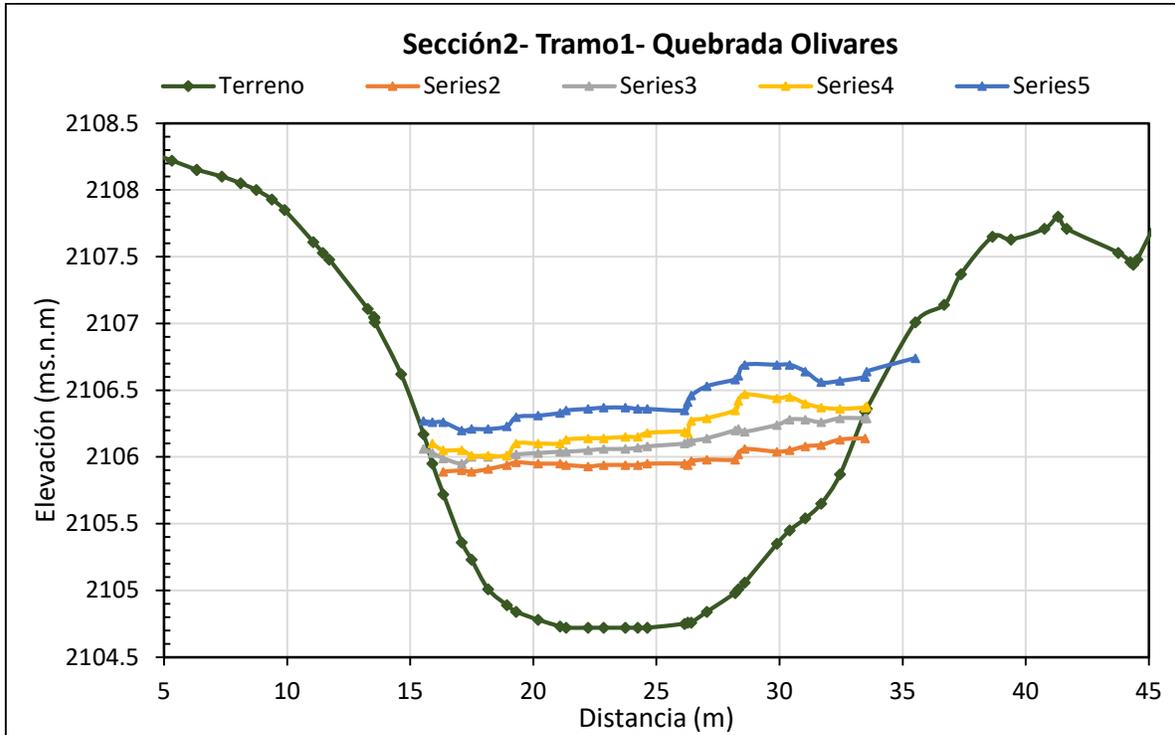


Figura 134. Perfil Sección transversal 2- Tramo 1- Quebrada Olivares.

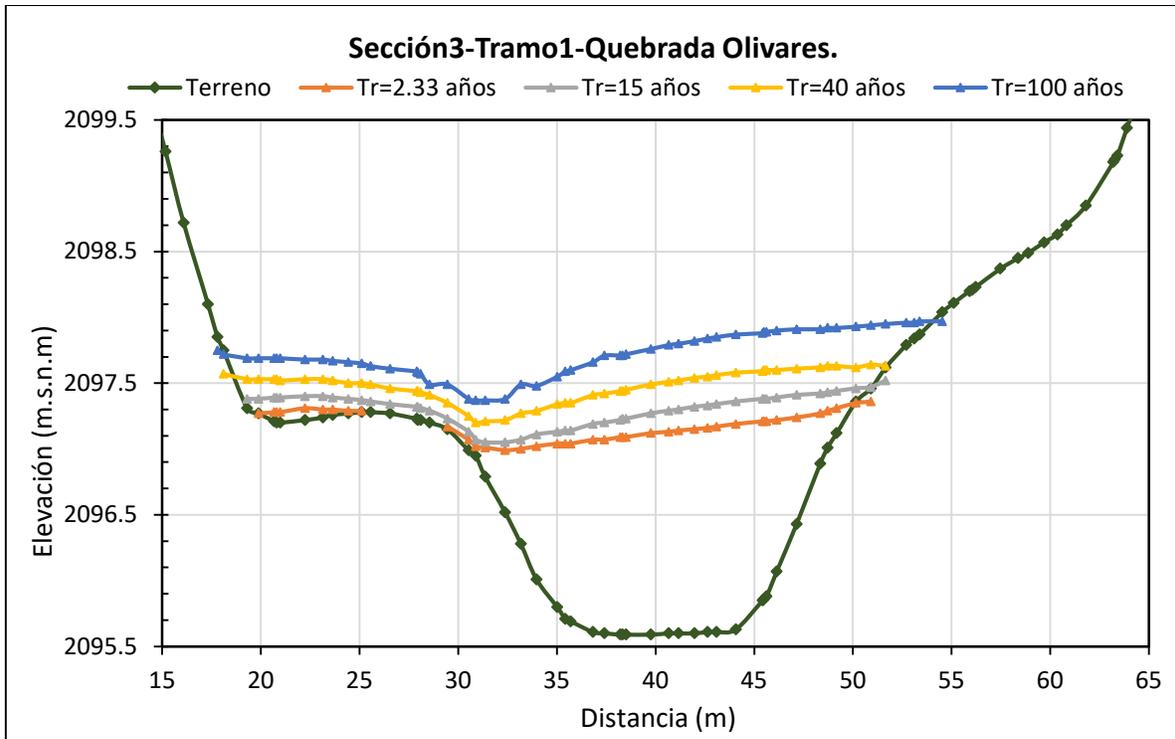


Figura 135. Perfil Sección transversal 2- Tramo 1- Quebrada Olivares.

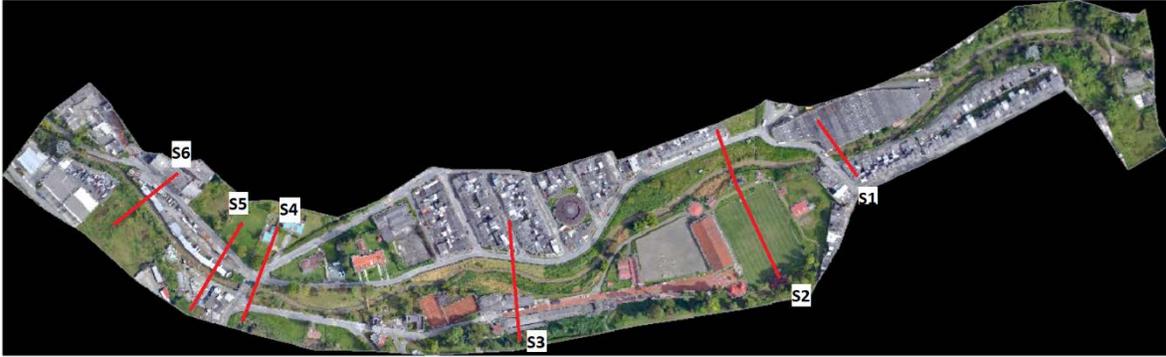


Figura 136. Secciones transversales Tramo 2- Quebrada Olivares.

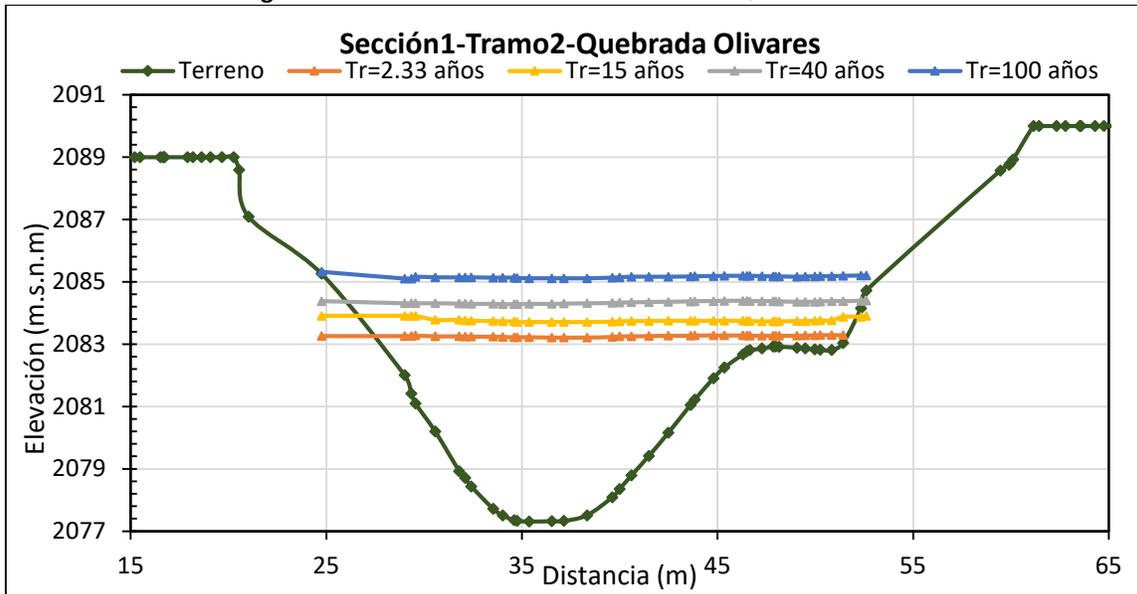


Figura 137. Perfil Sección transversal 1- Tramo 2- Quebrada Olivares.

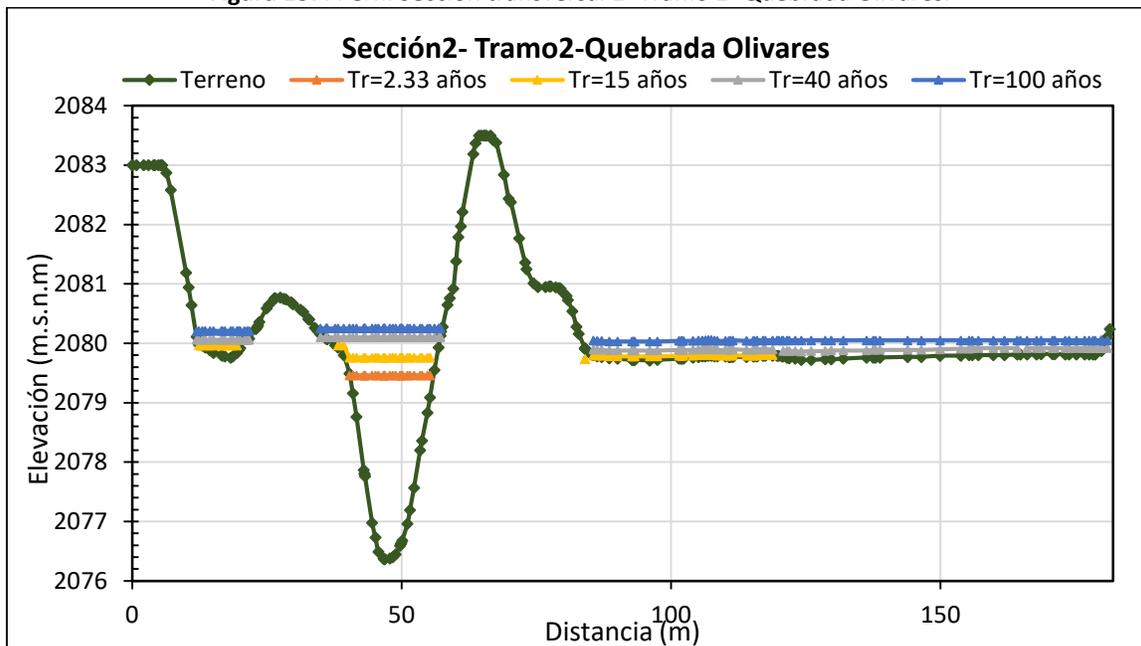


Figura 138. Perfil Sección transversal 2- Tramo 2- Quebrada Olivares.

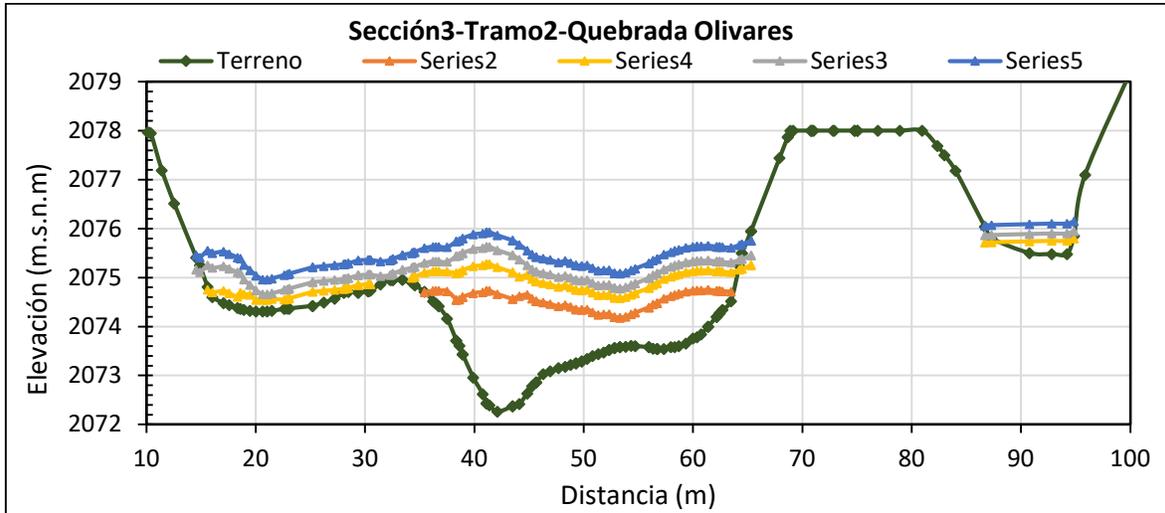


Figura 139. Perfil Sección transversal 3- Tramo 2- Quebrada Olivares.

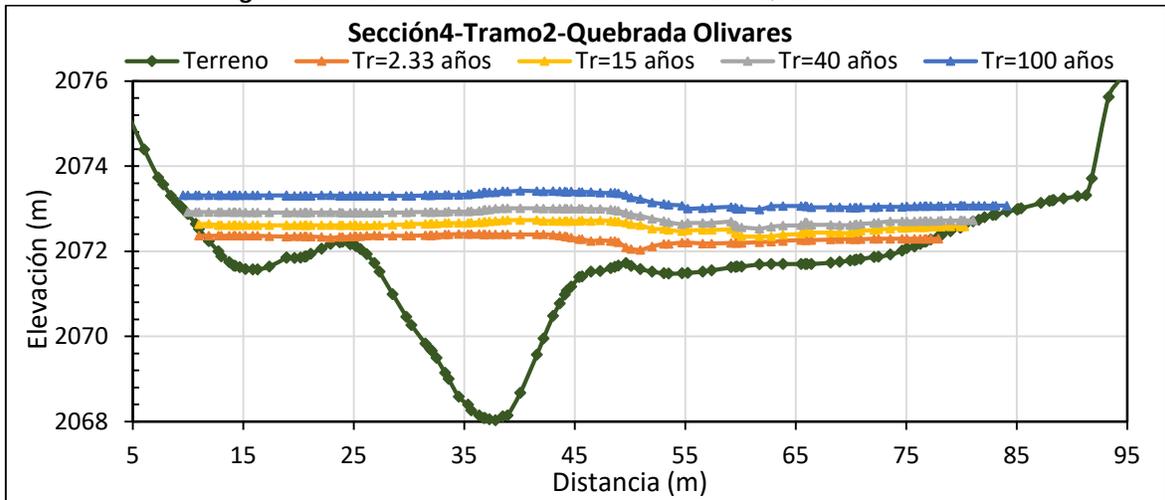


Figura 140. Perfil Sección transversal 4- Tramo 2- Quebrada Olivares.

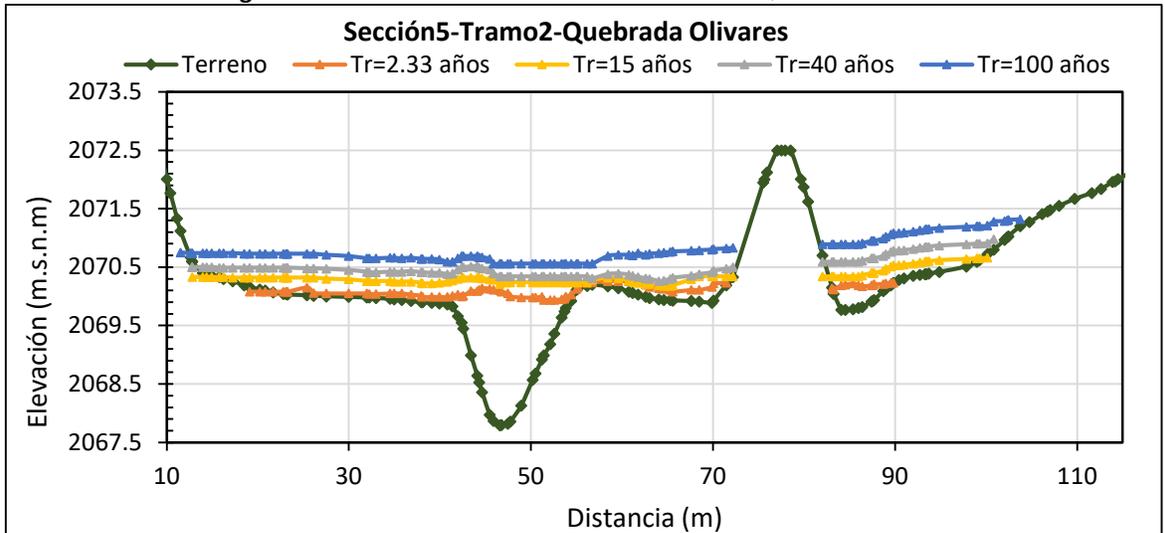


Figura 141. Perfil Sección transversal 5- Tramo 2- Quebrada Olivares.

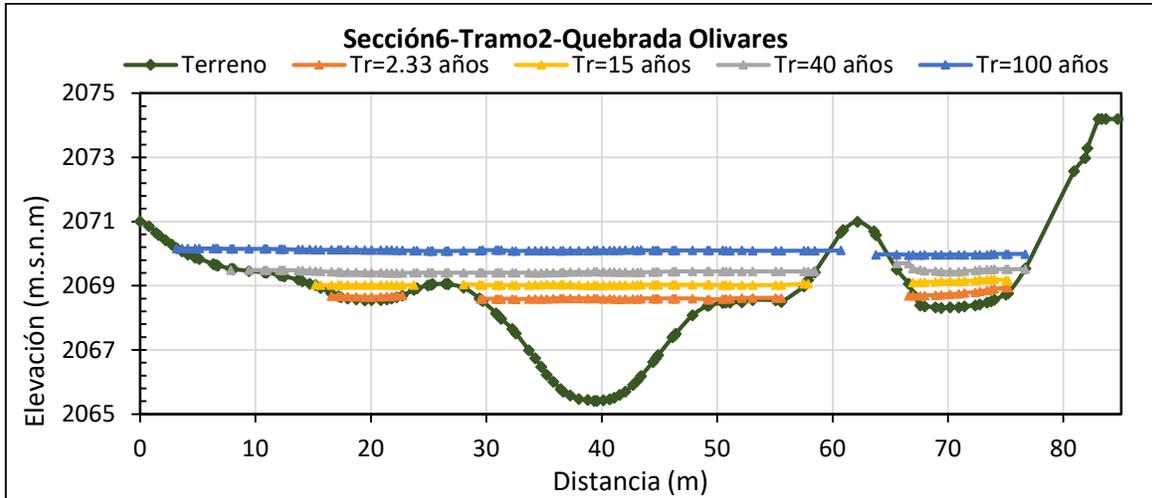


Figura 142. Perfil Sección transversal 6- Tramo 2- Quebrada Olivares.

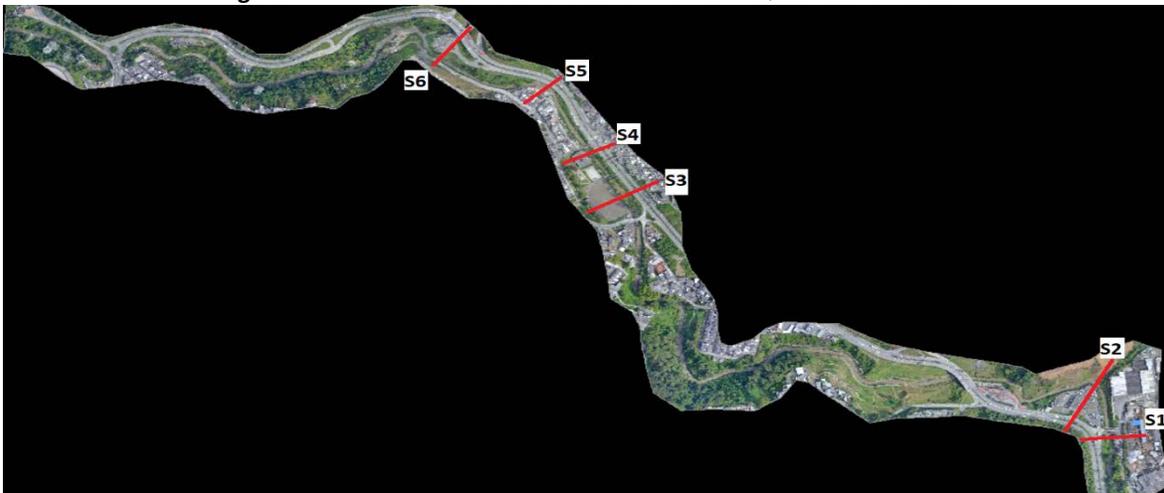


Figura 143. Secciones transversales Tramo 3- Quebrada Olivares.

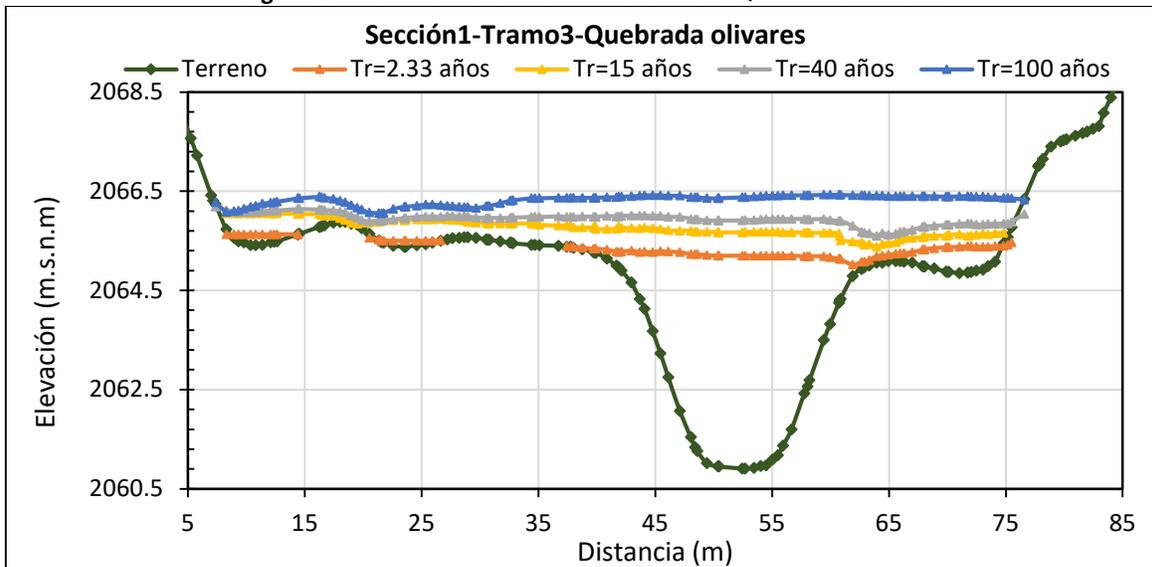


Figura 144. Perfil Sección transversal 1- Tramo 3- Quebrada Olivares.

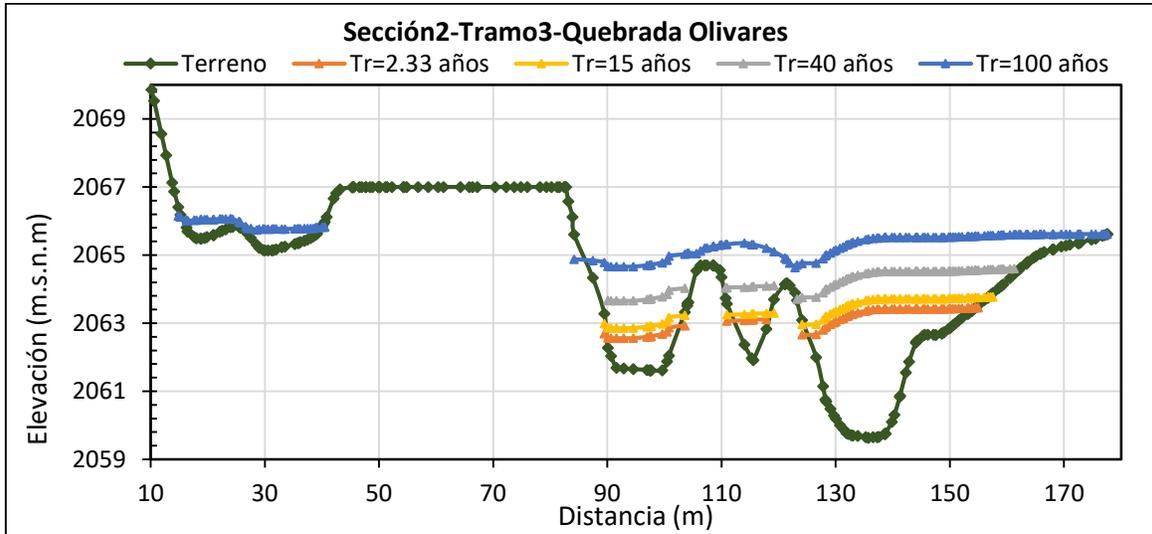


Figura 145. Perfil Sección transversal 2- Tramo 3- Quebrada Olivares.

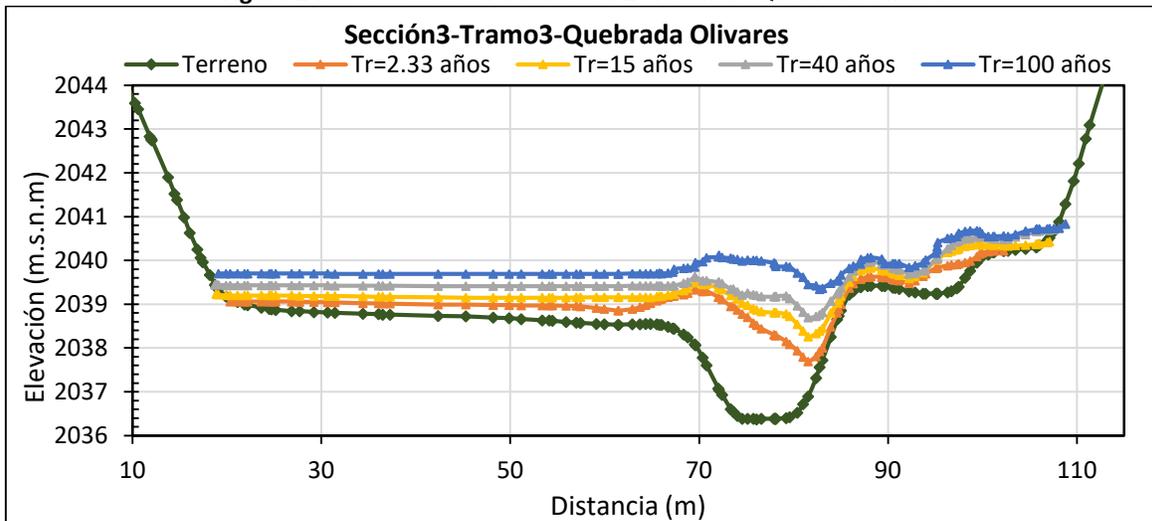


Figura 146. Perfil Sección transversal 3- Tramo 3- Quebrada Olivares.

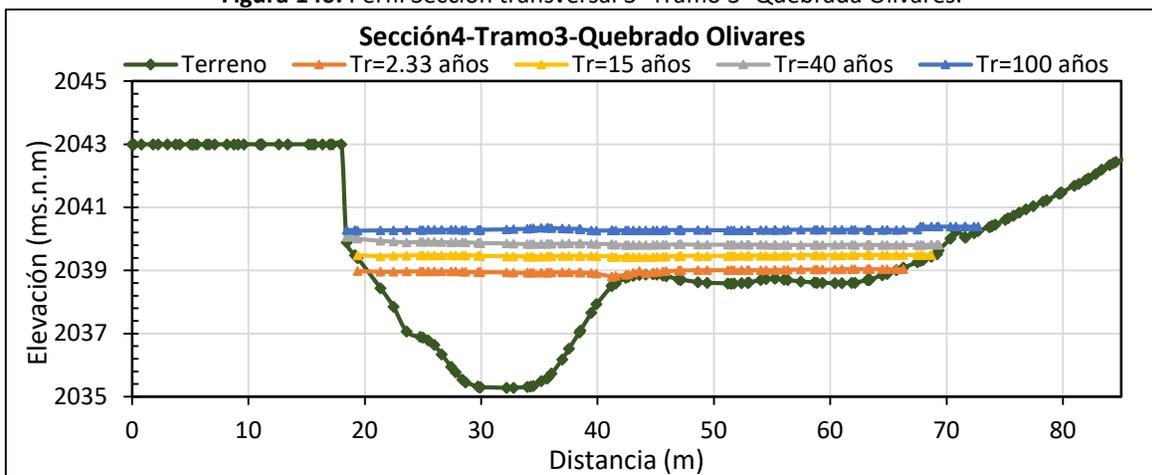


Figura 147. Perfil Sección transversal 4- Tramo 3- Quebrada Olivares.

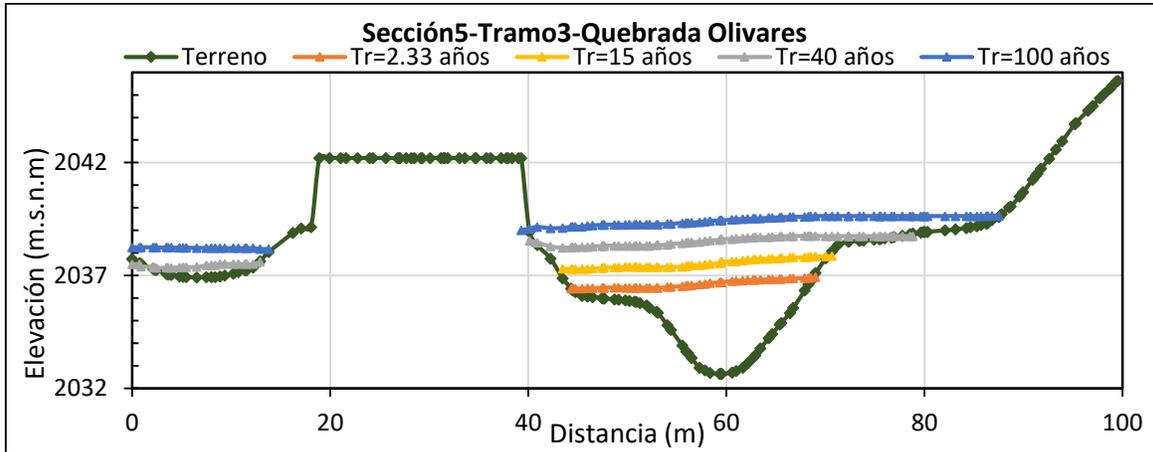


Figura 148. Perfil Sección transversal 5- Tramo 3- Quebrada Olivares.

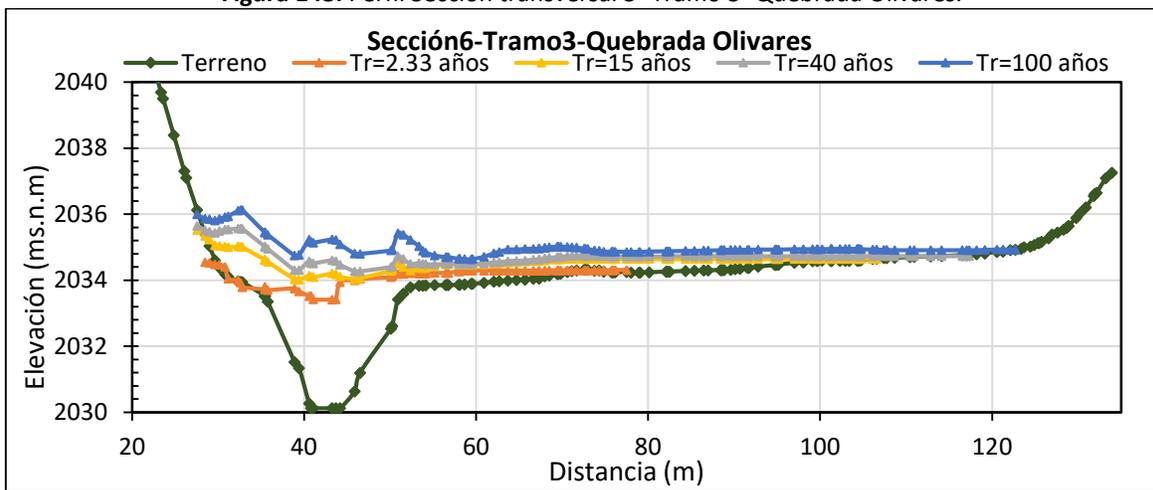


Figura 149. Perfil Sección transversal 6- Tramo 3- Quebrada Olivares.

De la **Figura 132** a la **Figura 149** se puede observar que son el tramo 3 y tramo 2 aquellos que presenta condiciones más críticas para la generación de inundaciones que afectan principalmente al Barrio La Asunción, específicamente en el sector de Canchas Comfamiliares para el tramo 2, debido a la presencia de puentes peatonales que tienen una altura de gálibo muy baja y por lo tanto genera un represamiento de la onda de crecida que se ve agravado por las condiciones de acumulación de sedimentos, basuras y vegetación. Y para el tramo 2 se evidencia que las secciones críticas están presentes en el sector de La Escuela de Carabineros de La Policía Nacional. Se evidencia además que estas zonas hacen parte de la llanura de inundación propia de la quebrada y su efecto de inundación se ve potenciado y agravado por la presencia de estructuras hidráulicas puentes, así como un pobre mantenimiento para mejorar las condiciones de rugosidad del canal natural.

Finalmente, para realizar la correlación de la precipitación y niveles, se estudió detalladamente las secciones 4 y 5 del tramo 3. Además, el resultado de estas secciones coincide con los reportes históricos de inundaciones que se han registrado en la prensa, así como en los relatos basados en la memoria colectiva de sus habitantes.

4.8 Umbrales preliminares Quebrada Olivares

La determinación de los umbrales de precipitación consistió en la selección de las secciones transversales más críticas, es decir, aquellas zonas de la quebrada en donde se presenta la inundación con mayor facilidad. Para este trabajo se seleccionaron las siguientes secciones: Las secciones número 3 de los tramos 1, para el tramo 2 las secciones 2,3 y 4, y para el tramo 3 las secciones 3, 4 y 5. El siguiente paso fue realizar una nube de puntos que relacione los niveles máximos alcanzados y la precipitación máxima en los diferentes eventos y escenarios. Además, se definieron 3 niveles de alerta basados en el nivel de la lámina de agua sobre la sección más crítica. Por lo tanto, el primer nivel de alerta está dado como la profundidad al 80% del nivel de sección llena, el segundo nivel de alerta corresponde al nivel de sección llena y el tercer nivel de alerta será aquel nivel en donde exista una afectación a la infraestructura.

Una vez obtenido la ecuación de la línea de tendencia de la gráfica niveles vs precipitación, encontrándose para este que el mejor ajuste fue dado mediante una ecuación logarítmica. Por lo tanto, es importante mencionar que el ajuste logarítmico presenta una inconsistencia física importante sobre todo para los valores bajos de niveles, puesto que para la solución trivial de una precipitación 0 resultaría un nivel negativo, sin embargo, se puede despreciar este aspecto debido a en este caso particular interesan los calados extremos de crecida, que es en donde existe un ajuste significativo. Los resultados finales para los umbrales de precipitación se muestran en la Figura 150, y es importante aclarar que estos umbrales son basados en la precipitación acumulada móvil de 10 minutos. Lo anterior debido a que en el análisis del tránsito del hidrograma sobre la quebrada se obtuvieron tiempos de concentración cortos, esto significa que el caudal pico sobre la sección crítica se presenta durante el evento de precipitación, por lo tanto, para este tipo cuencas no es posible la creación de un umbral de precipitación en función de la duración de cada evento, a menos que se mejore la tecnología de monitoreo hidrometeorológico con la implementación de Radares y modelos de predicción de clima. Finalmente, se reportan los valores de los umbrales para los diferentes niveles de alerta.

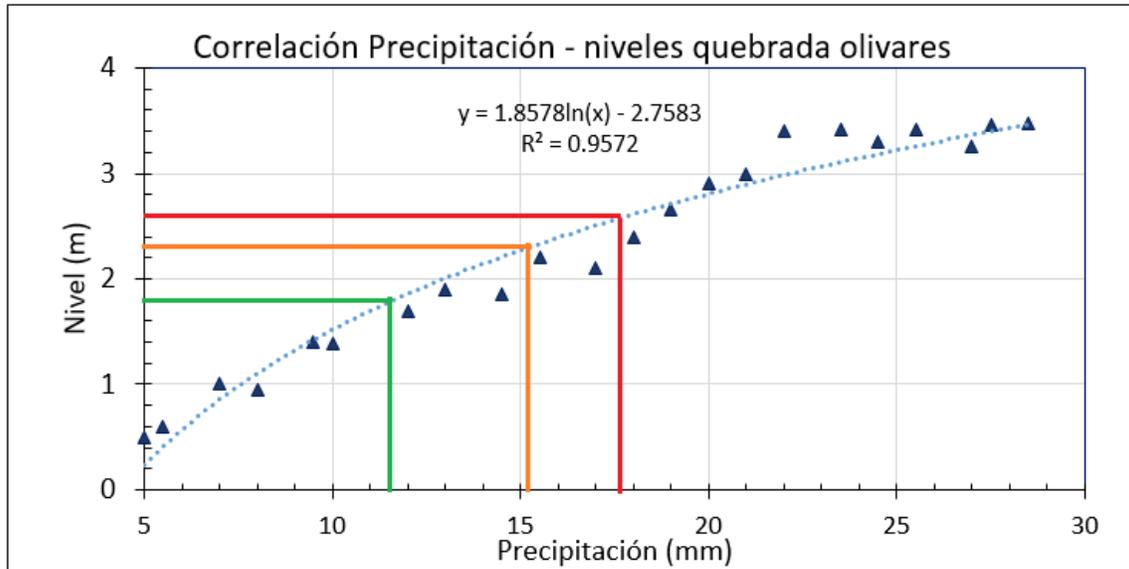


Figura 150. Determinación de los umbrales de precipitación para la Quebrada Olivares.

1er nivel de Alerta= 11.6 mm 2do Nivel de Alerta=15.2 mm 3er Nivel de Alerta=17.8 mm

5 DETERMINACIÓN DE UMBRALES DE PRECIPITACIÓN PARA LA CUENCA MANIZALES.

5.1 Procesamiento cartográfico:

La cuenca de la quebrada Manizales se encuentra en la zona Este del municipio de Manizales, entre las coordenadas planas (1047456 N, 844290 W) y (1052256 N, 855245 W) referidas al *Datum* Bogotá. La Quebrada Manizales tiene una longitud de cauce aproximada de 12.8 km, a una altitud de 3266 m.s.n.m en su nacimiento y a 1947 m.s.n.m en su desembocadura sobre el río Chinchiná, con una pendiente promedio de 10%, un área de 28.0 km² y un perímetro de 31.7 km.

Como se muestra en la *Figura 151* sobre la cuenca se encuentran instaladas y en operación 4 estaciones hidrometeorológicas (Triángulo verde), ubicadas sobre las quebradas Manizales, Tesorito, Guayabal y Cristales. Dos estaciones meteorológicas en la parte alta de la cuenca (cuadrado amarillo) y dos estaciones de alarma sonora (círculo rojo). A continuación, se muestra la información de la localización de las estaciones, pertenecientes a CORPOCALDAS, sobre el sistema de coordenadas COLOMBIA BOGOTA ZONE.

Tabla 9. Coordenadas de las estaciones hidrométricas de la Cuenca quebrada Manizales.

ESTACIÓN	CORRIENTE	COORDENADAS		COORDENADAS BOGOTA	
		N	W	N	W
Q. MANIZALES- SKINCO	Q. Manizales	5°2'18.89"	75°25'49.52"	1049104.787	849957.846
Q. TESORITO	Q. Tesorito	5°2'2.52"	75°25'51.16"	1048574.072	849906.049
RECINTO EL PENSAMIENTO	Q. Guayabal	5°2'30.60"	75°26'44.38"	1049432.874	848259.608
VALLES DEL ALHAMBRA	Q. Cristales	5°2'15.67"	75°27'26.51"	1048979.295	846965.522

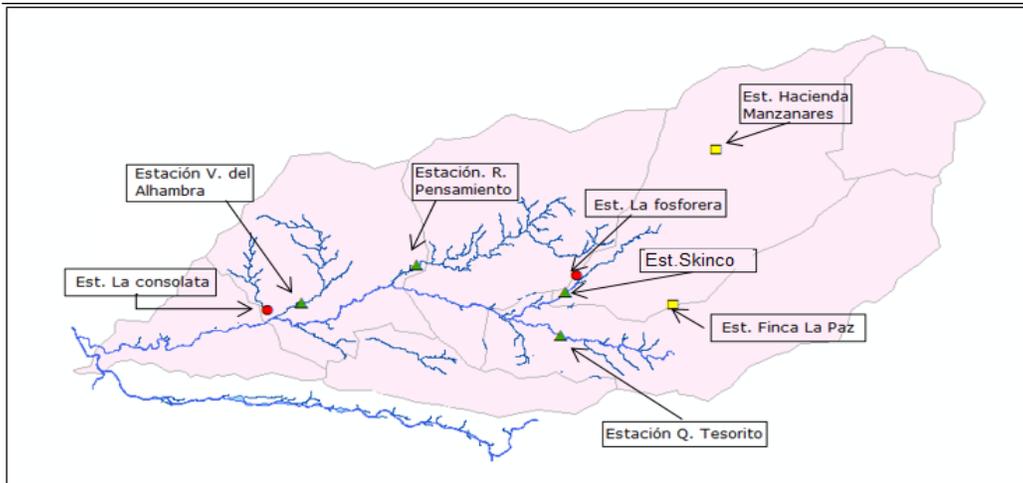


Figura 151. Localización Estaciones Cuenca Quebrada Manizales.

5.2 Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada Olivares:

Se calcularon los parámetros fisiomorfométricos de cada una de las subcuencas y de la cuenca en general. Lo anterior, realizado a partir de la ubicación de las 4 estaciones hidrométricas, estableciendo unas subcuencas que demarcan el área de drenaje de cada una de las corrientes, y teniendo cada estación como punto de salida, tal como se muestra en la fig.2.

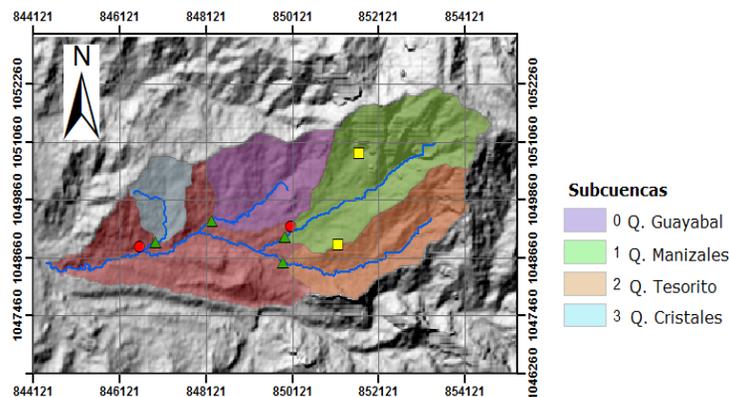


Figura 152. Subcuencas Quebrada Manizales.

A continuación, se muestran los resultados fisiomorfométricos de la cuenca quebrada Manizales, y luego de las subcuencas generadas:

Tabla 10. Parámetros fisiomorfométricos Cuenca Quebrada Manizales

Características Morfométricas Cuenca Quebrada Manizales		
Parámetro	Unidad	Valor
Área Cuenca	Km2	26.99
Perímetro	km	31.68
Cota máxima	msnm	3654.73
Cota de Salida	msnm	1949.57
X centroide cuenca	m	849936.45
Y centroide cuenca	m	1049797.29
Z centroide	msnm	2734.68
Diferencia altura	m	1705.16
Índice Compacidad o Gravelius		1.71
Altura Promedio cuenca	m	2801.13
Altura más frecuente	m	2328.45
Pendiente media de la cuenca	%	0.33
Longitud Cauce principal	Km	12.86
Altura máxima cauce	msnm	3265.91
Altura Mínima cauce	msnm	1947.27
Pendiente promedio Cauce	m/m	0.103

Tabla 11. Parámetros fisiomorfométricos Subcuencas.

Parámetro	Unidad	Subcuenca Q.Guayabal	Subcuenca Q.Manizales	Subcuenca Q. Tesorito	Subcuenca Q.Cristales
Área Cuenca	Km2	4.46	7.84	4.89	1.82
Perímetro	km	9.59	14.66	13.04	5.98
Cota máxima	msnm	2877.68	3654.74	3480.24	2401.11
Cota de Salida	msnm	2177.05	2314.20	2287.41	2100.86
X centroide cuenca	m	849568.00	852297.00	852192.00	847086.00
Y centroide	m	1050280.00	1050560.00	1049140.00	1049910.00
Z centroide	msnm	2485.68	3015.37	2850.46	2260.80
Diferencia altura	m	700.63	1340.54	1192.83	300.25
Índice Compacidad o Gravelius		1.27	1.47	1.65	1.24
Longitud Cauce principal	Km	2.84	4.39	4.45	1.87
Altura máxima cauce	msnm	2393.21	3265.91	2833.41	2321.25
Altura Mínima cauce	msnm	2178.62	2314.19	2287.58	2100.91
Pendiente promedio Cauce	%	7.53	21.67	12.35	11.20

El tiempo de concentración de la cuenca Manizales y de las subcuencas fue calculado mediante la aplicación de varias fórmulas empíricas propuestas por distintos autores como se mencionó para las cuencas anteriores[18]. Algunos resultados de estas ecuaciones se eliminaron por presentar

resultados que no tienen sentido físico (resultados de segundos o días), y se optó por trabajar con 8 fórmulas, de las cuales el resultado final se obtuvo sacando un promedio sin tener en cuenta los valores extremos. En general los tiempos de concentración de la cuenca son pequeños (menores a una hora), y permiten inferir que la respuesta de la cuenca es rápida frente a eventos de precipitación.

Tabla 12. Tiempos de Concentración.

Método	Tiempo de concentración t_c (min)				
	Cuenca Manizales	Subcuenca Q. Guayabal	Subcuenca Q. Manizales	Subcuenca Q. Tesorito	Subcuenca Q. Cristales
California Culvert Practice	61.94	15.24	19.64	20.86	13.76
FFA	127.53	94.20	82.36	100.00	68.56
Giandotti	23.02	38.67	20.64	23.54	30.14
Kerby-hathaway	58.48	30.87	29.76	34.15	23.82
Kirpich	68.17	23.78	22.38	28.08	15.50
Passini	25.85	27.45	16.89	19.03	18.89
Témez	193.13	65.04	74.09	83.29	45.50
Valencia y Zuluaga	123.28	86.94	73.71	74.33	60.00
Valor Medio sin valores extremos	77.97	37.16	41.72	43.97	29.59

5.3 Tormentas de diseño para la cuenca Quebrada Manizales.

Para establecer las lluvias de diseño para los diferentes periodos de retorno, se tomó la precipitación acumulada en cada uno de los eventos como insumo de información. (obtenido de una modelación anterior sobre la cuenca Chinchiná, realizada por la Universidad Nacional de Colombia). Posteriormente con el fin de simular condiciones más reales, se optó por trabajar con lluvias de diseño que presenten una distribución similar a las características de la precipitación de la ciudad de Manizales. Por lo tanto, se realizó una simulación de los modelos teniendo en cuenta los patrones de la distribución temporal de las precipitaciones en la ciudad de Manizales para la tormenta de diseño, para esto se tuvo en cuenta el trabajo *“Descripción espacio temporal de la precipitación en la ciudad de Manizales (Colombia) para tormentas de diseño”*, realizado por la Universidad Nacional de Colombia. Dentro del análisis propuesto se trabajó con el promedio de los resultados obtenidos para la estación Enea. Se definió además las tormentas de diseño con duración de evento entre los 40 y 50 minutos correspondientes a los tiempos de concentración de las subcuencas calculados

anteriormente. Además, se trabajó para condiciones desfavorables, con un patrón de distribución del 5% de ocurrencia del total de los eventos.

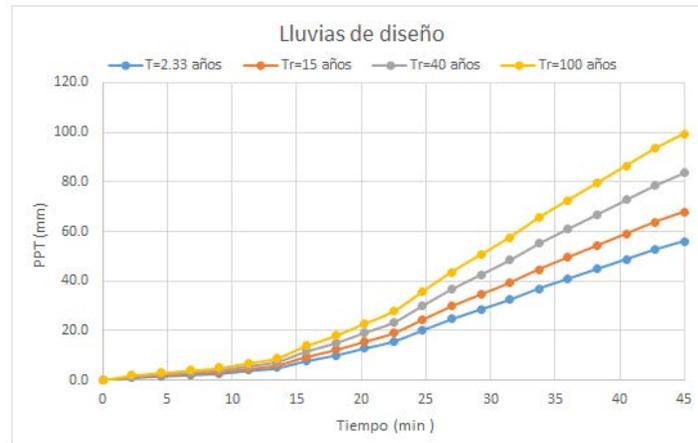


Figura 153. Patrón de distribución temporal para lluvias de diseño Subcuenca Manizales – Skinco.

En la Figura 153 se muestra el patrón de distribución temporal para la lluvia de diseño calculado para el promedio de la distribución espacial de la ciudad de Manizales, si se compara con la distribución de la segunda curva de Huff, se observa que esta nueva lluvia de diseño no presenta picos tan pronunciados y por el contrario muestra una intensidad de lluvia menor pero más constante en el tiempo.

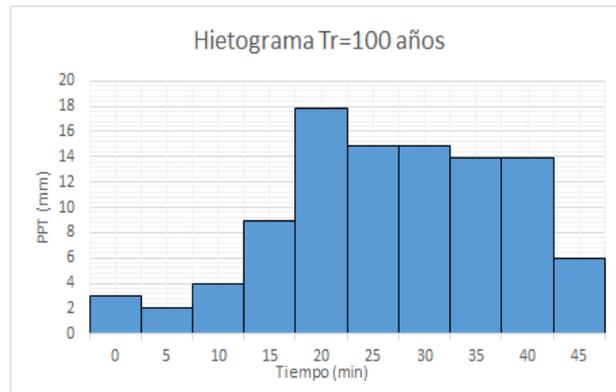


Figura 154. hietograma de diseño Tr 100 años para la subcuenca Q. Manizales – Skinco.

5.4 Modelación Hidrológica cuenca Quebrada Manizales.

Una vez obtenido las diferentes lluvias de diseño, se procedió a realizar la modelación hidrológica de cada subcuenca para los diferentes periodos de retorno, es decir, se obtuvo los hidrogramas de salida en cada una de las estaciones hidrométricas que se encuentran sobre la cuenca. Se recuerda que se la modelación hidrológica consistió en una actualización de los eventos de lluvia para el

modelo TETIS, puesto que este había sido implementado sobre la cuenca Chinchiná en estudios anteriores.

Debido a que se buscaba representar las características torrenciales de la cuenca, en donde los flujos transportan una gran cantidad de sedimentos, troncos de madera y escombros en general, aunque con la característica que no se producen cambios significativos en la densidad y viscosidad del fluido, se afectaron los resultados aumentado en un 40% del volumen obtenido, para la representación de estas condiciones. A continuación, se muestra los resultados del modelo:

Tabla 13. Resumen de caudales máximos en cada subcuenca para avenidas torrenciales.

Estación	Q (m ³ /s)			
	Tr=2.33	Tr=15	Tr=40	Tr=100
Skinco	15.92	36.18	63.62	91.37
Tesorito	11.50	28.65	54.81	81.57
Recinto El Pensamiento	4.91	15.17	37.90	61.64
Valles del Alhambra	-	4.52	16.07	35.19

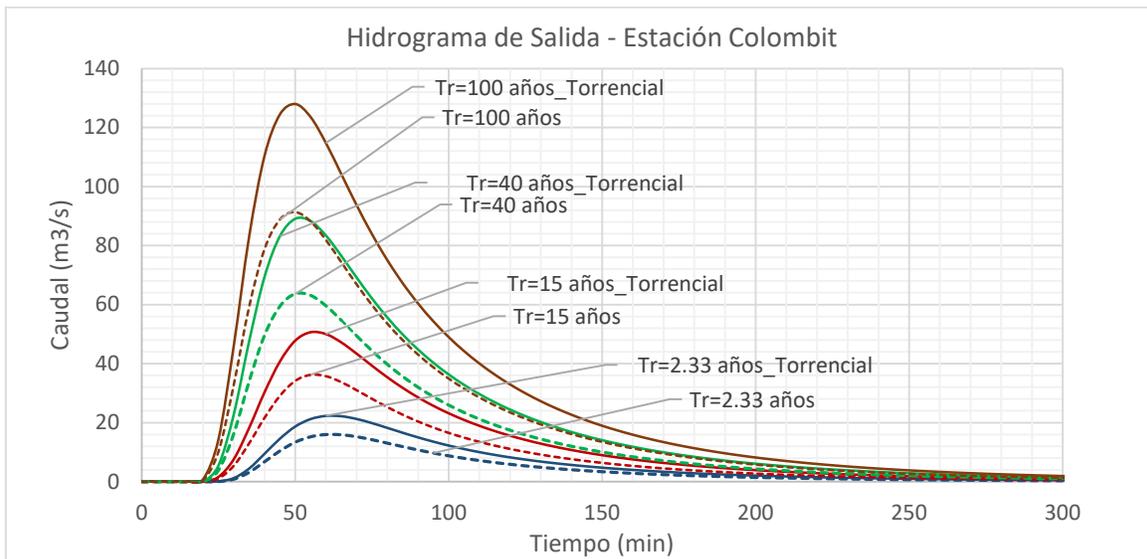


Figura 155. Hidrogramas de salida subcuenca Q. Manizales-Skinco

5.5 Análisis Hidráulico Quebrada manizales

A partir de los hidrogramas en las estaciones de Skinco y Tesorito, se procedió a realizar el tránsito de los mismos hacía aguas abajo, aplicando la teoría de la Onda Cinemática, que se presenta como un modelo simplificado del flujo no permanente en canales abiertos (Solución parcial a las ecuaciones de Saint-Venant), debido a que en la ecuación de conservación de momentum, se

desprecia los términos correspondientes a la aceleración local, aceleración convectiva y fuerza de presión. La elección de este método unidimensional que se presenta como una simplificación del flujo en el canal se debe a que autores como Lighthill and Witham, han concluido que “Bajo condiciones apropiadas para el flujo de avenida, las ondas dinámicas (solución completa a las ecuaciones de Saint Venant) se atenúan muy rápidamente, y son las ondas cinemáticas, viajando a una velocidad menor, las que asumen el rol preponderante” [19],[20].

Ecuaciones de Saint Venant

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0, \text{Continuidad}$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial(Q^2)}{\partial x(A)} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0, \text{Momentum}$$

Por lo tanto, para la onda cinemática, se resuelve:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

El método numérico usado para la solución de la ecuación diferencial corresponde a un método de diferencias finitas, con el esquema numérico de primer de orden (forward or backward), por lo tanto, se tiene:

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + C \frac{U_i^n - U_{i-1}^n}{\Delta x} = 0$$

En donde C, representa la celeridad de la Onda correspondiente a $5/3V_o$.

Además, para garantizar la estabilidad del modelo se debe cumplir que el número de Courant r sea menor a la unidad.

$$r = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

Para la aplicación del modelo, se dividió la zona de estudio en tres tramos; el primero corresponde desde la estación Skinco hasta el punto en donde descarga sobre la quebrada Tesorito, con una longitud aproximada de 798 m. El segundo tramo va desde la estación Tesorito hasta la desembocadura en la quebrada Manizales, con longitud de 712 m. y el tercer tramo, aquel donde

se evalúan las zonas en riesgo, correspondiente al trayecto de la quebrada Manizales aguas abajo, con una longitud de 3465m. En cada uno de los tramos se realizó un modelo de Onda cinemática, teniendo en cuenta que para el tramo 3, el hidrograma de entrada será la suma de los tramos 1 y 2.



Figura 156. Tramos de análisis Onda Cinemática para la quebrada Manizales.

Las condiciones iniciales de cada tramo, se obtuvieron mediante un análisis de la geometría de cada sección por medio del software FlowMaster, aplicando la ecuación de Manning, con los parámetros que se indican a continuación:

Tabla 14. Ejemplo Condiciones iniciales tramo 1. Estación Skinco

Qo (m3/s)=	7.92	C =	2.85
n=	0.08	Δt (s) =	60
S=	0.0801	r =	0.99
Yo (m)=	0.38	Δx cal (m)=	172.72
Ao (m2)=	4.63	Δx adop (m) =	175
Vo (m/s)=	1.71	r real =	0.977

Luego se realizó las simulaciones del modelo de Onda cinemática para cada periodo de retorno de cada uno de los tramos. A continuación, me muestra el ejemplo de los resultados para el Tr=40 años:

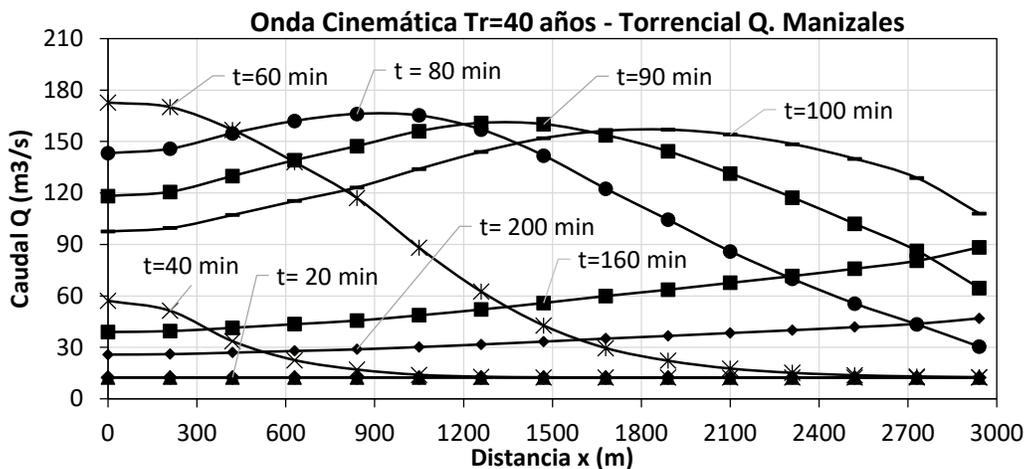


Figura 157. Ejemplo resultado modelo Onda Cinemática tramo 3- Tr40 años

La quebrada Manizales también fue modelada en el software IBER siguiendo el mismo procedimiento que se explicó en las cuencas anteriores. A) Se realizó la malla no estructurada de elementos finitos para el modelo digital del terreno de la quebrada. B) Se realizó la digitalización de usos de suelos y asignación del coeficiente de rugosidad. C) Se introdujo las medidas de las estructuras hidráulicas presentes en la quebrada, especialmente en las obras de control torrencial que corresponden a un dique transversal con un box culvert de 3.00 x 3.00. D) Se modificó el MDT con la altura de las edificaciones cercanas a la quebrada. A continuación se muestran imágenes del preproceso realizado, así como los resultados obtenidos.

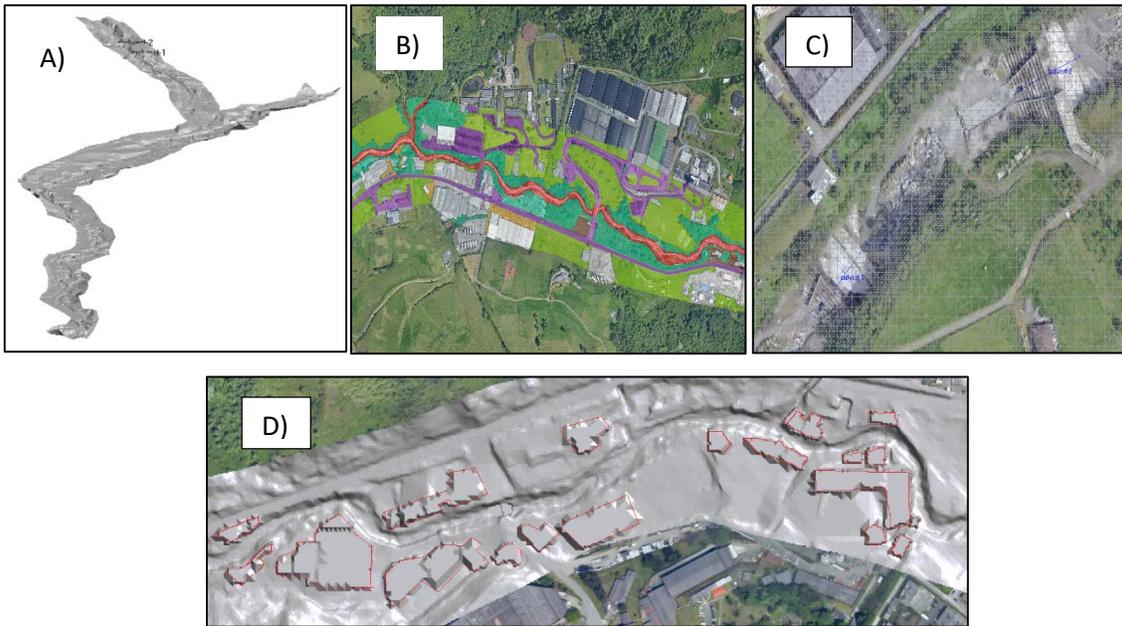


Figura 158. Preproceso modelación hidráulica quebrada Manizales.

5.5.1 Resultados modelación hidráulica quebrada Manizales.



Figura 159. Mapa de calados máximos quebrada Manizales $T_r=2.33$ años.



Figura 160. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados $Tr=2.33$ años.



Figura 161. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados $Tr=2.33$ años.



Figura 162. Tramo 3 Quebrada Manizales. Mapa de calados $Tr=2.33$ años.



Figura 163. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=2.33 años.

En las figuras anteriores se puede observar los resultados de la modelación hidráulica en IBER para la quebrada Manizales correspondiente al $Tr=2.33$ años. Se observa en la Figura 160 el funcionamiento de las obras de control torrencial construidas aguas arriba de la fábrica SKINCO, estos diques transversales producen un amortiguamiento del pico del hidrograma y por lo tanto una descarga controlada de los caudales hacia aguas abajo. En la Figura 161, correspondiente al tramo en donde ya se tiene el aporte de la quebrada Tesorito, se muestra un incremento de los calados y además la ocupación del flujo de las *floodplain pockets* aledañas a la Vía Panamericana Bogotá y sobre la zona de la Industria Licorera de Caldas, aunque no se presenta un desbordamiento de la quebrada. Además, para este periodo de retorno se presenta desbordamiento únicamente sobre el tramo 3 (Figura 162), específicamente sobre las casas ubicadas después del puente de La Consolata. Lo anterior se debe al estrechamiento del canal y al aporte de caudal realizado por la quebrada Guayabal en la desembocadura hacia la quebrada Manizales aguas arriba, dando como resultado el incremento del caudal y los niveles. Finalmente, en la Figura 163 se muestra el mapa de velocidades de la quebrada Manizales en donde se destaca una alta velocidad del flujo sobre el sector de SKINCO, producto de la impermeabilización con concreto de las paredes y el fondo del canal en este sector.



Figura 164. Mapa de calados máximos quebrada Manizales Tr=15 años.

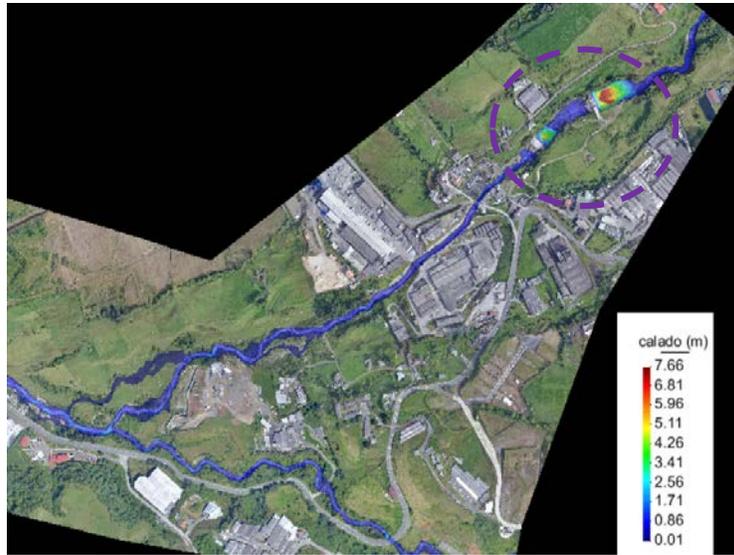


Figura 165. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=15 años.



Figura 166. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=15 años.



Figura 167. Tramo 3 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=15 años.



Figura 168. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=15 años.

Para el periodo de retorno de 15 años se observa que existe un desbordamiento considerable de la quebrada Manizales. Es importante resaltar el funcionamiento de las obras de control torrencial que minimizan el efecto aguas abajo, en la Figura 165 se evidencia la retención y amortiguamiento del flujo sobre el primer dique, alcanzando una altura de 7.66 m y evitando el desbordamiento sobre la fábrica SKINCO. Sin embargo, la atenuación del caudal pico realizada por estas obras contrasta con el aporte de la quebrada Tesorito, en la cual no existe ninguna obra de control y por lo tanto genera el desbordamiento después de su desembocadura sobre la quebrada Manizales. En la Figura 166 se puede evidenciar esta situación, en donde el agua se desborda justo después del puente de la Industria Licorera de Caldas y empieza a circular por la Vía Panamericana afectando las bodegas y talleres aledaños a la quebrada, este tramo inicia desde el punto de Recinto El Pensamiento hasta el puente de La Consolata. Finalmente, sobre el tramo 3 los márgenes de inundación muestran dos puntos de desbordamiento de la quebrada; el primero que afecta las bodegas y fábricas de Maltería (entre ellas Super de Alimentos SA y Outlet Maltería), y el segundo una leve afectación de la vía Panamericana cercano al puente de La Libertad y la glorieta San Marcel (Figura 167).



Figura 169. Mapa de calados máximos quebrada Manizales Tr=40 años.

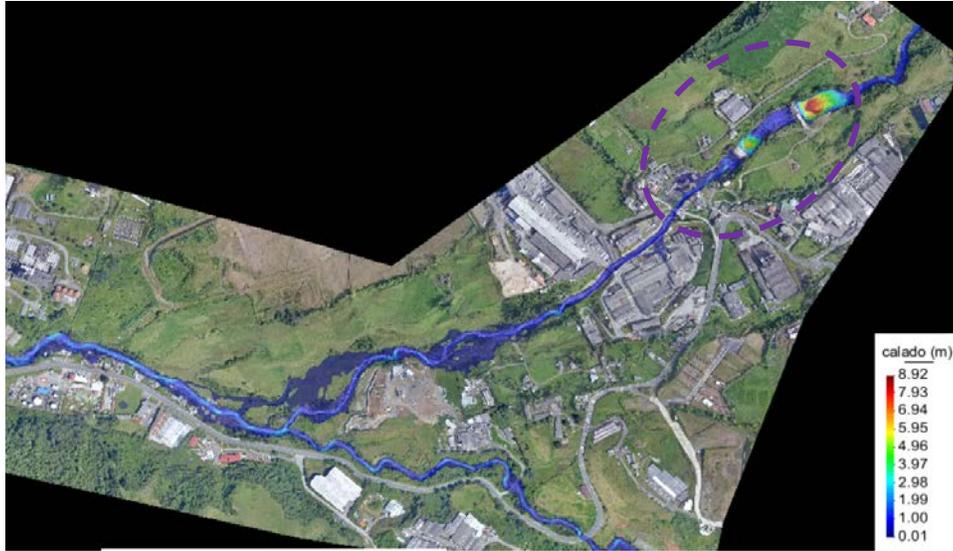


Figura 170. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=40 años.

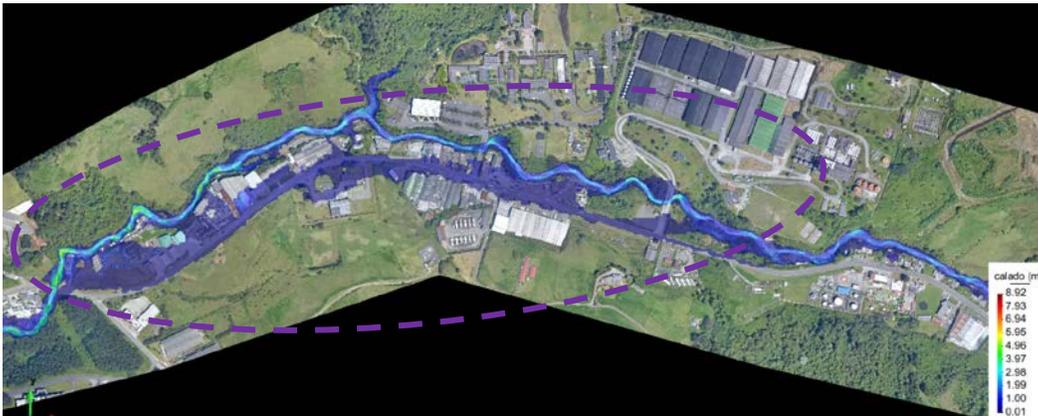


Figura 171. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=40 años.



Figura 172. Tramo 3 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=40 años.



Figura 173. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=40 años.

Para el periodo de retorno de 40 años se observa que en el tramo 1 los valores de los calados crecen considerablemente sobre las obras de control torrencial, y teniendo en cuenta que la altura de los diques es de 10 m, el nivel del agua alcanza un valor 8.92 m para el primer dique, lo que supone un volumen de almacenamiento temporal importante. Además en este tramo se tiene un incremento en el área delimitada por las márgenes de inundación, especialmente cercano al punto donde desemboca la quebrada Tesorito. El tramo 2 se caracteriza por presentar una inundación a lo largo de la Vía Panamericana, afectando las viviendas, bodegas y fábricas de la zona. Finalmente, para el tramo 3 se observa el incremento en el área de inundación de los puntos mencionados para el Tr=15 años.

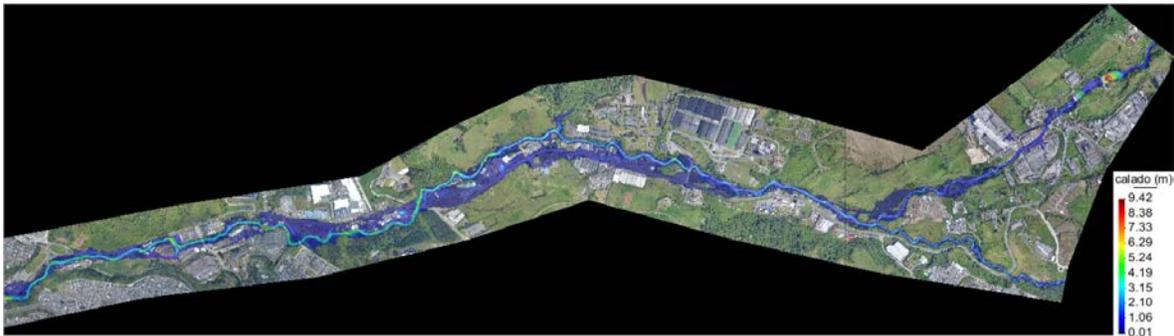


Figura 174. Mapa de calados máximos quebrada Manizales Tr=100 años.



Figura 175. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=100 años.

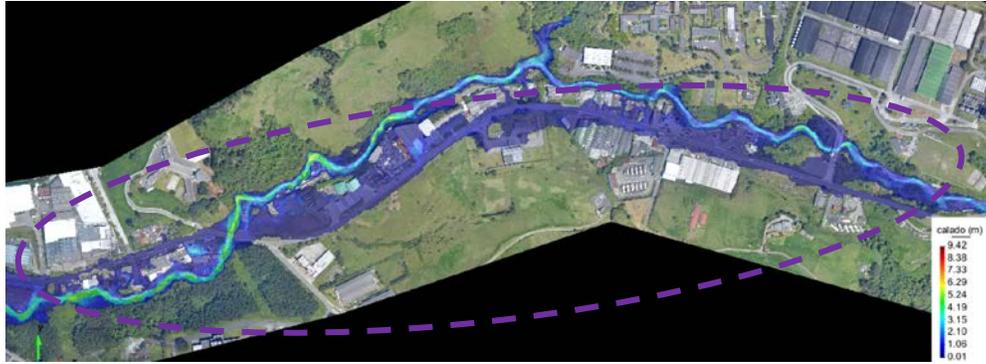


Figura 176. Tramo 2 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=100 años.



Figura 177. Tramo 1 Quebrada Manizales. Mapa de calados Tr=100 años.



Figura 178. Mapa de velocidades Quebrada Manizales Tr=100 años.

Finalmente, los resultados para el periodo de retorno de 100 años muestran que en los puntos anteriormente mencionados los desbordamientos aumentaron su nivel de inundación y además existe un incremento de la velocidad del flujo, significando un mayor riesgo para los pobladores debido al incremento de la energía cinética. En cuanto al Tramo 1 (Figura 175), se observa como el calado máximo alcanzado en el primer dique (9.42 m) es muy cercano a la altura de la estructura (10 m), lo que supone un riesgo importante si este se remansa. Además se observa que pese a los diques transversales, se presenta para este periodo de retorno una pequeña inundación sobre las instalaciones de la fábrica SKINCO y viviendas aledañas, junto con el incremento de velocidad que se observa en este tramo canalizado del lecho de la quebrada.

Posterior a los resultados de esta modelación, se obtuvieron las secciones transversales del canal en las abscisas que presenten riesgo para la comunidad, viviendas, vías, fábricas, etc. Seleccionándose las siguientes secciones:

Sección 1: 00 +217 m
Sección 4: 01 +736 m
Sección 7: 03 +038 m

Sección2: 00+868m
Sección5: 01+953m

Sección3: 01+058m
Sección6: 02+387m



Figura 179. Ejemplo Sección 00+868m y 01+058 m.

la geometría hidráulica de la sección transversal en cada punto de análisis, fue calculada por medio de la fórmula de Manning, proceso realizado mediante el software FlowMaster, con lo cual se pudo determinar la altura de lámina de agua para el caudal máximo en cada período de retorno. A continuación, se muestran los niveles de lámina de agua para cada sección:

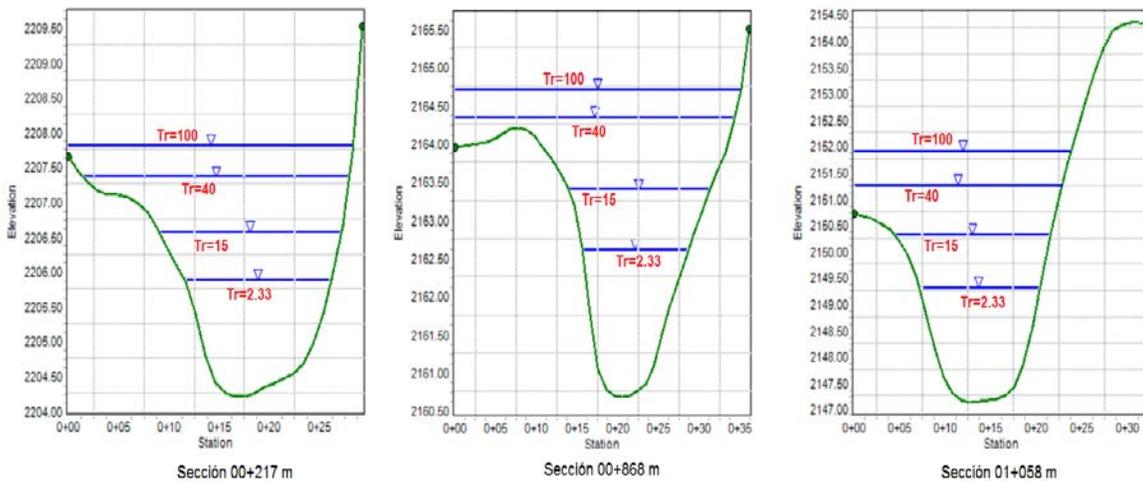


Figura 180. Ejemplo Secciones nivel de lámina de agua para cada periodo de retorno.

El anterior análisis permitió concluir que existen tres secciones críticas (00+217 m, 01+058m, 01+736 m), debido a que la amenaza de inundación es evidente, especialmente para

el caudal de $Tr=15$ años, que se aproxima al desbordamiento del cauce, además estas secciones presentan comunidades asentadas cerca de las riberas y llanuras de inundación de la quebrada que incrementan el riesgo. En cuanto a las secciones en la parte baja de la cuenca, cercanas a la desembocadura en el río Chinchiná, se evidencia en la geometría de la sección una incisión del cauce, por lo tanto, el nivel de agua no alcanza a generar inundación y se disminuye la amenaza.

5.6 Umbrales de precipitación preliminares para la Quebrada Manizales.

Para las secciones definidas como críticas anteriormente, se realizó una curva de niveles vs caudal, con el fin de determinar el caudal que produce un desbordamiento en el cauce, y el cual que genera una inundación que afecte a determinada comunidad.

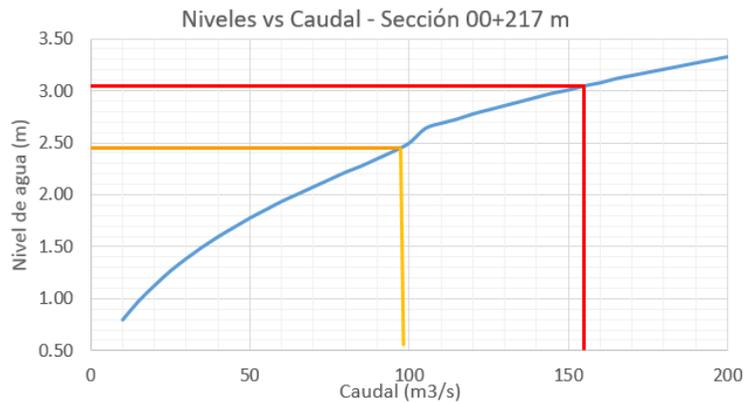


Figura 181. Ejemplo Niveles de desbordamiento e inundación sección 00+217m- Quebrada Manizales.

Tabla 15. Resumen caudales y niveles de desbordamiento e inundación Quebrada Manizales.

Sección	Caudal Desbordamiento (m3/s)	Nivel (m)	Caudal Inundación (m3/s)	Nivel (m)
00+217 m	96.86	2.45	155.06	3.05
01+058 m	101.95	2.87	117.16	3.19
01+736 m	120.25	3.3	132.5	3.69

Finalmente, se realizó la correlación de lluvia –niveles, en el cual se determinaron 3 niveles de alerta en base a la lluvia observada por un periodo de 10 minutos. cabe aclarar que estos niveles de alerta se obtuvieron en relación al nivel de lámina de agua alcanzado sobre la sección transversal y su posible consecuencia en cuanto a desbordamiento y afectación de infraestructura. Por lo tanto, no corresponden a los estados de alerta que manejan las autoridades de emergencia (estados de alerta amarillo, naranja y rojo). El primer nivel de alerta se definió como el nivel logrado en la sección

crítica igual al 80% del nivel de desbordamiento, el segundo nivel de alerta será el evento que alcance un nivel de agua igual al nivel de desbordamiento del cauce para la sección más crítica, sin causar una afectación a la población y la infraestructura. Finalmente, el tercer nivel de alerta será igual al evento que logre alcanzar el nivel de inundación con afectación a la población y a la infraestructura.

Por lo anterior, a partir de la curva de niveles vs caudales, se realiza el proceso para relacionar la intensidad de lluvia y los niveles en la sección más crítica, como se muestra a continuación.



Figura 182. Umbrales preliminares cuenca Quebrada Manizales

De la *Figura 161* se puede observar que debido al cambio de distribución temporal de la precipitación existen curvas diferentes de niveles vs precipitación, es decir, el cambio en la lámina de agua depende de la forma del hietograma y no únicamente del valor acumulado de la precipitación, en este sentido la cuenca es más sensible a eventos de precipitación que presenten un valor de precipitación constante durante la duración del aguacero.

Como conclusión quedan establecidos los umbrales de alerta preliminares en base a la precipitación acumulada en un período de tiempo de 10 minutos, es decir;

- **Primer Nivel de alerta:** [11.2 mm, 12.8 mm)
- **Segundo Nivel de Alerta:** [12.8 mm ,15.2 mm)
- **Tercer Nivel de Alerta:** > 15.2 mm

6 VALIDACIÓN MODELO CON DATOS HISTÓRICOS:

Se realizó una búsqueda de eventos históricos en los registros de las estaciones pertenecientes a la cuenca Manizales, sin embargo, debido a que éstas presentan una serie muy corta de datos (de aproximadamente 2 años), no se tienen registro de los eventos de interés de los cuales se tiene reporte de crecidas con afectaciones a las comunidades, dichos eventos son:

- 26-27 de mayo de 2008
- 11-16 de noviembre de 2008
- 21 de marzo de 2011
- 13 de abril de 2011

Por lo anterior se procedió a realizar una validación con el evento del 19 de abril de 2017 con las siguientes consideraciones: se realizó la simulación con el hietograma registrado en la estación Hospital Caldas (el mayor registro de precipitación para ese evento, 156 mm de lluvia aproximadamente), y con el hietograma de la estación La Nubia (73 mm de lluvia acumulada aproximadamente). El procedimiento consistió en ingresar estos hietogramas al modelo TETIS, obtener el caudal de salida en cada una de las estaciones afectándolo por el 40% de volumen para simular las condiciones torrenciales propias de la cuenca y posteriormente realizar la modelación hidráulica con el método de la onda cinemática. Finalmente se comprobó los umbrales propuestos para dichos eventos, para la emisión de las alertas, analizando el tiempo de anticipación.

A continuación, se muestran las tablas de comprobación de los umbrales y alertas para cada uno de los eventos y posteriormente las gráficas de las simulaciones. En la columna Umbral se muestra el acumulado de precipitación cada 10 minutos, esta casilla es comparada con los diferentes niveles de alarma propuesto los cuales son:

Nivel de Alarma primario >	11.2
Nivel de Alarma Secundario >	12.8
Nivel de Alarma Terciario >	15.2

Simulación Evento 19 de Abril de 2017 - PPT obtenida Est. Hospital Caldas				
Tiempo (min)	PPT (mm)	Caudal (m3/s)	Umbral	Nivel de Alerta
0	0	0	0	
5	0.2	0.0	0.2	
10	0.4	0.0	0.6	
15	0.0	0.0	0.4	
20	0.2	0.0	0.2	
25	0.0	0.0	0.2	
30	0.2	0.0	0.2	
35	0.8	0.0	1.0	
40	1.2	0.0	2.0	
45	0.8	0.0	2.0	
50	0.8	0.0	1.6	
55	1.0	0.0	1.8	
60	1.0	0.0	2.0	
65	1.6	0.0	2.6	
70	5.8	0.0	7.4	
75	4.2	0.0	10.0	
80	5.0	0.0	9.2	
85	7.2	0.5	12.2	Primer Nivel de Alerta
90	5.8	4.4	13.0	Segundo Nivel de Alerta
95	5.0	14.5	10.8	
100	8.4	30.5	13.4	Segundo Nivel de Alerta
105	6.4	52.5	14.8	Segundo Nivel de Alerta
110	6.0	79.1	12.4	Primer Nivel de Alerta
115	8.6	106.0	14.6	Segundo Nivel de Alerta
120	8.8	132.8	17.4	Tercer Nivel de Alerta
125	7.6	156.1	16.4	Tercer Nivel de Alerta
130	9.8	173.9	17.4	Tercer Nivel de Alerta
135	7.8	188.9	17.6	Tercer Nivel de Alerta
140	6.8	199.9	14.6	Segundo Nivel de Alerta
145	8.6	207.1	15.4	Tercer Nivel de Alerta
150	6.4	209.0	15.0	Segundo Nivel de Alerta
155	6.2	206.1	12.6	Primer Nivel de Alerta
160	4.2	199.3	10.4	

Simulación Evento 19 de Abril de 2017 - PPT obtenida Est. La Nubia				
Tiempo (min)	PPT (mm)	Caudal (m3/s)	Umbral	Nivel de Alerta
0	0.0	0.0	0.0	
5	0.2	0.0	0.2	
10	0.6	0.0	0.8	
15	0.4	0.0	1.0	
20	0.8	0.0	1.2	
25	0.4	0.0	1.2	
30	1.8	0.0	2.2	
35	2.4	0.0	4.2	
40	0.4	0.0	2.8	
45	0.0	0.0	0.4	
50	0.6	0.0	0.6	
55	3.8	0.0	4.4	
60	5.8	0.0	9.6	
65	7.4	0.0	13.2	Segundo Nivel de Alerta
70	2.4	0.0	9.8	
75	2.6	0.0	5.0	
80	1.8	0.5	4.4	
85	3.8	3.2	5.6	
90	6.2	9.3	10.0	
95	4.8	17.3	11.0	
100	4.2	25.1	9.0	
105	2.8	31.2	7.0	
110	1.6	35.3	4.4	
115	1.0	37.7	2.6	
120	1.0	39.0	2.0	
125	1.0	40.2	2.0	
130	1.4	40.7	2.4	
135	1.8	40.5	3.2	
140	0.6	39.5	2.4	
145	0.6	37.9	1.2	
150	0.6	36.1	1.2	
155	0.4	34.8	1.0	
160	0.6	33.8	1.0	

Los resultados muestran que para los dos eventos se activó la alarma de manera adecuada. Para la consideración del evento 1 correspondiente al hietograma registrado en la estación Hospital Caldas (el más crítico por el volumen de esorrentía), se muestra sé que se activó el primer nivel de alarma en el minuto 85 después de iniciado el evento, el nivel de alerta 3 al minuto 120 y el caudal pico se

produjo al minuto 150, en este sentido el primer aviso se hubiere emitido con 65 minutos de antelación y el estado de alarma 3 con 30 minutos, por lo tanto se puede concluir que bajo estas condiciones el modelo y los umbrales funcionarían correctamente. Sin embargo, para el evento 2 (hietograma estación La Nubia) se muestra que la precipitación fue suficiente para superar el umbral correspondiente al nivel de alarma 2, pero debido a la distribución temporal de la lluvia en los siguientes minutos, mostrando un decremento, no fue suficiente para producir un caudal con la capacidad de incrementar los niveles de manera que haya afectaciones a la comunidad. Por lo tanto, se puede concluir que pese al nivel de alarma que fue emitido en el minuto 65 y que los niveles no se incrementaron de manera que represente un peligro para la comunidad, este hubiera sido un buen indicador para el monitoreo más detallado de las condiciones de las quebradas por parte de las autoridades, sin embargo, cuando se presente este tipo de situaciones y sobre todo para el nivel de alerta terciario se debería pensar en la posibilidad de establecer una metodología que tenga en cuenta el si el dato de precipitación subsecuente decrece, se mantiene o crece con el fin de emitir el nivel de alarma a la comunidad y no generar falsas alarmas.

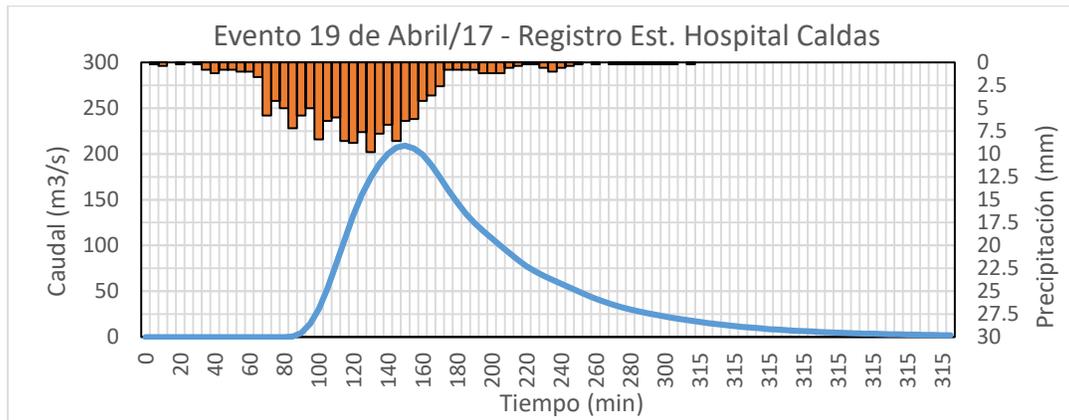


Figura 183. Resultados simulación Q.Manizales- Hietograma Hospital Caldas

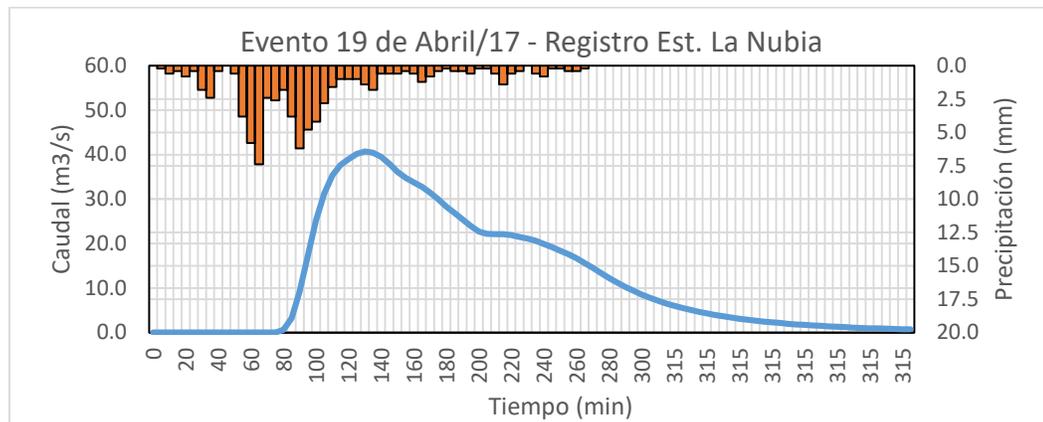


Figura 184. Resultados simulación Q. Manizales – Hietograma La Nubia.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- Se establecieron los umbrales preliminares de alerta temprana basados en una modelación hidrológica, a través del modelo TETIS, que permitió obtener caudales a partir de varias lluvias de diseño para diferentes periodos de retorno. Sin embargo, se recomienda realizar a futuro un estudio más detallado que involucre un análisis estadístico más riguroso que permita la simulación de una gran cantidad de distribución de lluvia temporal para diferentes duraciones, permitiendo así obtener unos umbrales de precipitación asociados a una incertidumbre.
- Los umbrales de alerta se determinaron bajo la única condición de un caudal base sobre los afluentes igual a la mitad del caudal de banca llena, sin embargo, es importante tener en cuenta la variabilidad temporal de caudales, por lo tanto, se recomienda realizar un estudio más detallado que contemple los caudales base de periodo de estiaje y periodos húmedos.
- Al realizar una comparación de los umbrales obtenidos para las diferentes cuencas se puede concluir que pese a la diferencia que presentan los valores en los umbrales, en general existe un grado de similitud entre los mismos, siendo la cuenca El Guamo la que menor valores presenta, seguido de en orden ascendente por la cuenca de la quebrada Manizales y finalmente la cuenca quebrada Olivares. Inicialmente se podría establecer una relación con respecto al tamaño de la cuenca para explicar esta situación, sin embargo, existen otros factores que pueden afectar los resultados y convendría realizar un análisis más detallado.
- Se recomienda que los umbrales obtenidos se sometan a un periodo de prueba para que se pueda evaluar la eficacia de los mismos, teniendo en cuenta que los sistemas de alerta temprana se deben retroalimentar y actualizar a medida que sucedan los eventos. Por lo tanto, estos umbrales preliminares constituyen apenas un inicio de lo que deber ser un sistema de alerta temprana por inundación en la ciudad de Manizales.

- Los umbrales de alerta temprana fueron obtenidos a partir de la cantidad acumulada de precipitación en 10 minutos. Además, se debe contemplar la posibilidad de realizar estudios que involucren otras metodologías a medida que se adquiere más información, en especial las series de datos de las estaciones meteorológicas.
- En las visitas de campo realizadas a las quebradas se observó una alta acumulación de sedimentos, basura, escombros y ramas sobre las estructuras y las zonas canalizadas de las quebradas. Esta acumulación de sedimentos representa una disminución de la capacidad hidráulica de las estructuras y por lo tanto un aumento de la probabilidad de desbordamiento e inundaciones frente a eventos de precipitación.
- Se recomienda realizar una limpieza y remoción de los sedimentos sobre las estructuras y canales con el fin de mejorar su capacidad hidráulica y disminuir la probabilidad de desbordamiento. Además, se recomienda que el mantenimiento de las estructuras sea periódico, y en especial, se realicen con anterioridad a las temporadas de mayor de precipitación.
- Una definición más exacta de las zonas inundables requerirá de una topografía de detalle para elaborar un muy un modelo digital del terreno más fino, y sobre el cual se pueda simular inundaciones de mayor precisión, permitiendo así contribuir en la toma de decisiones para las entidades locas, y con ello definir unas rondas hídricas seguras y decretar las zonas que necesitan ser desalojadas.
- Es necesario realizar un inventario de obras (muros, puentes, contenciones, etc.) en la cuenca, para mejorar las modelaciones hidráulicas que permitan evidenciar las reales obstrucciones al flujo líquido y sólido en el cauce.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. V. Hromadka, "The state-of-the-art in hydrologic models," *Environ. Softw.*, vol. 2, no. 1, pp. 29–36, Mar. 1987.
- [2] O. Ocampo L, "Análisis de Vulnerabilidad de la cuenca del río Chinchiná para condiciones estacionarias y de cambio climático," Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2012.
- [3] F. Francés, J. I. Vélez, and J. J. Vélez, "Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models," *J. Hydrol.*, vol. 332, no. 1–2, pp. 226–240, Jan. 2007.
- [4] L. Mays, "Chapter 7 Hydrologic Processes," in *Water Resources Engineering*, Second Edi., Wiley, 2010, p. 230.
- [5] D. F. Rincón and J. J. Vélez, "SPATIO-TEMPORAL DESCRIPTION OF THE RAINFALL IN THE ANDEAN CITY OF MANIZALES (COLOMBIA) FOR STORM DESIGN," 2015.
- [6] World Meteorological Organization, *Manual on flood forecasting and warning*, 2011 Editi., no. 1072. Geneva: WMO, 2011.
- [7] E. Domínguez Calle and S. Lozano Báez, "Sistemas de Alerta Temprana Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia," *Ciencias la Tierra*, vol. 38, no. 148, pp. 321–322, 2014.
- [8] K. Sene, *Flood Warning, Forecasting and Emergency Response*. Springer, 2008.
- [9] M. Diakakis, "Rainfall thresholds for flood triggering. The case of Marathonas in Greece," *Nat. Hazards*, vol. 60, no. 3, pp. 789–800, 2012.
- [10] V. Montesarchio, F. Napolitano, M. Rianna, E. Ridolfi, F. Russo, and S. Sebastianelli, "Comparison of methodologies for flood rainfall thresholds estimation," *Nat. Hazards*, vol. 75, no. 1, pp. 909–934, 2015.
- [11] The University Corporation for Atmospheric Research., *Flash flood early warning system reference guide*. 2010.
- [12] M. L. V Martina, E. Todini, and A. Libralon, "A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning," *Hydrol. Earth Syst. Sci*, vol. 10, pp. 413–426, 2006.
- [13] L. Cea and E. Bladé, "Modelización matemática en lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable," in *Jornadas Técnicas sobre Hidráulica Fluvial*, 2008, pp. 1–30.
- [14] E. Bladé *et al.*, "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos," *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 30, no. 1, p. 10, 2014.
- [15] L. Posada García, *Hidráulica fluvial: transporte de sedimentos*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad Nacional de Minas. Ingeniería civil, 1994.
- [16] L. Gómez and J. Aristizábal, "ESTUDIOS Y DISEÑOS DE INGENIERÍA SOBRE LA QUEBRADA MANIZALES SECTOR COLOMBIT-BOCATOMA PROGEL," Manizales, 2011.
- [17] US Army Corps of Engineers, "HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual," Davis, 2010.

- [18] J. J. VÉLEZ and A. BOTERO, “ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES,” *Dyna*, vol. 78, no. 165, pp. 58–71, 2011.
- [19] Q. Q. Liu, L. Chen, J. C. Li, and V. P. Singh, “Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow.”
- [20] J. Hénonin *et al.*, “Urban flood real-time forecasting and modelling: a state-of-the-art review,” in *DHI conference*, 2010, no. September 2010, p. 21.