

ESTUDIO DE MITIGACIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN  
DEL CANAL EL PROGRESO EN EL MUNICIPIO DE PUERTO  
BOYACÁ, EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

JUAN DAVID RODRIGUEZ ACEVEDO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ D.C.

2018

ESTUDIO DE MITIGACIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN  
DEL CANAL EL PROGRESO EN EL MUNICIPIO DE PUERTO  
BOYACÁ, EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

por

JUAN DAVID RODRIGUEZ ACEVEDO

Trabajo de grado propuesto como cumplimiento de los  
requisitos para optar por el título de especialista en  
Recursos Hidráulicos Y Medio Ambiente

Director  
Germán Eduardo Acero Riveros

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ D.C.

2018

Trabajo de Especialización titulado “*Estudio de mitigación del área de inundación del canal el progreso en el municipio de Puerto Boyacá, en el departamento de Boyacá*”, presentado por Juan David Rodríguez Acevedo, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

Bogotá D.C., noviembre de 2018

## DEDICATORIA

A Dios que me animó en el camino para concluir los estudios de especialización y me exhortó a la perseverancia. A mi amada esposa, quien es mi mayor bendición, y ha creído en todo momento y circunstancia en mí y en el propósito que Dios tiene para nosotros como familia. A mi hijo Jacobo quién con sus contados meses de vida ha sido usado por Dios para enseñarme más sobre el amor y motivarme en la carrera que tenemos por delante. Y a todas aquellas personas a mi alrededor, como testigos de las cosas que he dejado a un lado, para correr con perseverancia la carrera que Dios me ha puesto por delante, pues la vida es una carrera que exige resistencia, corriendo con la mirada fija en aquél campeón que ya ganó la carrera, que es fuente de mi fe, y es quien hace que confíe cada vez más y mejor, a fin de no rendirme ni desanimarme.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su más sincero agradecimiento a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, la cual durante varios años ha sido como un segundo hogar, en el cuál, desde mis estudios de pregrado, he podido potencializar mis habilidades y talentos de la mano del ascenso de mis conocimientos y el desarrollo del pensamiento analítico e ingenioso, que me ha permitido desempeñarme profesionalmente con suficiente competencia proveyendo a la sociedad buenas prácticas de ingeniería y soluciones acertadas.

Igualmente, agradezco al Director del Proyecto, el ingeniero Germán Eduardo Acero Riveros, quién ha sido un excelente ejemplo como ingeniero, docente y persona, por su apoyo en el desarrollo del presente proyecto.

Al director de la especialización, el doctor Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, y demás docentes como el doctor Germán Ricardo Santos Granados y el ingeniero Jairo Alberto Romero Rojas, quienes desempeñan su labor de docencia con profesionalismo y conocimiento, buscando transmitir y brindar a las nuevas generaciones las herramientas necesarias para desempeñarse en la sociedad dejando en alto a la Escuela Colombiana de Ingeniería y en general a la Ingeniería Colombiana.

A Dios y a mi familia por su paciencia, amor, apoyo, respaldo y motivación en el desarrollo de mis estudios y de éste trabajo que marca su culminación.

## RESUMEN

La ingeniería hidráulica y medioambiental, proporcionan a la ingeniería capacidad y herramientas que permiten analizar, planificar, diseñar, evaluar y en general participar en proyectos de aprovechamiento de los recursos hidráulicos, garantizando la conservación del medio ambiente, aportando a la nación colombiana en la ordenación y utilización sostenible de los recursos naturales, con inclusión de la tierra, el agua, el aire, el clima y los recursos genéticos, en beneficio de las generaciones actuales y futuras.

Igualmente, el análisis y modelación hidrológica e hidráulica de cuerpos de agua superficiales, permiten, a través de la información física existente y los datos históricos hidrológicos, conocer su comportamiento para diferentes periodos de retorno, permitiendo la planificación y el desarrollo del manejo de los recursos hidráulicos.

En el presente documento se realiza la caracterización del municipio de Puerto Boyacá y del Canal El Progreso y sus cuencas afluentes, seguido del análisis y modelación hidrológica e hidráulica del canal, para posteriormente realizar el planteamiento y evaluación de alternativas para mitigar el área de inundación y la afectación sobre la población. Finalmente se presenta el diseño y modelación de la propuesta seleccionada para la mitigación del área de inundación y su afectación sobre la población del municipio de Puerto Boyacá.

## ABSTRACT

Hydraulic and environmental engineering provide capability and tools to engineering that allow analyzing, planning, designing, evaluating and in general participating in projects to take advantage of hydraulic resources, guaranteeing the conservation of the environment, contributing to the Colombian nation in sustainable use of natural resources, including land, water, air, climate and genetic resources, for the benefit of current and future generations.

Likewise, hydrological and hydraulic analysis and modeling of surface water bodies allow, through existing physical information and hydrological historical data, to know their behavior for different return periods, allowing the planning and development of resource management hydraulic

In this document the characterization of the town of Puerto Boyacá and of Channel El Progreso and its tributary basins is carried out, followed by the hydrological and hydraulic analysis and modeling of the Channel, to carry out the planning and evaluation of alternatives to mitigate the flood area and the effect on the population. Finally, the design and modeling of the selected proposal for the mitigation of the flood area and its effect on the population of the municipality of Puerto Boyacá is presented.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	8
2.	OBJETIVOS.....	9
3.	MARCO TEÓRICO.....	10
3.1.	CÁLCULO DE CAUDALES DE AGUA LLUVIA .....	10
3.1.1.	Calculo De Caudales Hoyas Menores - Cuencas Urbanas.....	10
3.1.1.1.	Método racional.....	10
3.1.1.2.	Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia IDF .....	10
3.1.1.3.	Áreas Aferentes y/o Drenaje.....	12
3.1.1.4.	Período de Retorno .....	12
3.1.1.5.	Tiempo de Concentración.....	13
3.1.1.6.	Intensidad de Precipitación.....	16
3.1.1.7.	Coeficiente de Escorrentía, C.....	16
3.1.2.	Calculo De Caudales Hoyas Mayores - Cuencas Rurales.....	17
3.1.2.1.	Método del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service .....	17
3.1.2.2.	Factor de reducción por áreas .....	19
3.1.2.3.	Modelo Hidrológico HEC-HMS.....	21
3.2.	MODELACIÓN HIDRÁULICA HEC-RAS.....	25
4.	CARACTERIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE PUERTO BOYACÁ - BOYACÁ.....	28
4.1.	LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	28
4.2.	VIAS DE COMUNIACACIÓN .....	29
4.3.	HIDROGRAFÍA .....	29
4.3.1.	Aguas Superficiales.....	30
4.4.	GEOLOGÍA.....	30
4.5.	TOPOGRAFÍA.....	31
4.6.	CARACTERÍSTICAS SOCIOCULTURALES .....	32
4.6.1.	Estratificación.....	32
4.6.2.	Densidad Poblacional.....	33
4.6.3.	Distribución Espacial .....	33
4.6.4.	Proyección Población.....	34
4.6.5.	Nivel de Complejidad.....	41



5. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL CANAL EL PROGRESO Y SUS CUENCAS AFLUENTES.....	44
5.1. DIAGNÓSTICO DEL CANAL EL PROGRESO .....	44
5.2. CUENCAS DEL CANAL EL PROGRESO .....	45
5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA.....	48
5.3.1. Análisis De Precipitación Total A Nivel Mensual Y Anual Multianual .....	48
5.3.2. Tensión de Vapor .....	49
5.3.3. Humedad Relativa .....	50
5.3.4. Nubosidad .....	51
5.3.5. Punto de Rocío.....	51
5.3.6. Temperatura Media del Aire .....	52
5.3.7. Precipitación Máxima en 24 Horas .....	53
5.4. CAUDALES DE AGUAS LLUVIA.....	54
5.4.1. Calculo De Caudales Hoya Menor - Cuencas Urbanas.....	55
5.4.1.1. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia IDF .....	55
5.4.1.2. Áreas Aferentes.....	56
5.4.1.3. Período de Retorno .....	58
5.4.1.4. Tiempo de Concentración.....	58
5.4.1.5. Intensidad de Precipitación.....	58
5.4.1.6. Coeficiente de Escorrentía, C.....	59
5.4.1.7. Calculo de Caudales Máximos Cuencas Menores .....	59
5.4.1.8. Hidrograma De Cuencas Menores .....	60
5.4.2. Calculo De Caudales Hoya Mayor - Cuencas Rurales.....	61
5.4.2.1. Áreas Aferentes.....	62
5.4.2.2. Tiempo de Concentración.....	62
5.4.2.3. Método del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service .....	63
5.4.2.4. Factor de Reducción Por Áreas.....	63
5.4.2.5. Histogramas de Aguaceros Puntuales.....	64
5.4.2.6. Hietogramas de Aguaceros Espaciales .....	67
5.4.2.7. Crecientes y Caudales Máximos Instantáneos (Modelo HEC-HMS).....	68
5.4.2.8. Hidrogramas De Escorrentía Hoyas Mayores (Modelo HEC-HMS) .....	68
5.5. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DEL CANAL.....	71
5.5.1. Localización.....	71
5.5.2. Componentes Del Sistema De Descarga .....	72
5.5.2.1. Compuertas.....	73

5.5.3.	Componentes Del Sistema De Bombeo .....	74
5.5.3.1.	Tuberías de succión.....	74
5.5.3.2.	Cuarto de bombas.....	74
5.5.4.	Evaluación Hidráulica Del Sistema De Bombeo Existente .....	75
6.	MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL CANAL EL PROGRESO.....	76
6.1.	GEOMETRÍA DEL CANAL.....	76
6.2.	MODELACIÓN CON FLUJO PERMANENTE.....	78
6.2.1.	Datos De Entrada Al Modelo .....	78
6.2.2.	Perfiles de Flujo Máximo Modelación Permanente.....	79
6.2.3.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 2 Años .....	79
6.2.4.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 5 Años .....	80
6.2.5.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 10 Años .....	81
6.2.6.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 25 Años .....	82
6.2.7.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 50 Años .....	83
6.2.8.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 100 Años.....	84
6.3.	MODELACIÓN CON FLUJO NO PERMANENTE .....	85
6.3.1.	Modelación Para 2 Años de Periodo de Retorno.....	85
6.3.1.1.	Datos De Entrada Al Modelo .....	85
6.3.2.	Perfil de Flujo Máximo Para Periodo de Retorno de 2 Años.....	87
6.3.3.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 2 Años .....	87
6.3.4.	Modelación Para 25 Años de Periodo de Retorno.....	88
6.3.4.1.	Datos De Entrada Al Modelo .....	88
6.3.5.	Perfil de Flujo Máximo Para Periodo de Retorno de 25 Años.....	90
6.3.6.	Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 25 Años .....	90
6.4.	CONCLUSIONES DE LA MODELACIÓN.....	92
7.	PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA MITIGACIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN DEL CANAL .....	93
7.1.	PLANTEAMIENTO ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	93
7.2.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO .....	96
8.	DISEÑO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA PARA LA MITIGACIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN.....	99
8.1.	IMPLANTACIÓN, GEOMETRÍA Y PERFIL.....	99
8.2.	MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL CANAL CON LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN.....	104
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	108
10.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	109

## LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO .....	28
ILUSTRACIÓN 2. VÍAS DE COMUNICACIÓN MUNICIPIO DE PUERTO BOYACÁ .....	29
ILUSTRACIÓN 3. DIVISIÓN TOPOGRÁFICA DE PUERTO BOYACÁ .....	32
ILUSTRACIÓN 4. DENSIDAD POBLACIONAL, MUNICIPIO PUERTO BOYACÁ, BOYACÁ, 2016. ....	33
ILUSTRACIÓN 5. PROYECCIÓN TRES MÉTODOS. ....	39
ILUSTRACIÓN 6. LOCALIZACIÓN CANAL EL PROGRESO. ....	44
ILUSTRACIÓN 7. FOTOGRAFÍA COMPUERTAS DEL CANAL EL PROGRESO.....	45
ILUSTRACIÓN 8. FOTOGRAFÍAS AÉREAS DE INUNDACIÓN DEL CANAL EL PROGRESO .....	45
ILUSTRACIÓN 9. DELIMITACIÓN HOYAS HIDROGRÁFICAS SOBRE PLANCHAS IGAC.....	46
ILUSTRACIÓN 10. DELIMITACIÓN HOYAS HIDROGRÁFICAS SOBRE PLANCHAS IGAC Y TOPOGRAFÍA.....	46
ILUSTRACIÓN 11. IDENTIFICACIÓN DE HOYAS HIDROGRÁFICAS CANAL EL PROGRESO. ....	47
ILUSTRACIÓN 12. IDENTIFICACIÓN DE HOYAS HIDROGRÁFICAS CANAL EL PROGRESO (2). ....	47
ILUSTRACIÓN 13. HISTOGRAMA DE VALORES TOTALES DE PRECIPITACIÓN A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL PERIODO (1974-2015).....	49
ILUSTRACIÓN 14. HISTOGRAMA DE VALORES MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL PERIODO (1974-2015).....	54
ILUSTRACIÓN 15. CURVAS IDF – ESTACIÓN CO PUERTO BOYACÁ (CÓD: 23115010).....	56
ILUSTRACIÓN 16. HIDROGRAMA DE CUENCAS MENORES – PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS .....	60
ILUSTRACIÓN 17. HIDROGRAMA DE CUENCAS MENORES – PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS .....	61
ILUSTRACIÓN 18. HIDROGRAMA DE CUENCAS MENORES – PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS .....	61
ILUSTRACIÓN 19. HIDROGRAMA DE CUENCA 10 – PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS.....	68
ILUSTRACIÓN 20. HIDROGRAMA DE CUENCA 10 – PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.....	69
ILUSTRACIÓN 21. HIDROGRAMA DE CUENCA 10 – PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS.....	69
ILUSTRACIÓN 22. HIDROGRAMA DE CUENCA 12 – PERIODO DE RETORNO DE 2 AÑOS.....	70
ILUSTRACIÓN 23. HIDROGRAMA DE CUENCA 12 – PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS.....	70
ILUSTRACIÓN 24. HIDROGRAMA DE CUENCA 12 – PERIODO DE RETORNO DE 25 AÑOS.....	71
ILUSTRACIÓN 25. LOCALIZACIÓN COMPUERTAS DEL CANAL EL PROGRESO.....	71
ILUSTRACIÓN 26. VISTA FRONTAL DE LA ESTRUCTURA DE COMPUERTA .....	72
ILUSTRACIÓN 27. PLANTA ESTRUCTURA DE COMPUERTA .....	73
ILUSTRACIÓN 28. ESTRUCTURA DE COMPUERTAS.....	73
ILUSTRACIÓN 29. TUBERÍA DE SUCCIÓN O TORNILLOS SIN FIN .....	74
ILUSTRACIÓN 30. MOTOR DIESEL .....	75
ILUSTRACIÓN 31. TERRENO Y GEOMETRÍA DEL CANAL EL PROGRESO.....	77
ILUSTRACIÓN 32. GEOMETRÍA 3D DEL CANAL EL PROGRESO .....	77
ILUSTRACIÓN 33. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE ENTRADA.....	78
ILUSTRACIÓN 34. CONDICIONES DE BORDE AGUAS ABAJO ( <i>ESTACIÓN BOMBEO EXISTENTE</i> ) .....	78
ILUSTRACIÓN 35. PERFIL DE FLUJO MODELACIÓN PERMANENTE.....	79
ILUSTRACIÓN 36. ESQUEMA 3D MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 2 AÑOS.....	79
ILUSTRACIÓN 37. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 2 AÑOS .....	80
ILUSTRACIÓN 38. ESQUEMA 3D MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 5 AÑOS.....	80
ILUSTRACIÓN 39. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 5 AÑOS .....	81
ILUSTRACIÓN 40. ESQUEMA 3D MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 10 AÑOS.....	81
ILUSTRACIÓN 41. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 10 AÑOS .....	82
ILUSTRACIÓN 42. ESQUEMA 3D MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 25 AÑOS.....	82
ILUSTRACIÓN 43. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 25 AÑOS .....	83

ILUSTRACIÓN 44. ESQUEMA 3D MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 50 AÑOS.....	83
ILUSTRACIÓN 45. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 50 AÑOS .....	84
ILUSTRACIÓN 46. ESQUEMA 3D MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 100 AÑOS.....	84
ILUSTRACIÓN 47. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN PERMANENTE – TR: 100 AÑOS .....	85
ILUSTRACIÓN 48. RESUMEN INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE ENTRADA.....	85
ILUSTRACIÓN 49. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE ENTRADA.....	86
ILUSTRACIÓN 50. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE ENTRADA – HIDROGRAMAS.....	86
ILUSTRACIÓN 51. PERFIL DE FLUJO MODELACIÓN NO PERMANENTE – TR: 2 AÑOS.....	87
ILUSTRACIÓN 52. ESQUEMA 3D MODELACIÓN NO PERMANENTE – TR: 2 AÑOS, LAMINA MÁXIMA.....	87
ILUSTRACIÓN 53. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN NO PERMANENTE – TR: 2 AÑOS, LAMINA MÁXIMA .....	88
ILUSTRACIÓN 54. RESUMEN INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE ENTRADA.....	89
ILUSTRACIÓN 55. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE ENTRADA.....	89
ILUSTRACIÓN 56. INFORMACIÓN HIDROLÓGICA DE ENTRADA – HIDROGRAMAS.....	90
ILUSTRACIÓN 57. PERFIL DE FLUJO MODELACIÓN NO PERMANENTE – TR: 25 AÑOS.....	90
ILUSTRACIÓN 58. ESQUEMA 3D MODELACIÓN NO PERMANENTE – TR: 25 AÑOS, LAMINA MÁXIMA.....	91
ILUSTRACIÓN 59. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN NO PERMANENTE – TR: 25 AÑOS, LAMINA MÁXIMA .....	91
ILUSTRACIÓN 60. ALTURA REQUERIDA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	93
ILUSTRACIÓN 61. VOLUMEN MATERIAL REQUERIDO PARA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	94
ILUSTRACIÓN 62. VOLUMEN CONCRETO REQUERIDO PARA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	95
ILUSTRACIÓN 63. COSTO APROXIMADO PARA CONSTRUCCIÓN MURO DE CONTENCIÓN.....	95
ILUSTRACIÓN 64. CURVAS DE ALMACENAMIENTO SEGÚN CAUDAL SALIDA .....	97
ILUSTRACIÓN 65. CURVAS DE ALMACENAMIENTO SEGÚN CAUDAL SALIDA .....	97
ILUSTRACIÓN 66. VOLUMEN MÁXIMO ALMACENADO SEGÚN CAUDAL SALIDA .....	98
ILUSTRACIÓN 67. PLANTA DE UBICACIÓN DE LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	99
ILUSTRACIÓN 68. PLANTA - PERFIL ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	100
ILUSTRACIÓN 69. PLANTA - PERFIL ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	100
ILUSTRACIÓN 70. SECCIÓN TRANSVERSAL TIPO PARA EL MURO DE CONTENCIÓN .....	101
ILUSTRACIÓN 71. DETALLES ELEMENTOS GEO-SINTÉTICOS PARA MURO DE CONTENCIÓN.....	102
ILUSTRACIÓN 72. ESQUEMA 3D MODELACIÓN CON ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN– TR: 25 AÑOS .....	104
ILUSTRACIÓN 73. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN CON ESTRUCTURA CONTENCIÓN – TR: 25 AÑOS.....	105
ILUSTRACIÓN 74. ESQUEMA 3D MODELACIÓN CON ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN– TR: 50 AÑOS .....	105
ILUSTRACIÓN 75. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN CON ESTRUCTURA CONTENCIÓN – TR: 50 AÑOS.....	106
ILUSTRACIÓN 76. ESQUEMA 3D MODELACIÓN CON ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN– TR: 100 AÑOS .....	106
ILUSTRACIÓN 77. MAPA INUNDACIÓN MODELACIÓN CON ESTRUCTURA CONTENCIÓN – TR: 100 AÑOS.....	107
ILUSTRACIÓN 78. PERFIL DE FLUJO CON ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	107

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. OBTENCIÓN DE CURVAS IDF .....	11
TABLA 2. PERIODOS DE RETORNO.....	12
TABLA 3. GRADO DE PROTECCIÓN SEGÚN EL NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA.....	13
TABLA 4. FACTOR DE REDUCCIÓN .....	16
TABLA 5. COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA O IMPERMEABILIDAD .....	17
TABLA 6. DESCRIPCIÓN SUBCUENCAS .....	30
TABLA 7. ESTRATIFICACIÓN MUNICIPIO DE PUERTO BOYACÁ .....	32
TABLA 8. POBLACIÓN POR ÁREA DE RESIDENCIA-MUNICIPIO PUERTO BOYACÁ.....	34
TABLA 9. REGISTROS HISTÓRICOS CENSALES .....	35
TABLA 10. DATOS DE PROYECCIÓN DE POBLACIÓN SEGÚN DANE. ....	35
TABLA 11. TASA DE CRECIMIENTO DANE .....	36
TABLA 12. CENSOS DE POBLACIÓN - DANE.....	36
TABLA 13. DATOS DE PROYECCIÓN DE POBLACIÓN MÉTODO ARITMÉTICO .....	37
TABLA 14. DATOS DE PROYECCIÓN DE POBLACIÓN MÉTODO GEOMÉTRICO .....	38
TABLA 15 DATOS DE PROYECCIÓN DE POBLACIÓN MÉTODO EXPONENCIAL.....	39
TABLA 16. POBLACIÓN TOTAL PROYECTADA. ....	40
TABLA 17. ASIGNACIÓN DEL NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA DEL PROYECTO .....	41
TABLA 18. CAPACIDAD ECONÓMICA SEGÚN ESTRATO SOCIOECONÓMICO.....	42
TABLA 19. ESTRATIFICACIÓN MUNICIPIO DE PUERTO BOYACÁ .....	42
TABLA 20. NECESIDADES BÁSICAS INSATISFECHAS NBI 2012 .....	42
TABLA 21. CARACTERÍSTICAS DE LOCALIZACIÓN DE ESTACIÓN HIDROMÉTRICA AFERENTE A LA ZONA DEL PROYECTO .....	48
TABLA 22. VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ORDINARIA PUERTO BOYACÁ .....	48
TABLA 23. VALORES MEDIOS MENSUALES DE TENSIÓN DE VAPOR A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ORDINARIA PUERTO BOYACÁ. ....	49
TABLA 24. VALORES MEDIOS MENSUALES DE HUMEDAD RELATIVA A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ORDINARIA PUERTO BOYACÁ .....	50
TABLA 25. VALORES MEDIOS MENSUALES DE NUBOSIDAD A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ORDINARIA PUERTO BOYACÁ .....	51
TABLA 26. VALORES MEDIOS MENSUALES DE PUNTO DE ROCÍO A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ORDINARIA PUERTO BOYACÁ. ....	51
TABLA 27. VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ORDINARIA PUERTO BOYACÁ .....	52
TABLA 28. VALORES MÁXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS A NIVEL MENSUAL Y ANUAL MULTIANUAL DE LA ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA ORDINARIA PUERTO BOYACÁ. ....	53
TABLA 29. CURVAS INTENSIDAD FRECUENCIA Y DURACIÓN-PUERTO BOYACÁ. ....	55
TABLA 30. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CUENCAS .....	56
TABLA 31. CÁLCULO DE PENDIENTE MEDIA PONDERADA DE LOS CAUCES.....	57
TABLA 32. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN SELECCIONADOS .....	58
TABLA 33. INTENSIDAD DE PRECIPITACIÓN PARA CÁLCULO DE CAUDALES PARA HOYAS MENORES .....	59
TABLA 34. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA CUENCAS HIDROGRÁFICAS AFERENTES A LA ZONA DE PROYECTO. ....	59
TABLA 35. CAUDALES AFERENTES A LOS CANALES CON ÁREAS DE DRENAJE MENORES. ....	60
TABLA 36. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CUENCAS .....	62
TABLA 37. CÁLCULO DE PENDIENTE MEDIA PONDERADA DE LOS CAUCES.....	62
TABLA 38. TIEMPOS DE CONCENTRACIÓN SELECCIONADOS .....	63

TABLA 39. VALORES DE CN PONDERADOS DE LA CUENCA CANAL EL PROGRESO .....	63
TABLA 40. FACTOR DE REDUCCIÓN ESPACIAL POR LLUVIA PUNTUAL .....	64
TABLA 41. CURVAS DE MASAS DE AGUACEROS PUNTUALES ÁREA DE INFLUENCIA ESTACIÓN PUERTO BOYACÁ .....	64
TABLA 42. INCREMENTOS DE LLUVIAS PUNTUALES DE LOS HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN ÁREA DE INFLUENCIA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA PUERTO BOYACÁ .....	65
TABLA 43. INCREMENTOS ARREGLADOS DE LLUVIAS PUNTUALES DE LOS HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN ÁREA DE INFLUENCIA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA PUERTO BOYACÁ .....	66
TABLA 44. HIETOGRAMA DE AGUACERO ESPACIAL CUENCA HIDROGRÁFICA RURAL CANAL EL PROGRESO.....	67
TABLA 45. CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS AFERENTES A LA ZONA DE PROYECTO MÉTODO DEL SOIL CONSERVATION SERVICE (MODELO HEC-HMS) .....	68
TABLA 46. FICHA TÉCNICA MOTORES.....	75
TABLA 47. EVALUACIÓN DE VARIACIÓN DE COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN .....	96
TABLA 48. EVALUACIÓN DE VARIACIÓN DE VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO EN FUNCIÓN DEL CAUDAL DE SALIDA .....	98

## 1. INTRODUCCIÓN

El Canal El Progreso se localiza en el costado sur del casco urbano del municipio de Puerto Boyacá, y recibe aproximadamente el 70% de las aguas pluviales del municipio. Esta estructura inicia en la calle 14 con carrera 9 y termina en el costado occidental del casco urbano.

El caño entrega sus aguas a unas compuertas localizadas después de un box culvert que se ubica en la ruta de Sol. Estas compuertas, corresponden a la sección de control del caño y evitan que, en temporada invernal, ingresen las aguas del río Magdalena al canal.

Cuando las compuertas se cierran, dos tornillos helicoidales bombean el agua al otro lado de la estructura. Sin embargo, los tornillos helicoidales tienen una capacidad de bombeo muy baja, frente al caudal que es aportado por la cuenca alta de la estructura, generando consecuentemente inundaciones que afectan la población aferente.

El presente trabajo, contiene estudio y evaluación de alternativas para la mitigación del área de inundación del canal El Progreso, así como la selección de solución, con el fin de reducir las afectaciones socioeconómicas, ambientales y en salud de la población aferente.

## 2. OBJETIVOS

Diseñar una solución óptima con el fin de mitigar el área de inundación del Canal El Progreso y sus consecuencias ambientales y en salubridad, en el municipio de Puerto Boyacá, en el departamento de Boyacá.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización física y socioeconómica del área urbana del municipio.
- Caracterización del Canal El Progreso y sus cuencas afluentes.
- Análisis y modelación hidrológica e hidráulica del Canal El Progreso y sus afluentes.
- Planteamiento de posibles alternativas de mitigación de la mancha de inundación.
- Selección propuesta definitiva para la mitigación del área de inundación.



### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. CÁLCULO DE CAUDALES DE AGUA LLUVIA

##### 3.1.1. Calculo De Caudales Hoyas Menores - Cuencas Urbanas

###### 3.1.1.1. Método racional

Para la estimación del caudal de diseño se utiliza el método racional, se determinan los caudales máximos a partir del tiempo de concentración del área de drenaje y la relación que este tiene con diferentes períodos de retorno para estimar la intensidad media del evento de precipitación de diseño. Adicionalmente, se tiene en cuenta un coeficiente de escorrentía de acuerdo con el tipo de suelo y del uso que se le está dando al mismo. La ecuación del método racional es:

$$Q = 2.78 CIA$$

Dónde:

I	=	intensidad de la precipitación en mm/hora
C	=	coeficiente de impermeabilidad o escorrentía
A	=	área aferente en Ha
Q	=	caudal pico en l/s.

De acuerdo con el método racional, el caudal pico ocurre cuando toda el área de drenaje está contribuyendo, y éste es una fracción de la precipitación media bajo las siguientes suposiciones:

- El caudal pico en cualquier punto es una función directa de la intensidad.
- I de la lluvia, durante el tiempo de concentración para ese punto.
- La frecuencia del caudal pico es la misma que la frecuencia media de la precipitación.
- El tiempo de concentración está implícito en la determinación de la intensidad media de la lluvia.

###### 3.1.1.2. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia IDF

De acuerdo al numeral D.4.3.3 del RAS 2000 y el artículo 135 de la resolución 330 de 2017, las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) constituyen la base climatológica para la estimación de los caudales de diseño. Estas curvas sintetizan las características de los eventos

extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con periodos de retorno específicos.

Es necesario verificar la existencia de curvas IDF para la localidad. Si existen, éstas deben ser analizadas para establecer su validez y confiabilidad para su aplicación al proyecto. Si no existen o no contemplan datos del último quinquenio, se deben obtener a partir de información pluviográfica de la zona, incluyendo los datos más recientes, para derivar las curvas de frecuencia correspondientes mediante análisis puntuales de frecuencia de eventos extremos máximos. Si esto no permite derivar curvas IDF aceptables para el proyecto, deben ajustarse curvas IDF por métodos sintéticos, derivados con información pluviográfica colombiana. En el análisis se deberán incluir los cambios en las intensidades producidas por los fenómenos de variabilidad y cambio climático sucedidos en Colombia, teniendo en cuenta los lineamientos desarrollados en las comunicaciones nacionales sobre cambio climático, elaborados por el IDEAM.

La obtención de las curvas IDF debe realizarse con información pluviográfica de estaciones ubicadas en la localidad, derivando las curvas de frecuencia correspondientes mediante análisis puntuales de frecuencia de eventos extremos máximos. La distribución de probabilidad de Gumbel se recomienda para estos análisis, aunque otras también pueden ser ajustadas.

Eventualmente, es posible hacer análisis regionales de frecuencia en caso de disponer de más de una estación pluviográfica. Si no existe información en la población, debe recurrirse a estaciones localizadas en la zona lo más cercanas a la población. Si esto no permite derivar curvas IDF aceptables para el proyecto, deben ajustarse curvas IDF por métodos sintéticos, preferencialmente derivados con información pluviográfica colombiana.

De acuerdo con el nivel de complejidad del sistema, la manera mínima permitida de obtención de las curvas IDF se define en la tabla D.4.1. Del RAS 2000, para el caso del municipio de Puerto Boyacá que se encuentra en un nivel de complejidad alto, la obtención mínima de curvas IDF se deben generar a partir de registros pluviográficos.

Tabla 1. Obtención de curvas IDF.

NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA	OBTENCIÓN MÍNIMA DE CURVAS IDF
Bajo y medio	Sintética
Medio alto	Información pluviográfica Calculo del caudal medio diario de aguas residuales regional
Alto	Información pluviográfica local

Fuente: RAS – 2000. Tabla D. 4.1.

Es importante conocer los eventos máximos de lluvia, que pueden ocurrir en una cuenca determinada, pues las obras hidráulicas van a estar inevitablemente sometidas a estos. El método

más común de analizar las precipitaciones máximas es utilizando una tormenta de diseño que involucre una relación entre la intensidad de la lluvia, la duración y los periodos de retorno apropiados para este tipo de proyectos.

### 3.1.1.3. Áreas Aferentes y/o Drenaje

Con el fin de establecer los caudales de diseño para un elemento de drenaje dentro de un sistema de alcantarillado pluvial se deben determinar las áreas aferentes que corresponden a las áreas al elemento. El área de drenaje o tributaria corresponde al área en proyección horizontal aferente al canal, y se expresará en km<sup>2</sup>.

### 3.1.1.4. Período de Retorno

El periodo de retorno de diseño debe determinarse de acuerdo con la importancia de las áreas y con los daños, perjuicios o molestias que las inundaciones periódicas puedan ocasionar a los habitantes, tráfico vehicular, comercio, industria, etc.

La selección del periodo de retorno, está asociada entonces con las características de protección e importancia del área de estudio y, por lo tanto, el valor adoptado debe estar justificado. En la siguiente tabla se establecen valores de periodos de retorno o grado de protección.

Tabla 2. Periodos de Retorno

Características del área de drenaje	Mínimo (años)	Aceptable (años)	Recomendado (años)
Tramos iniciales en zonas residenciales con áreas tributarias menores de 2 ha	2	2	3
Tramos iniciales en zonas comerciales o industriales, con áreas tributarias menores de 2 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias entre 2 y 10 ha	2	3	5
Tramos de alcantarillado con áreas tributarias mayores de 10 ha	5	5	10
Canales abiertos en zonas planas y que drenan áreas mayores de 1000 ha *	10	25	25

Características del área de drenaje	Mínimo (años)	Aceptable (años)	Recomendado (años)
Canales abiertos en zonas montañosas (alta velocidad) o a media ladera, que drenan áreas mayores a 1000 ha	25	25	50

Fuente. RAS 2000

Dependiendo del nivel de complejidad del sistema, las autoridades locales deben definir el grado de protección, esto es, mínimo, aceptable o recomendado. En cualquier caso, este grado de protección, o periodo de retorno debe ser igual o mayor al presentado en la siguiente tabla. Sin embargo, en casos especiales en los cuales exista el peligro de vidas humanas, las autoridades locales pueden incrementar el grado de protección.

Tabla 3. Grado de Protección Según el Nivel de Complejidad del Sistema

Nivel de Complejidad del Sistema	Grado de Protección Igual o Mayor Al:
Bajo	Mínimo
Medio alto	Aceptable
Alto	Recomendado

Fuente. RAS 2000.

### 3.1.1.5. Tiempo de Concentración

Cuando se utiliza la fórmula Racional, se debe suponer que el caudal máximo ocasionado por una determinada intensidad del aguacero de diseño sobre un área de drenaje específica, es producido por el referido aguacero, el cual se prolonga durante un período de tiempo igual al tiempo de concentración del flujo en el punto bajo consideración. Técnicamente, se define este último como el tiempo de concentración,  $T_c$ , el cual es el tiempo requerido para que la escorrentía superficial llegue al punto bajo consideración desde la parte más apartada del área de drenaje.

Para el tiempo de concentración,  $T_c$ , se han pueden utilizar las siguientes fórmulas:

- Ecuación de Kirpich

$$T_c = 0.0078L^{0.77} S^{-0.385}$$

Dónde:

$T_c$ : Tiempo de concentración, en minutos.

$L$ : Longitud del cauce principal, en pies.

$S$ : Pendiente del cauce principal, en pie/pie.

- Ecuación de Témez

$$T_c = 0.3 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$$

Dónde:

- T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración en horas.
- L: Longitud del cauce principal en km.
- S: Pendiente del cauce principal en %.

- Ecuación de Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{LS}}$$

Dónde:

- T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración en horas.
- A: Área de la cuenca en km<sup>2</sup>.
- L: Longitud del cauce principal en km.
- S: Pendiente del cauce principal en m/m.

- Ecuación de V.T. Chow

$$T_c = 0.273 \left( \frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$$

Dónde:

- T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración, en horas.
- L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.
- S: Pendiente del cauce principal, en m/m.

- Ecuación del Cuerpo de Ingenieros

$$T_c = 0.28 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$$

Dónde:

- T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración, en horas.
- L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.
- S: Pendiente del cauce principal, en m/m.

- Ecuación de Williams - Hann

$$T_c = 4.63A^{0.422} / S^{0.46} (L/W)^{0.133}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración en horas.

A: Área de la cuenca en millas cuadradas.

L/W: Relación entre la longitud y el ancho de la cuenca.

S: Diferencia de cotas en pies dividida por la longitud del cauce principal en millas.

- Ecuación de Johnstone y Cross

$$Tc = 5(L/S_0^{0.5})^{0.5}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración en horas.

L: Longitud del cauce principal en millas.

S: Pendiente del cauce principal en pie/milla.

- Ecuación de SCS - Ranser

$$Tc = 0.947 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.

H: Diferencia de altura entre el punto más alto de la hoya y el punto de salida, en metros.

- Ecuación de Ventura - Heras

$$Tc = 0.3 \left( \frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.75}$$

Dónde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.

S: Pendiente del cauce principal en %.

- Ecuación de Hathaway

$$Tc = \left( \frac{36.36(Ln)^{0.467}}{S^{0.234}} \right)$$

Dónde:

Tc: Tiempo de Concentración, en minutos.

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.

S: Pendiente del cauce principal en %.

n: Factor promedio de rugosidad, sin dimensiones.

### 3.1.1.6. Intensidad de Precipitación

La intensidad de precipitación que debe usarse en la estimación del caudal pico de aguas lluvias corresponde a la intensidad media de precipitación dada por las curvas IDF para el período de retorno de diseño definido con base en lo establecido en el literal D.4.3.4. Del RAS-2000, y una duración equivalente al tiempo de concentración de la escorrentía, cuya estimación se define en el literal D.4.3.7, del RAS-2000.

Los valores de intensidad dados por las curvas IDF corresponden a valores puntuales representativos de áreas relativamente pequeñas. En la medida en que las áreas de drenaje consideradas se hacen más grandes, la intensidad media de la lluvia sobre éstas se reduce en razón de la variabilidad espacial del fenómeno de precipitación. En consecuencia, resulta conveniente considerar factores de reducción de la intensidad media de la precipitación en la medida en que el área de drenaje se incremente. Los valores de la siguiente tabla corresponden a factores de reducción para convertir la intensidad puntual en intensidad media espacial.

Tabla 4. Factor de Reducción

Áreas de Drenaje (ha)	Factor de Reducción
50 – 100	0.99
100 – 200	0.95
200 – 400	0.93
400 – 800	0.90
800 – 1600	0.88

Fuente. RAS 2000.

### 3.1.1.7. Coeficiente de Escorrentía, C

El coeficiente de escorrentía, C, es función del tipo de suelo, del grado de permeabilidad de la zona, de la pendiente del terreno y otros factores que determinan la fracción de la precipitación que se convierte en escorrentía. En su determinación deben considerarse las pérdidas por infiltración en el suelo y otros efectos retardadores de la escorrentía. De igual manera, debe incluir consideraciones sobre el desarrollo urbano, los planes de ordenamiento territorial y las disposiciones legales locales sobre uso del suelo. El valor del coeficiente C debe ser estimado tanto para la situación inicial como la futura, al final del periodo de diseño.

Para áreas de drenaje que incluyan sub áreas con coeficientes de escorrentía diferentes, el valor de C representativo del área debe calcularse como el promedio ponderado con las respectivas áreas.

$$C = \frac{(\sum C \cdot A)}{\sum A}$$

Para la estimación de C existen tablas de valores y fórmulas, algunas de las cuales se presentan en la siguiente tabla como guía para su selección. La adopción de determinados valores debe estar justificada.

**Tabla 5. Coeficiente de Escorrentía o Impermeabilidad**

Tipo de Superficie	C
Cubiertas	0.75-0.95
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0.70-0.95
Vías adoquinadas	0.70-0.85
Zonas comerciales o industriales	0.60-0.95
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0.75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas duras entre éstos	0.60-0.75
Residencial unifamiliar, con casas contiguas y predominio de jardines	0.40-0.60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0.45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques-cementerios	0.30
Laderas sin vegetación	0.60
Laderas con vegetación	0.30
Parques recreacionales	0.20-0.35

*Fuente. RAS 2000.*

### 3.1.2. Calculo De Caudales Hoyas Mayores - Cuencas Rurales

Para aquellas hoyas hidrográficas consideradas como mayores; es decir, con un área de drenaje superior a 2.5 km<sup>2</sup> (250 Ha), la metodología a utilizar es la del hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, al cual se le aplicó la lluvia efectiva de diseño.

Para el cálculo de los hidrogramas como unitarios y los de creciente de escorrentía superficial para diferentes periodos de retorno pueden ser calculados con base en el programa de computador HEC-HMS.

#### 3.1.2.1. Método del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia, considerada como uniforme en el espacio y variable en el tiempo. Las siguientes suposiciones básicas son inherentes en este modelo:

- ✓ El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva y las tormentas seleccionadas para el análisis deben ser de corta duración.



- ✓ El exceso de precipitación está uniformemente distribuido en toda el área de drenaje; si ésta es muy grande, debe dividirse en sub-cuencas analizando tormentas que cubran toda la sub-área.
- ✓ El tiempo base de la duración de la escorrentía directa resultante de un exceso de lluvia de una duración dada es constante.
- ✓ Las ordenadas de todas las duraciones de escorrentía directa de una base de tiempo común son directamente proporcionales a la cantidad total de escorrentía directa representada por cada hidrograma.

Para una cuenca dada el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de la cuenca. El hidrograma unitario se considera único para la cuenca dada, e invariable con respecto al tiempo, y es aplicable solamente cuando no se presenten cambios ni almacenamientos apreciables en la cuenca estudiada.

A pesar de que el modelo fue desarrollado originalmente en cuencas grandes, se ha encontrado que puede aplicarse a cuencas pequeñas desde menos de 2.5 km<sup>2</sup> hasta 250 km<sup>2</sup> aproximadamente.

Para hallar el caudal máximo originado por la escorrentía directa, se utiliza el hidrograma unitario curvilíneo, cuyo pico está definido la siguiente ecuación:

$$q_p = 0.208 A E / T_p$$

$$T_p = (6/10) T_{lag}$$

$$T_{lag} = 0.6 T_c$$

Siendo:

- $q_p$ : Caudal unitario máximo, en (m<sup>3</sup>/s) /mm de lluvia.
- A: Área de la cuenca considerada, en km<sup>2</sup>.
- E: Precipitación efectiva unitaria, en mm.
- $T_p$ : Tiempo al pico del hidrograma, en horas, medido desde el comienzo.
- $T_{lag}$ : Tiempo de retardo en horas, medido entre los centros de gravedad del hietograma de lluvia espacial e hidrograma unitario.
- $T_c$ : Tiempo de concentración de la hoya hidrográfica, h.
- L: Longitud del cauce, en metros.
- S: Pendiente de la ladera de la cuenca, en m/m.

El valor CN corresponde con el número de curva de la metodología del Soil Conservation Service.

La distribución temporal del hietograma de lluvia efectiva que causa escorrentía superficial, y la magnitud de las abstracciones de una tormenta, se pueden obtener por el método del Soil Conservation Service, a partir de las siguientes relaciones empíricas:

$$Q = \frac{(P - 0.20S)^2}{P - 0.80S}$$
$$S = \frac{2540}{CN} - 25.4$$

Dónde:

- Q: Escorrentía total acumulada, pulgadas.
- P: Precipitación total del evento, pulgadas.
- S: Infiltración potencial o retención potencial máxima, pulgadas.
- CN: Curva número.

### 3.1.2.2. Factor de reducción por áreas

En general, la precipitación para una duración determinada (o, en otras palabras, la intensidad promedio) decrece desde el centro de las tormentas, a medida que la distancia se incrementa a partir de este punto. La precipitación máxima es representativa del centro de las tormentas, por lo cual la precipitación promedio en la totalidad del área de drenaje deberá ser menor, dependiendo del tamaño y forma de la cuenca, de las tormentas históricas registradas, y de la localización del centro de precipitación máxima.

El cálculo de la reducción de la precipitación a medida que se incrementa el área de drenaje se hace por medio de curvas de profundidad - área - duración para duraciones determinadas de la precipitación. Para cada duración específica de la precipitación se analizan las tormentas que tengan cubrimiento grande sobre el área de drenaje en consideración, y que sean suficientemente intensas. Posteriormente, se dibujan las isolíneas de precipitación de cada tormenta, y por medio de éstas se calculan las curvas de profundidad de precipitación - área de drenaje para cada duración.

La relación entre la profundidad de la precipitación, relacionada a diferentes áreas de drenaje, y la precipitación puntual, definida como el factor de reducción, se calcula posteriormente para modificar las curvas anteriores. Finalmente, se calcula la envolvente de las curvas definidas en el paso anterior para cada duración, la cual define la curva representativa de la relación profundidad de precipitación - área de drenaje de la cuenca.

Para la definición de este parámetro se han estudiado tres autores distintos según la referencia bibliográfica (1), que presentan ecuaciones en las cuales se relaciona básicamente el área de

drenaje y el tiempo de concentración de la cuenca para definir un coeficiente de reducción de la lluvia puntual.

- **Fórmula de Fhrüling**

El coeficiente de reducción de la lluvia por el tamaño del área de drenaje se ha calculado, en primer término, de acuerdo con la ecuación de Fhrüling que expresa:

$$i_m = i_o f(a)$$

O:

$$i_m = i_o (1 - 0.0054 A^{0.25})$$

En donde:

$i_m$ : Intensidad promedio de lluvia en la hoya hidrográfica, mm/h.

$i_o$ : Intensidad de lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1 - 0.0054 A^{0.25})$ : Coeficiente de reducción de la lluvia,  $f(a)$ , por el tamaño del área de drenaje  $A$ , estando esta última variable expresada en  $m^2$ .

- **Formula del Institution of Civil Engineers**

Esta metodología fue presentada para Inglaterra por el Institution of Civil Engineers, Proceedings, 2nd Part, "Flood Studies Report", Volume 65, Research and Theory, June 1978, que expresa:

$$i_m = i_o f(a)$$

O:

$$i_m = i_o (1 - 0.0268 t_c^{-0.261} A^{0.387})$$

En donde:

$i_m$ : Intensidad promedio de lluvia en la hoya hidrográfica, mm/h.

$i_o$ : Intensidad de lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1 - 0.0268 t_c^{-0.261} A^{0.387})$ : Coeficiente de reducción de la lluvia,  $f(a)$ , por el tamaño del área de drenaje  $A$ , estando esta última variable expresada en  $m^2$  y por el tiempo de concentración de la hoya  $t_c$ , expresado en horas.

- **Formula de Norte América**

Esta metodología fue desarrollada con datos tomados en los Estados Unidos de forma experimental.

$$i_m = i_o f(a)$$

O:

$$i_m = i_o (1 - 0.05 t_c^{0.361} A^{0.264})$$

En donde:

$i_m$ : Intensidad promedio de lluvia en la hoya hidrográfica, mm/h.

$i_o$ : Intensidad de lluvia puntual medida en la estación registradora, mm/h.

$(1 - 0.05 t_c^{0.361} A^{0.264})$ : coeficiente de reducción de la lluvia,  $f(a)$ , por el tamaño del área de drenaje  $A$ , estando esta última variable expresada en  $m^2$  y por el tiempo de concentración de la hoya  $t_c$ , expresado en horas.

### 3.1.2.3. Modelo Hidrológico HEC-HMS

El cálculo del hidrograma total, se realizó considerando el hidrograma unitario afectado por la escorrentía directa o precipitación efectiva en cada duración unitaria del hidrograma, el cual va desplazando tal duración. El hidrograma total resultante es la suma de las ordenadas de los diversos hidrogramas unitarios para cada valor constante de tiempo. Para el presente estudio no se adicionó el caudal base, dado que no se posee información para su obtención y que su porcentaje es mínimo en relación al caudal pico. Para ello, se usó el modelo de computador HEC-HMS, considerando la referencia bibliográfica (7) presentadas en el informe.

A continuación, se presenta una descripción teórica del modelo de computador HEC-HMS:

- Descripción Modelo Hidrológico HEC-HMS

Para los trabajos particulares relacionados con estos estudios, se utilizó la versión más reciente de este modelo hidrológico HEC-HMS 4.2.1.

- Filosofía del Modelo

El modelo computacional HEC-HMS ha sido diseñado para simular la escorrentía superficial en una corriente de agua en respuesta a un evento de precipitación como un sistema interconectado de componentes hidrológicas e hidráulicas. Cada componente se modela como un aspecto del proceso precipitación - escorrentía dentro de una porción de la hoya hidrográfica, comúnmente referida como una subhoya. Una componente puede representar una entidad de escorrentía superficial, un canal de una corriente, o un embalse. La representación de una componente requiere de un conjunto de parámetros que especifican las características particulares de tal componente y las relaciones matemáticas que describen los procesos físicos que ocurren y la involucran. El resultado del proceso de modelación es la determinación de los hidrogramas de crecencia en puntos determinados de la hoya hidrográfica.

- **Componentes del Modelo**

### Red de Canales

La hoya hidrográfica se subdivide en un sistema interconectado de canales utilizando mapas topográficos y cualquier otra información geográfica que describa las características existentes o proyectadas de la red de drenaje. En primer término, se delimita la hoya hidrográfica, la cual se subdivide posteriormente en un número determinado de subhoyas de acuerdo con sus propias características, determinando el ejercicio anterior el número y tipos de componentes de canales que se usan en el modelo y su interrelación entre ellas.

### Componente de Escorrentía Superficial del Terreno

La componente de escorrentía superficial del terreno de las subhoyas se utiliza para representar el movimiento del agua sobre la superficie del terreno y en los canales de las respectivas subhoyas. El dato de entrada a esta componente es el hietograma de precipitación total. La precipitación efectiva que produce escorrentía superficial se calcula substrayendo al valor de la precipitación total la infiltración y las pérdidas por detención en el terreno con base en una función de la tasa de infiltración del agua en el suelo. Para los estimativos anteriores, se supone que la precipitación y la infiltración son uniformes sobre cada una de las subhoyas establecidas. Estas pérdidas debidas a la intercepción superficial del terreno, almacenamientos en depresiones e infiltración son denominadas en el modelo computacional HEC-HMS como las pérdidas de la precipitación, las cuales pueden ser estimadas a través de las siguientes metodologías: pérdida inicial y tasa de pérdida uniforme; tasa de pérdida exponencial; método de la curva número CN del Soil Conservation Service, SCS; tasa de pérdida de Holtan; y, función de infiltración de Green y Ampt.

Los excesos de lluvia efectiva son posteriormente transitados a través de las técnicas del hidrograma unitario o de la onda cinemática a la salida de la subhoya, estimándose el hidrograma de escorrentía respectivo. La técnica del hidrograma unitario produce un hidrograma de escorrentía en el punto más aguas abajo de la subhoya respectiva. Si la ubicación para el cálculo de escorrentía no es apropiada, puede ser necesario subdividir aún más la subhoya o utilizar el método de la onda cinemática para distribuir entradas de caudal localizadas en puntos específicos.

El modelo computacional HEC-HMS tiene en cuenta las siguientes metodologías de hidrogramas unitarios: Clark, Snyder y adimensional del SCS. Para las hoyas hidrográficas en consideración, también por su simplicidad y uso arraigado, se ha tenido en cuenta el método del hidrograma unitario adimensional del SCS, el cual se basa en las características del tiempo de desfase, el cual a su vez se basa en el tiempo de concentración, y en el área de drenaje de la subhoya considerada.

La transformación de la lluvia efectiva en escorrentía a través el método de la onda cinemática permite una distribución uniforme de la escorrentía superficial sobre el terreno a lo largo de la longitud del canal principal. Esta distribución uniforme de entradas de caudal localizadas es particularmente importante en hoyas hidrográficas en donde muchos canales laterales contribuyen al caudal a lo largo de la longitud del canal principal. La distribución uniforme de escorrentía desde una subhoya se puede obtener utilizando combinaciones de tres elementos conceptuales: áreas de flujo sobre el terreno, canales colectores y un canal principal. La técnica de tránsito de la onda cinemática puede ser utilizada para transitar la lluvia efectiva sobre las áreas de flujo sobre el terreno.

Por otro lado, tanto las técnicas de la onda cinemática como la de Muskingum - Cunge pueden ser usadas para transitar crecientes laterales entrantes a un canal colector y aguas arriba de éste, y caudales laterales entrantes a través del canal principal. Sin embargo, las teorías de la onda cinemática y de Muskingum - Cunge para el análisis en los diferentes elementos de los canales no pueden ser entremezcladas.

En esta teoría, el elemento de flujo sobre el terreno es un canal rectangular ancho de base unitaria, en el cual el valor de la rugosidad de Manning ha sido reemplazado por un factor de rugosidad de flujo sobre el terreno. Cuando se aplica la teoría de la onda cinemática a un elemento de flujo sobre el terreno, el caudal lateral entrante es la precipitación efectiva, y la salida es un caudal por unidad de ancho. Un elemento de flujo sobre el terreno se describe por medio de cuatro parámetros: su longitud típica de flujo sobre el terreno, su pendiente y factor de rugosidad, y el porcentaje del área de la subhoya representados por estos elementos previos. Un área de flujo sobre el terreno es utilizada para modelar la escorrentía proveniente de usos de tierra permeables y otra área es utilizada para modelar superficies impermeables. La creciente desde los elementos de flujo sobre el terreno viaja hasta la salida de la subhoya a través de uno o dos elementos de canales sucesivos. Un canal se define por su longitud, pendiente, rugosidad, forma, ancho o diámetro, y talud de la sección transversal. El último canal en una subhoya es llamado el canal principal, y cualquier canal intermedio entre los elementos de flujo sobre el terreno y el canal principal es llamado canal colector.

### Componente de Tránsito en Canales

Se utiliza una componente de tránsito del hidrograma de escorrentía en los canales para representar la transformación de la onda de creciente a lo largo de ellos. El dato de entrada a esta componente es un hidrograma de creciente en el punto más aguas arriba, resultante de contribuciones individuales o combinadas de escorrentía de las subhoyas y de su tránsito en canales o embalses. Si se utiliza el método de la onda cinemática, la escorrentía distribuida de los elementos de subhoyas localizadas dentro de la propia subhoya en consideración es también un dato de entrada, el cual se combina con el hidrograma de creciente más aguas arriba mencionado previamente, para ser transitados hasta el final del tramo de canal. El hidrograma es transitado

hasta punto más aguas abajo del canal en estudio con base en las características geométricas y de rugosidad de éste.

El tránsito de crecientes es utilizado para simular el movimiento de la onda de creciente a través de tramos de canales y embalses. La mayoría de los métodos de tránsito de crecientes disponibles en el modelo computacional HEC-HMS están basados en la ecuación de continuidad y alguna otra relación entre el caudal y el almacenamiento o el nivel de agua. Los métodos que utiliza este modelo son: Muskingum, Muskingum - Cunge, onda cinemática, Puls modificado, de trabajo R y D, y tránsito de embalse nivel - almacenamiento. En todos estos métodos, el tránsito procede sobre la base de un tramo de canal independiente desde aguas arriba hacia aguas abajo; no se consideran efectos de remanso ni discontinuidades en la superficie del agua tales como resaltos hidráulicos u ondas de creciente de flujo rápidamente variado.

Los métodos de tránsito en embalses del modelo HEC-HMS son los que requieren datos que definen las características del almacenamiento de un tramo de tránsito o embalse. Estos métodos son: Puls modificado, de trabajo R y D, y tránsito de embalse de nivel - almacenamiento. También existen dos métodos de tránsito en HEC-HMS que están basados sobre las ordenadas del hidrograma de creciente desfasadas. Estos últimos métodos no tienen como punto de partida las características de almacenamiento del embalse, pero han sido utilizados en numerosos ríos con buenos resultados.

### Uso Combinado de las Componentes de Tránsito en Canales y Escorrentía Superficial de las Subhoyas

Se puede representar cualquier tipo de conexión de procesos de precipitación - escorrentía en las subhoyas y el tránsito en canales en la hoya hidrográfica en estudio a través de una combinación adecuada de las componentes de escorrentía superficial en las subhoyas y de tránsito en canales. La conexión de las componentes de la red de canales está implicada por el orden en el cual las componentes de los datos están arregladas. La simulación debe siempre comenzar en la parte más aguas arriba de la subhoya considerada en un ramal de la red de canales. La simulación procede hacia aguas abajo hasta que se alcanza la confluencia respectiva. Antes de simular los procesos aguas abajo de una confluencia, todas las crecientes hasta tal confluencia deben ser calculadas y transitadas hasta ese punto.

### Componente de Tránsito en Embalses

La utilización de la componente de embalse es similar a la componente del tránsito en canales. La componente de embalse opera recibiendo una creciente aguas arriba de éste y transitando los caudales respectivos entrantes a través del embalse, utilizando métodos de tránsito en embalses. Las metodologías para el tránsito de crecientes en embalses con las cuales trabaja el modelo de

computador HEC-HMS fueron explicadas con detalle en la respectiva metodología para el tránsito de crecientes en canales.

### Otras Componentes

Aunque no fueron utilizadas en la modelación hidrológica, se mencionan otras componentes del programa de computador HEC-HMS, con el fin de dar una completa descripción de sus capacidades.

#### ✓ Componente de Desviación

La componente de desviación se utiliza para representar desviaciones o bifurcaciones en un canal, o cualquier otra transferencia de flujo de un punto a otro punto dentro o fuera de la hoya hidrográfica.

#### ✓ Componente de Bombeo

La componente de bombeo puede ser utilizada para simular la acción de plantas de bombeo utilizadas para elevar la escorrentía desde áreas de pondajes bajas.

#### ✓ Transformación de Hidrogramas

La opción de transformación de hidrogramas da capacidad para alterar los hidrogramas de creciente basados en el criterio definido por el usuario

## 3.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA HEC-RAS

En relación con la referencia bibliográfica este modelo simula la hidráulica del flujo para canales, ríos y quebradas de cualquier tipo de sección transversal bajo flujo gradualmente variado, trabajando de acuerdo con la ecuación de Bernoulli:

$$Z_1 + Y_1 + (V_1^2/2g) = Z_2 + Y_2 + (V_2^2/2g) + h$$

En donde:

Z: Nivel del fondo del canal aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de posición, en m.



- Y: Lámina de agua aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo, denominado este término cabeza de presión, en m.
- $V^2/2g$ : Cabeza de velocidad aguas arriba (1) y abajo del tramo (2), denominado este término cabeza de velocidad, en m.
- h: Pérdidas de energía en el tramo, dividiéndose en pérdidas por fricción y localizadas, en m.}

Las pérdidas por fricción en el tramo  $h_f$  para flujo gradualmente variado en un tramo de longitud L del canal se pueden expresar por medio de la ecuación de Manning:

$$h_f = ((S_{e1} + S_{e2}) / 2) L$$

En donde:

$S_{e1}$  y  $S_{e2}$  corresponden a los valores de la pendiente de la línea de energía aguas arriba (1) y abajo (2) del tramo. Estos valores se expresan por medio de la fórmula de Manning para flujo uniforme en cada sección del tramo:

$$S_e = (n^2 V^2 / R^{4/3})$$

En donde:

- n: Coeficiente de rugosidad de Manning, valor adimensional.
- V: Velocidad promedio del agua, en m/s.
- R: Radio hidráulico, en m, igual al área hidráulica A, en  $m^2$ , dividida entre el perímetro mojado P, en m.

De acuerdo con las caracterizaciones de campo, y teniendo en cuenta las recomendaciones de la referencia bibliográfica, se definieron los correspondientes coeficientes de rugosidad, para cada uno de los canales modelados.

Por otro lado, las pérdidas localizadas en un punto del canal se expresan mediante la ecuación:

$$h_l = K \text{ ABS } ((V_1^2 / 2g) - (V_2^2 / 2g))$$

En donde:

- K: Coeficiente de pérdidas localizadas, adimensional.
- V: Velocidad promedio aguas arriba (1) y aguas abajo (2) del punto o tramo en donde se produce la pérdida localizada, en m/s.
- ABS: Valor absoluto del término.

Los resultados de la modelación incluyen los siguientes aspectos para cada sección transversal considerada:

- Abscisa de la sección transversal.
- Caudal total.
- Cota de fondo mínima de la sección transversal.
- Nivel de la lámina de agua.
- Lámina de agua máxima en la sección transversal.
- Nivel de la profundidad crítica.
- Nivel de la línea de energía.
- Pendiente de la línea d energía.
- Velocidad promedio del agua.
- Área hidráulica.
- Ancho de la superficie libre de agua de la sección transversal.
- Número de Froude.

## 4. CARACTERIZACIÓN DEL MUNICIPIO DE PUERTO BOYACÁ - BOYACÁ

### 4.1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

La cabecera municipal de Puerto Boyacá, se localiza en las coordenadas geográficas: 5° 58' norte y 74° 36' oeste. El municipio de Puerto Boyacá hace parte del Magdalena Medio Boyacense y se localiza sobre la margen derecha del río Magdalena, de esta forma presenta una altura promedio de 140 m.s.n.m y limita al norte con el municipio de Bolívar (Santander), al medio con el río Ermitaño, al sur con los municipio de Puerto Salgar y Yacopi en el departamento de Cundinamarca, al oriente con el municipio de Otanche (Boyacá), en las estribaciones de la serranía de las Quinchas, al occidente con los municipios de Puerto Naré, Puerto Triunfo, Puerto Berrio y Sonsón en el departamento de Antioquia, teniendo de por medio el río Magdalena.

El municipio de Puerto Boyacá posee una extensión total de 147.091 km<sup>2</sup>, de la cual 357 Km<sup>2</sup> pertenece al área urbana del municipio y de área rural le corresponde 146.734 km<sup>2</sup>. Dicho municipio presenta una temperatura media de 28° C a una distancia de 373 km de la Capital de Boyacá (Tunja).

En la siguiente imagen se presenta la localización del proyecto.

Ilustración 1. Localización del proyecto



Fuente: Google Earth

## 4.2. VIAS DE COMUNIACACIÓN

El acceso a la cabecera municipal es por vía terrestre, a través de una desviación de 15 km. de la carretera que de Bogotá se comunica con Medellín. A través de la troncal de la Paz, conectándose por dicha vía con Honda y con Barranquilla. La distancia de Tunja, la capital del departamento de Boyacá, es de 375 Km. De Bucaramanga, dista a 390 km, por la vía Puerto Serviez, Puerto Araujo, La Lizama, Bucaramanga. Por vía fluvial se comunica con distintos puertos sobre el río Magdalena al norte de Honda, entre ellos Puerto Perales y Puerto Berrio.

Existe también una red de vías destapadas y de bajas especificaciones que comunica el casco urbano con las veredas y con los municipios limítrofes. A continuación, se presenta la localización de las vías primarias de comunicación del municipio con los puntos de referencia aledaños.

Ilustración 2. Vías de comunicación Municipio de Puerto Boyacá



Fuente. Planeación Municipal- Municipio de Puerto Boyacá.

## 4.3. HIDROGRAFÍA

El municipio cuenta con cuatro (4) ríos principales que conforman su red hidrológica y que además sirven de límites: Magdalena, Guaguaquí, Negro y Ermitaño. A ellos se suman numerosos drenajes que cruzan la región como: La Velásquez, Las Pavas, La Fiebre, humedales y cuerpos artificiales para la explotación agrícolas. El volumen de aguas presente en este sistema disminuye drásticamente en temporada de verano.

El Río Grande de la Magdalena, La Serranía de Las Quinchas, Río Guaguaquí, Río Negro, Quebrada Velásquez, Caños, Ciénaga de Palagua y el Río Ermitaño conforman el potencial hídrico del municipio de puerto Boyacá. Se utiliza principalmente para actividades humanas y de la producción, como riego de pasturas dedicadas a la explotación ganadera, para uso humano, a través de la perforación de pozos para la captación de aguas subterráneas en la zona urbana, y de

aguas superficiales en la zona rural. Algunas fincas se abastecen de pozos profundos, artesianos y lagos artificialmente creados por la mano del hombre denominados jagüeyes, utilizados como abrevaderos y para explotación piscícola. (PBOT, 2011)

Con base en la información presentada en la siguiente tabla, se tiene que las cuencas se encuentran en un piso térmico cálido, exceptuando cuatro de estas diez cuencas puesto que su rango de cotas supera los 1000 msnm. La zona más baja corresponde a las orillas del río Magdalena en el cual se reciben las aguas de las corrientes de esta zona.

Tabla 6. Descripción Subcuencas

SUBCUENCA	ÁREA (m <sup>2</sup> )	COTA MIN (msnm)	COTA MAX (msnm)	RANGO COTAS (msnm)	COTA MEDIA (msnm)
Río Magdalena	328447000	97	235	138	148.5
Q. Damiana	113124000	137	320	183	175.7
Q. La Velásquez	340192000	138	1197	1059	225.1
Cñ. Palagua	162179000	99	235	136	149.4
Río Ermitaño AD.	235181000	114	1334	1220	340.5
Q. Dos Quebradas Terraplén	126425000	145	1227	1082	337.1
Río Negro AD.	16424800	146	231	85	169.8
Río Guaguaqui	91412800	175	1404	1229	486.3
Cñ. Jaguey	15499000	166	241	75	186.4
Cñ. Ortiz	34033100	154	280	126	190.9

Fuente: Estudio

#### 4.3.1. Aguas Superficiales

El área del municipio a pesar de tener un drenaje denso, muchas de sus corrientes son intermitentes. Los cuerpos de agua superficiales existentes son utilizados básicamente para las labores pecuarias y riego de pasto. Existen numerosos jagüeyes distribuidos en toda el área, utilizados como bebederos para el ganado, localizados generalmente en las zonas de vega y bajos. Adicionalmente, varias fincas poseen represas de diversos tamaños para el almacenamiento del vital líquido. Los asentamientos veredales y la población dispersa suplen sus necesidades de agua de las corrientes que circundan los sitios donde viven, algunos toman el agua directamente de las corrientes, otros a través de aljibes, pozos superficiales, pozos profundos o por gravedad. Se presentan también problemas en algunos sectores para los abastecimientos de agua en cuanto a calidad y distribución comparada con otros asentamientos que tienen sus acueductos alimentados por aguas subterráneas. Algunos nacimientos de agua o manas son utilizados como una alternativa de suministro, especialmente en los pequeños centros poblados y en viviendas campesinas. (PBOT, 2011).

#### 4.4. GEOLOGÍA

El municipio de Puerto Boyacá se encuentra situado en la margen derecha del río Magdalena. Su zona geológica se denomina Foso del Magdalena la cual corresponde a un hundimiento profundo

de aproximadamente 4.000 m de profundidad y de más de 100 km<sup>2</sup> de extensión, en donde se han formado capas de sedimento las cuales se superponen al piso eoceno de la era terciaria conocido en el país como piso Guaduas. Los suelos se encuentran formados por capas arcillosas y limosas con alto porcentaje de arena y grava; además por su carácter arcilloso es de baja permeabilidad.

De acuerdo con la información suministrada por el INGEOMINAS y la información recopilada del municipio, se encontró que el subsuelo del municipio de Puerto Boyacá, departamento de Boyacá, se ubica dentro de la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana PLCMG, la cuál se constituye por Granulitas que afloran y que consiste en anfibolitas y granulitas que afloran como bloques fallados aislados en las serranías de la Macarena y San Lucas, en los macizos de Garzón y Santander, en la Sierra Nevada de Santa Marta y en la Alta Guajira, así como también formando techos pendientes sobre plutones mesozoicos en la Cordillera Central. La PLCMG se extiende al occidente hasta la Falla de San Jerónimo.

Regionalmente, el municipio de Puerto Boyacá está formado principalmente por tres tipos de unidades litológicas: Rocas Sedimentarias de la Formación Mesa de edad Plioceno, Depósitos Aluviales Cuaternarios y Rocas que Afloran al Oeste y Este de la Falla de Cambrás.

#### 4.5. TOPOGRAFÍA

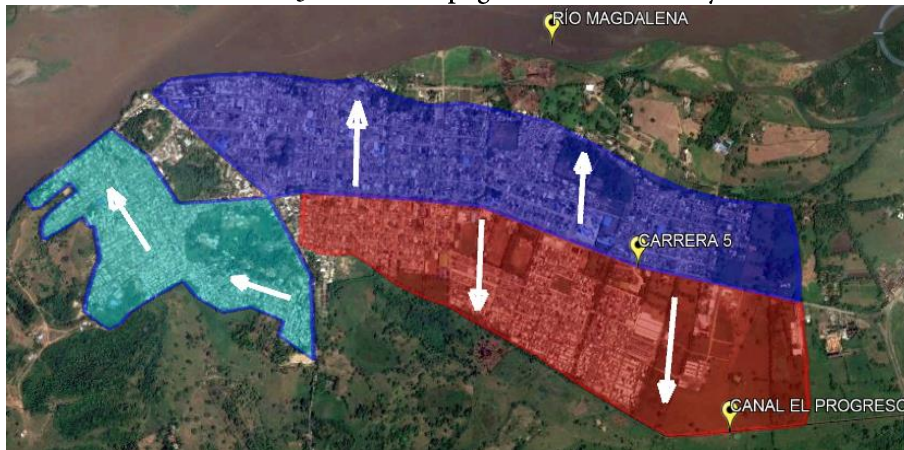
El municipio de Puerto Boyacá hace del parte del valle del Magdalena medio en un aproximado del 60%, está formado por ondulaciones con pendientes menores del 25% y pequeños valles; otro 30% aproximadamente es terreno plano con pendientes menores correspondientes a 10% y el 10% restante es terreno quebrado con pendientes mayores al 25%. Estos últimos están localizados en el extremo oriental del municipio y permanecen a las estribaciones de la cordillera oriental.

En la cabecera urbana del municipio la topografía se divide en cuatro (4) sub-zonas:

- **Sub-zona de Pueblo Nuevo:** Localizada al extremo occidental del casco urbano y limitada al norte por el río Magdalena, al oriente por las colinas El Chircal y la Meseta, y al sur occidente por la zona rural. Presente una topografía quebrada que drena hacia el canal del mismo nombre y que la cruza en sentido sur a norte y la divide en dos (2) sub-sectores.
- **Sub -zona centro:** Delimitada por el río Magdalena y la carrera 5A. (Avenida General Santander), entre la calle 7A (Avenida Kennedy) y la calle 15. Su topografía es relativamente plana presentando una divisoria de aguas en sentido norte sur sobre la carrera 3A; con una pendiente suave hacia el oriente.
- **Sub-zona oriental:** Limitada por la carrera 5A y el río Magdalena, y desde la calle 15 hasta donde terminan los barrios La Paz y Villa Magdalena. Es totalmente plana.
- **Sub-zona El Progreso:** Limitada por la carrera 5A y el Caño el Progreso. Presenta un perfil orientado suavemente en dirección sur al Caño El Progreso.

Sin embargo, es importante mencionar, que el área urbana del municipio de Puerto Boyacá está dividida topográficamente en dos áreas importantes, las cuales dividen el drenaje de la población en dos partes. La primera corresponde al área comprendida entre la carrera quinta, la cual es la arteria principal de la población y el río Magdalena, como se presenta en color azul en la siguiente figura. La segunda corresponde al área comprendida entre la carrera quinta y el Caño El Progreso, como se presenta en color rojo en la siguiente figura. Adicionalmente, se encuentra una cuenca urbana aislada de las dos cuencas principales descritas anteriormente. Esta área, la cual se delimitó en color cian, cuenta con una sola pendiente topográfica la cual drena en dirección al río Magdalena.

Ilustración 3. División topográfica de Puerto Boyacá



Fuente: Elaboración propia

## 4.6. CARACTERÍSTICAS SOCIOCULTURALES

### 4.6.1. Estratificación

En el municipio de Puerto Boyacá existen seis estratos socioeconómicos, siendo el estrato 2 con el mayor porcentaje de suscriptores del servicio de acueducto.

La siguiente tabla presenta el número de usuarios de acueducto por estrato.

Tabla 7. Estratificación municipio de Puerto Boyacá

Estrato	No. Usuarios	%
Estrato 0	38	0.337
Estrato 1	3182	28.242
Estrato 2	5511	48.913
Estrato 3	1399	12.417
Estrato 4	67	0.595

Estrato	No. Usuarios	%
Industrial	3	0.027
Comercial	991	8.796
Oficial	76	0.675
<b>Total</b>	<b>11267</b>	<b>100.00</b>

Fuente. Empresas Públicas de Puerto Boyacá.

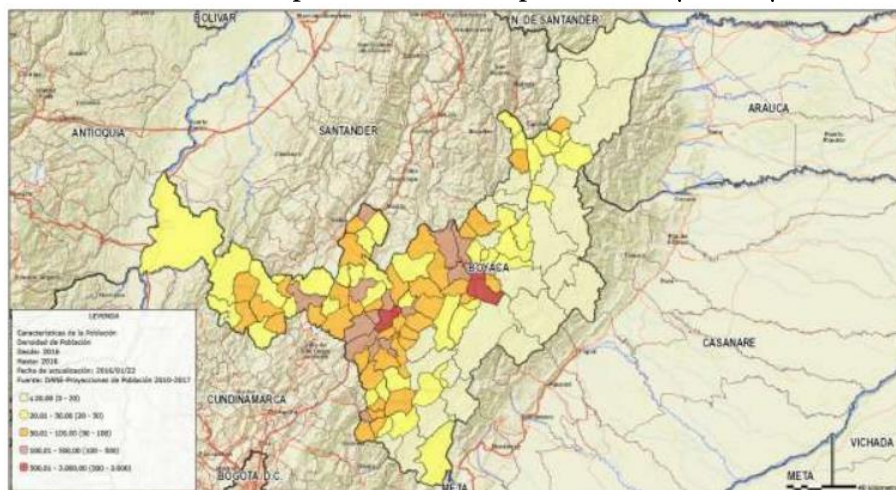
En relación con lo presentado en la tabla anterior, el estrato con mayor predominancia en el municipio es el estrato 2 con un 48.9%, le sigue el estrato 1 con un 28.42%, seguido del estrato 0, 3, 4, industrial, oficial y comercial, los cuales suman el 22.17%.

#### 4.6.2. Densidad Poblacional

La densidad poblacional se considera como la cantidad de personas que habitan por kilómetro cuadrado en un territorio, según la ficha de información territorial el municipio de Puerto Boyacá, departamento de Boyacá tiene en promedio 37.84 habitantes por kilómetro cuadrado, lo que muestra que su población se encuentra menos concentrada, en el área rural.

A continuación, se presenta la figura de la densidad poblacional del municipio.

Ilustración 4. Densidad poblacional, Municipio Puerto Boyacá, Boyacá, 2016.



Fuente. Bodega de datos SISPRO- Modulo geográfico 2015.

#### 4.6.3. Distribución Espacial

La baja densidad de población (38 habitantes por kilómetro cuadrado) esta enmascarada por la escasa población en una gran extensión de área rural y el alto grado de urbanización (68.3%); fenómeno que evidencia la concentración de la población en el área urbana, posiblemente asociado a los diferentes periodos de violencia que ha vivido el municipio en las últimas décadas. La



siguiente tabla presenta la población del municipio de Puerto Boyacá por área de residencia, la cual fue tomada del DANE.

Tabla 8. Población por área de residencia-Municipio Puerto Boyacá

Municipio	Población cabecera municipal		Población resto		Población total	Grado de urbanización
	Población	Porcentaje	Población	Porcentaje		
Puerto Boyacá	38032	68,3%	17662	31,7%	55694	68,3%

Fuente. DANE, proyecciones de población 2005 - 2016

#### 4.6.4. Proyección Población

A continuación, se presenta la proyección de la población para el municipio de Puerto Boyacá, para la determinación de dichas estimaciones se tiene en cuenta varias proyecciones, entre las que se encuentran:

- ✓ Proyección según DANE.
- ✓ Proyección según estudio.
- ✓ De los resultados obtenidos de las anteriores proyecciones se tomará la proyección que más se ajuste al municipio

#### *Métodos De Proyección De Población*

La proyección de la población para el municipio, se realizó según la metodología presentada en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000 (Resolución 1096 de 17 de noviembre de 2000), en su título B, capítulo B2 “población, dotación y demanda” y la Resolución 0330 de 2017.

De acuerdo al RAS 2000, ítem B.2.2.4 Métodos de cálculo para la proyección de la población depende del nivel de complejidad del sistema según se muestra en la tabla B.2.1. Se calculará la población utilizando por lo menos los siguientes modelos matemáticos: Aritmético, geométrico y exponencial, seleccionando el modelo que mejor se ajuste al comportamiento histórico de la población. Los datos de población deben estar ajustados con la población flotante y la población migratoria.

En caso de falta de datos, se recomienda la revisión de los datos de la proyección con los disponibles en poblaciones cercanas que tengan un comportamiento similar al de la población en estudio.

#### *Proyección Población Según DANE*

El DANE en el cuadro Estimaciones de población 1985-2005 presenta la proyección de la

población para la cabecera, el resto y el número total de habitantes del municipio de Puerto Boyacá teniendo en cuenta los registros históricos censales, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 9. Registros Históricos Censales**

AÑO	TOTALES	CABECERA	RESTO
Población 1985	32,060	19,012	13,048
Población 1990	31,142	21,144	9,998
Población 1993	34,934	24,844	10,090
Población 1995	43,626	30,074	13,552
Población 2000	50,301	33,806	16,495
Población 2005	32,060	19,012	13,048

Fuente. Departamento Nacional de estadísticas. DANE.

Las proyecciones de población que se realizaron, tomando como base la información de población estimada de los censos del DANE, los cuales se presentan en la siguiente Tabla.

**Tabla 10. Datos de proyección de población según DANE.**

AÑO	POBLACIÓN
2006	34268
2007	34715
2008	35145
2009	35560
2010	35959
2011	36341
2012	36709
2013	37060
2014	37399
2015	37722
2016	38032
2017	38324
2018	38603
2019	38869
2020	39117

Fuente. Departamento Nacional de Estadísticas. DANE

### **Proyección Población Según Estudio**

De acuerdo al RAS 2000, ítem B.2.2.4 Métodos de cálculo para la proyección de la población depende del nivel de complejidad del sistema según se muestra en la tabla B.2.1. Se calculará la población utilizando los siguientes modelos matemáticos: Aritmético, geométrico y exponencial, seleccionando el modelo que mejor se ajuste al comportamiento histórico de la población.

A continuación, se presenta la tabla de tasa de crecimiento del DANE.

Tabla 11. Tasa de crecimiento DANE

Período	URBANO		
	Tasa De Crecimiento Aritmético (m)	Tasa De Crecimiento Geométrica (r)	Tasa De Crecimiento Exponencial (k)
1985 - 1990	426.400	0.021	0.021
1990 - 1995	740.000	0.033	0.032
1995 - 2000	1.046,000	0.039	0.038
2000 - 2005	746.400	0.024	0.023
2005- 2010	430.600	0.012	0.012
Promedio	624.90	0.026	0.025

Fuente. DANE 2003

Con ocasión del Censo de población y vivienda de 2005, la Dirección de Censos y Demografía del DANE (DCD), realizó la conciliación demográfica de éste con los censos realizados en 1993 y 1985. El resultado de este proceso a nivel nacional y departamental, fue la base para la realizar las proyecciones de población de 2005 en adelante, es por esto que la proyección de población se realiza con base en los registros históricos de población para el Municipio de Puerto Boyacá, de los obtenidos a partir de los datos suministrados por el Departamento Nacional de Estadísticas de Colombia (DANE), en el cual se hallan los datos de población urbana, rural y total para los años 1985, 1993 y 2005, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 12. Censos de población - DANE

Censos	Población Cabecera
1985	1902
1993	23058
2005	33806

Fuente. Departamento Nacional de Estadísticas. DANE

Para el Municipio de Puerto Boyacá, el DANE determinó la Tasa de crecimiento geométrica, aritmético y exponencial, por quinquenios teniendo en cuenta los censos presentados anteriormente.

- **Método Aritmético**

El Método Aritmético supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración. La ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} \times (T_f - T_{uc})$$

Donde,  $P_f$  es la población (hab) correspondiente al año para el que se quiere proyectar la población,  $P_{uc}$  es la población (hab) correspondiente al último año censado con información,  $P_{ci}$  es la población (hab) correspondiente al censo inicial con información,  $T_{uc}$  es el año correspondiente al último año censado con información,  $T_{ci}$  es el año correspondiente al censo inicial con información y  $T_f$  es el año al cual se quiere proyectar la información. La siguiente tabla presenta los datos de la proyección de la población utilizados para determinar la población proyectada mediante el método aritmético. De igual manera, los datos de la tabla se esquematizaron obteniendo como resultado la gráfica mostrada.

Tabla 13. Datos de proyección de población método aritmético

Año	Población	Año	Población
2017	42682	2030	52299
2018	43422	2031	53038
2019	44162	2032	53778
2020	44902	2033	54518
2021	45641	2034	55257
2022	46381	2035	55997
2023	47121	2036	56737
2024	47860	2037	57476
2025	48600	2038	58216
2026	49340	2039	58956
2027	50079	2040	59696
2028	50819	2041	60435
2029	51559	2042	61175

Fuente. Estudio

- Método geométrico

El Método Geométrico es útil en poblaciones que muestren una importante actividad económica, que genera un apreciable desarrollo y que poseen importantes áreas de expansión las cuales pueden ser dotadas de servicios públicos sin mayores dificultades. La ecuación que se emplea es:

$$P_f = P_{uc} (1 + r)^{T_f - T_{uc}}$$

Donde  $r$  es la tasa de crecimiento anual en forma decimal y las demás variables se definen igual que para el método anterior. La tasa de crecimiento anual se calcula de la siguiente manera:

$$r = \left( \frac{P_{uc}}{P_{ci}} \right)^{\frac{1}{(T_{uc}-T_{ci})}} - 1$$

La tasa de crecimiento para este método es de  $k=0,02920$ . La siguiente tabla presenta los datos de la proyección de la población utilizados para determinar la población proyectada mediante el método geométrico. De igual manera, los datos de la tabla se esquematizaron obteniendo como resultado la gráfica mostrada.

Tabla 14. Datos de proyección de población método geométrico

Año	Población	Año	Población
2017	47750	2030	69415
2018	49144	2031	71441
2019	50579	2032	73527
2020	52056	2033	75674
2021	53576	2034	77883
2022	55140	2035	80157
2023	56750	2036	82498
2024	58407	2037	84906
2025	60112	2038	87385
2026	61867	2039	89936
2027	63673	2040	92562
2028	65532	2041	95265
2029	67445	2042	98046

Fuente. Estudio

- Método exponencial

Su aplicación se recomienda a poblaciones que muestre y posea abundantes áreas de expansión. Para su cálculo se utilizó la siguiente expresión:

$$P_f = P_{ci} \times e^{k \times (T_f - T_{ci})}$$

Donde  $K$  es la tasa de crecimiento de la población la cual se calcula como el promedio de las tasas calculadas para cada par de censos, así:

$$k = \frac{\ln P_{cp} - \ln P_{ca}}{T_{cp} - T_{ca}}$$

La tasa de crecimiento para este método es de  $r = 0,0287$ . La siguiente tabla presenta los datos de la proyección de la población utilizados para determinar la población proyectada mediante el método exponencial. De igual manera, los datos de la tabla se esquematizaron obteniendo como resultado la gráfica mostrada.

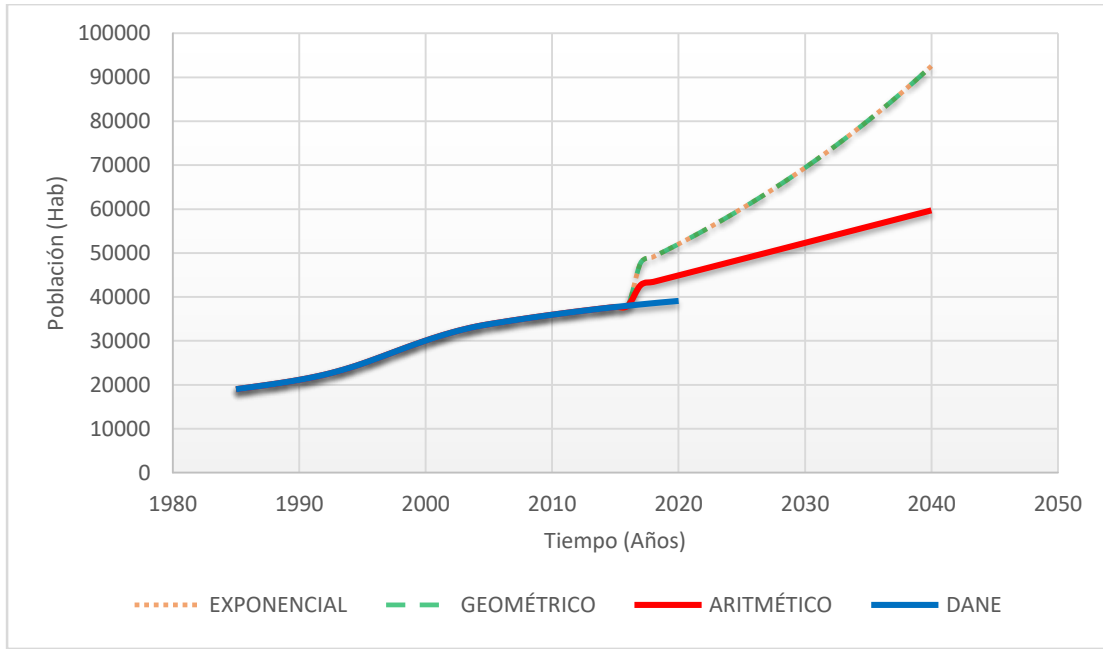
Tabla 15 Datos de proyección de población método exponencial

Año	Población	Año	Población
2017	47750	2030	69415
2018	49144	2031	71441
2019	50579	2032	73527
2020	52056	2033	75674
2021	53576	2034	77883
2022	55140	2035	80157
2023	56750	2036	82498
2024	58407	2037	84906
2025	60112	2038	87385
2026	61867	2039	89936
2027	63673	2040	92562
2028	65532	2041	95265
2029	67445	2042	98046

Fuente. Estudio

Se grafican los tres métodos incluida la proyección del DANE, obteniendo lo presentado en la siguiente gráfica:

Ilustración 5. Proyección tres métodos.



Fuente. Estudio

De acuerdo a las proyecciones realizadas y al comportamiento de los diferentes métodos, para el municipio de Puerto Boyacá, el método que más se asemeja al comportamiento del municipio y la proyección del DANE es el ARITMÉTICO.

Tabla 16. Población Total Proyectada.

Año	Población Urbana (Hab)	Población Flotante (Hab)	Población Total (Hab)
2017	42682	8536	51218
2018	43422	8684	52106
2019	44162	8832	52994
2020	44902	8980	53882
2021	45641	9128	54769
2022	46381	9276	55657
2023	47121	9424	56545
2024	47860	9572	57432
2025	48600	9720	58320
2026	49340	9868	59208
2027	50079	10016	60095
2028	50819	10164	60983
2029	51559	10312	61871
2030	52299	10460	62759
2031	53038	10608	63646
2032	53778	10756	64534
2033	54518	10904	65422
2034	55257	11051	66308

Año	Población Urbana (Hab)	Población Flotante (Hab)	Población Total (Hab)
2035	55997	11199	67196
2036	56737	11347	68084
2037	57476	11495	68971
2038	58216	11643	69859
2039	58956	11791	70747
2040	59696	11939	71635
2041	60435	12087	72522
2042	61175	12235	73410

Fuente. Estudio

#### 4.6.5. Nivel de Complejidad

La asignación del nivel de complejidad de todo proyecto objeto del presente Reglamento es de obligatorio cumplimiento y debe hacerse según las siguientes disposiciones:

##### *Población*

La población de Puerto Boyacá es mayor a 60000 habitantes, por lo tanto, se tiene que, según la tabla A.3.1 relacionada en el RAS en el capítulo A3 DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA, el nivel de complejidad corresponde a ALTO La siguiente tabla muestra la asignación del nivel de complejidad según el RAS.

Tabla 17. Asignación del nivel de complejidad del sistema del proyecto

Nivel de Complejidad del Sistema	Población de Diseño	Capacidad Económica
Bajo	< 2.500	Baja
Medio	2.501 a 12.500	Baja
Medio Alto	12501 a 60.000	Media
Alto	> 60.000	Alta

Fuente. RAS 2000

##### *Capacidad Económica*

La capacidad económica del municipio se trabajará con base en la estratificación actual de los usuarios del sistema.

##### *Estratificación Socioeconómica*



La capacidad económica de acuerdo al estrato socioeconómico.

Tabla 18. Capacidad económica según estrato socioeconómico

Estrato	Capacidad Económica
Estrato único 1 y 2	Baja
Estrato 3 y 4	Media
Estrato 5	Media alta
Industria y comercio	Alta

Fuente. Ministerio de Desarrollo Económico. Guía 001 RAS-2000

De acuerdo con lo reportado en el ítem anterior existen seis estratos socioeconómicos correspondientes a los niveles 1, 2, 3. En el municipio El Puerto Boyacá se establecen 5, siendo el estrato 2 con el mayor porcentaje de suscriptores del servicio de acueducto tal y como se evidencia en la siguiente tabla:

Tabla 19. Estratificación municipio de Puerto Boyacá

Estrato	No. Usuarios	%
Estrato 0	38	0.337
Estrato 1	3182	28.242
Estrato 2	5511	48.913
Estrato 3	1399	12.417
Estrato 4	67	0.595
Industrial	3	0.027
Comercial	991	8.796
Oficial	76	0.675
Total	11267	100.00

Fuente. Empresas Públicas de Puerto Boyacá.

De acuerdo con la metodología desarrollada por el DANE, el nivel de vida de la población se puede medir por el Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas NBI, el cual sigue siendo utilizado en los informes de la Encuesta Nacional de Hogares. Según el censo del año 2005 las necesidades básicas insatisfechas, para el municipio son:

Tabla 20. Necesidades Básicas Insatisfechas NBI 2012

SECTOR	NBI (%)
Urbano	29.98
Rural	39.31
Total	58.47

Fuente. DANE. Censo General 2005.

La escogencia del nivel de complejidad de acuerdo al ítem A.3.2 ASIGNACIÓN DEL NIVEL DE COMPLEJIDAD DEL SISTEMA. (Artículo 12), para el caso del municipio de Puerto Boyacá es de Alto, de acuerdo al numeral 2. El nivel de complejidad del sistema adoptado debe ser el que resulte mayor entre la clasificación obtenida por la población urbana y la capacidad económica.

De acuerdo a las Tablas 1 y 2 del presente documento, y teniendo en cuenta el nivel de complejidad del municipio para el presente trabajo se debe adoptar un periodo de retorno de 10 años, así mismo, de acuerdo a la Resolución 0330 del 08 de junio de 2017, expedida por el MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT), en el ARTÍCULO 40 se adopta un periodo de diseño de 25 años para todos los componentes de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo.

## 5. CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL CANAL EL PROGRESO Y SUS CUENCAS AFLUENTES

El presente capítulo está referido a la elaboración de la caracterización del canal El Progreso y el estudio hidrometeorológico del área del proyecto, de acuerdo a las referencias metodológicas descritas en el capítulo 3 y los parámetros hidrológicos que se emplearán en el análisis, modelación, planteamiento de alternativas y diseño definitivo de la solución para la mitigación del área de inundación del Canal El Progreso.

### 5.1. DIAGNÓSTICO DEL CANAL EL PROGRESO

El Canal El Progreso se localiza en el costado sur del casco urbano del municipio de Puerto Boyacá, y recibe aproximadamente el 70% de las aguas pluviales del municipio. Esta estructura inicia en la calle 14 con carrera 9 y termina en el costado occidental del casco urbano. A continuación, subrayado en verde, se presenta la localización del canal.

Ilustración 6. Localización Canal El Progreso.



Fuente: Google Earth

El Canal El Progreso está revestido en concreto y presenta una sección trapezoidal con secciones variables a lo largo de su longitud, la cual corresponde a 2429.24 m. De la longitud total del canal, 394.29m son en estructura cerrada y el restante se encuentra a superficie libre.

De acuerdo a la información suministrada por el municipio respecto a los vertimientos al canal El Progreso, se tiene que, actualmente el canal recibe nueve (9) vertimientos distribuidos a lo largo de la estructura.

El canal entrega sus aguas a unas compuertas localizadas después del box culvert que se ubica en la ruta de Sol. Estas compuertas, corresponden a la sección de control del caño y evitan que, en temporada invernal, ingresen las aguas del río Magdalena al canal.

Ilustración 7. Fotografía compuertas del Canal El Progreso



Fuente: Municipio de Puerto Boyacá

Cuando las compuertas se cierran, dos tornillos helicoidales bombean el agua al otro lado de la estructura. Sin embargo, los tornillos helicoidales tienen una capacidad de bombeo muy baja (560l/s), frente al caudal que es aportado por la cuenca alta de la estructura, generando consecuentemente inundaciones que afectan la población aferente.

Ilustración 8. Fotografías aéreas de inundación del Canal El Progreso



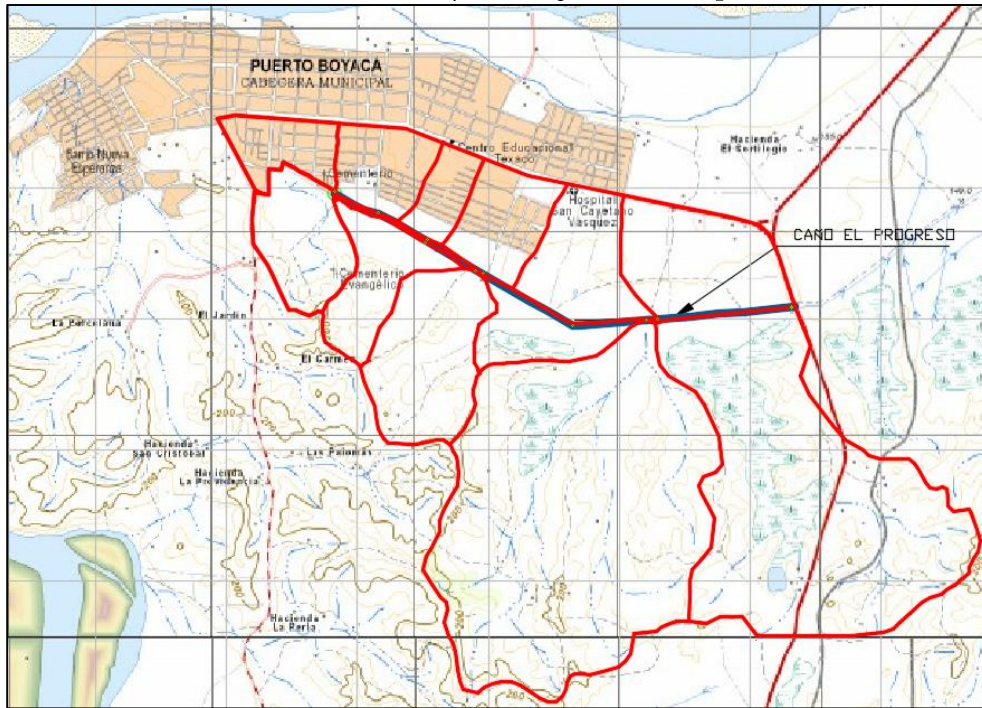
Fuente: Municipio de Puerto Boyacá

## 5.2. CUENCAS DEL CANAL EL PROGRESO

Con base en la información geográfica y topográfica del proyecto, y a fin de realizar un análisis más detallado y aproximado a la realidad se delimitaron en total 12 hoyas hidrográficas que drenan

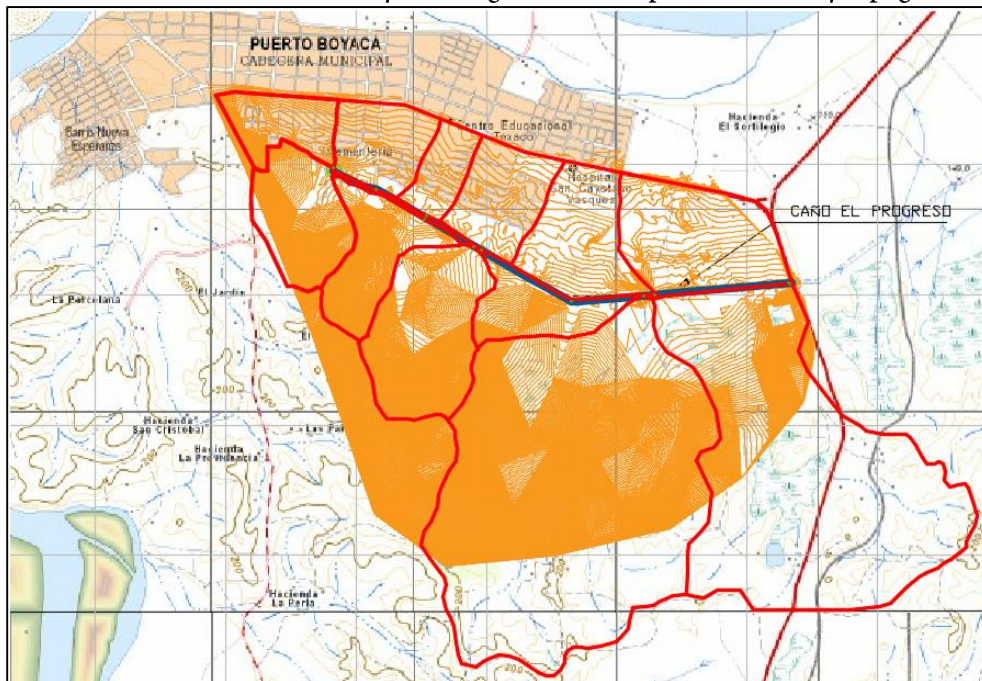
sus aguas al Canal El Progreso. A continuación, se presenta el esquema de las hoyas afluentes al Canal El Progreso.

Ilustración 9. Delimitación hoyas hidrográficas sobre planchas IGAC



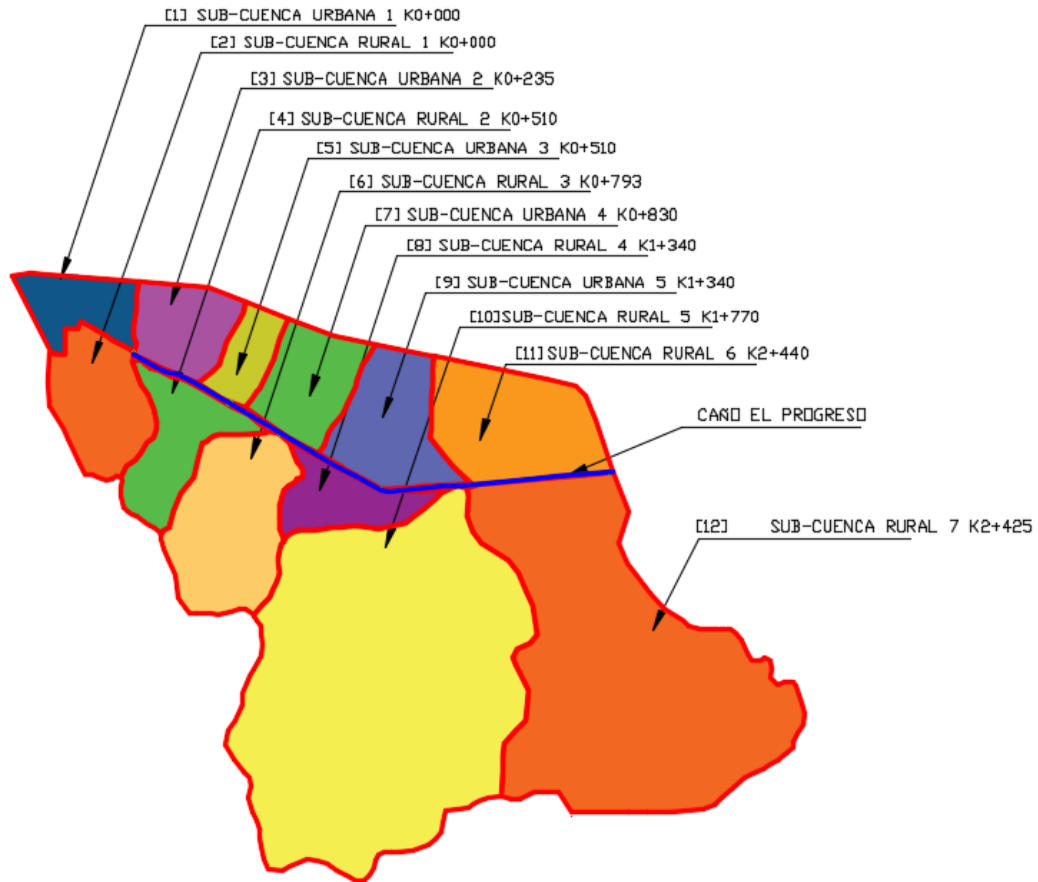
Fuente: Estudio

Ilustración 10. Delimitación hoyas hidrográficas sobre planchas IGAC y topografía.



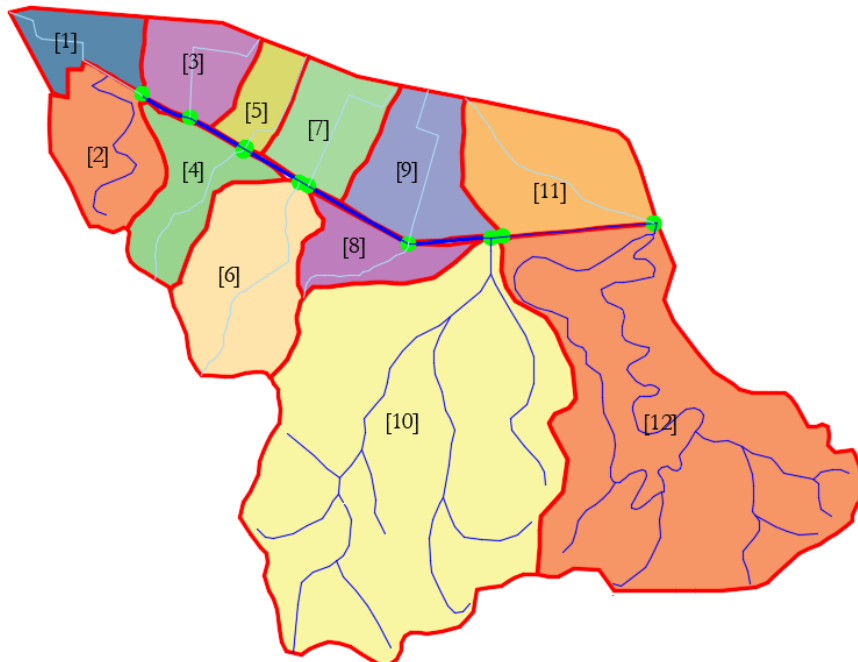
Fuente: Estudio

Ilustración 11. Identificación de hoyas hidrográficas Canal El Progreso.



Fuente: Estudio

Ilustración 12. Identificación de hoyas hidrográficas Canal El Progreso (2).



Fuente: Estudio

### 5.3. CARACTERIZACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

Para la elaboración de la caracterización y/o análisis hidroclimatológico de la zona de estudio, se realizó la búsqueda de la información de estaciones hidroclimatológicas cercanas a la zona de proyecto. De acuerdo con el análisis realizado sobre la información secundaria aportada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, se seleccionó la estación Puerto Boyacá, debido a que se encuentra localizada en el casco urbano del municipio de Puerto Boyacá y cuenta con un periodo de registro suficiente y adecuado para la elaboración del análisis. En la siguiente tabla se presentan las características de la estación climatológica ordinario Puerto Boyacá.

Tabla 21. Características de localización de estación hidrométrica aferente a la zona del proyecto

Código	Tipo	Nombre de estación	Nombre municipio	Coordenadas		Elevación (msnm)	Fecha	
				GEODÉSICAS			Instalación	Suspensión
23115010	CO	PTO BOYACÁ	Puerto Boyacá	2°20' N	76°46' W	350	AGOSTO 1974	ACTIVA

Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

#### 5.3.1. Análisis De Precipitación Total A Nivel Mensual Y Anual Multianual

En la siguiente tabla, se presenta a nivel mensual y anual multianual los valores totales de precipitación mensual de acuerdo a los datos existentes de la estación medidora de precipitación seleccionada.

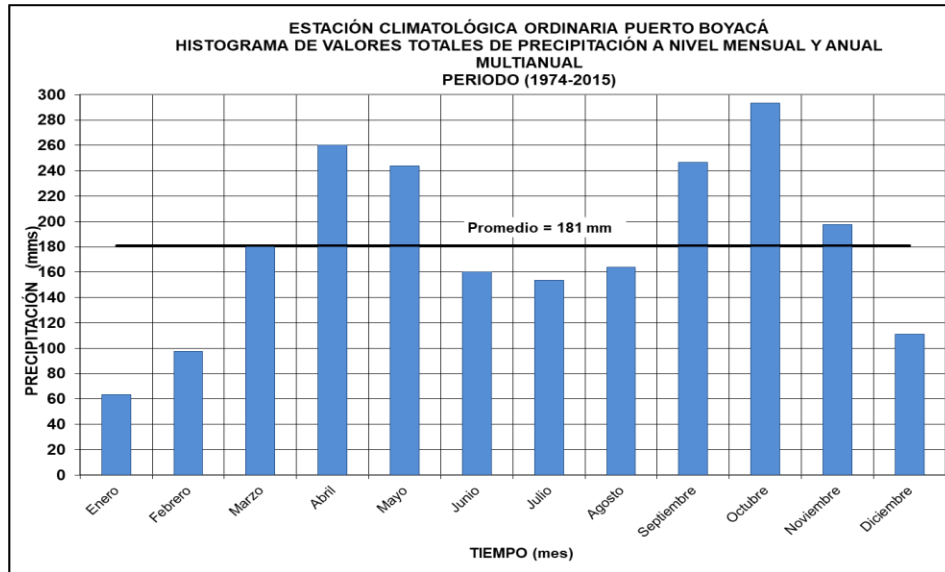
Tabla 22. Valores totales mensuales de precipitación a nivel mensual y anual multianual de la Estación Climatológica Ordinaria Puerto Boyacá

MES	VALORES TOTALES MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (mm) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Enero	63.4
Febrero	97.7
Marzo	180.9
Abril	260.0
Mayo	244.1
Junio	160.0
Julio	153.5
Agosto	163.9
Septiembre	246.8
Octubre	293.5
Noviembre	197.4
Diciembre	111.0
TOTAL	2171.2

Fuente: Estudio

En la siguiente gráfica, se observa que en la estación Climatológica Ordinaria Puerto Boyacá se tiene una distribución de precipitación total de tipo bimodal, con un periodo de lluvia en los meses de marzo a mayo y septiembre a noviembre y lluvias en general por debajo del promedio de los demás meses del año. Las lluvias a nivel anual multianual se encuentran alrededor de los 2172.0 mm, teniendo un máximo en el mes de octubre y un mínimo en el mes de enero, con valores correspondientes de 293.5 y 63.4 mm.

Ilustración 13. Histograma de valores totales de precipitación a nivel mensual y anual multianual periodo (1974-2015)



Fuente: Estudio

### 5.3.2. Tensión de Vapor

La tensión de vapor en la zona del proyecto se puede determinar a través de la estación medidora de este parámetro, la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá, los valores medios mensuales multianuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 23. Valores medios mensuales de tensión de vapor a nivel mensual y anual multianual de la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá.

MES	VALORES MEDIOS MENSUALES DE TENSIÓN DE VAPOR (Mb) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Enero	28.2
Febrero	28.0
Marzo	28.5
Abril	28.7
Mayo	29.0
Junio	28.6
Julio	28.1
Agosto	27.9



MES	VALORES MEDIOS MENSUALES DE TENSION DE VAPOR (Mb) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Septiembre	28.1
Octubre	28.4
Noviembre	28.8
Diciembre	28.7
PROMEDIO	28.4

Fuente: Estudio

La estación climatológica ordinaria de Puerto Boyacá, presenta a nivel anual multianual una tensión de vapor promedio igual a 28.4 Mb, variando entre valores mínimos de 27.9 Mb para el mes de agosto y máximos de 29.0 Mb en el mes de mayo.

### 5.3.3. Humedad Relativa

La humedad relativa del aire en general depende del comportamiento y distribución de las precipitaciones, la nubosidad y la radiación solar, en la siguiente tabla se presentan los valores medios mensuales multianuales la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá.

Tabla 24. Valores medios mensuales de humedad relativa a nivel mensual y anual multianual de la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá

MES	VALORES MEDIOS MENSUALES DE HUMEDAD RELATIVA (%) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Enero	76.31
Febrero	75.12
Marzo	77.92
Abril	79.75
Mayo	79.64
Junio	77.64
Julio	75.19
Agosto	74.49
Septiembre	77.75
Octubre	80.87
Noviembre	81.50
Diciembre	79.51
PROMEDIO	78.0

Fuente: Estudio

La estación climatológica ordinaria de Puerto Boyacá, presenta a nivel anual multianual una humedad relativa promedio igual a 78%, variando entre valores mínimos de 74.5% para el mes de agosto y máximos de 81.5% en el mes de noviembre.

### 5.3.4. Nubosidad

Este parámetro corresponde a la fracción de cielo que se encuentra cubierto por nubes, la nubosidad se expresa en octas y corresponde al número total de las 8 partes en que se divide el cielo que están cubiertas por las nubes, en la siguiente tabla se presentan los valores medios mensuales multianuales la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá.

Tabla 25. Valores medios mensuales de nubosidad a nivel mensual y anual multianual de la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá

MES	VALORES MEDIOS MENSUALES DE NUBOSIDAD (Octas) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Enero	3.2
Febrero	3.5
Marzo	4.2
Abril	4.3
Mayo	3.9
Junio	3.7
Julio	3.5
Agosto	3.4
Septiembre	3.9
Octubre	3.9
Noviembre	3.9
Diciembre	3.4
PROMEDIO	3.7

Fuente: Estudio

Tomando en consideración los valores históricos de nubosidad de la estación Climatológica Ordinaria Puerto Boyacá, el valor promedio de este parámetro a nivel anual multianual es de 3.7 octas, variando entre valores mínimos de 3.2 octas para el mes de enero y máximos de 4.3 octas en el mes de abril.

### 5.3.5. Punto de Rocío

Este parámetro se define como la temperatura más baja a la que empieza a condensarse el vapor de agua contenido en el aire, produciendo rocío, neblina, cualquier tipo de nube o, en caso de que la temperatura sea lo suficientemente baja, escarcha, en la siguiente tabla se presentan los valores medios mensuales multianuales la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá.

Tabla 26. Valores medios mensuales de punto de rocío a nivel mensual y anual multianual de la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá.

MES	VALORES MEDIOS MENSUALES DE PUNTO DE ROCÍO (°C) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Enero	23.1
Febrero	22.9

MES	VALORES MEDIOS MENSUALES DE PUNTO DE ROCÍO (°C) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Marzo	23.2
Abril	23.4
Mayo	23.5
Junio	23.2
Julio	22.9
Agosto	22.7
Septiembre	23.0
Octubre	23.2
Noviembre	23.4
Diciembre	23.3
PROMEDIO	23.2

Fuente: Estudio

La estación climatológica ordinaria de Puerto Boyacá, presenta a nivel anual multianual un punto de rocío promedio igual a 23.2 °C, variando entre valores mínimos de 22.7 °C para el mes de agosto y máximos de 23.5 °C en el mes de mayo.

### 5.3.6. Temperatura Media del Aire

De acuerdo con la información obtenida de la estación Climatológica Puerto Boyacá, se concluye que la temperatura del aire es no presenta mucha variación, debida a que esta está asociada principalmente a la elevación sobre el nivel del mar, en la siguiente tabla se presentan los valores medios mensuales multianuales la estación.

Tabla 27. Valores medios mensuales de temperatura a nivel mensual y anual multianual de la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá

MES	VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA (°C) Periodo de Registro: 1974 - 2015
Enero	28.1
Febrero	28.3
Marzo	28.0
Abril	27.6
Mayo	27.8
Junio	27.9
Julio	28.3
Agosto	28.4
Septiembre	27.6
Octubre	27.0
Noviembre	27.1
Diciembre	27.5
PROMEDIO	27.8

Fuente: Estudio

La estación climatológica ordinaria de Puerto Boyacá, presenta a nivel anual multianual una temperatura promedio igual a 27.8 °C, variando entre valores mínimos de 27 °C para el mes de octubre y máximos de 28.4 °C en el mes de agosto.

### 5.3.7. Precipitación Máxima en 24 Horas

En la siguiente tabla, se presenta a nivel mensual y anual multianual del parámetro precipitación máxima en 24 horas de acuerdo a los datos existentes de la estación medidora de precipitación seleccionada.

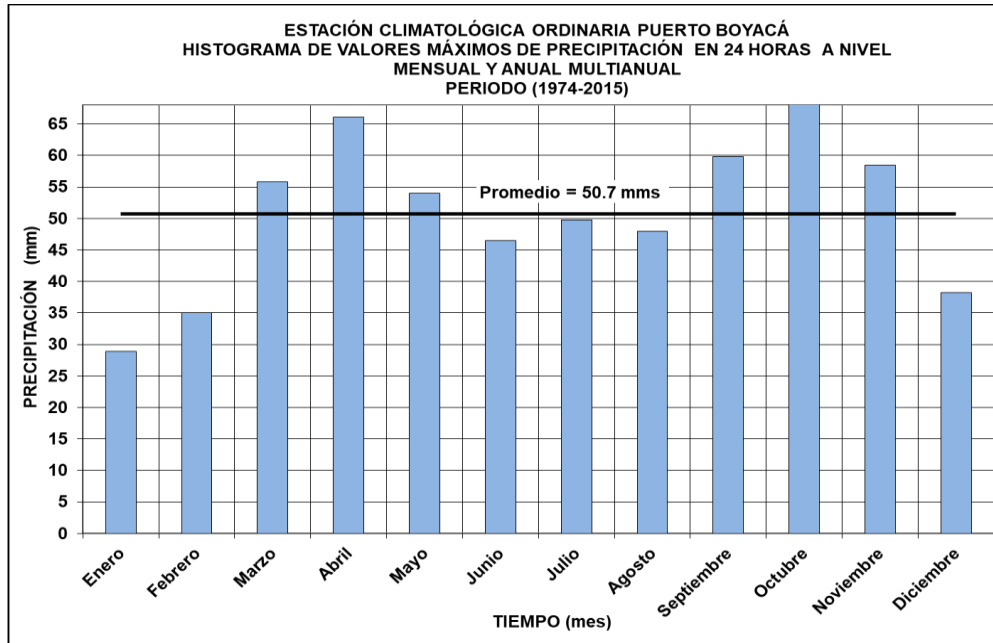
Tabla 28. Valores máximos mensuales de precipitación en 24 horas a nivel mensual y anual multianual de la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá.

MES	VALORES MÁXIMOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS (mm) Periodo de Registro: 1974 – 2015
Enero	28.9
Febrero	35.0
Marzo	55.8
Abril	66.1
Mayo	54.0
Junio	46.5
Julio	49.8
Agosto	48.0
Septiembre	59.8
Octubre	68.3
Noviembre	58.5
Diciembre	38.2
PROMEDIO	50.7

Fuente: Estudio

En la siguiente gráfica, se observa que en la estación Climatológica Ordinaria Puerto Boyacá se tiene una distribución de precipitación total de tipo bimodal, con periodos lluviosos en promedio de marzo a mayo y septiembre a noviembre, el resto del año se presentan y lluvias máximas menores al promedio anual multianual. Las precipitaciones máximas en 24 horas a nivel anual multianual son en promedio de 50.7 mm, teniendo un máximo en el mes de octubre y un mínimo en el mes de enero, con valores correspondientes de 68.3 y 28.9 mm.

Ilustración 14. Histograma de valores máximos de precipitación en 24 horas a nivel mensual y anual multianual periodo (1974-2015)



Fuente: Estudio

#### 5.4. CAUDALES DE AGUAS LLUVIA

De acuerdo con la información recopilada del municipio, la información secundaria recopilada del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para el municipio de puerto Boyacá, se identificaron hoyas hidrográficas menores y mayores.

En la resolución 330 de 2017 se estipula que el método racional se puede usar, siempre y cuando se tengan áreas de drenaje inferiores a 80 Ha, las cuales se definirán en el presente estudio como hoyas menores. De acuerdo con lo expuesto, para el cálculo de los caudales máximos en las hoyas menores se usará el método racional.

Por otro lado, para aquellas hoyas hidrográficas consideradas como mayores; es decir, con un área de drenaje superior a 0.8 km<sup>2</sup> (80 Ha) y que tienen aferencia al casco urbano del municipio, la metodología a utilizar para realizar el cálculo de caudales máximos, es la del hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, al cual se le debe aplicar la lluvia efectiva de diseño.

A continuación, se describirán los dos métodos usados para realizar el cálculo de caudales máximos.

### 5.4.1. Calculo De Caudales Hoya Menor - Cuencas Urbanas

Siguiendo con la metodología descrita en el capítulo 3, mediante el uso del método racional se realizó el cálculo de caudales para cada uno de los canales descritos anteriormente. Previo al cálculo se tuvieron en cuenta las siguientes características:

#### 5.4.1.1. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia IDF

Para el caso del municipio de Puerto Boyacá, se verificó la existencia de curvas IDF en el IDEAM. En el área de proyecto se identificó la estación Climatológica Ordinaria Puerto Boyacá, la cual tiene un periodo de registro mayor a 15 años lo cual se considera adecuado para el alcance del proyecto. Dentro de la información entregada por la entidad se recibieron las curvas IDF para la estación seleccionada, las cuales fueron verificadas y se presentan a continuación.

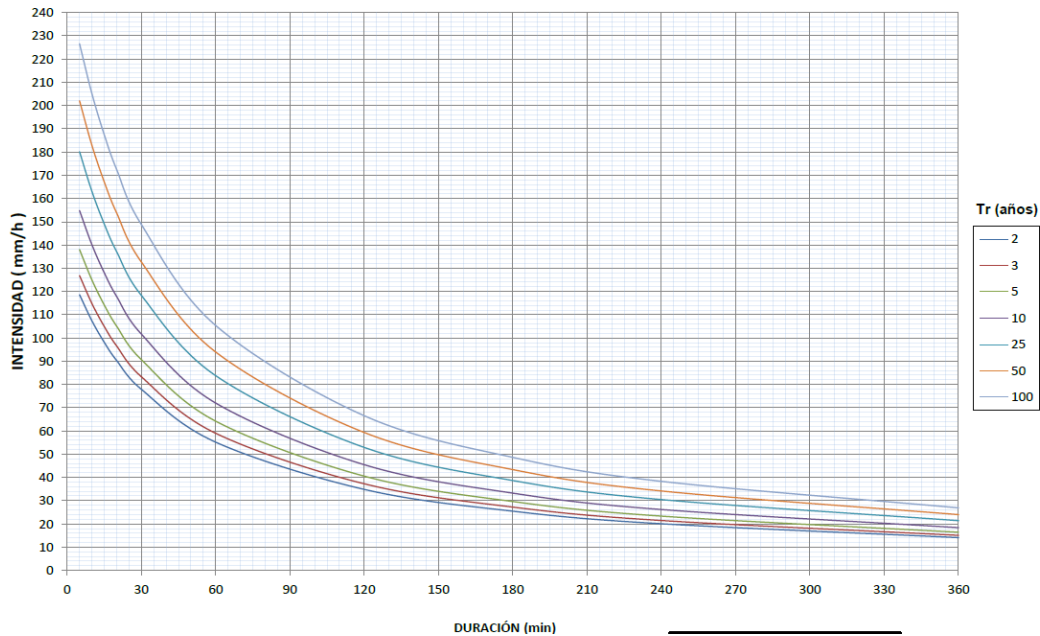
Tabla 29. Curvas Intensidad Frecuencia y Duración-Puerto Boyacá.

Duración (min)	PERIODO DE RETORNO						
	2 Años (mm/h)	3 Años (mm/h)	5 Años (mm/h)	10 Años (mm/h)	25 Años (mm/h)	50 Años (mm/h)	100 Años (mm/h)
5	118.6	126.8	138	154.8	180.1	202	226.6
10	107.4	114.8	124.9	140.1	163.1	182.9	205.1
15	98.1	104.9	114.1	128	149	167.1	187.4
20	90.3	96.5	105.1	117.8	137.1	153.8	172.5
30	77.9	83.3	90.6	101.6	118.3	132.7	148.8
40	68.5	73.2	79.7	89.4	104	116.6	130.8
50	61.1	65.3	71.1	79.7	92.8	104.1	116.7
60	55.1	59	64.2	72	83.8	93.9	105.4
80	46.2	49.4	53.7	60.3	70.1	78.6	88.2
100	39.7	42.5	46.2	51.8	60.3	67.6	75.9
120	34.8	37.2	40.5	45.5	52.9	59.3	66.5
140	31	33.2	36.1	40.5	47.1	52.8	59.3
160	28	29.9	32.5	36.5	42.5	47.6	53.4
180	25.4	27.2	29.6	33.2	38.6	43.3	48.6

Fuente. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

Como se observa en la tabla anterior, se cuenta con curvas para eventos con periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, con duraciones de lluvia de hasta 180 minutos. A continuación, se presentan las curvas IDF en forma gráfica, de acuerdo a la información suministrada por el IDEAM.

Ilustración 15. Curvas IDF – Estación CO Puerto Boyacá (CÓD: 23115010)



$$i = \frac{5054,627 * (T^{0,1655})}{(d + 42,80)^{1,0000}}$$

Fuente. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

#### 5.4.1.2. Áreas Aferentes

En base con la información topográfica suministrada por el municipio de Puerto Boyacá y la información cartográfica de la zona de proyecto, se trazaron las hoyas de drenaje aferentes al Canal El Progreso. Adicionalmente, se calculó la longitud del cauce, la diferencia de altura entre el punto más alto y más bajo y la pendiente media ponderada de la corriente. En las ilustraciones 11 y 12 se muestra la delimitación de las cuencas urbanas y rurales aferentes al Canal El Progreso. A continuación, en las siguientes tablas se presentan las características físicas de las cuencas descritas previamente.

Tabla 30. Características físicas de las cuencas

Hoya No.	Nombre De La Cuenca	Área de la Cuenca	Longitud Del Cauce	H máx. (m)	H min. (m)	ΔH (m)	Pendiente Ponderada Del Cauce, S (m/m)
1	Subcuenca URB-1 Ko+000	0.151 km <sup>2</sup> 151339 m <sup>2</sup>	0.782km 781.56m	141.10	139.4	1.7	0.0016
2	Subcuenca RUR 1 Ko+000	0.259 km <sup>2</sup> 259271 m <sup>2</sup>	1.247km 1247.03m	160.40	139.4	21.0	0.0078
3	Subcuenca URB-2 Ko+235	0.185 km <sup>2</sup> 185334 m <sup>2</sup>	0.643km 642.7m	141.80	139.4	2.4	0.0035
4	Subcuenca RUR 2 Ko+510	0.227 km <sup>2</sup> 226644 m <sup>2</sup>	0.758km 757.98m	160.00	139.4	20.6	0.0134

Hoya No.	Nombre De La Cuenca	Área de la Cuenca	Longitud Del Cauce	H máx. (m)	H min. (m)	$\Delta H$ (m)	Pendiente Ponderada Del Cauce, S (m/m)
5	Subcuenca URB-3 Ko+510	0.106 km <sup>2</sup> 106194 m <sup>2</sup>	0.524km 524.16m	142.00	139.4	2.6	0.0042
6	Subcuenca RUR 3 Ko+793	0.41 km <sup>2</sup> 409580 m <sup>2</sup>	1.045km 1044.56m	171.90	139.20	32.7	0.0122
7	Subcuenca URB-4 Ko+830	0.214 km <sup>2</sup> 214450 m <sup>2</sup>	0.699km 699.49m	142.20	139.20	3.0	0.0042
8	Subcuenca RUR 4 K1+340	0.165 km <sup>2</sup> 164524 m <sup>2</sup>	0.576km 576.3m	151.00	139.00	12.0	0.0124
9	Subcuenca URB-5 K1+340	0.283 km <sup>2</sup> 283236 m <sup>2</sup>	0.773km 773.19m	142.40	138.80	3.6	0.0049
11	Subcuenca RUR 6 K2+440	0.384 km <sup>2</sup> 384065 m <sup>2</sup>	1.036km 1036.28m	142.80	138.50	4.3	0.0031

Fuente: Estudio

Tabla 31. Cálculo de pendiente media ponderada de los cauces

Hoya No.	Longitud Del Cauce	Longitud Tramo 1	$\Delta H T_1$	AT <sub>1</sub> (m)	Longitud Tramo 2	$\Delta H T_2$	AT <sub>2</sub> (m)	Longitud Tramo 3	$\Delta H T_3$	AT <sub>3</sub> (m)	H <sub>2</sub> *	Pendiente Ponderada, S (m/m)
1	0.782km 781.56m	178.92	0.2	24959	190.06	0.4	26570	412.58	1.5	57906	140.64	0.0016
2	1.247km 1247.03m	178.92	0.2	24959	514.07	0.4	71867	554.04	20.8	83106	149.18	0.0078
3	0.643km 642.7m	230.80	0.8	32265	79.00	1.0	11115	332.90	1.6	46939	141.66	0.0035
4	0.758km 757.98m	327.82	1.8	45993	195.88	5.8	28226	234.28	18.8	35283	149.53	0.0134
5	0.524km 524.16m	238.50	1.0	33366	156.50	0.8	22035	129.16	1.6	18237	141.58	0.0042
6	1.045km 1044.56m	323.04	1.4	45193	391.76	1.4	55356	329.76	31.3	51525	151.97	0.0122
7	0.699km 699.49m	233.16	1.2	32595	242.13	1.0	34116	224.20	1.8	31679	142.12	0.0042
8	0.576km 576.3m	180.50	1.8	25252	191.50	1.4	27097	204.30	10.2	29807	146.12	0.0124
9	0.773km 773.19m	266.14	1.8	37179	256.68	0.6	36166	250.37	1.8	35427	142.56	0.0049
11	1.036km 1036.28m	369.21	1.1	51338	394.80	1.4	55390	272.27	3.2	38445	141.68	0.0031

Fuente: Estudio



### 5.4.1.3. Período de Retorno

De acuerdo al nivel de complejidad del municipio de Puerto Boyacá “Nivel de complejidad ALTO”, las características del área de drenaje, y las necesidades de protección e importancia del área de estudio, se adopta un período de retorno de 25 años, sin embargo, se calculan los caudales para 2, 5, 10, 25 y 50 años.

### 5.4.1.4. Tiempo de Concentración

Para determinar la duración de las tormentas de diseño se ha seleccionado el valor mediano de las mismas. Este valor mediano representa un valor más real del tiempo de concentración que el valor medio, con el fin de representar un valor característico típico del tiempo de concentración.

Además de lo anterior y teniendo en cuenta la referencia bibliográfica se ha definido un tiempo de concentración mínimo de 15 minutos, para tener en consideración el tiempo mínimo que tarda la lluvia en concentrarse inicialmente, el cual no tiene en cuenta las características físicas de la cuenca. A continuación, se presentan los tiempos de concentración estimados para las diferentes metodologías enunciadas en el capítulo 3, así como el tiempo de concentración seleccionado en el cálculo de los caudales máximos instantáneos.

Tabla 32. Tiempos de concentración seleccionados

Hoya No.	Kirpich (min)	Giandotti (min)	Vt Chow (min)	Cuerpo de ingenieros (min)	Williams (min)	Johnstone y Cross (min)	SCS-Ranser (min)	Hathaway (min)	Mediana (min)	Seleccionado (min)
1	39.30	183.51	109.97	47.39	49.52	122.80	34.85	105.90	77.71	77.71
2	30.47	93.71	89.02	49.92	54.42	104.11	22.71	90.69	71.72	71.72
3	24.89	133.87	75.23	35.11	34.04	91.28	24.34	80.24	55.17	55.17
4	16.91	71.66	54.57	30.90	30.13	71.03	12.87	63.44	42.73	42.73
5	19.96	106.19	62.63	29.15	28.40	79.10	18.65	70.19	45.89	45.89
6	22.40	86.59	68.94	40.10	39.84	85.26	15.61	75.24	54.52	54.52
7	24.88	127.28	75.20	36.25	35.28	91.25	24.63	80.21	55.73	55.73
8	14.12	69.91	46.97	25.47	24.03	63.17	11.55	56.86	36.22	36.22
9	25.34	127.15	76.37	38.01	36.79	92.36	25.78	81.11	57.19	57.19
11	37.91	169.56	106.73	51.82	52.44	119.96	33.77	103.57	78.01	78.01

Fuente: Estudio

### 5.4.1.5. Intensidad de Precipitación

Para el caso del municipio de Puerto Boyacá la intensidad expresada en mm/h se define a partir de la curva IDF correspondiente a cada uno de los periodos de retorno y el tiempo de duración de la lluvia equivalente al tiempo de concentración de cada hoya hidrográfica. Para efectos prácticos se unifican las hoyas 1 y 2, ya que su descarga es en el mismo punto del canal.

Tabla 33. Intensidad de precipitación para cálculo de caudales para hoyas menores

Hoya No.	Área	Tiempo De Concentración (min)	Intensidad (mm/h)					
			T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años
1-2	0.411 km <sup>2</sup>	77.71	47.04	54.75	61.40	71.46	80.14	89.88
3	0.185 km <sup>2</sup>	55.17	57.86	67.34	75.52	87.89	98.57	110.55
4	0.227 km <sup>2</sup>	42.73	66.28	77.13	86.51	100.67	112.91	126.63
5	0.106 km <sup>2</sup>	45.89	63.92	74.39	83.43	97.09	108.89	122.13
6	0.41 km <sup>2</sup>	54.52	58.25	67.79	76.03	88.48	99.24	111.30
7	0.214 km <sup>2</sup>	55.73	57.54	66.96	75.10	87.40	98.02	109.93
8	0.165 km <sup>2</sup>	36.22	71.74	83.49	93.64	108.97	122.22	137.08
9	0.283 km <sup>2</sup>	57.19	56.70	65.98	74.00	86.12	96.59	108.33
11	0.384 km <sup>2</sup>	70.01	46.93	54.61	61.25	71.28	79.94	89.66

Fuente: Estudio

#### 5.4.1.6. Coeficiente de Escorrentía, C

Los coeficientes de escorrentía adoptados para el cálculo de caudales para las cuencas menores en área urbana del proyecto son de 0.64 (*Residencial con casas continuas y presencia de jardines y parques*) y para las cuencas menores en área rural del proyecto son de 0.38 (*Zonas verdes con presencia de bosques*).

Para encontrar el coeficiente de escorrentía correspondiente para las hoyas hidrográficas del Canal El Progreso, se hizo uso de la clasificación supervisada, con base en la información geográfica y cartográfica del área del proyecto, sobre la cuál se identificaron zonas de bosque, pastos, terrenos escarpados, y zonas duras. A partir de la ponderación de áreas se obtuvieron los resultados de las diferentes coberturas los cuales se presentan a continuación.

Tabla 34. Coeficientes de escorrentía cuencas hidrográficas aferentes a la zona de proyecto.

CUENCA	PORCENTAJE DE COBERTURA (%)				VALOR DE C CALCULADO
	BOSQUES	PASTOS	ESCARPADO	ZONA DURA	
	(C = 0.40)	(C = 0.35)	(C = 0.50)	(C = 0.80)	
Cuencas En Área Urbana	5%	25%	10%	60%	0.64
Cuencas En Área Rural	18%	71%	8%	3%	0.38

Fuente: Estudio

#### 5.4.1.7. Calculo de Caudales Máximos Cuencas Menores

Finalmente se calcularon los caudales máximos para periodos de retorno seleccionados variables entre 2 y 100 años, utilizando la fórmula racional, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 35. Caudales aferentes a los canales con áreas de drenaje menores.

Hoya No.	Área (km <sup>2</sup> )	Coeficiente Escorrentía	Caudal (m <sup>3</sup> /s)					
			T = 2 años	T = 5 años	T = 10 años	T = 25 años	T = 50 años	T = 100 años
1-2	0.411	0.48	2.55	2.97	3.33	3.88	4.35	4.88
3	0.185	0.64	1.91	2.22	2.49	2.90	3.25	3.64
4	0.227	0.38	1.59	1.85	2.07	2.41	2.70	3.03
5	0.106	0.64	1.21	1.40	1.58	1.83	2.06	2.31
6	0.41	0.38	2.52	2.93	3.29	3.83	4.29	4.81
7	0.214	0.64	2.19	2.55	2.86	3.33	3.74	4.19
8	0.165	0.38	1.25	1.45	1.63	1.89	2.12	2.38
9	0.283	0.51	2.28	2.65	2.97	3.46	3.88	4.35
11	0.384	0.38	1.90	2.21	2.48	2.89	3.24	3.64

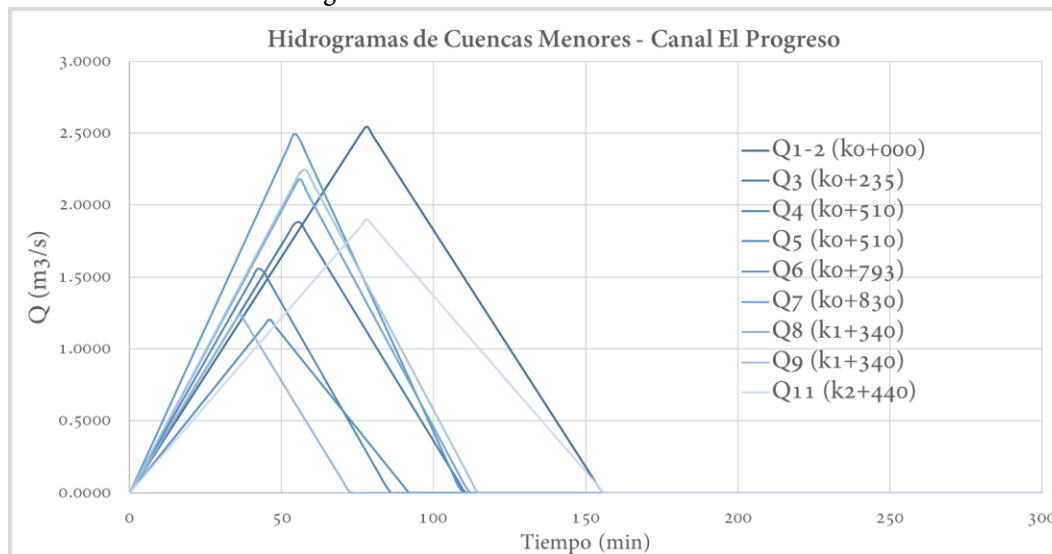
Fuente: Estudio

#### 5.4.1.8. Hidrograma De Cuencas Menores

Con el fin de desarrollar un estudio más detallado con respecto a la modelación hidráulica del Canal El Progreso, se generaron los hidrogramas de escorrentía superficial para cada una de las cuencas menores, a fin de representar gráficamente la variación del caudal en relación con el tiempo en un intervalo de tiempo definido de cinco horas. Para tal fin se seleccionó el caudal pico del hidrograma como el caudal calculado por el método racional como se indica en la sección 5.4.1.7, y el tiempo pico como el tiempo de concentración seleccionado como se indica en la sección 5.4.1.4 del presente documento.

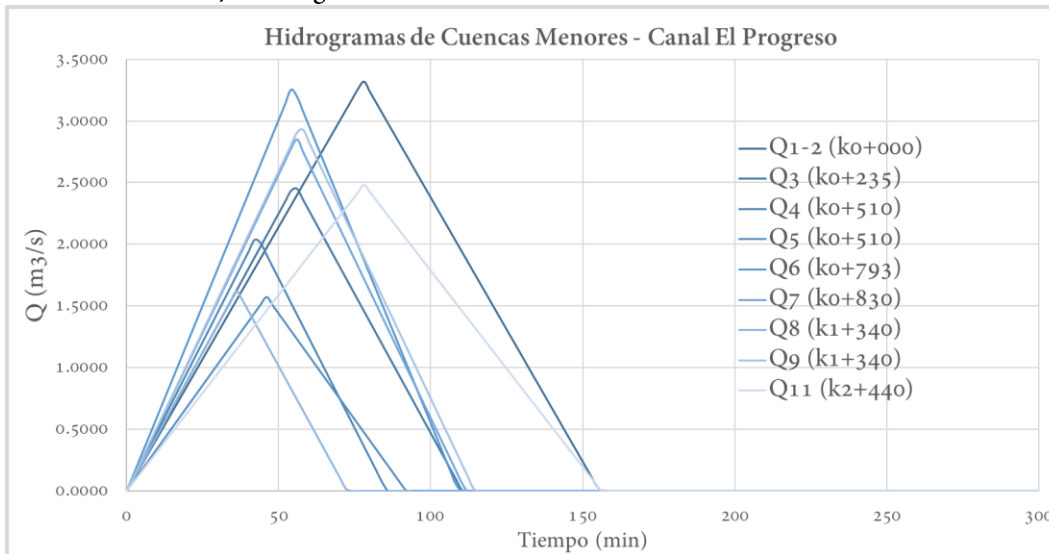
A continuación, se presentan los hidrogramas de las cuencas menores para periodos de retorno de 2, 10 y 25 años.

Ilustración 16. Hidrograma de Cuencas Menores – Periodo de Retorno de 2 años



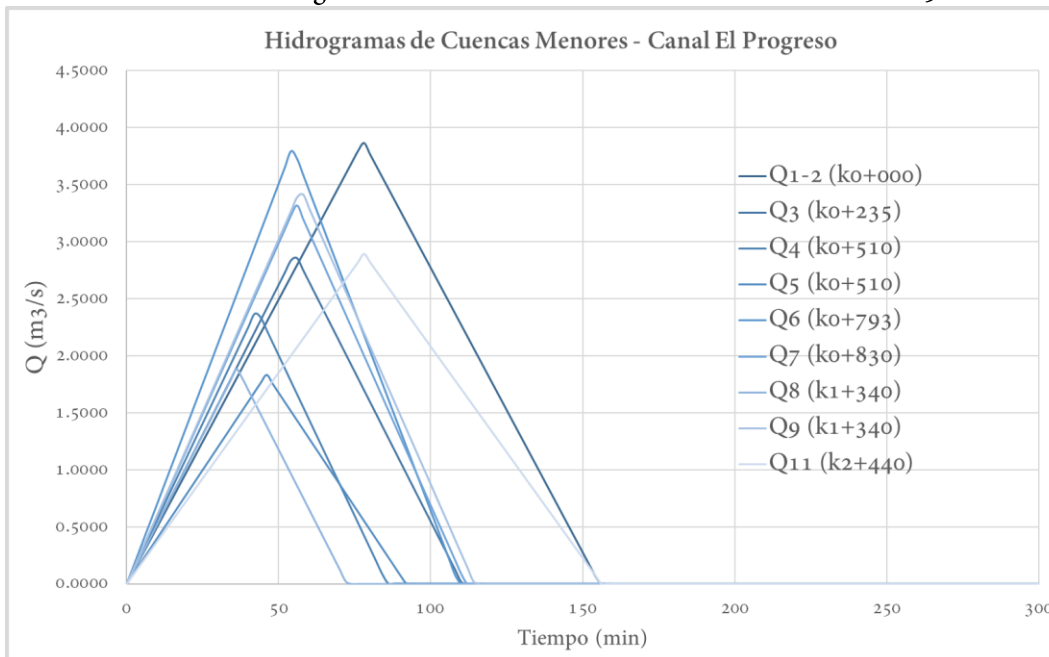
Fuente: Estudio

Ilustración 17. Hidrograma de Cuencas Menores – Periodo de Retorno de 10 años



Fuente: Estudio

Ilustración 18. Hidrograma de Cuencas Menores – Periodo de Retorno de 25 años



Fuente: Estudio

#### 5.4.2. Calculo De Caudales Hoya Mayor - Cuencas Rurales

Para aquellas hoyas hidrográficas consideradas como mayores; es decir, con un área de drenaje superior a  $0.8 \text{ km}^2$  (80 Ha), la metodología a utilizar es la del hidrograma unitario sintético del Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, al cual se le aplicó la lluvia efectiva de diseño. Los hidrogramas para diferentes periodos de retorno fueron calculados con base en el programa de computador HEC-HMS.

### 5.4.2.1. Áreas Aferentes

n base con la información topográfica suministrada por el municipio de Puerto Boyacá y la información cartográfica de la zona de proyecto, se trazaron las hoyas de drenaje aferentes al Canal El Progreso. Adicionalmente, se calculó la longitud del cauce, la diferencia de altura entre el punto más alto y más bajo y la pendiente media ponderada de la corriente. En las ilustraciones 11 y 12 se muestra la delimitación de las cuencas urbanas y rurales aferentes al Canal El Progreso. A continuación, en las siguientes tablas se presentan las características físicas de las cuencas descritas previamente.

Tabla 36. Características físicas de las cuencas

Hoya No.	Nombre De La Cuenca	Área de la Cuenca	Longitud Del Cauce	H máx. (m)	H min. (m)	$\Delta H$ (m)	Pendiente Ponderada Del Cauce, S (m/m)
10	Subcuenca RUR 5 K1+770	1.897 km <sup>2</sup> 1897338 m <sup>2</sup>	2.228km 2227.53m	240.00	138.80	101.2	0.0198
12	Subcuenca RUR 7 K2+440	1.492 km <sup>2</sup> 1491755 m <sup>2</sup>	2.322km 2321.83m	250.00	138.50	111.5	0.0219

Fuente: Estudio

Tabla 37. Cálculo de pendiente media ponderada de los cauces

Hoya No.	Longitud Del Cauce	Longitud Tramo 1	$\Delta H T_1$	AT <sub>1</sub> (m)	Longitud Tramo 2	$\Delta H T_2$	AT <sub>2</sub> (m)	Longitud Tramo 3	$\Delta H T_3$	AT <sub>3</sub> (m)	H <sub>2</sub> *	Pendiente Ponderada, S (m/m)
10	2.228 km 2227.53m	577.42	3.8	81243	803.56	1.2	115070	846.55	97.4	161945	182.86	0.0198
12	2.322 km 2321.83m	742.14	5.1	104678	689.51	5.2	100806	890.18	106.4	175187	189.41	0.0219

Fuente: Estudio

### 5.4.2.2. Tiempo de Concentración

Para determinar la duración de las tormentas de diseño se ha seleccionado el valor mediano de las mismas. Este valor mediano representa un valor más real del tiempo de concentración que el valor medio, con el fin de representar un valor característico típico del tiempo de concentración.

Además de lo anterior y teniendo en cuenta la referencia bibliográfica se ha definido un tiempo de concentración mínimo de 15 minutos, para tener en consideración el tiempo mínimo que tarda la lluvia en concentrarse inicialmente, el cual no tiene en cuenta las características físicas de la cuenca. A continuación, se presentan los tiempos de concentración estimados para las diferentes metodologías enunciadas en el capítulo 3, así como el tiempo de concentración seleccionado en el cálculo de los caudales máximos instantáneos.

**Tabla 38. Tiempos de concentración seleccionados**

Hoya No.	Kirpich (min)	Giandotti (min)	Vt Chow (min)	Cuerpo de ingenieros (min)	Williams (min)	Johnstone y Cross (min)	SCS-Ranser (min)	Hathaway (min)	Mediana (min)	Seleccio nado (min)	t-lag (min)
10	33.36	100.00	95.97	65.07	66.20	110.40	24.22	95.75	80.98	80.98	48.59
12	33.10	87.96	95.35	65.85	69.24	109.85	24.48	85.87	77.56	77.56	46.53

Fuente: Estudio

#### 5.4.2.3. Método del Hidrograma Unitario del Soil Conservation Service

La obtención del número de curva CN se realizó con base en la información geográfica, cartográfica y satelital del proyecto en estudio, sobre la cual se les realizó la clasificación de tipos de coberturas del terreno.

De acuerdo con la información secundaria, se ha seleccionado desde el punto de vista de la seguridad en relación a los caudales resultantes, un valor de CN igual a 73 para bosque y 71 para pastos y 82 para zonas escarpadas, todos correspondientes a un grupo de suelo hidrológico C (*consiste de suelos con tasas de infiltración bajas cuando están totalmente húmedos, con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcali o suelos con niveles freáticos moderados; estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50 a 100 cm)*), y con condición de humedad antecedente tipo AMC-II (*Precipitación acumulada de los 5 días previos al evento en consideración mayor o igual a 52.5 mm*).

Para encontrar el valor de CN correspondiente a cada hoya se hizo uso de la clasificación supervisada, con base en la información geográfica y cartográfica del área del proyecto, sobre la cual se identificaron zonas de bosque, pastos, terrenos escarpados, y zonas duras. A partir de la ponderación de áreas se obtuvieron los resultados de las diferentes coberturas los cuales se presentan a continuación.

**Tabla 39. Valores de CN ponderados de la Cuenca Canal El Progreso**

Hoya No.	Porcentaje de Cobertura (%)				Valor de CN Calculado
	Bosques	Pastos	Zona Escarpada	Áreas Duras	
	CN 70	CN 74	CN 87	CN 90	
10	53%	26%	16%	5%	74.8
12	18%	71%	8%	3%	74.8

Fuente: Estudio

#### 5.4.2.4. Factor de Reducción Por Áreas

Para las hoyas hidrográficas 10 y 12 se calculó el coeficiente de reducción, el cual se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 40. Factor de reducción espacial por lluvia puntual**

Hoya No.	Área Cuenca (km <sup>2</sup> )	Tiempo De Concentración Seleccionado (min)	Factor De Lluvia Espacial Fhrüling	Factor De Lluvia Espacial Icep	Factor De Lluvia Espacial Norteamérica	Factor De Lluvia Espacial Seleccionado
10	1.897	80.98	0.80	0.97	0.93	0.85
12	1.492	77.56	0.81	0.97	0.94	0.85

Fuente: Estudio

#### 5.4.2.5. Histogramas de Aguaceros Puntuales

Con base en las curvas intensidad – duración – frecuencias correspondientes a la estación climatológica ordinaria Puerto Boyacá, para el sector objeto de análisis, se calcularon las curvas de masas de los aguaceros puntuales para duraciones entre 0 y 300 min y periodos de retorno entre 2 y 100 años, las cuales se presentan a continuación:

**Tabla 41. Curvas de masas de aguaceros puntuales área de influencia estación Puerto Boyacá**

TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	25	50	100
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	17.89	20.82	23.36	27.18	30.48	34.19
20	30.09	35.02	39.27	45.71	51.26	57.49
30	38.94	45.31	50.82	59.14	66.33	74.39
40	45.64	53.12	59.58	69.33	77.76	87.21
50	50.91	59.24	66.44	77.32	86.72	97.27
60	55.15	64.18	71.98	83.76	93.95	105.36
70	58.63	68.23	76.53	89.06	99.89	112.03
80	61.55	71.63	80.34	93.50	104.86	117.61
90	64.03	74.52	83.58	97.26	109.08	122.34
100	66.17	77.00	86.36	100.50	112.72	126.42
110	68.02	79.16	88.78	103.32	115.87	129.96
120	69.64	81.05	90.90	105.78	118.64	133.07
130	71.08	82.72	92.78	107.97	121.09	135.81
140	72.36	84.21	94.45	109.91	123.27	138.26
150	73.51	85.55	95.94	111.66	125.23	140.45
160	74.54	86.75	97.29	113.23	126.99	142.43
170	75.48	87.84	98.52	114.65	128.59	144.22
180	76.33	88.83	99.63	115.95	130.04	145.85
190	77.11	89.74	100.65	117.13	131.37	147.34
200	77.83	90.57	101.58	118.22	132.59	148.70
210	78.49	91.34	102.44	119.22	133.71	149.96
220	79.10	92.05	103.24	120.14	134.75	151.12
230	79.66	92.70	103.97	121.00	135.71	152.20
240	80.18	93.31	104.66	121.79	136.60	153.20
250	80.67	93.88	105.29	122.54	137.43	154.14
260	81.13	94.41	105.89	123.23	138.21	155.01

TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)					
	2	5	10	25	50	100
270	81.56	94.91	106.45	123.88	138.94	155.82
280	81.96	95.38	106.97	124.49	139.62	156.59
290	82.33	95.81	107.46	125.06	140.26	157.31
300	82.69	96.23	107.92	125.60	140.86	157.99

Fuente: Estudio

Posteriormente, con base en estas curvas de masas se calcularon los hietogramas de los aguaceros puntuales respectivos, las cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 42. Incrementos de lluvias puntuales de los hietogramas de precipitación área de influencia estación pluviométrica Puerto Boyacá

INTERVALO DE TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (años)					
	2	5	10	25	50	100
0-10	17.89	20.82	23.36	27.18	30.48	34.19
10-20	12.20	14.19	15.92	18.52	20.78	23.30
20-30	8.85	10.29	11.54	13.44	15.07	16.90
30-40	6.71	7.81	8.76	10.19	11.43	12.82
40-50	5.26	6.12	6.87	7.99	8.97	10.06
50-60	4.24	4.93	5.53	6.44	7.22	8.10
60-70	3.49	4.06	4.55	5.30	5.94	6.66
70-80	2.92	3.40	3.81	4.43	4.97	5.58
80-90	2.48	2.89	3.24	3.77	4.22	4.74
90-100	2.13	2.48	2.78	3.24	3.63	4.07
100-110	1.85	2.16	2.42	2.82	3.16	3.54
110-120	1.63	1.89	2.12	2.47	2.77	3.11
120-130	1.44	1.67	1.88	2.18	2.45	2.75
130-140	1.28	1.49	1.67	1.94	2.18	2.45
140-150	1.15	1.34	1.50	1.74	1.95	2.19
150-160	1.03	1.20	1.35	1.57	1.76	1.98
160-170	0.94	1.09	1.22	1.42	1.60	1.79
170-180	0.85	0.99	1.11	1.30	1.45	1.63
180-190	0.78	0.91	1.02	1.18	1.33	1.49
190-200	0.72	0.83	0.93	1.09	1.22	1.37
200-210	0.66	0.77	0.86	1.00	1.12	1.26
210-220	0.61	0.71	0.79	0.92	1.04	1.16
220-230	0.56	0.66	0.74	0.86	0.96	1.08
230-240	0.52	0.61	0.68	0.80	0.89	1.00
240-250	0.49	0.57	0.64	0.74	0.83	0.93
250-260	0.46	0.53	0.60	0.69	0.78	0.87
260-270	0.43	0.50	0.56	0.65	0.73	0.82
270-280	0.40	0.47	0.52	0.61	0.68	0.77
280-290	0.38	0.44	0.49	0.57	0.64	0.72
290-300	0.35	0.41	0.46	0.54	0.60	0.68

Fuente: Estudio



Para dar una secuencia más crítica del aguacero, como es usual en este tipo de análisis, mediante el método del Bloque Alterno, los incrementos de lluvia de los hietogramas mencionados previamente fueron arreglados de la siguiente manera: el valor más bajo se colocó en el primer lugar, el segundo valor en orden creciente se colocó en último lugar, el tercer valor en tal orden se ubicó en segundo lugar, el cuarto valor se localizó en el penúltimo lugar, y así sucesivamente. Los resultados de estos cálculos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 43. Incrementos arreglados de lluvias puntuales de los hietogramas de precipitación área de influencia estación pluviométrica Puerto Boyacá

INTERVALO DE TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (años)					
	2	5	10	25	50	100
0-10	0.85	0.99	1.11	1.30	1.45	1.63
10-20	1.03	1.20	1.35	1.57	1.76	1.98
20-30	1.28	1.49	1.67	1.94	2.18	2.45
30-40	1.63	1.89	2.12	2.47	2.77	3.11
40-50	2.13	2.48	2.78	3.24	3.63	4.07
50-60	2.92	3.40	3.81	4.43	4.97	5.58
60-70	4.24	4.93	5.53	6.44	7.22	8.10
70-80	6.71	7.81	8.76	10.19	11.43	12.82
80-90	12.20	14.19	15.92	18.52	20.78	23.30
90-100	17.89	20.82	23.36	27.18	30.48	34.19
100-110	8.85	10.29	11.54	13.44	15.07	16.90
110-120	5.26	6.12	6.87	7.99	8.97	10.06
120-130	3.49	4.06	4.55	5.30	5.94	6.66
130-140	2.48	2.89	3.24	3.77	4.22	4.74
140-150	1.85	2.16	2.42	2.82	3.16	3.54
150-160	1.44	1.67	1.88	2.18	2.45	2.75
160-170	1.15	1.34	1.50	1.74	1.95	2.19
170-180	0.94	1.09	1.22	1.42	1.60	1.79
180-190	0.94	1.09	1.22	1.42	1.60	1.79
190-200	0.78	0.91	1.02	1.18	1.33	1.49
200-210	0.78	0.91	1.02	1.18	1.33	1.49
210-220	0.66	0.77	0.86	1.00	1.12	1.26
220-230	0.66	0.77	0.86	1.00	1.12	1.26
230-240	0.56	0.66	0.74	0.86	0.96	1.08
240-250	0.56	0.66	0.74	0.86	0.96	1.08
250-260	0.49	0.57	0.64	0.74	0.83	0.93
260-270	0.49	0.57	0.64	0.74	0.83	0.93
270-280	0.43	0.50	0.56	0.65	0.73	0.82
280-290	0.43	0.50	0.56	0.65	0.73	0.82
290-300	0.38	0.44	0.49	0.57	0.64	0.72

Fuente: Estudio

#### 5.4.2.6. Hietogramas de Aguaceros Espaciales

Los hietogramas de lluvia puntual fueron transformados a hietogramas de lluvia espacial, para tener en cuenta el hecho de la espacialidad de la hoya, y de que la precipitación promedio en un aguacero en una hoya es menor a medida que aumenta su área de drenaje.

Para esto se deben afectar los incrementos arreglados de los hietogramas de lluvia puntual por el factor de reducción de lluvia estimado en el numeral 5.4.2.4. Los hietogramas de lluvia espacial se presentan en la siguiente tabla, los cuales resultan iguales para las cuencas 10 y 12.

Tabla 44. Hietograma de aguacero espacial cuenca hidrográfica rural Canal El Progreso

INTERVALO DE TIEMPO (min)	PERIODO DE RETORNO (años)					
	2	5	10	25	50	100
0-10	0.72	0.84	0.95	0.93	1.24	1.39
10-20	0.88	1.02	1.15	1.14	1.50	1.68
20-30	1.09	1.27	1.42	1.42	1.85	2.08
30-40	1.38	1.61	1.80	1.83	2.35	2.64
40-50	1.81	2.11	2.37	2.45	3.09	3.46
50-60	2.48	2.89	3.24	3.45	4.23	4.74
60-70	3.60	4.19	4.70	5.21	6.14	6.88
70-80	5.70	6.64	7.44	8.75	9.71	10.90
80-90	10.37	12.06	13.53	17.71	17.66	19.81
90-100	15.21	17.70	19.85	28.50	25.91	29.06
100-110	7.52	8.75	9.81	12.07	12.81	14.37
110-120	4.47	5.21	5.84	6.64	7.62	8.55
120-130	2.96	3.45	3.87	4.19	5.05	5.66
130-140	2.11	2.45	2.75	2.89	3.59	4.03
140-150	1.58	1.83	2.06	2.11	2.68	3.01
150-160	1.22	1.42	1.59	1.61	2.08	2.33
160-170	0.98	1.14	1.27	1.27	1.66	1.86
170-180	0.80	0.93	1.04	1.02	1.36	1.52
180-190	0.80	0.93	1.04	1.02	1.36	1.52
190-200	0.66	0.77	0.86	0.84	1.13	1.27
200-210	0.66	0.77	0.86	0.84	1.13	1.27
210-220	0.56	0.65	0.73	0.71	0.95	1.07
220-230	0.56	0.65	0.73	0.71	0.95	1.07
230-240	0.48	0.56	0.63	0.60	0.82	0.92
240-250	0.48	0.56	0.63	0.60	0.82	0.92
250-260	0.42	0.48	0.54	0.52	0.71	0.79
260-270	0.42	0.48	0.54	0.52	0.71	0.79
270-280	0.36	0.42	0.47	0.45	0.62	0.69
280-290	0.36	0.42	0.47	0.45	0.62	0.69
290-300	0.32	0.37	0.42	0.40	0.55	0.61

Fuente: Estudio

### 5.4.2.7. Crecientes y Caudales Máximos Instantáneos (Modelo HEC-HMS)

Mediante la aplicación del modelo de computador HEC-HMS, y con las características de la lluvia total espacial, de la curva CN, las áreas de drenaje y del tiempo de desfase para las hoyas hidrográficas analizadas, se calcularon las crecientes de diseño aferentes a las diferentes corrientes producidas por la cuenca hidrográfica analizada, para periodos de retorno entre 2 y 100 años y los valores se presentan respectivamente en la siguiente tabla.

Tabla 45. Caudales máximos instantáneos aferentes a la zona de proyecto método del Soil Conservation Service (Modelo HEC-HMS)

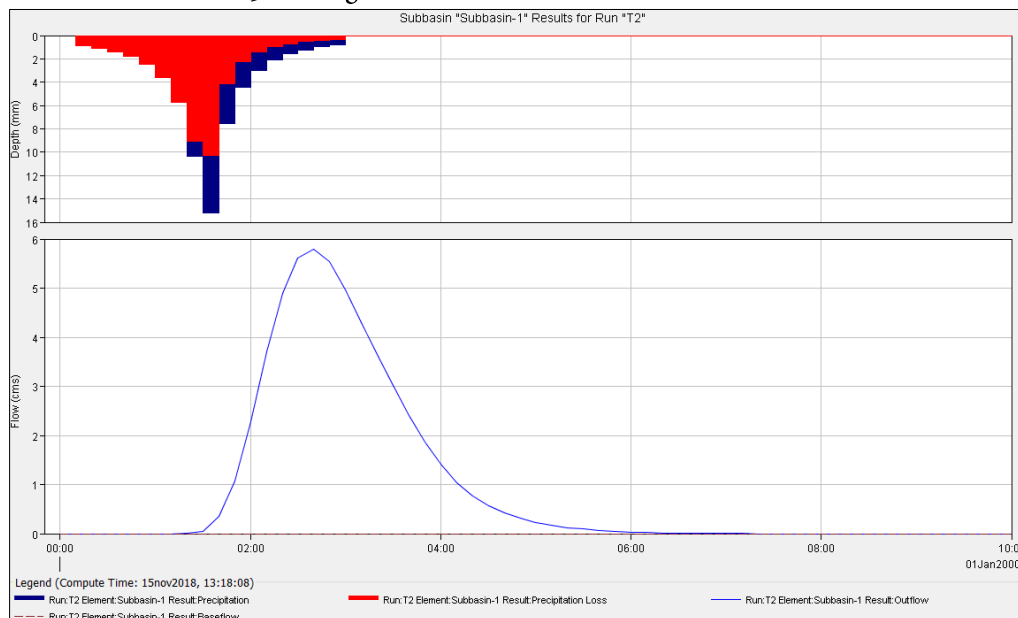
Hoya No.	CAUDAL MÁXIMO (m <sup>3</sup> /s)					
	T= 2 AÑOS	T= 5 AÑOS	T= 10 AÑOS	T= 25 AÑOS	T= 50 AÑOS	T= 100 AÑOS
10	5.8	8.0	10.1	15.3	16.5	17.4
12	4.7	6.4	8.1	12.4	13.4	16.3

Fuente: Estudio

### 5.4.2.8. Hidrogramas De Escorrentía Hoyas Mayores (Modelo HEC-HMS)

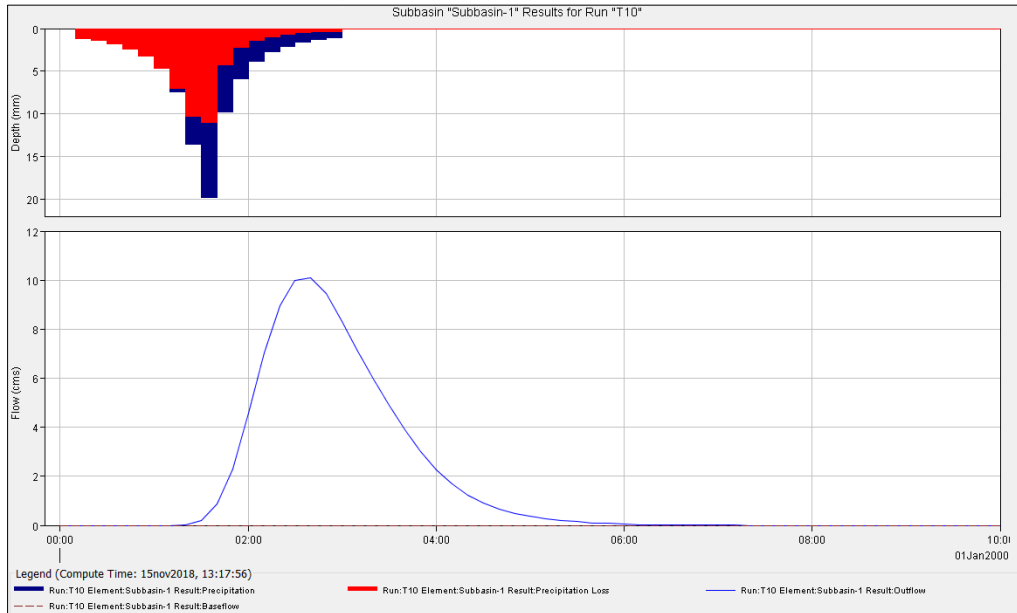
Mediante la aplicación del modelo de computador HEC-HMS, y con las características de la lluvia total espacial, de la curva CN, las áreas de drenaje y del tiempo de desfase para las hoyas hidrográficas analizadas, se calcularon las crecientes de diseño aferentes a las diferentes corrientes producidas por la cuenca hidrográfica analizada, para periodos de retorno entre 2 y 100 años y los valores se presentan respectivamente en la siguiente tabla.

Ilustración 19. Hidrograma de Cuenca 10 – Periodo de Retorno de 2 años



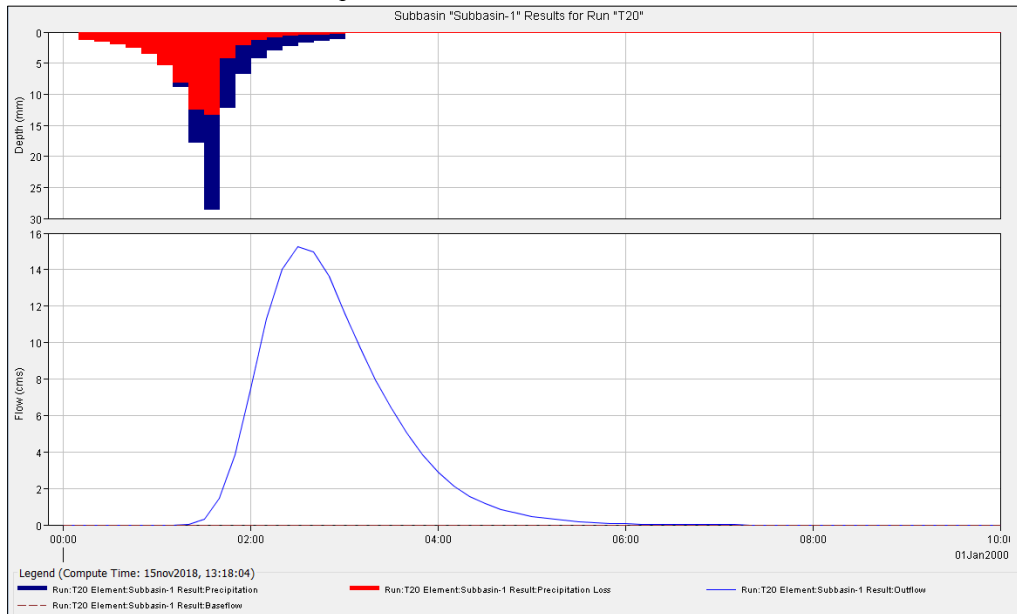
Fuente: Estudio

Ilustración 20. Hidrograma de Cuenca 10 – Periodo de Retorno de 10 años



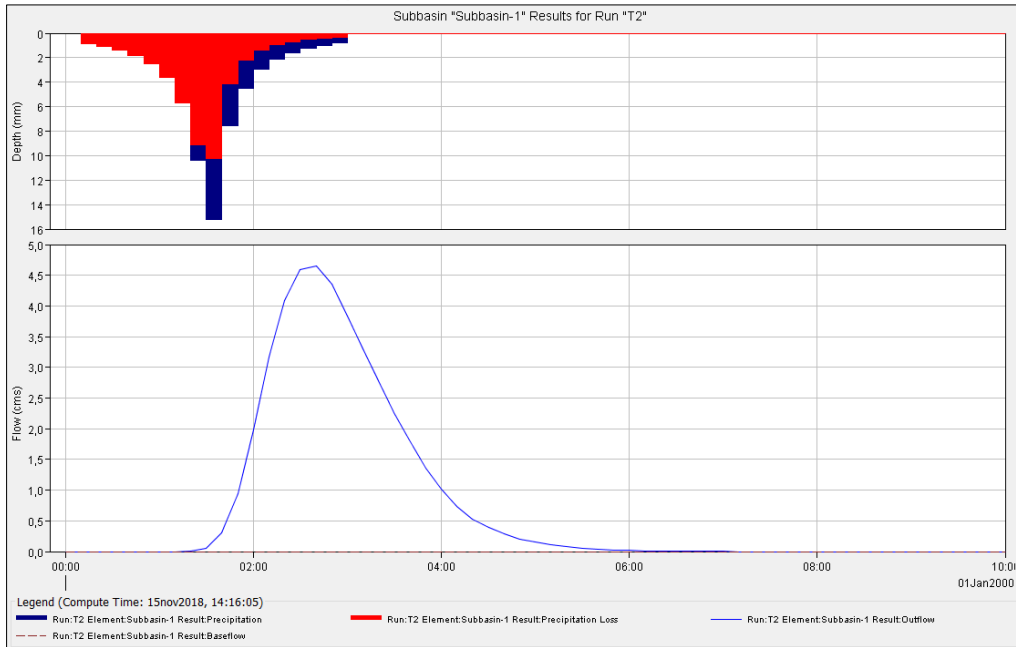
Fuente: Estudio

Ilustración 21. Hidrograma de Cuenca 10 – Periodo de Retorno de 25 años



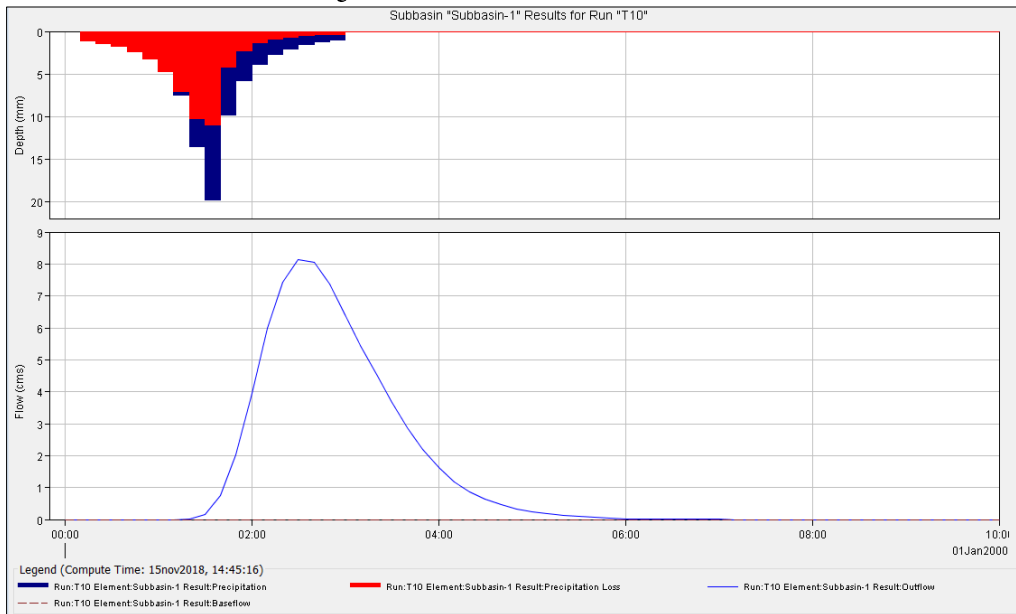
Fuente: Estudio

Ilustración 22. Hidrograma de Cuenca 12 – Periodo de Retorno de 2 años



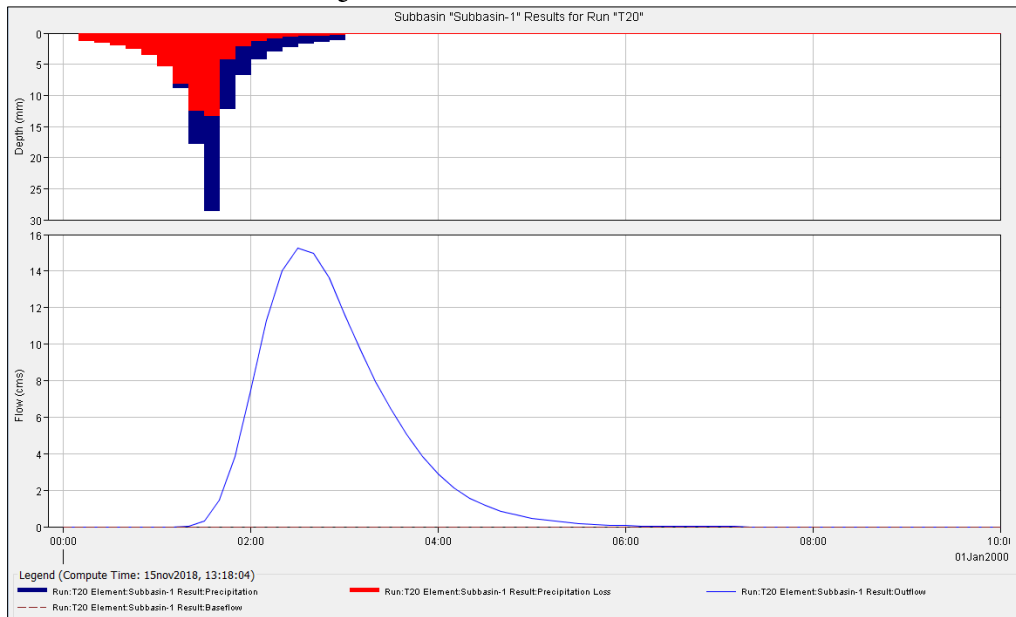
Fuente: Estudio

Ilustración 23. Hidrograma de Cuenca 12 – Periodo de Retorno de 10 años



Fuente: Estudio

Ilustración 24. Hidrograma de Cuenca 12 – Periodo de Retorno de 25 años



Fuente: Estudio

## 5.5. ANÁLISIS DE LA DESCARGA DEL CANAL

A continuación, se describirá la composición de la estructura de compuerta y se dará un análisis del estado actual de la misma.

### 5.5.1. Localización

El Canal El Progreso descarga aguas abajo, en un depósito que tiene un sistema de compuertas el cual se encuentra ubicado después del cruce de la Ruta del sol, como se ilustra en la siguiente imagen.

Ilustración 25. Localización compuertas del Canal el Progreso



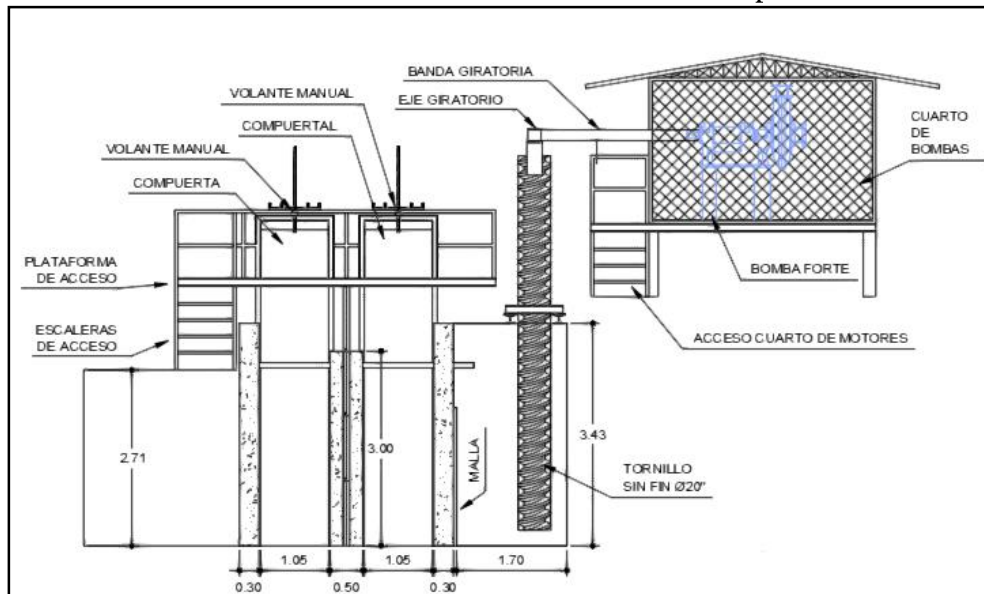
Fuente: Google Maps

### 5.5.2. Componentes Del Sistema De Descarga

En la siguiente ilustración se presenta la vista frontal de la estructura de compuertas, la cual está conformada por dos accesos, uno para la plataforma de maniobra de volantes y otro para ingresar al cuarto de bombas.

Adicionalmente, se tienen un par de compuertas, que se apoyan en muros de concreto y un par de tornillos sin fin que succionan el agua depositada en el espacio delimitado por tales muros, los cuales a su vez cuentan con una malla que impide el paso de sólidos y que permiten el óptimo funcionamiento del sistema. El trabajo de dichos tornillos es producido con la energía que proporcionan los motores Diesel, que se encuentran dentro del cuarto de bombas, como se presenta en la siguiente figura.

Ilustración 26. Vista frontal de la estructura de compuerta

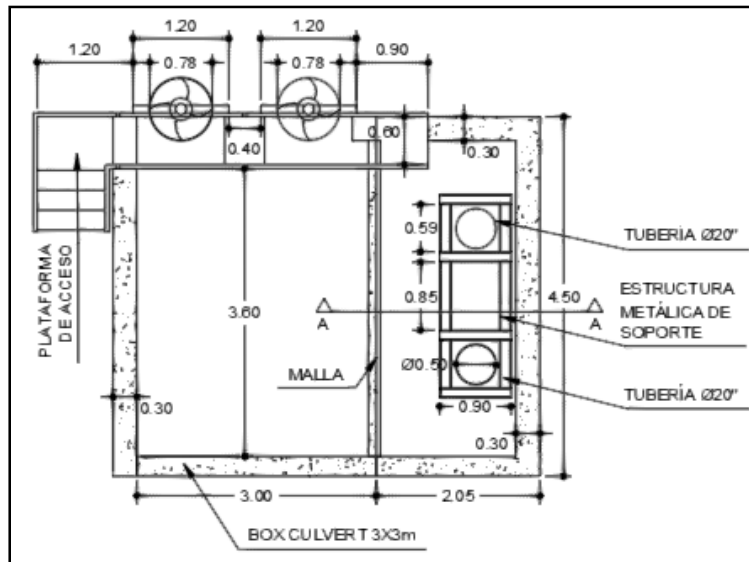


Fuente: Municipio de Puerto Boyacá

El caudal proveniente del canal el progreso, desemboca aguas abajo en el Box couvert de Ruta del sol el cual tiene una sección de 3.0 x 3.0 m. Posterior al box existen un tanque de almacenamiento de aproximadamente 3.6 m de longitud por 5m de ancho.

Las compuertas tienen 1.20 m de ancho y se encuentran separadas 0.4 m la una de la otra. En el caso de las tuberías de succión o tornillos sin fin, tienen un diámetro de 20" y están soportados en estructura metálica. Lo descrito anteriormente se evidencia en la siguiente ilustración.

Ilustración 27. Planta estructura de compuerta



Fuente: Municipio de Puerto Boyacá

#### 5.5.2.1. Compuertas

Las compuertas son las estructuras hidráulicas que permite o impiden el paso del agua dependiendo si estas se encuentran abiertas o cerradas. En el caso de las compuertas del caño El Progreso, se manejan dos escenarios en los cuales las compuertas pueden ser accionadas, el primero de ellos se da cuando el nivel del progreso aumenta a tal punto que se hace necesario evacuar las aguas hacia el canal natural que se encuentra aguas debajo de la estructura de compuertas y que posteriormente se conecta a unos de los brazos del río Magdalena; es decir que las compuertas deben ser abiertas.

El otro caso se presenta cuando el nivel del canal aguas abajo de las compuertas se incrementa lo cual genera remanso del agua así que las compuertas deben ser cerradas para evitar tal fenómeno. En cuanto al estado de las compuertas se tiene que éstas presentan corrosión, sin embargo, actualmente son funcionales.

Ilustración 28. Estructura de compuertas



Fuente: Municipio de Puerto Boyacá



### 5.5.3. Componentes Del Sistema De Bombeo

#### 5.5.3.1. Tuberías de succión

Toda el agua que desemboca en el depósito de esta estructura, es evacuada mediante un par de tornillos sin fin o tuberías de succión que están soportadas en estructura metálica y que cuentan con un diámetro de 20”.

Cabe resaltar que antes de que el agua ingrese por las tuberías, hay una malla metálica que impide el paso de sólidos, la cual está totalmente oxidada. En la siguiente imagen se presenta la fotografía de la tubería de los tornillos sin fin.

Ilustración 29. Tubería de succión o tornillos sin fin



*Fuente: Municipio de Puerto Boyacá*

#### 5.5.3.2. Cuarto de bombas

El trabajo de bombeo inicia cuando los motores que están dentro del cuarto de bombas se ponen en funcionamiento, lo cual ocurre solamente cuando estos son accionados manualmente por los operarios de la Empresa de servicios públicos del municipio. A continuación, se presenta el registro fotográfico de los dos motores Diesel que funcionan actualmente en la estación.

Ilustración 30. Motor Diesel



Fuente: Municipio de Puerto Boyacá

Los motores funcionan únicamente con combustible Diesel y de acuerdo a la información suministrada por la empresa de servicios públicos de Puerto Boyacá, tienen un alto costo de operación. La ficha técnica de estos motores corresponde a la información mostrada en la siguiente imagen y a lo presentado en la siguiente tabla.

Tabla 46. Ficha técnica motores

BOMBAS FORTE (GLOBAL MOTOR PRODUCTS)	
MODELO	SP211P301-TD226B-4D
MOTOR	TD226B-401
POTENCIA (HP)	101
SERIE	4B11E001551-0215
FECHA	ENERO 2012

Fuente: Municipio de Puerto Boyacá

La energía producida por los motores es transmitida mediante bandas al eje de los tornillos sin fin, los cuales inician la succión del agua y la transportan al otro lado de las compuertas.

#### 5.5.4. Evaluación Hidráulica Del Sistema De Bombeo Existente

El sistema de bombeo del Caño El Progreso, cuenta con un sistema de retención de sólidos tipo malla, con dos bombas de tornillo vertical de capacidad 4500 GPM (283 lps) cada una y sistema by-pass con compuerta deslizante. La capacidad manejada por las Bombas tipo tornillo, equivale a 566 L/s.

De acuerdo con la caracterización hidrológica del Canal El Progreso, se observa que el sistema de bombeo existente, no tiene la capacidad hidráulica suficiente para extraer el caudal aportado por un evento con periodo de retorno de más de 2 años.

## **6. MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL CANAL EL PROGRESO**

El Canal El Progreso se localiza en el costado sur del casco urbano del municipio de Puerto Boyacá, y recibe aproximadamente el 70% de las aguas pluviales del municipio. Esta estructura inicia en la calle 14 con carrera 9 y termina en el costado occidental del casco urbano en donde entrega sus aguas a un box culvert localizado en la Ruta del Sol.

De acuerdo con la información recopilada y la caracterización hidrológica realizada en el capítulo 5 del presente documento, se realizó la modelación hidráulica del canal por medio del software libre HEC-RAS 5.0.5, con el fin de calcular las principales características hidráulicas, generas las áreas de inundación y posteriormente realizar el análisis y proponer soluciones para su mitigación y afectación ambiental.

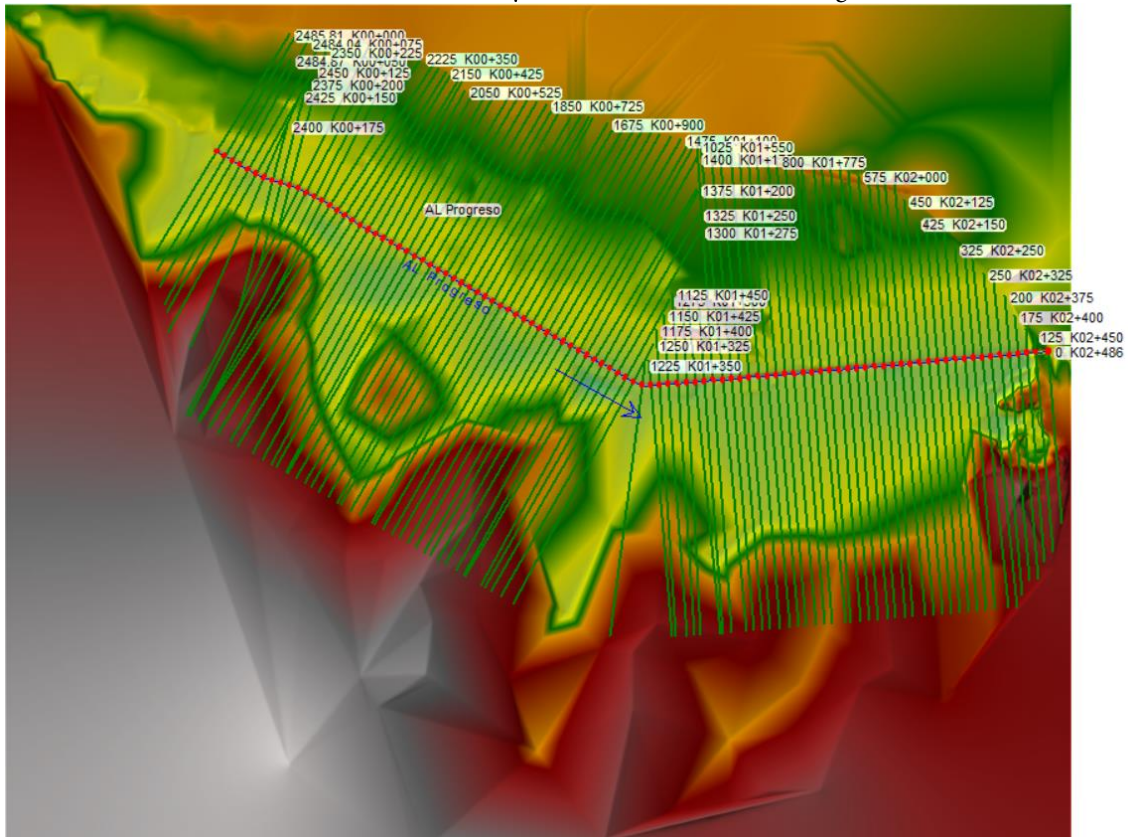
Inicialmente se realizó el modelo hidráulico suponiendo un flujo permanente, para eventos de precipitación con periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, obteniéndose como resultado los valores de nivel máximo instantáneo para cada una de las secciones y los diferentes periodos de retorno seleccionado.

Posteriormente, a fin de realizar un estudio y análisis más detallado y aproximado, se realizó el modelo hidráulico con flujo no permanente, para eventos de precipitación con periodo de retorno de 2, 10 y 25 años, obteniéndose como resultado los valores de nivel en el tiempo incluyendo los valores máximos para cada una de las secciones y los diferentes periodos de retorno seleccionado.

### **6.1. GEOMETRÍA DEL CANAL**

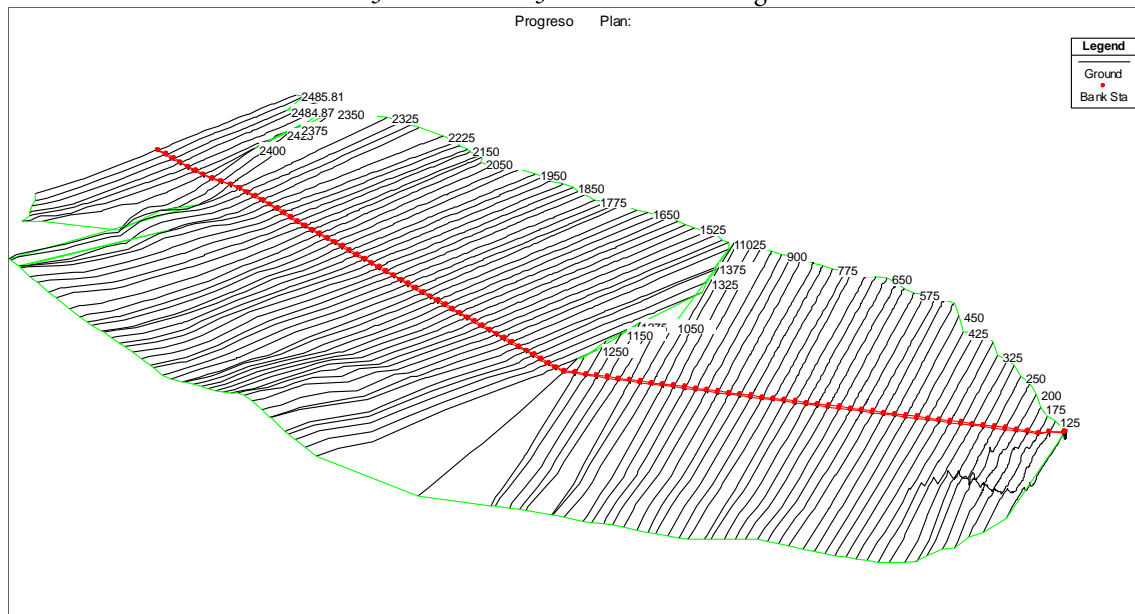
Con base en la información geográfica y topográfica del área del proyecto, se importó al software HEC-RAS la información geográfica del área del proyecto y la geometría detallada del Canal El Progreso cada 25 metros, contando así con la información necesaria para la modelación hidráulica del canal. Una vez importado, se revisó la información de cada una de las secciones transversales del canal, detallando la localización de las bancas del canal e ingresando la información de rugosidad y coeficientes de expansión y contracción para el desarrollo de la modelación hidráulica.

Ilustración 31. Terreno y Geometría del Canal El Progreso



Fuente: Estudio

Ilustración 32. Geometría 3D del Canal El Progreso



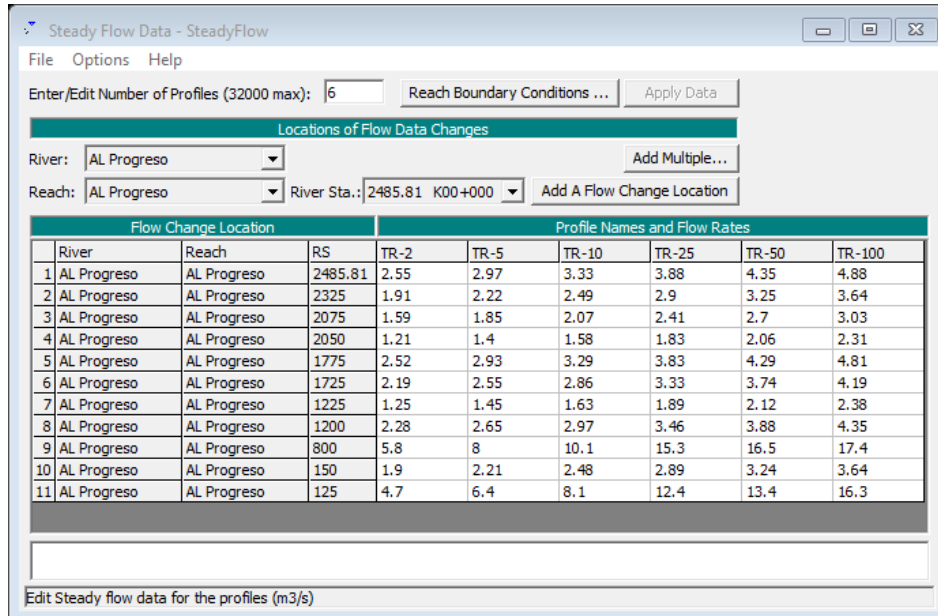
Fuente: Estudio

## 6.2. MODELACIÓN CON FLUJO PERMANENTE

### 6.2.1. Datos De Entrada Al Modelo

Los datos de entrada y la configuración al modelo hidráulico se representan en la siguiente tabla.

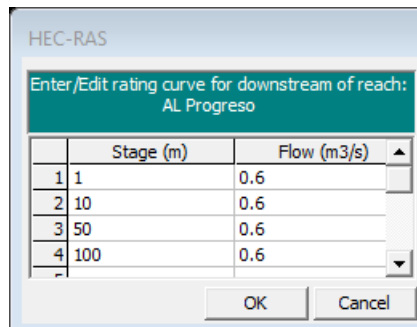
Ilustración 33. Información Hidrológica de Entrada



Flow Change Location			Profile Names and Flow Rates					
River	Reach	RS	TR-2	TR-5	TR-10	TR-25	TR-50	TR-100
1	AL Progreso	2485.81	2.55	2.97	3.33	3.88	4.35	4.88
2	AL Progreso	2325	1.91	2.22	2.49	2.9	3.25	3.64
3	AL Progreso	2075	1.59	1.85	2.07	2.41	2.7	3.03
4	AL Progreso	2050	1.21	1.4	1.58	1.83	2.06	2.31
5	AL Progreso	1775	2.52	2.93	3.29	3.83	4.29	4.81
6	AL Progreso	1725	2.19	2.55	2.86	3.33	3.74	4.19
7	AL Progreso	1225	1.25	1.45	1.63	1.89	2.12	2.38
8	AL Progreso	1200	2.28	2.65	2.97	3.46	3.88	4.35
9	AL Progreso	800	5.8	8	10.1	15.3	16.5	17.4
10	AL Progreso	150	1.9	2.21	2.48	2.89	3.24	3.64
11	AL Progreso	125	4.7	6.4	8.1	12.4	13.4	16.3

Fuente: Estudio

Ilustración 34. Condiciones de Borde Aguas Abajo (Estación Bombeo Existente)

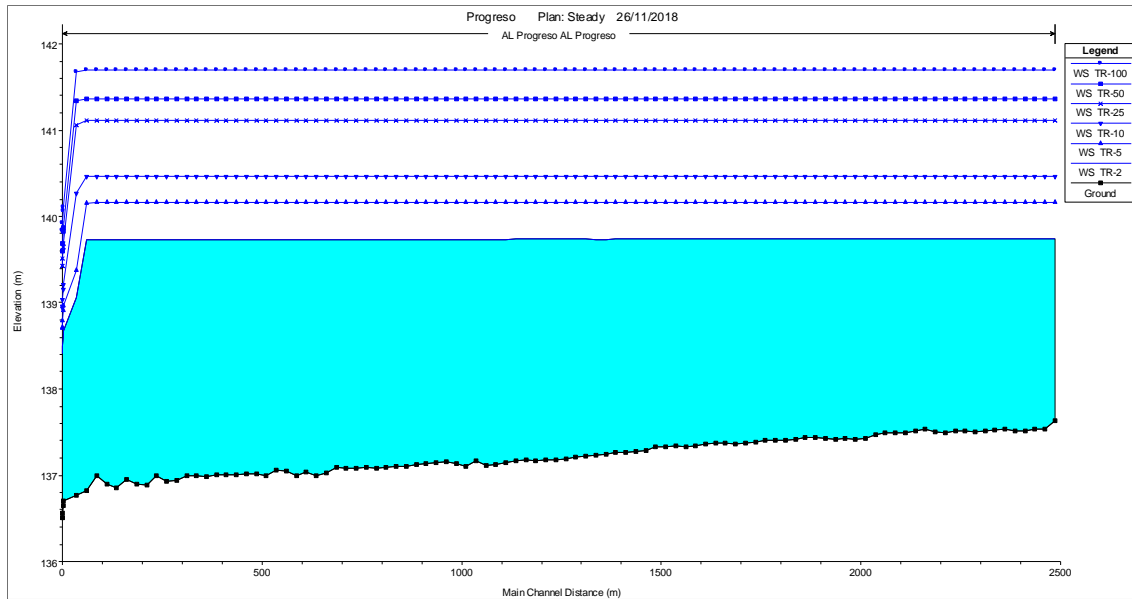


	Stage (m)	Flow (m3/s)
1	1	0.6
2	10	0.6
3	50	0.6
4	100	0.6

Fuente: Estudio

## 6.2.2. Perfiles de Flujo Máximo Modelación Permanente

Ilustración 35. Perfil de Flujo Modelación Permanente

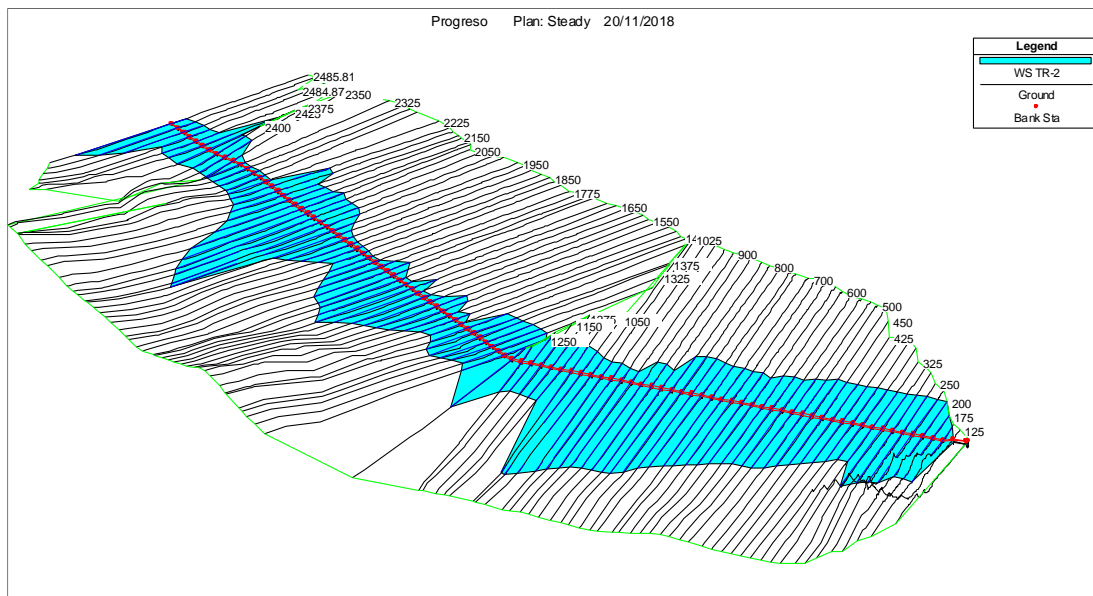


Fuente: Estudio

## 6.2.3. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 2 Años

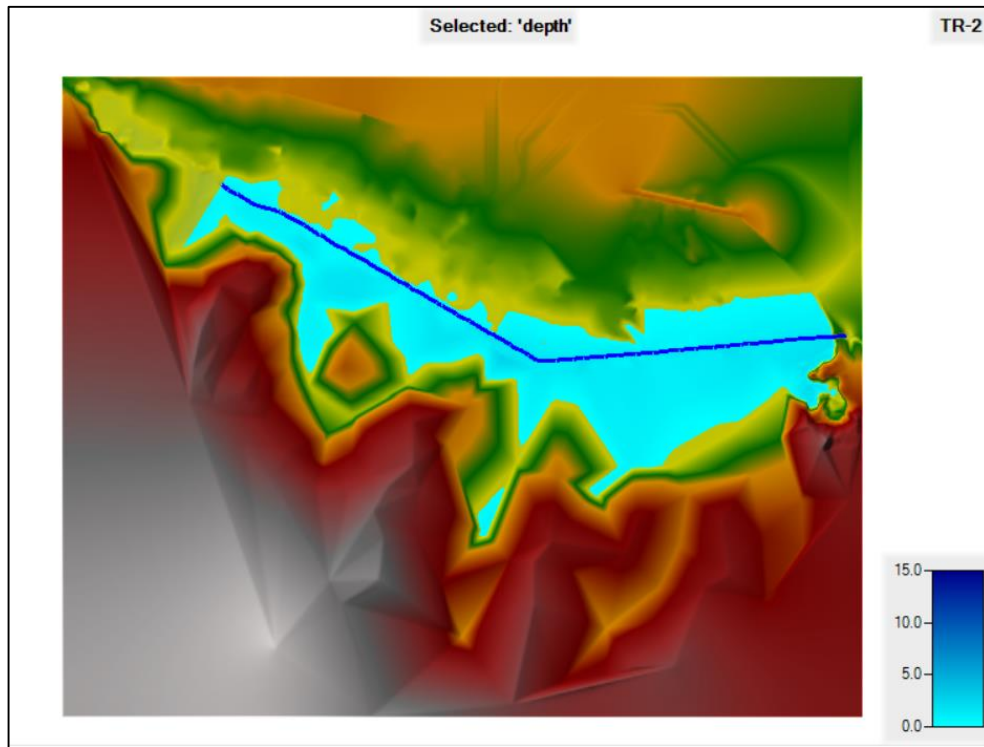
A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 2 años.

Ilustración 36. Esquema 3D Modelación Permanente – TR: 2 años



Fuente: Estudio

Ilustración 37. Mapa Inundación Modelación Permanente – TR: 2 años

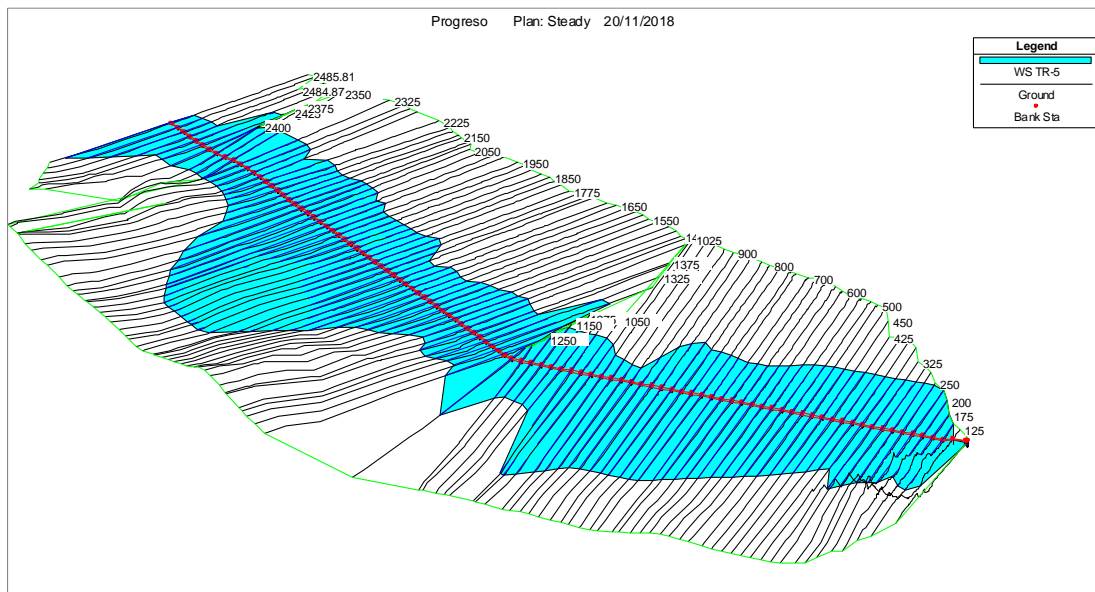


Fuente: Estudio

#### 6.2.4. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 5 Años

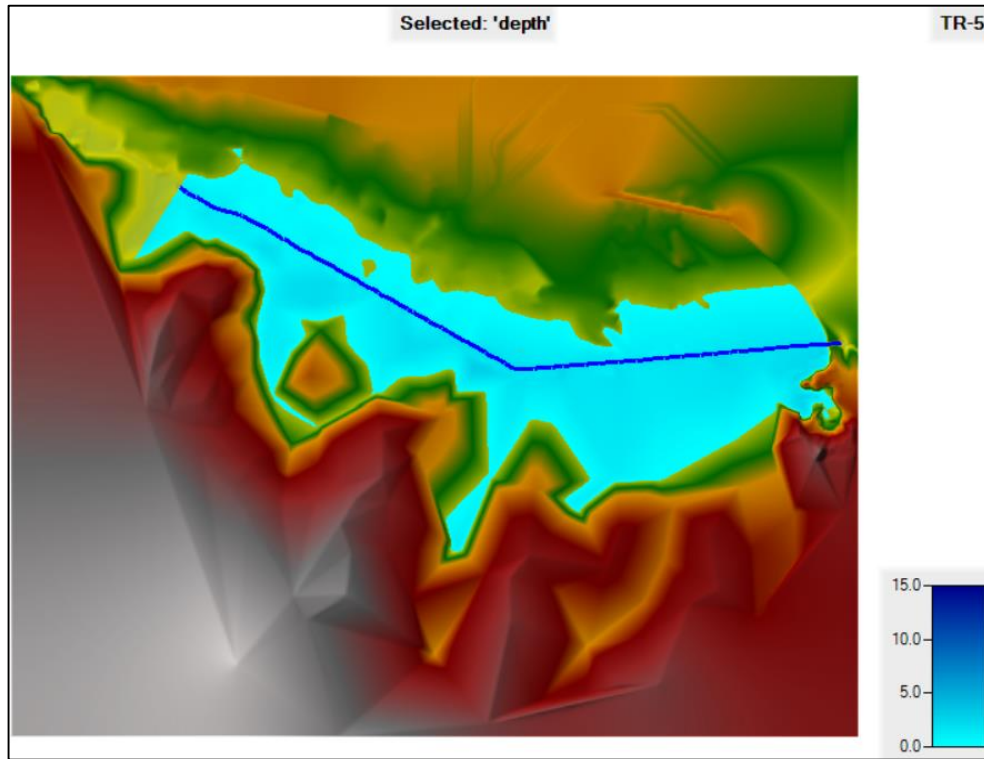
A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 5 años.

Ilustración 38. Esquema 3D Modelación Permanente – TR: 5 años



Fuente: Estudio

Ilustración 39. Mapa Inundación Modelación Permanente – TR: 5 años

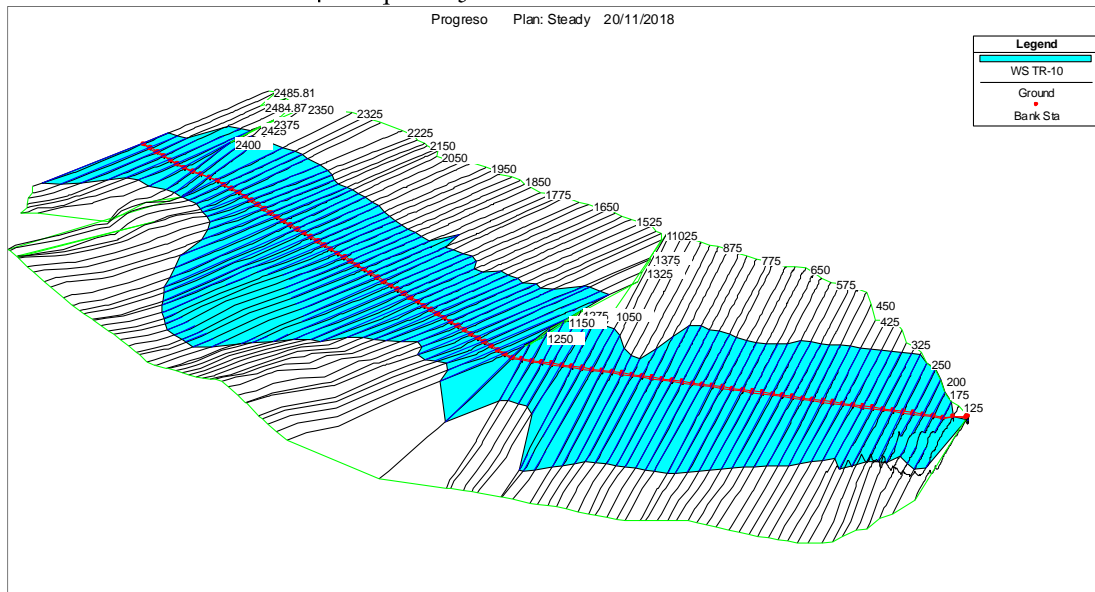


Fuente: Estudio

### 6.2.5. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 10 Años

A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 10 años.

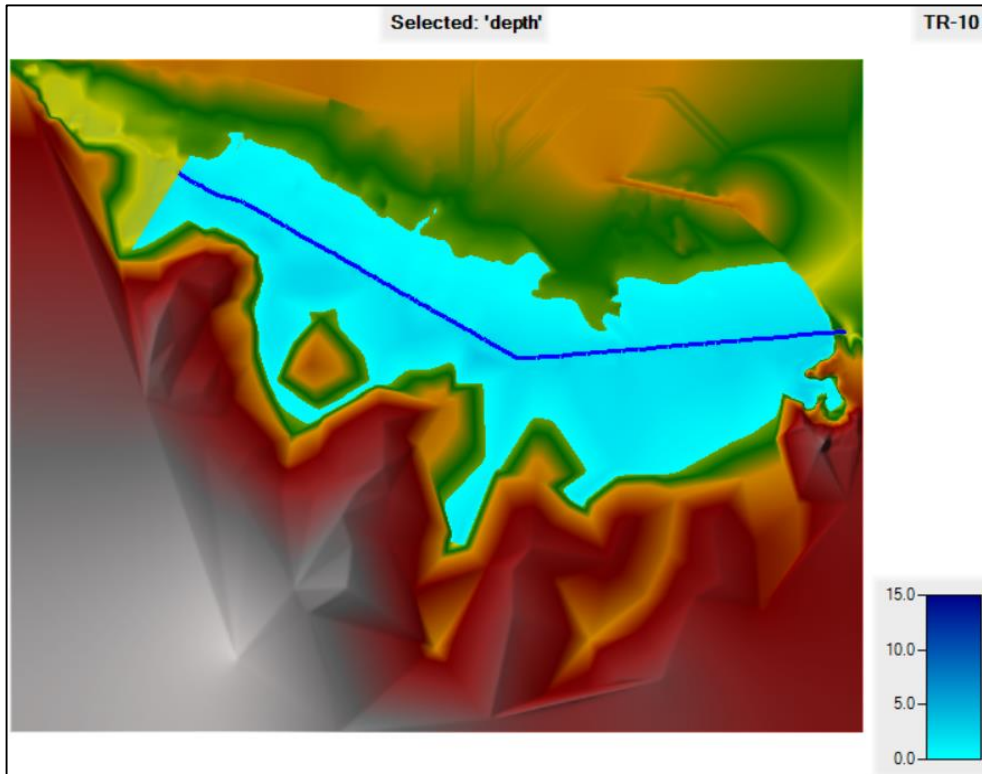
Ilustración 40. Esquema 3D Modelación Permanente – TR: 10 años



Fuente: Estudio



Ilustración 41. Mapa Inundación Modelación Permanente – TR: 10 años

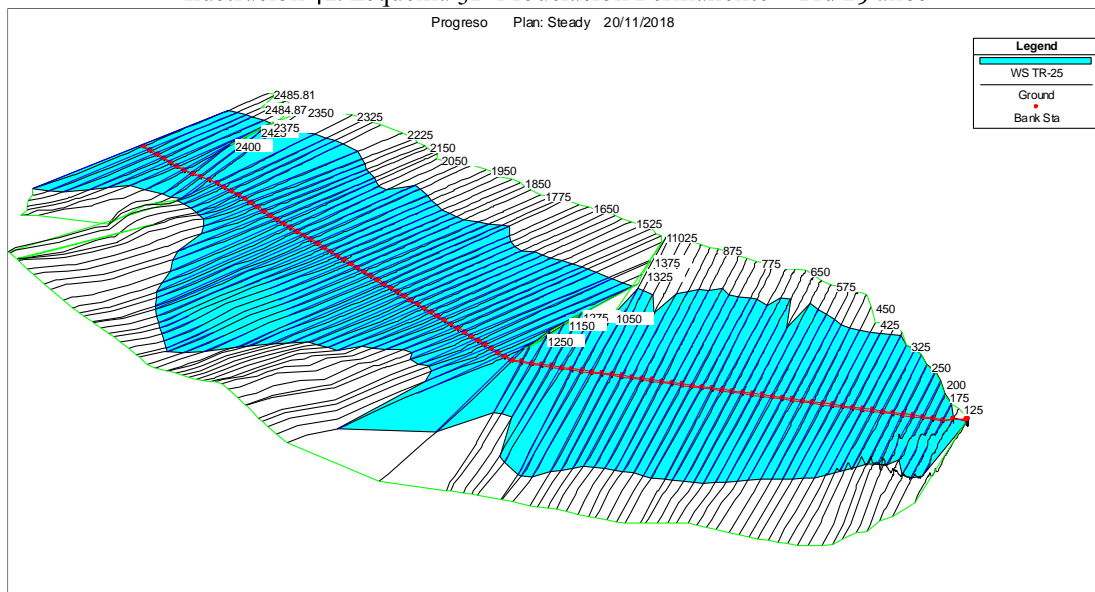


Fuente: Estudio

### 6.2.6. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 25 Años

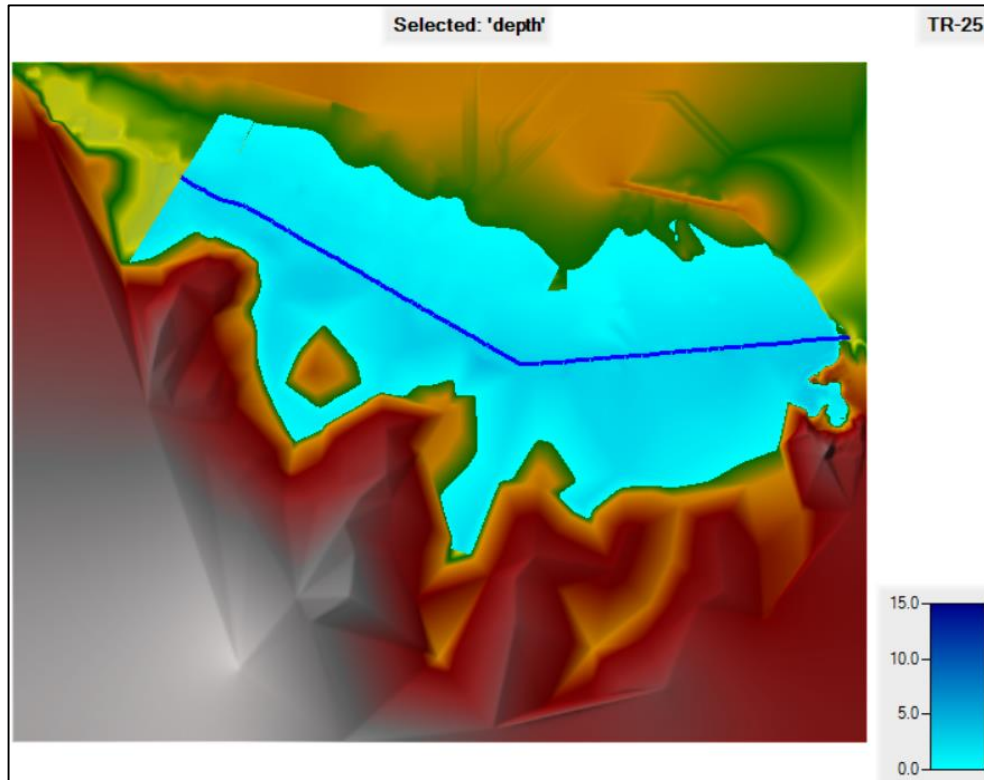
A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 25 años.

Ilustración 42. Esquema 3D Modelación Permanente – TR: 25 años



Fuente: Estudio

Ilustración 43. Mapa Inundación Modelación Permanente – TR: 25 años

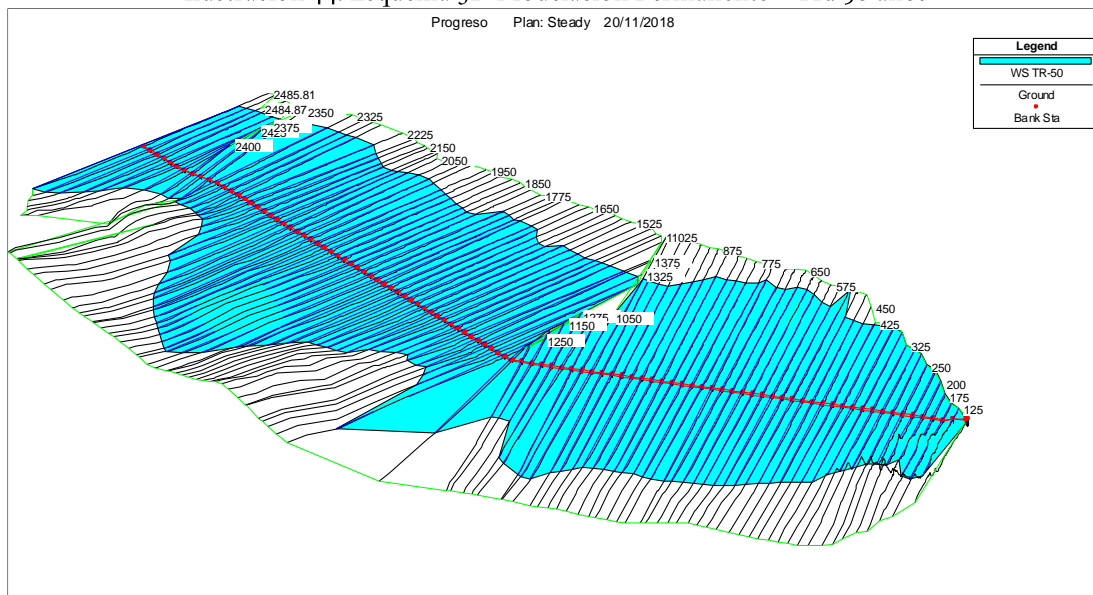


Fuente: Estudio

### 6.2.7. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 50 Años

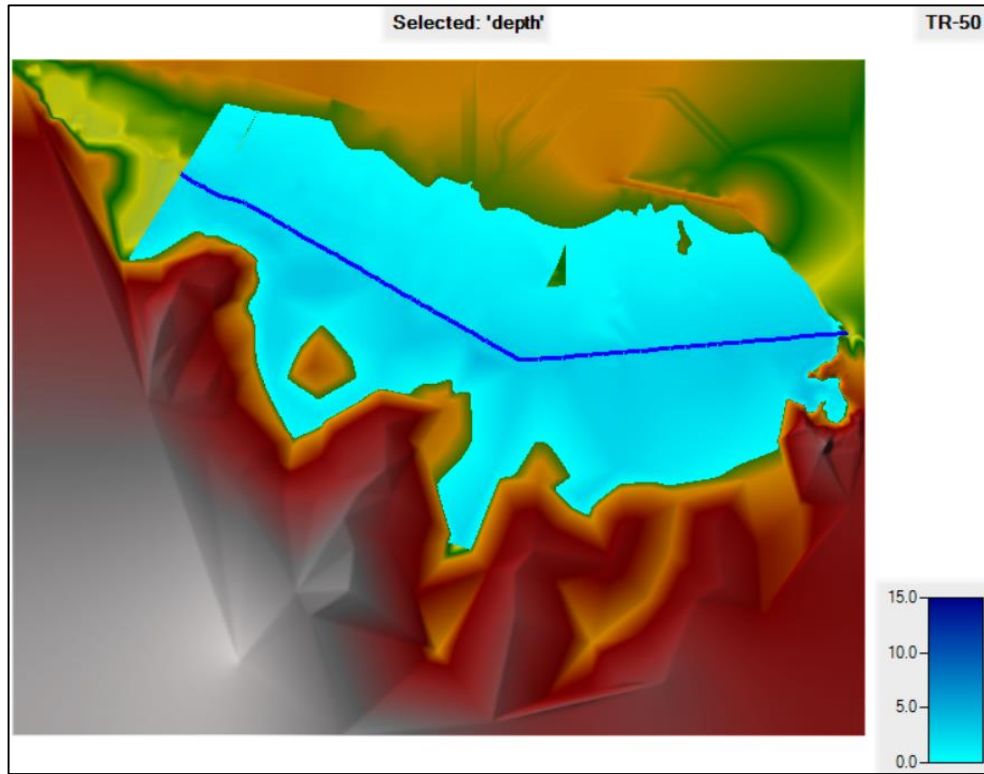
A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 50 años.

Ilustración 44. Esquema 3D Modelación Permanente – TR: 50 años



Fuente: Estudio

Ilustración 45. Mapa Inundación Modelación Permanente – TR: 50 años

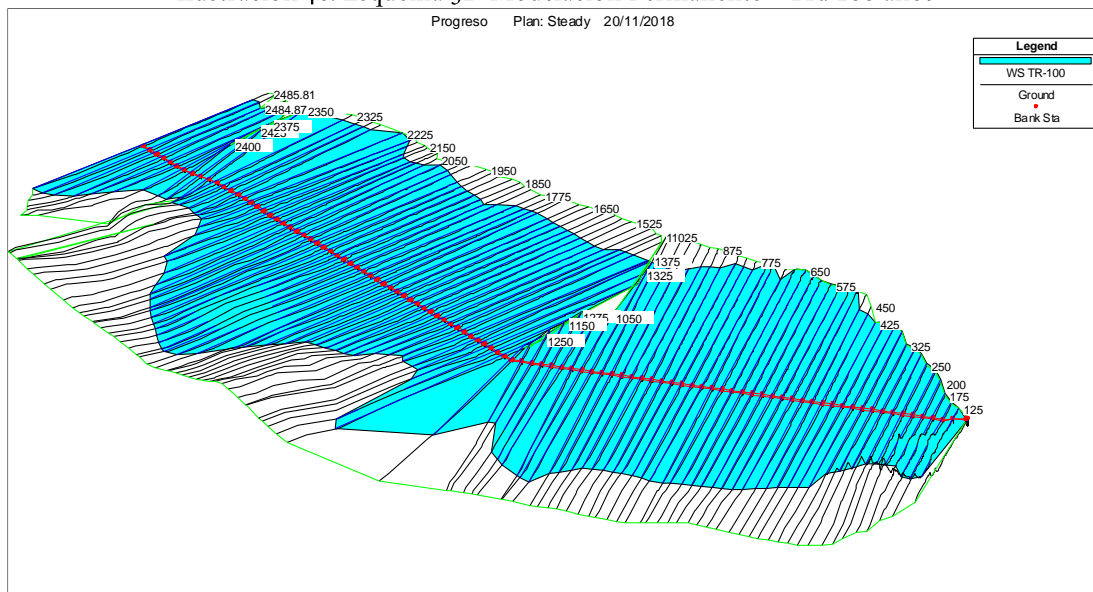


Fuente: Estudio

### 6.2.8. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 100 Años

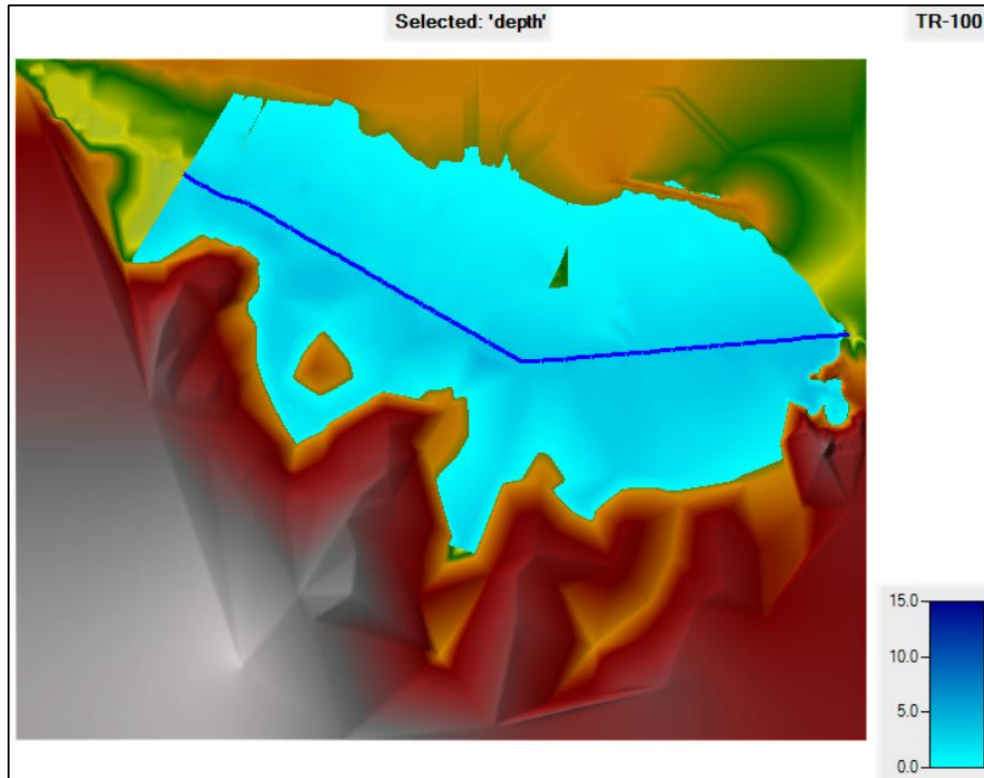
A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 100 años.

Ilustración 46. Esquema 3D Modelación Permanente – TR: 100 años



Fuente: Estudio

Ilustración 47. Mapa Inundación Modelación Permanente – TR: 100 años



Fuente: Estudio

### 6.3. MODELACIÓN CON FLUJO NO PERMANENTE

#### 6.3.1. Modelación Para 2 Años de Periodo de Retorno

##### 6.3.1.1. Datos De Entrada Al Modelo

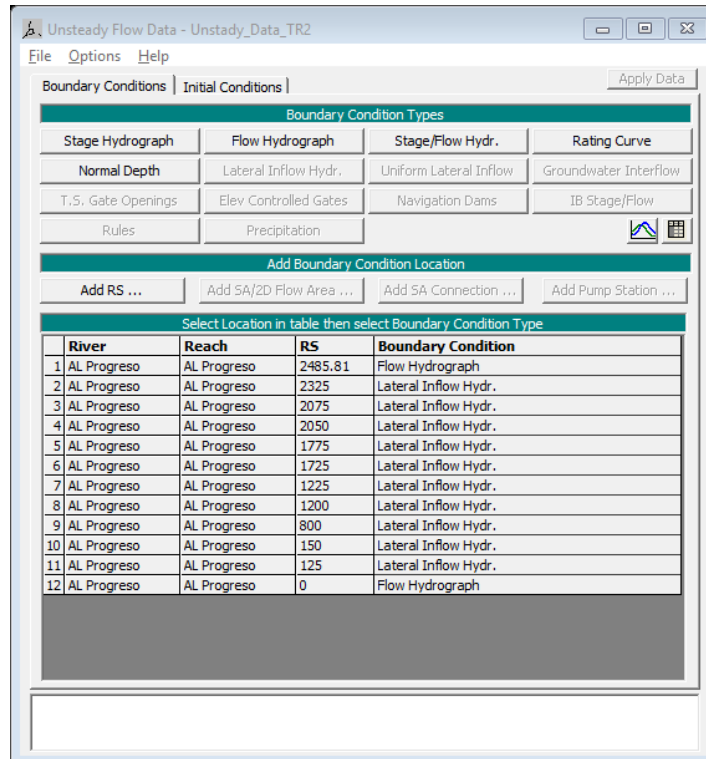
Los datos de entrada y la configuración al modelo hidráulico se representan en la siguiente tabla.

Ilustración 48. Resumen Información Hidrológica de Entrada

Inflow summary					
	Boundary Condition Location	Minimum (m3/s)	Maximum (m3/s)	Volume(1000 m3)	Comments
1	AL Progreso AL Progreso: 2485.81	0.01	2.5437	11.99	Min Set (0.01)
2	AL Progreso AL Progreso: 2325	0.01	1.8781	6.424	Min Set (0.01)
3	AL Progreso AL Progreso: 2075	0.01	1.5585	4.194	Min Set (0.01)
4	AL Progreso AL Progreso: 2050	0.01	1.2039	3.449	Min Set (0.01)
5	AL Progreso AL Progreso: 1775	0.01	2.4947	8.353	Min Set (0.01)
6	AL Progreso AL Progreso: 1725	0.01	2.183	7.449	Min Set (0.01)
7	AL Progreso AL Progreso: 1225	0.01	1.2386	2.844	Min Set (0.01)
8	AL Progreso AL Progreso: 1200	0.01	2.2428	7.917	Min Set (0.01)
9	AL Progreso AL Progreso: 800	0.01	4.8	26.81	Min Set (0.01)
10	AL Progreso AL Progreso: 150	0.01	1.9023	8.992	Min Set (0.01)
11	AL Progreso AL Progreso: 125	0.01	4.7	25.73	Min Set (0.01)
12	AL Progreso AL Progreso: 0	0.6	0.6	10.80	Min Set (0.01)

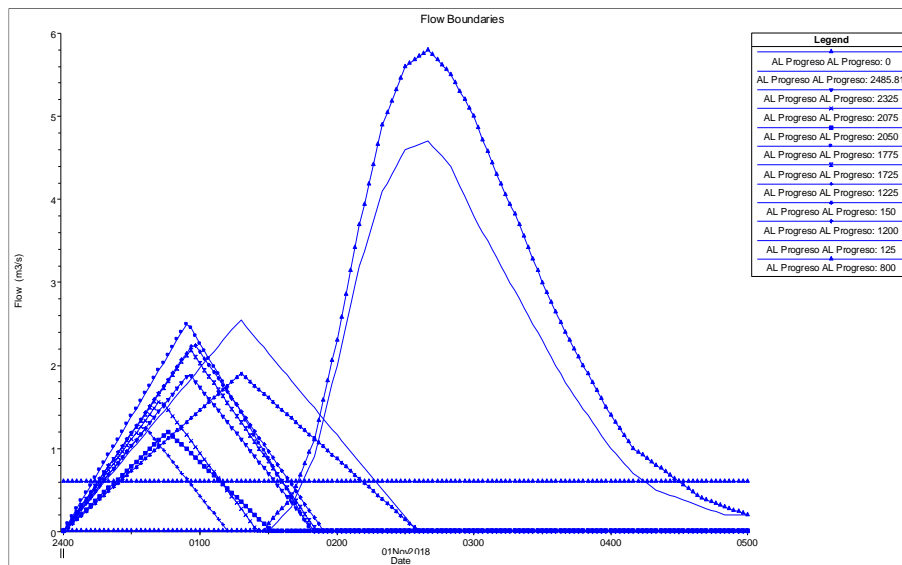
Fuente: Estudio

Ilustración 49. Información Hidrológica de Entrada



Fuente: Estudio

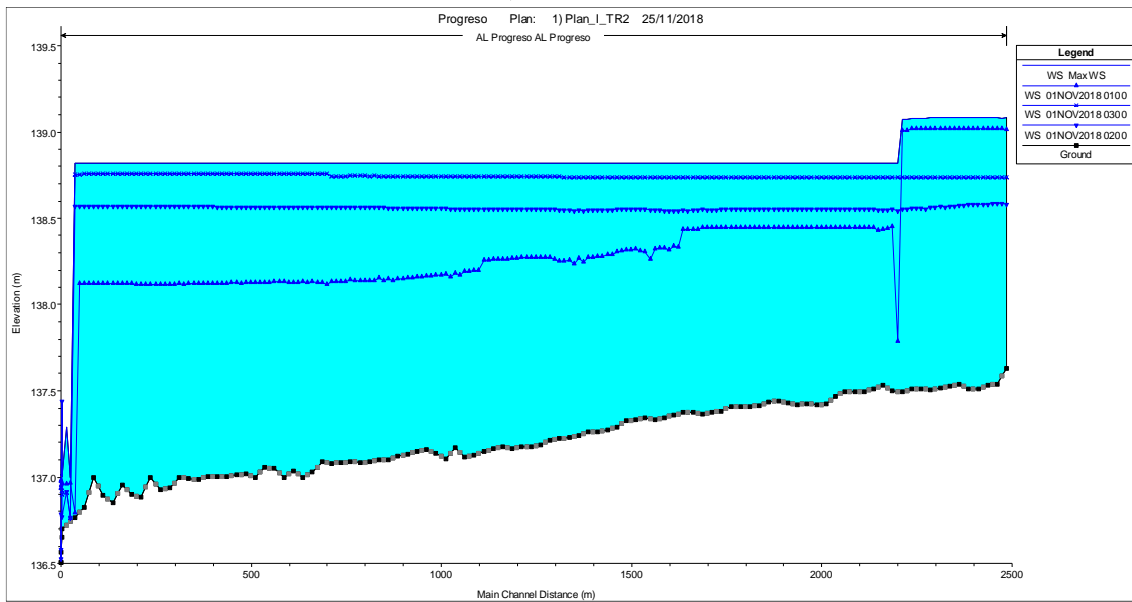
Ilustración 50. Información Hidrológica de Entrada – Hidrogramas



Fuente: Estudio

### 6.3.2. Perfil de Flujo Máximo Para Periodo de Retorno de 2 Años

Ilustración 51. Perfil de Flujo Modelación No Permanente – TR: 2 años

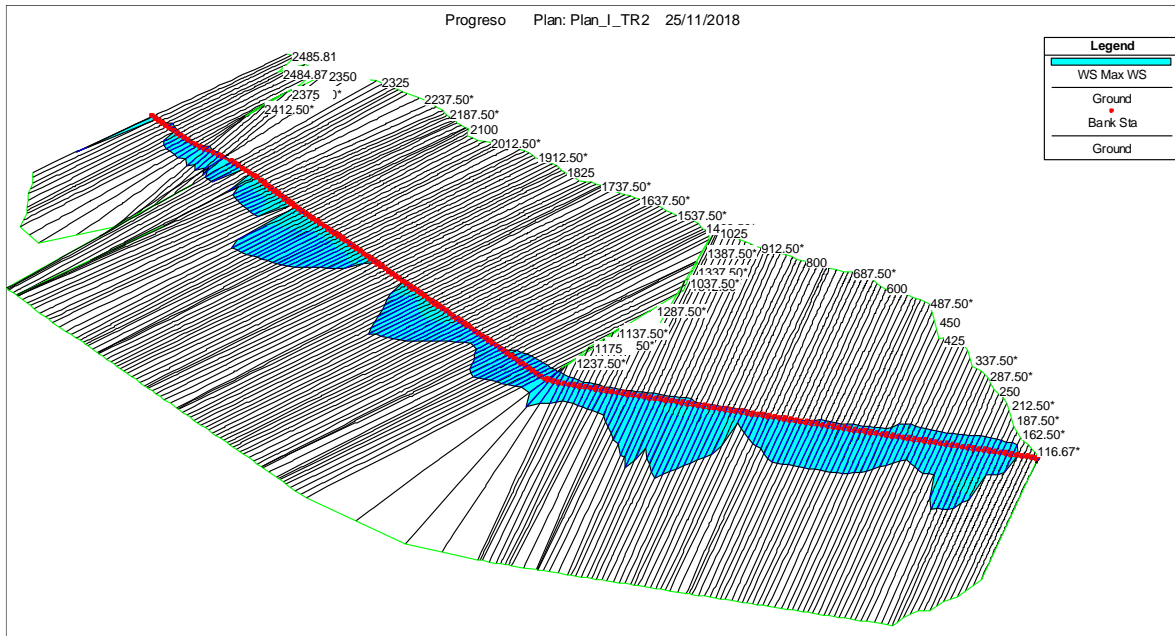


Fuente: Estudio

### 6.3.3. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 2 Años

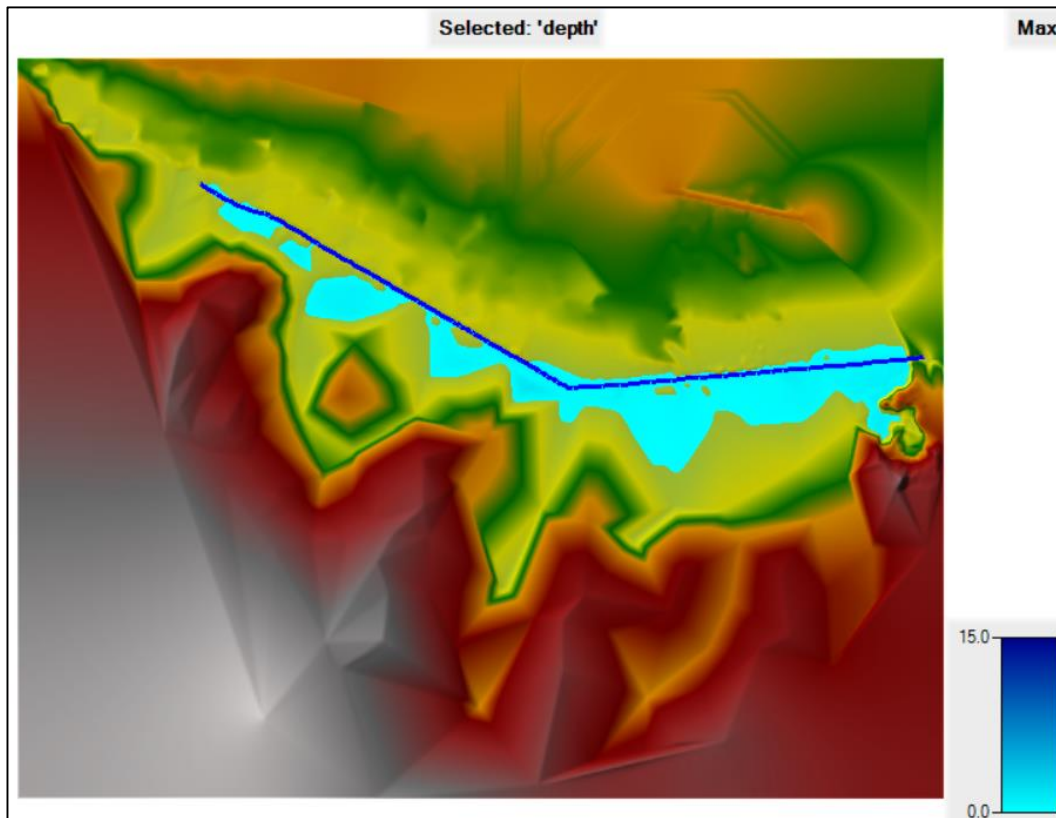
A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 2 años.

Ilustración 52. Esquema 3D Modelación No Permanente – TR: 2 años, Lamina Máxima



Fuente: Estudio

Ilustración 53. Mapa Inundación Modelación No Permanente – TR: 2 años, Lamina Máxima



Fuente: Estudio

En los resultados de la modelación de flujo no permanente, se presentaron varios avisos de alerta del programa, e igualmente se identificó un error en el cálculo interno del programa debido a la condición de frontera aguas abajo la cual limita la salida de caudal a  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , encontrándose que, en el desarrollo de iteraciones el programa asume caudales negativos para cumplir con dicha condición de frontera, lo que no permite tener confiabilidad en el modelo. Aun así, se realizó la modelación en flujo no permanente para un periodo de retorno de 25 años de periodo de retorno para evaluar si se presentaba el mismo error.

### 6.3.4. Modelación Para 25 Años de Periodo de Retorno

#### 6.3.4.1. Datos De Entrada Al Modelo

Los datos de entrada y la configuración al modelo hidráulico se representan en la siguiente tabla.

Ilustración 54. Resumen Información Hidrológica de Entrada

Inflow summary

	Boundary Condition Location	Minimum (m3/s)	Maximum (m3/s)	Volume(1000 m3)	Comments
1	AL Progreso AL Progreso: 2485.81	0.01	3.8637	18.35	Min Set (0.01)
2	AL Progreso AL Progreso: 2325	0.01	2.8527	9.879	Min Set (0.01)
3	AL Progreso AL Progreso: 2075	0.01	2.3672	6.484	Min Set (0.01)
4	AL Progreso AL Progreso: 2050	0.01	1.8287	5.353	Min Set (0.01)
5	AL Progreso AL Progreso: 1775	0.01	3.7893	12.81	Min Set (0.01)
6	AL Progreso AL Progreso: 1725	0.01	3.3159	11.44	Min Set (0.01)
7	AL Progreso AL Progreso: 1225	0.01	1.8813	4.429	Min Set (0.01)
8	AL Progreso AL Progreso: 1200	0.01	3.4067	12.15	Min Set (0.01)
9	AL Progreso AL Progreso: 800	0.01	12.4	65.24	Min Set (0.01)
10	AL Progreso AL Progreso: 150	0.01	2.8894	13.79	Min Set (0.01)
11	AL Progreso AL Progreso: 125	0.01	15.3	82.68	Min Set (0.01)
12	AL Progreso AL Progreso: 25	0.001	0.5	0.4851	Min Set (0.001)
13	AL Progreso AL Progreso: 0	0.01	0.6	21.36	Min Set (0.01)

Clipboard Print ... File ... Close

Fuente: Estudio

Ilustración 55. Información Hidrológica de Entrada

Unsteady Flow Data - Unsteady\_Data\_TR2

File Options Help

Boundary Conditions | Initial Conditions | Apply Data

Boundary Condition Types

Stage Hydrograph	Flow Hydrograph	Stage/Flow Hydr.	Rating Curve
Normal Depth	Lateral Inflow Hydr.	Uniform Lateral Inflow	Groundwater Interflow
T,S. Gate Openings	Elev Controlled Gates	Navigation Dams	IB Stage/Flow
Rules	Precipitation		

Add Boundary Condition Location

Add RS ... Add SA/2D Flow Area ... Add SA Connection ... Add Pump Station ...

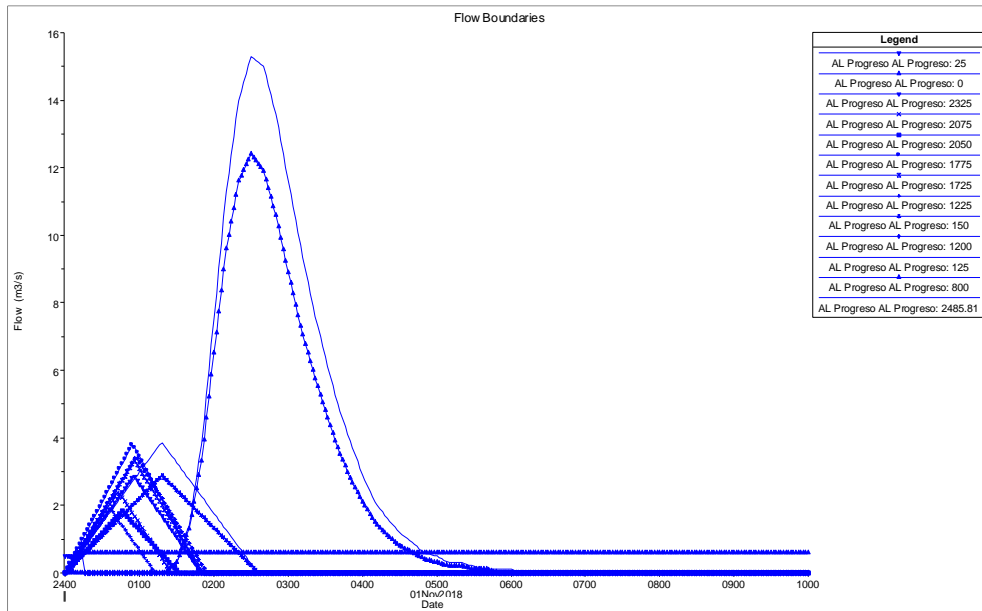
Select Location in table then select Boundary Condition Type

River	Reach	RS	Boundary Condition	
1	AL Progreso	AL Progreso	2485.81	Flow Hydrograph
2	AL Progreso	AL Progreso	2325	Lateral Inflow Hydr.
3	AL Progreso	AL Progreso	2075	Lateral Inflow Hydr.
4	AL Progreso	AL Progreso	2050	Lateral Inflow Hydr.
5	AL Progreso	AL Progreso	1775	Lateral Inflow Hydr.
6	AL Progreso	AL Progreso	1725	Lateral Inflow Hydr.
7	AL Progreso	AL Progreso	1225	Lateral Inflow Hydr.
8	AL Progreso	AL Progreso	1200	Lateral Inflow Hydr.
9	AL Progreso	AL Progreso	800	Lateral Inflow Hydr.
10	AL Progreso	AL Progreso	150	Lateral Inflow Hydr.
11	AL Progreso	AL Progreso	125	Lateral Inflow Hydr.
12	AL Progreso	AL Progreso	0	Flow Hydrograph

Fuente: Estudio



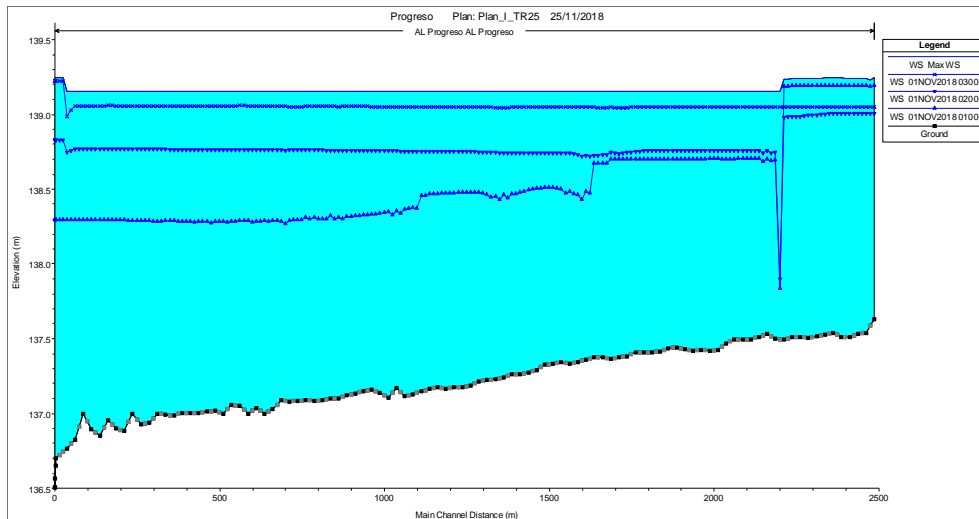
Ilustración 56. Información Hidrológica de Entrada – Hidrogramas



Fuente: Estudio

### 6.3.5. Perfil de Flujo Máximo Para Periodo de Retorno de 25 Años

Ilustración 57. Perfil de Flujo Modelación No Permanente – TR: 25 años

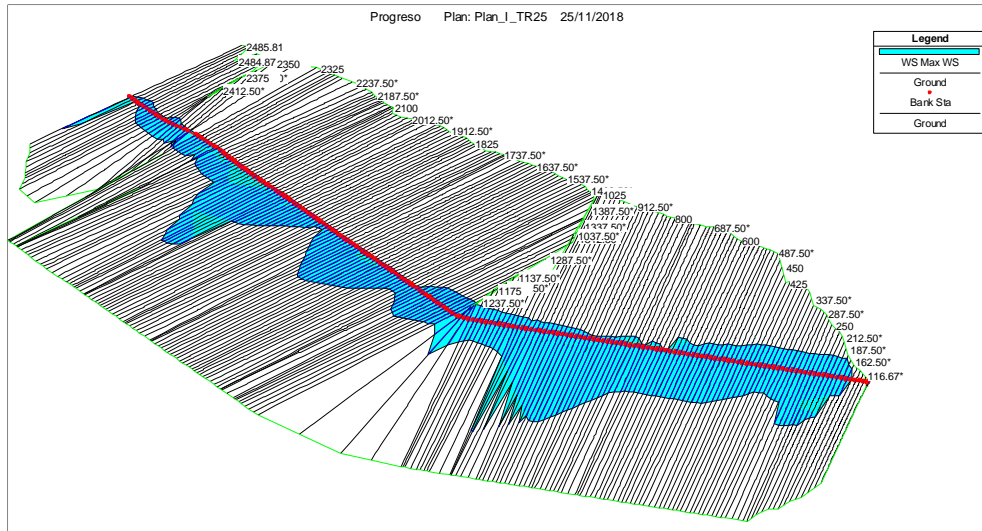


Fuente: Estudio

### 6.3.6. Área de Inundación Para Periodo de Retorno de 25 Años

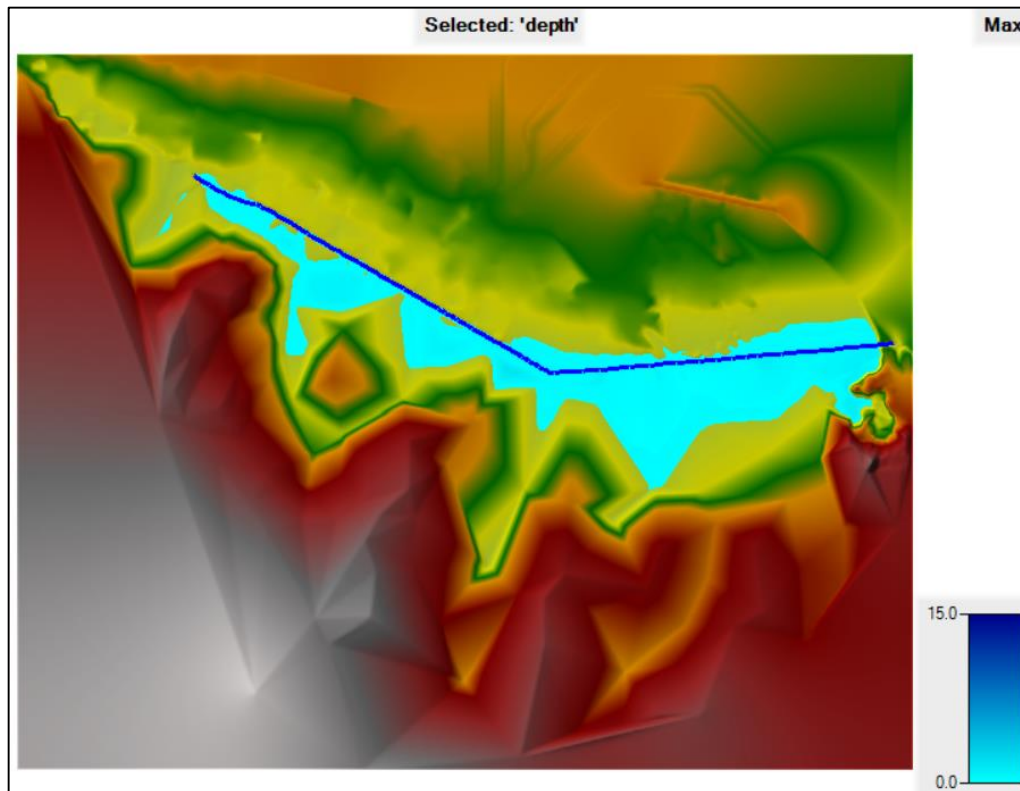
A continuación, se presentan los resultados del área de inundación de la modelación realizada con flujo permanente para un periodo de retorno de 25 años.

Ilustración 58. Esquema 3D Modelación No Permanente – TR: 25 años, Lamina Máxima



Fuente: Estudio

Ilustración 59. Mapa Inundación Modelación No Permanente – TR: 25 años, Lamina Máxima



Fuente: Estudio

Para este caso, igualmente en los resultados de la modelación de flujo no permanente, se presentaron varios avisos de alerta del programa, e igualmente se identificó un error en el cálculo interno del programa debido a la condición de frontera aguas abajo la cual limita la salida de caudal a  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , encontrándose que, en el desarrollo de iteraciones el programa asume caudales negativos para cumplir con dicha condición de frontera, lo que no permite tener confiabilidad en el modelo.

## 6.4. CONCLUSIONES DE LA MODELACIÓN

Dado que el Canal El Progreso entrega sus aguas a unas compuertas localizadas después del box culvert que se ubica en la ruta de Sol, las cuales actúan como sección de control del canal y en temporada invernal se cierran a fin de evita que las aguas del rio Magdalena ingresen al canal.

Cuando las compuertas se cierran, dos tornillos helicoidales bombean el agua al otro lado de la estructura. Sin embargo, los tornillos helicoidales tienen una capacidad de bombeo muy baja (560l/s), frente al caudal que es aportado por la cuenca alta de la estructura, generando consecuentemente inundaciones que afectan la población aferente.

Teniendo en cuenta la caracterización hidrológica y la modelación hidráulica realizada del Canal El Progreso, se observa que el sistema de bombeo existente, no tiene la capacidad hidráulica suficiente para extraer el caudal aportado por un evento con periodo de retorno de más de 2 años. Por esta razón dentro de las alternativas para la mitigación del área de inundación y en especial la afectación al área urbana del municipio, se debe proponer una estructura de contención de agua y la optimización del sistema de bombeo, con el fin de evitar que las inundaciones afecten la población aferente.

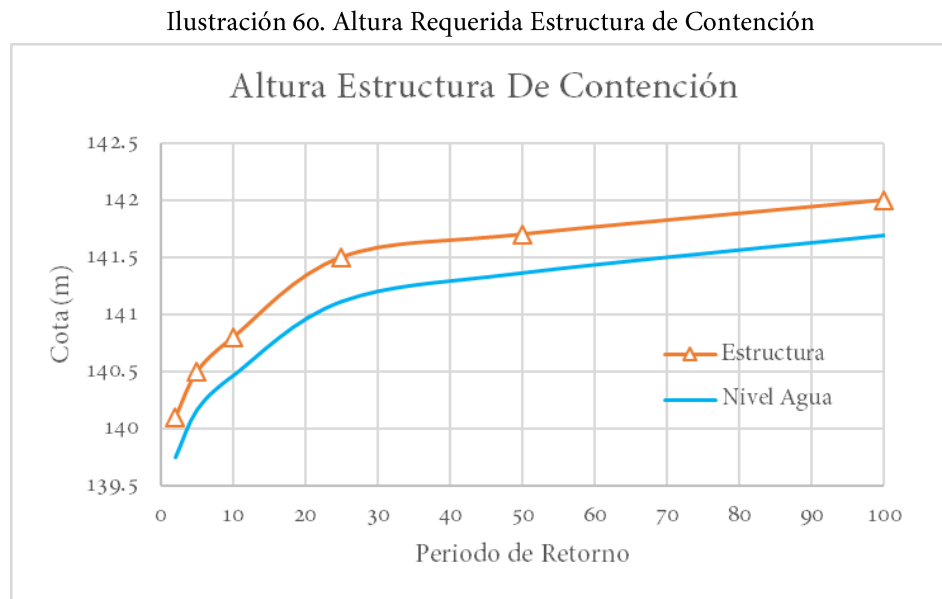
## 7. PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LA MITIGACIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN DEL CANAL

Teniendo en cuenta la caracterización hidrológica y la modelación hidráulica realizada del Canal El Progreso, se observa que el sistema de bombeo existente, no tiene la capacidad hidráulica suficiente para extraer el caudal aportado por un evento con periodo de retorno de más de 2 años. Por esta razón dentro de las alternativas para la mitigación del área de inundación y en especial la afectación al área urbana del municipio, se propone una estructura de contención de agua y la optimización del sistema de bombeo, con el fin de evitar que las inundaciones afecten la población aferente.

### 7.1. PLANTEAMIENTO ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

Para evaluar y seleccionar la estructura de contención más adecuada para atender el problema actual que afecta la población del municipio, se procedió inicialmente a analizar la posible altura de la estructura en función del periodo de retorno de diseño.

A continuación, se presenta una gráfica que representa el nivel máximo de la lámina de agua y la altura de la estructura de contención, contemplando un borde libre de alrededor de treinta y cinco centímetros, en función del periodo de retorno.



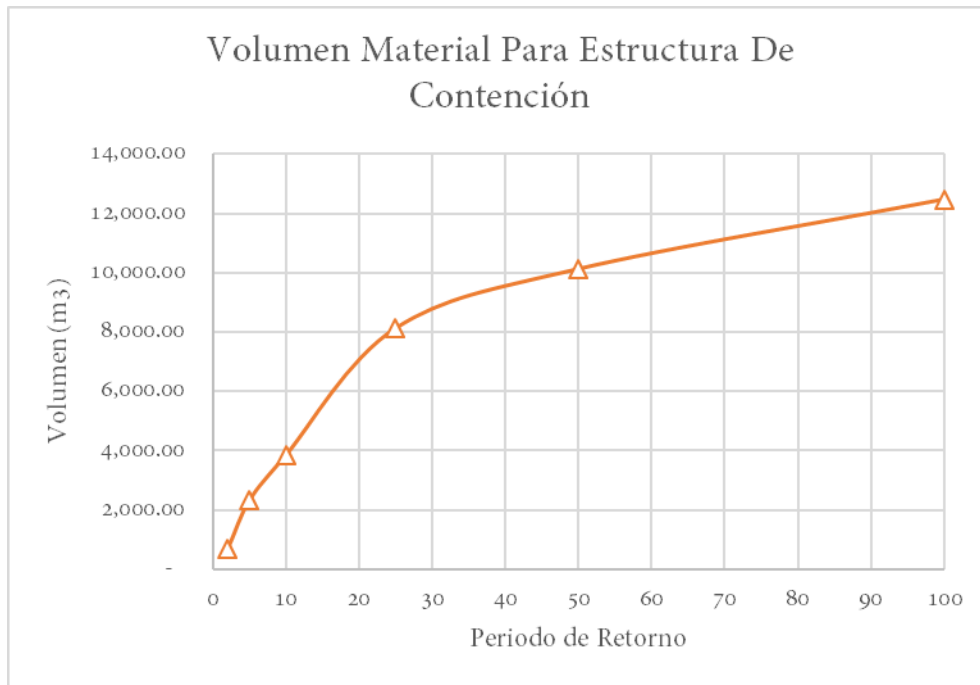
Fuente: Estudio

En la gráfica podemos apreciar que, el incremento de la lámina de agua y consecuentemente de la estructura de contención, presenta una variación considerable para las lluvias de diseño hasta de 25 años de periodo de retorno, y por el contrario, de los 25 años en adelante, la variación de la cota de inundación con respecto al periodo de diseño no resulta tan significativo.

Para realizar una evaluación más detallada, se procedió a calcular la cantidad de material aproximada requerida para la construcción de una estructura de contención en material granular y materiales geo-sintéticos, y la cantidad aproximada de concreto armado requerido para la construcción de un dique en éste material. Así mismo, se estimó un costo de construcción por metro cúbico a fin de evaluar la estructura más rentable.

A continuación, se presenta una gráfica que representa el volumen de material requerido para la construcción de una estructura de contención en material granular y geo-sintéticos en función del periodo de retorno.

Ilustración 61. Volumen Material Requerido Para Estructura de Contención

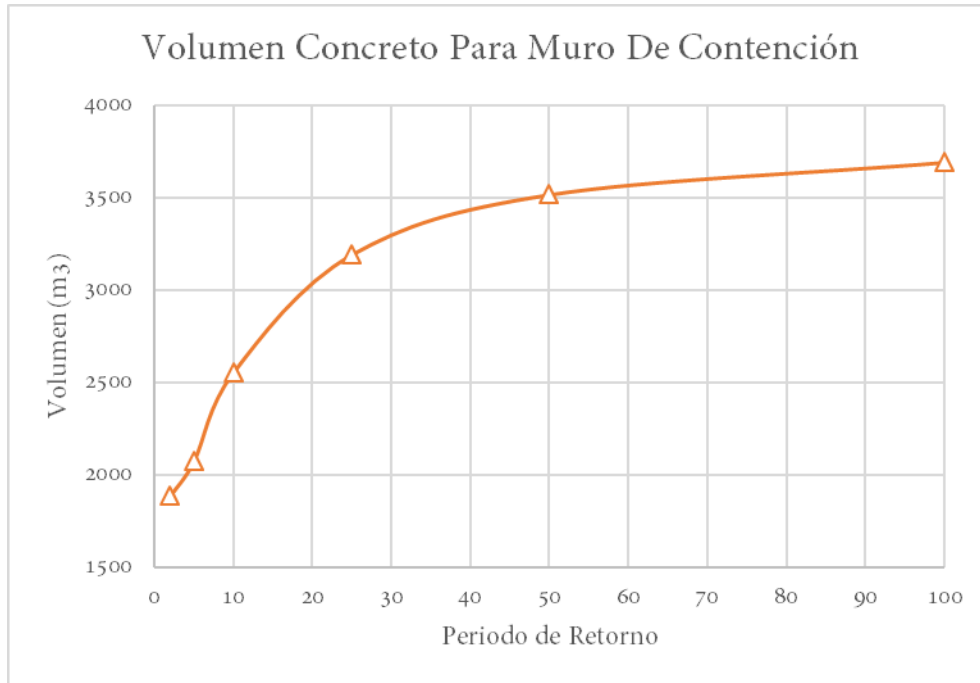


Fuente: Estudio

En ésta gráfica igualmente se aprecia que, la cantidad de material para la estructura de contención presenta una variación considerable para las lluvias de diseño hasta de 25 años de periodo de retorno, y por el contrario, de los 25 años en adelante, la variación de la cota de inundación con respecto al periodo de diseño no resulta tan significativo.

Igualmente, se presenta a continuación una gráfica que representa el volumen de concreto requerido para la construcción de una estructura concreto armado en función del periodo de retorno.

Ilustración 62. Volumen Concreto Requerido Para Estructura de Contención

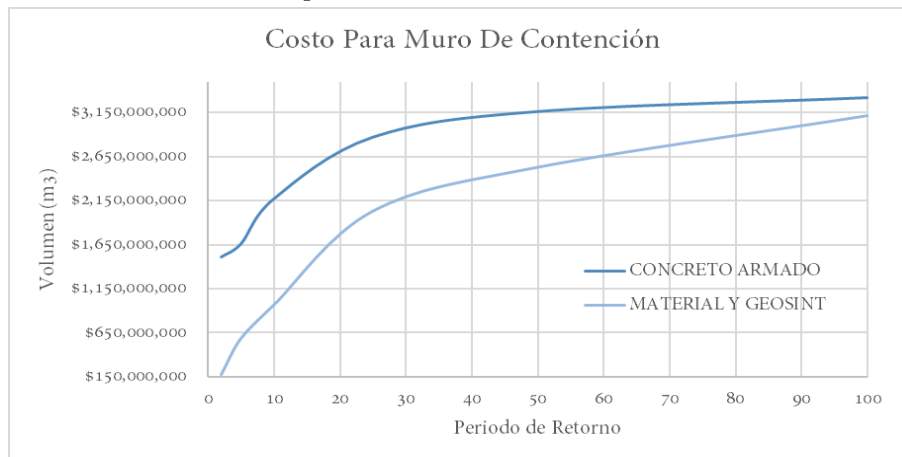


Fuente: Estudio

En ésta gráfica igualmente se aprecia que, la cantidad de concreto para la estructura de contención presenta una variación considerable para las lluvias de diseño hasta de 25 años de periodo de retorno, y por el contrario, de los 25 años en adelante, la variación de la cota de inundación con respecto al periodo de diseño no resulta tan significativo.

A continuación, se presenta una gráfica que representa los costos aproximados de la estructura de contención en los dos tipos de material evaluado en función del periodo de retorno. En la imagen, se puede apreciar que la estructura de contención en concreto armado resulta más costosa que una estructura en material de relleno y elementos geo-sintéticos, razón por la cual se selecciona ésta segunda opción.

Ilustración 63. Costo Aproximado Para Construcción Muro de Contención



Fuente: Estudio

Finalmente, se evaluó el incremento en costos de la estructura de contención con respecto al periodo de retorno de diseño, encontrando que

Tabla 47. Evaluación de variación de costos de construcción de estructura de contención

TR	Costo Aproximado	$\Delta$ Costo	$\Delta$ Costo %	Cota Estructura (m)
2 años	\$173,970,328	--	0.00%	140.1
5 años	\$586,675,453	\$412,705,125	237.2%	140.5
10 años	\$966,364,168	\$379,688,715	64.7%	140.8
25 años	\$2,031,732,969	\$1,065,368,801	110.2%	141.5
50 años	\$2,529,927,013	\$498,194,044	24.5%	141.7
100 años	\$3,115,378,711	\$585,451,699	23.1%	142

Fuente: Estudio

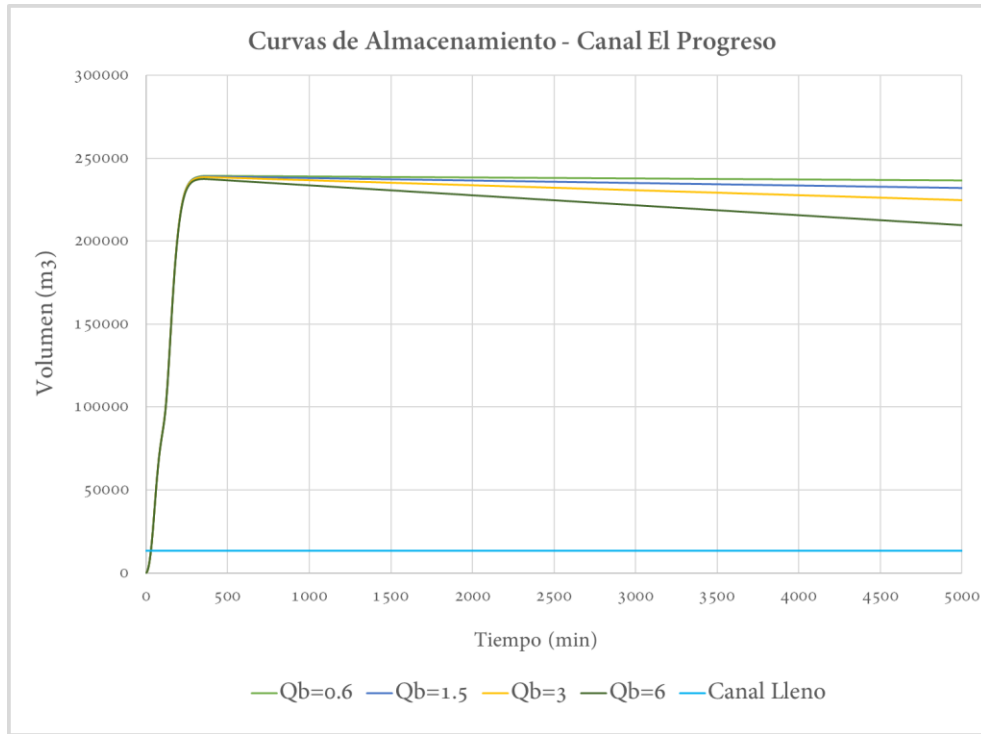
Teniendo en cuenta el incremento significativo de los costos y lo indicado en el Art. 40 de la Resolución 0330 del 08 de junio de 2017, expedida por el Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial (MAVDT), se adopta un periodo de diseño de 25 años para el dimensionamiento de la estructura de contención, el cual teniendo en cuenta el borde libre, quedaría por encima de la cota máxima de inundación para un periodo de retorno de 50 años.

## 7.2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

Para realizar la evaluación del posible mejoramiento al sistema de bombeo, para atender el problema actual que afecta la población del municipio, y teniendo en cuenta el error generado en la modelación hidráulica en flujo no permanente, se procedió a realizar los cálculos y generación de curvas de almacenamiento en el área del Canal y su área de inundación, para un periodo de retorno de 25 años, para diferentes caudales de bombeo en la salida, analizando el área del canal como un embalse, lo cual resulta muy aproximado a la realidad del problema en el momento en el cual se realiza el cierre de las compuertas.

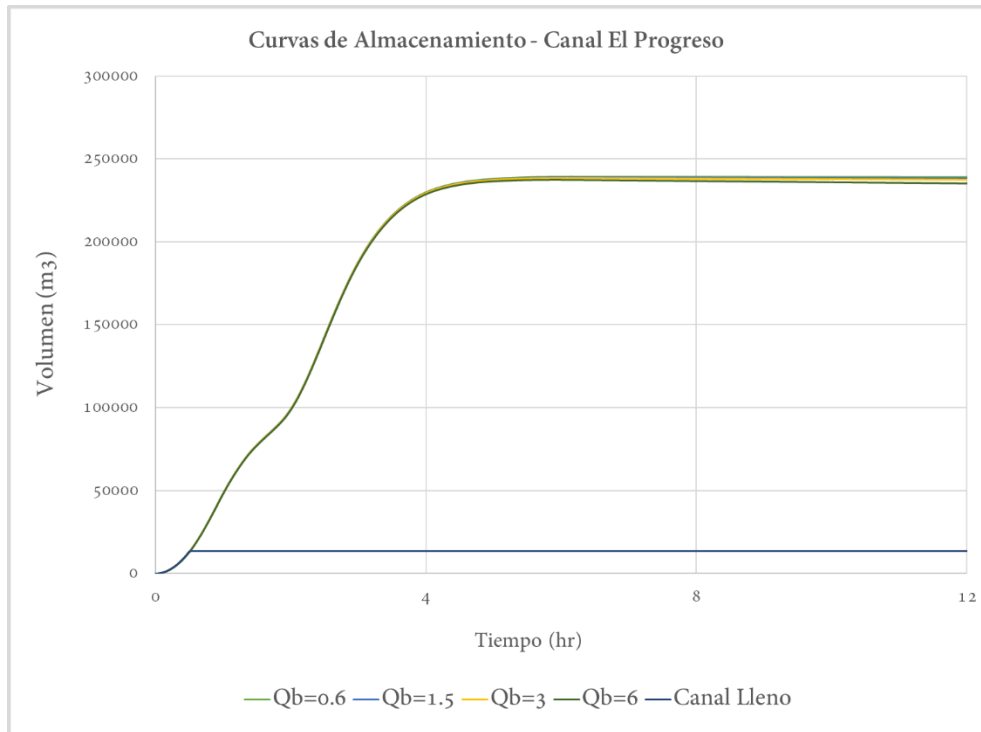
A continuación, se presenta una gráfica que representa las curvas de almacenamiento en el área del canal y su área de inundación, en función del caudal de bombeo a la salida, en el cual se evidencia que, debido al gran volumen de agua afluente, el aumento en el caudal de bombeo a la salida, no parece generar ninguna reducción significativa al volumen máximo de almacenamiento, por lo que consecuentemente, no generaría una reducción significativa a la cota máxima de inundación en el canal.

Ilustración 64. Curvas De Almacenamiento Según Caudal Salida



Fuente: Estudio

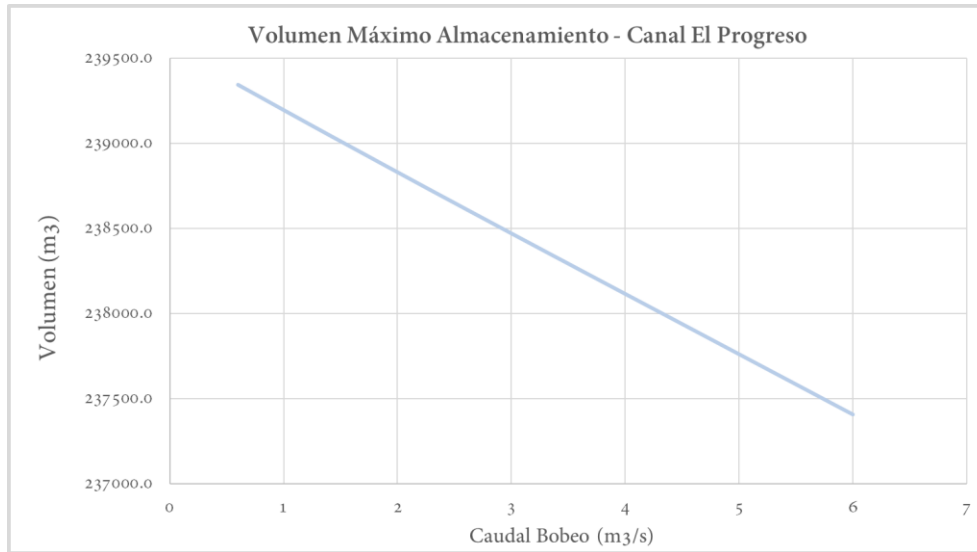
Ilustración 65. Curvas De Almacenamiento Según Caudal Salida



Fuente: Estudio



Ilustración 66. Volumen Máximo Almacenado Según Caudal Salida



Fuente: Estudio

Finalmente, se evaluó más detalladamente la reducción al volumen máximo de almacenamiento respecto al incremento del caudal de bombeo a la salida del canal, encontrándose que, si bien el aumento en el caudal de bombeo podría disminuir el tiempo de la inundación, dicho aumento, no genera una reducción significativa en el volumen de almacenamiento ni en la cota máxima de inundación en el canal. Por lo tanto, para el presente proyecto, se decide mantener el mismo sistema de bombeo existente.

Tabla 48. Evaluación de variación de volumen de almacenamiento en función del caudal de salida

Qs (m³/s)	Vol max. (m³)	$\Delta$ Vol (m³)	$\Delta$ Vol %	Cota (m)
0.6	239342.9	--	0.00%	141.11
1.5	239011.7	-331.2	-0.14%	141.11
3	238471.1	-871.8	-0.36%	141.11
6	237407.9	-1935.0	-0.81%	141.11

Fuente: Estudio

## 8. DISEÑO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA PARA LA MITIGACIÓN DEL ÁREA DE INUNDACIÓN

### 8.1. IMPLANTACIÓN, GEOMETRÍA Y PERFIL

Finalmente, se procede al diseño y modelación de la solución seleccionada, con el planteamiento de una estructura de contención en material granular y geo-sintéticos cuya cota de corona está a 141.5 m.s.n.m. A continuación, se presenta implantada la estructura de contención, la cuál tendrá una longitud de 1680 metros lineales.

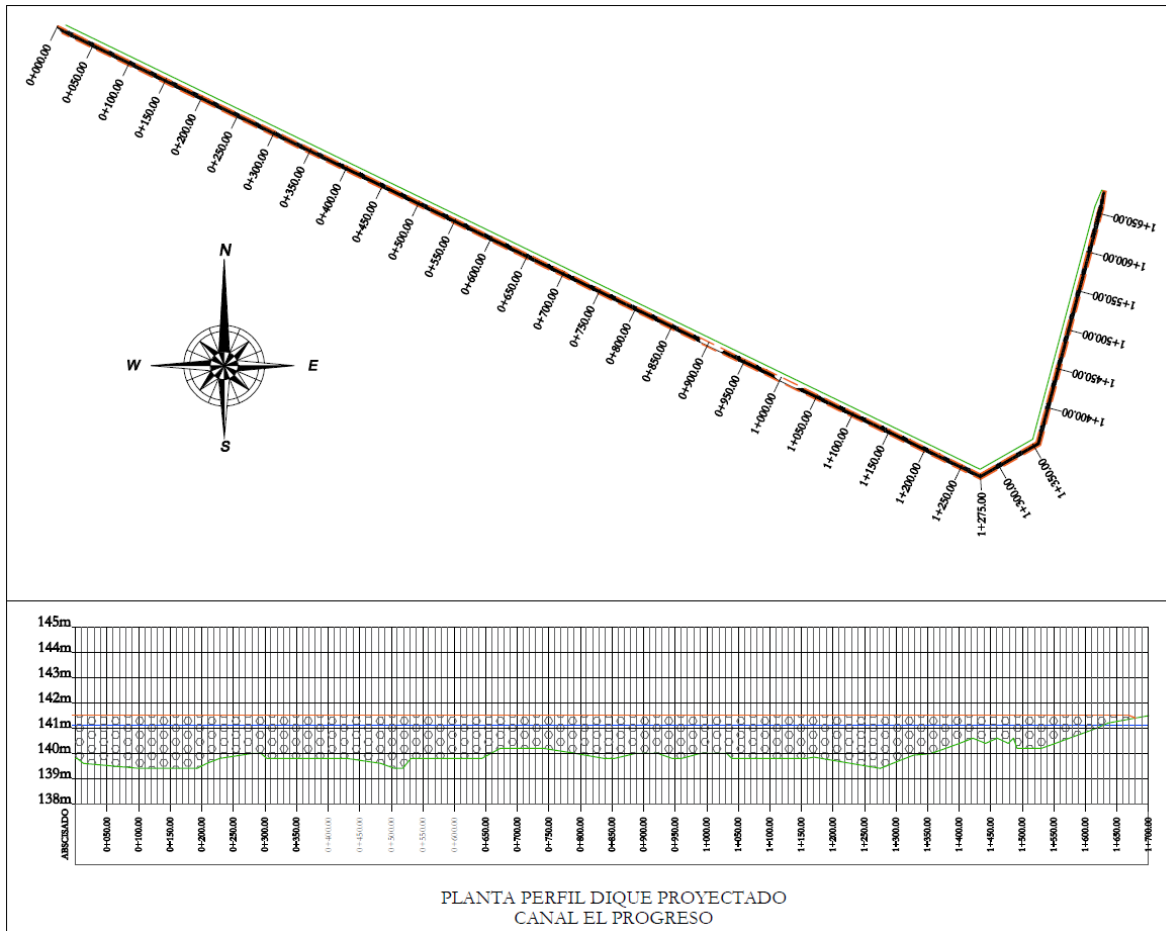
Ilustración 67. Planta de Ubicación de la Estructura de Contención



Fuente: Estudio

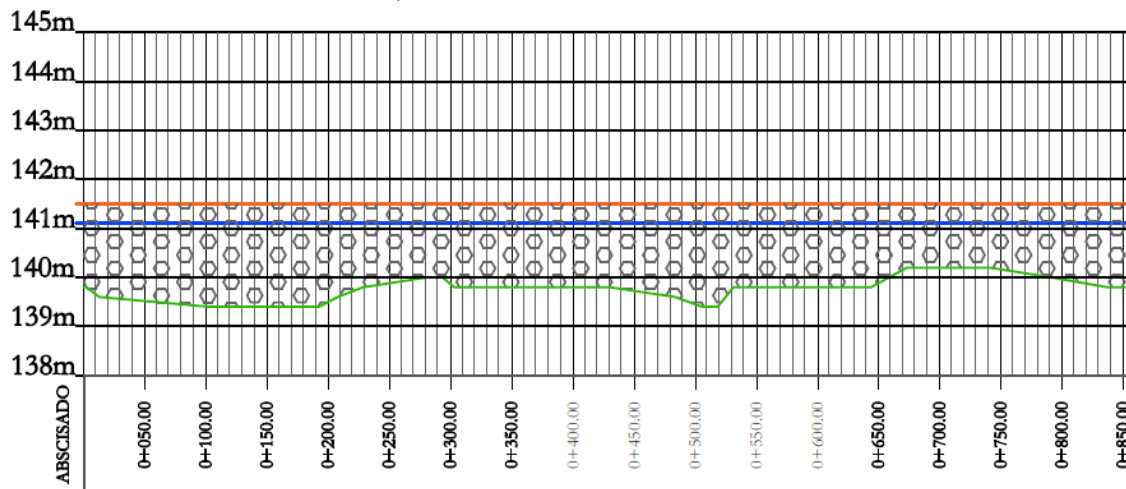
En la siguiente ilustración, se presenta el esquema planta-perfil de la estructura de contención, teniendo en cuenta la cota final de la estructura y el perfil del topográfico del terreno:

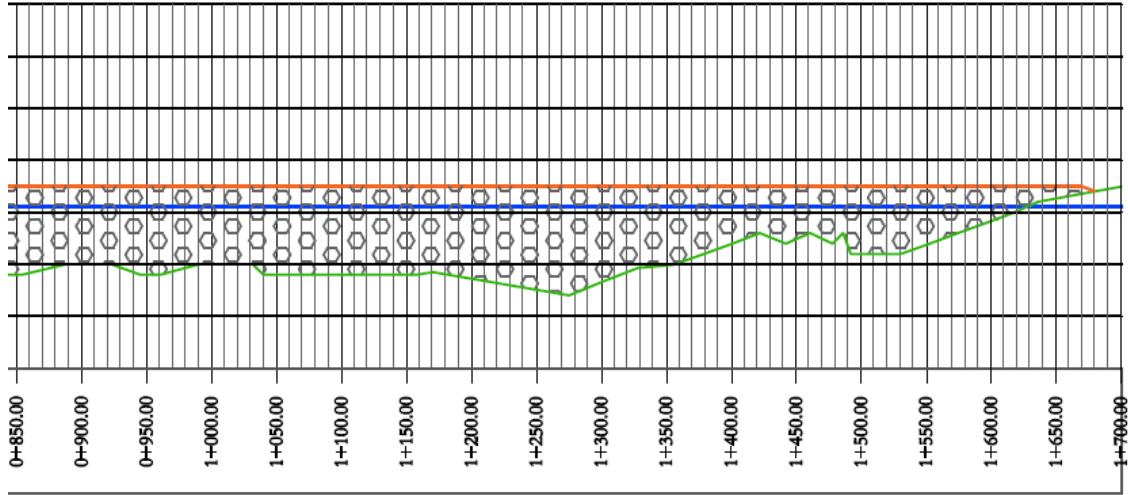
Ilustración 68. Planta - Perfil Estructura de Contención



Fuente: Estudio

Ilustración 69. Planta - Perfil Estructura de Contención

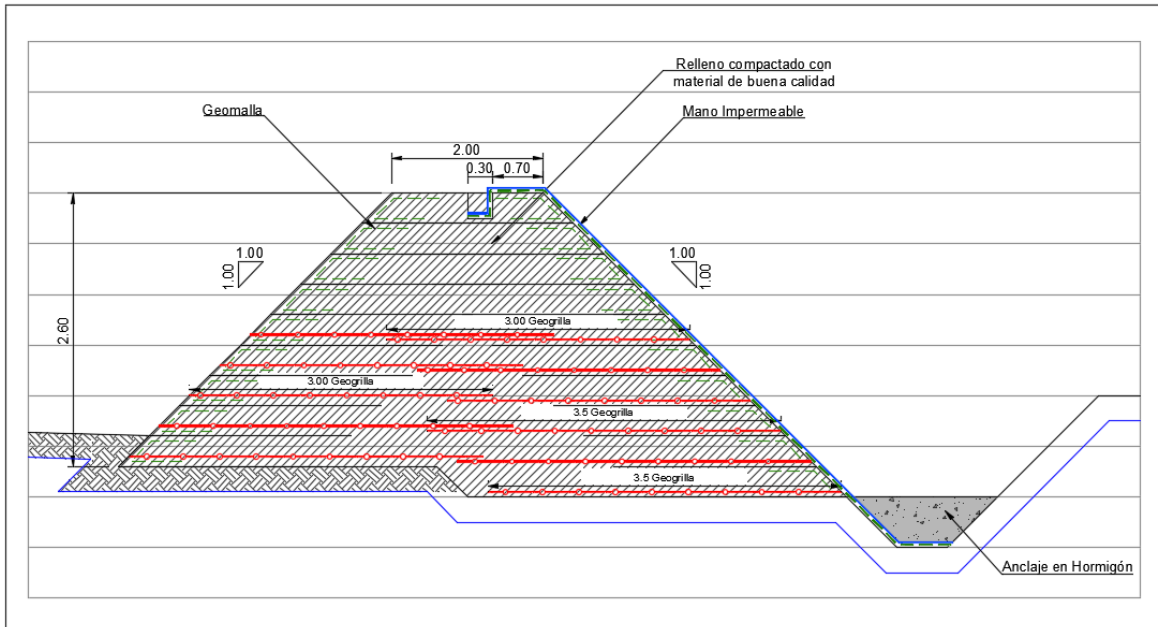




Fuente: Estudio

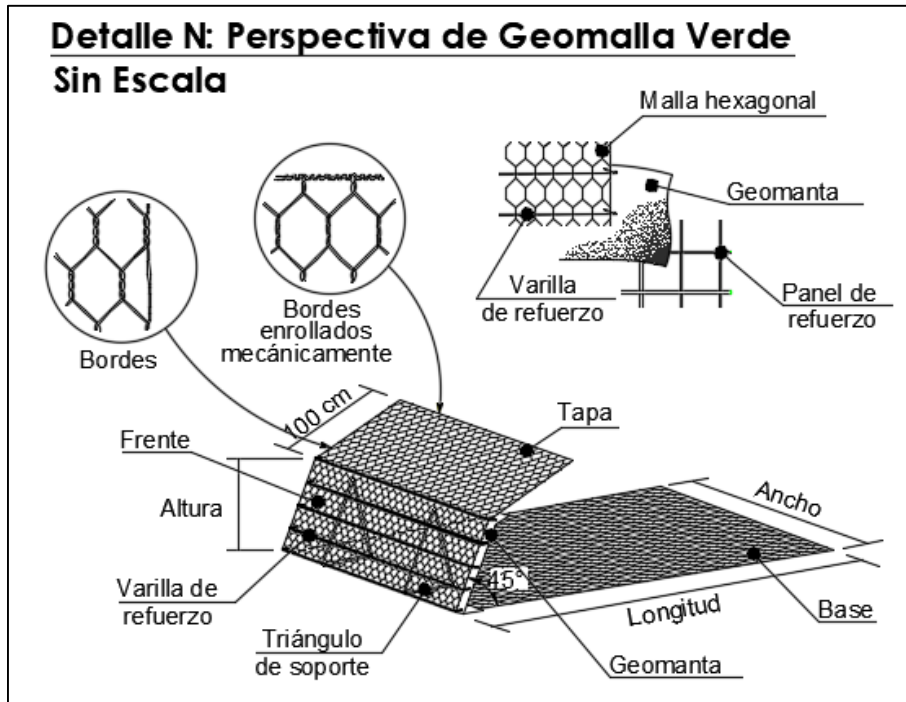
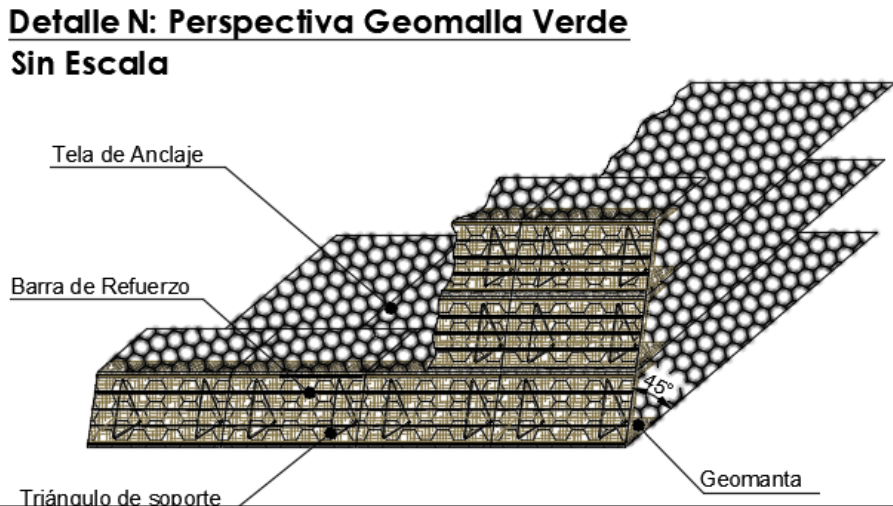
Así mismo, se presenta a continuación el esquema de la sección transversal de la estructura de contención, y los detalles generales para la construcción del mismo.

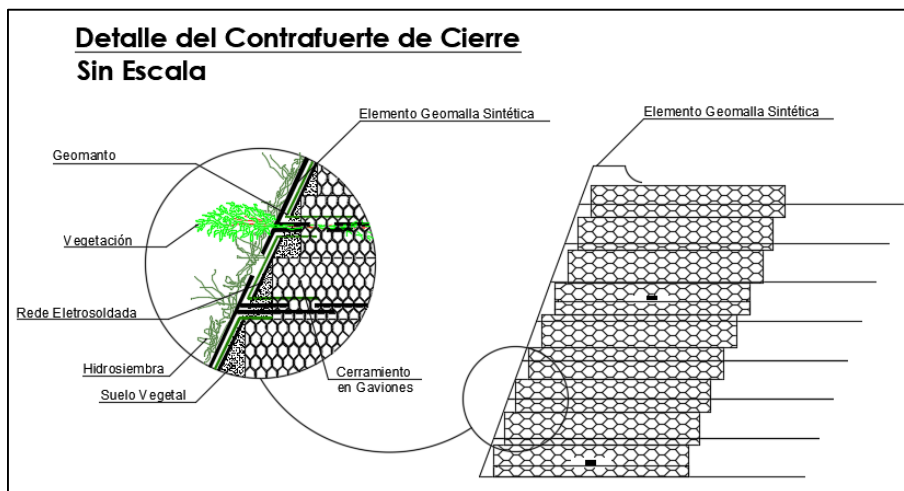
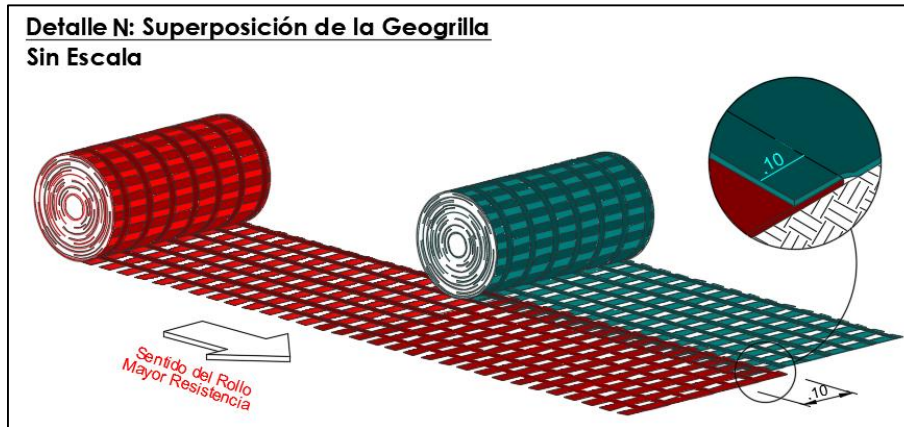
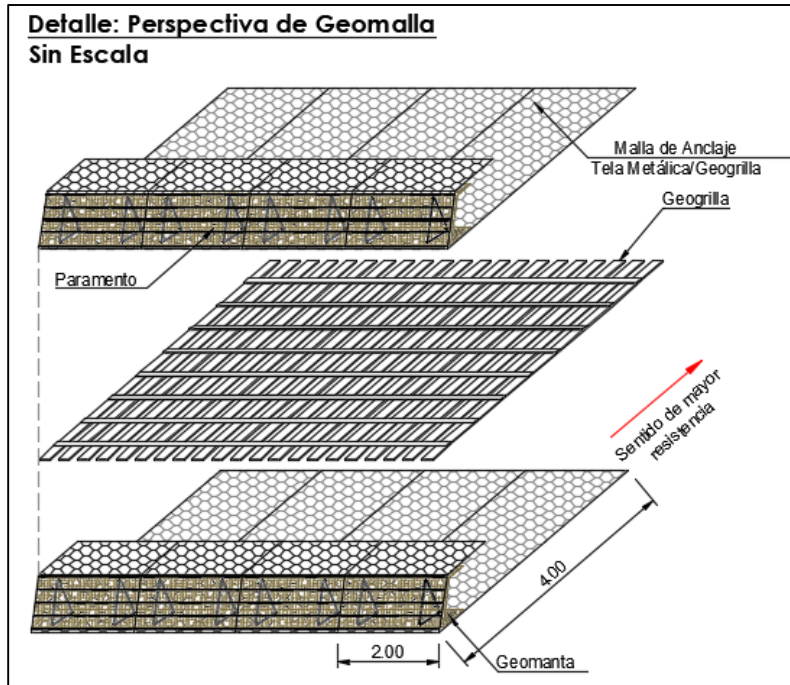
Ilustración 70. Sección transversal tipo para el muro de contención

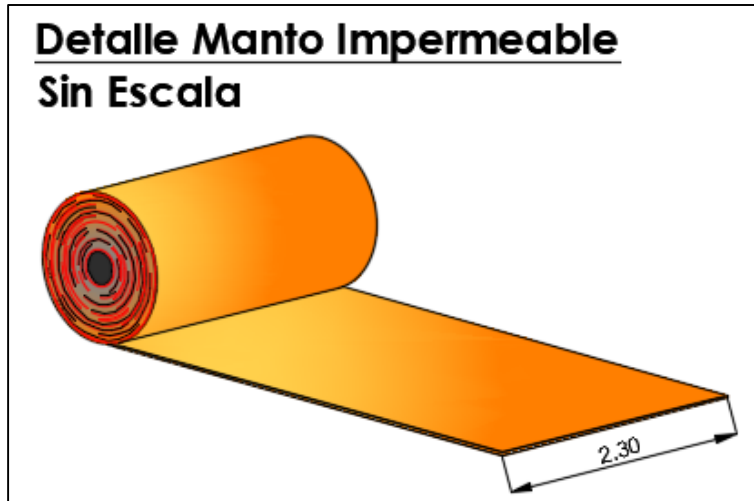


Fuente: Estudio

Ilustración 71. Detalles elementos geo-sintéticos para muro de contención





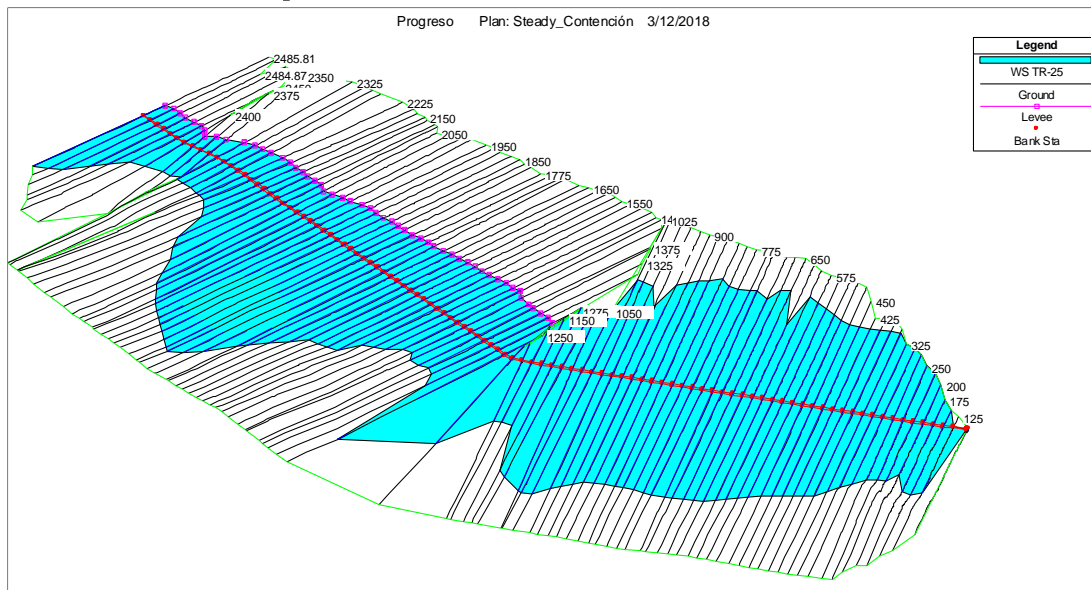


Fuente: Estudio - Grupo Industriale Maccaferri

## 8.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL CANAL CON LA ESTRUCTURA DE CONTENCIÓN

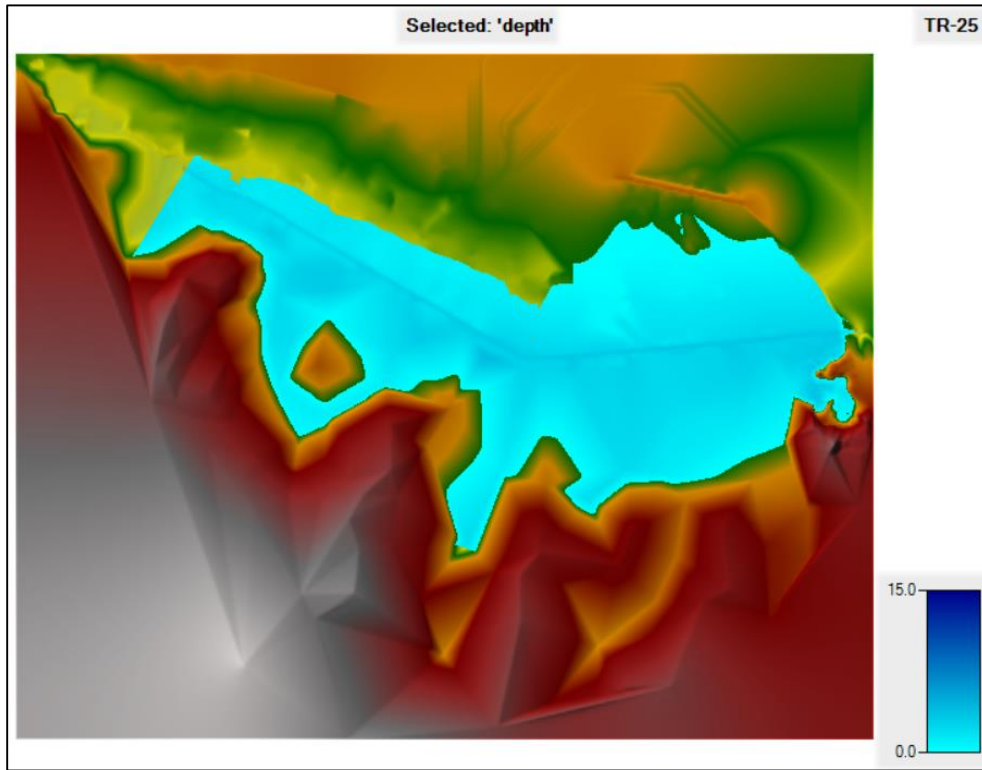
Finalmente, se procedió a realizar la modelación del canal, con el cambio en la geometría contemplando la estructura de contención para atender mitigar la inundación que afecta la población del municipio.

Ilustración 72. Esquema 3D Modelación Con Estructura de Contención- TR: 25 años



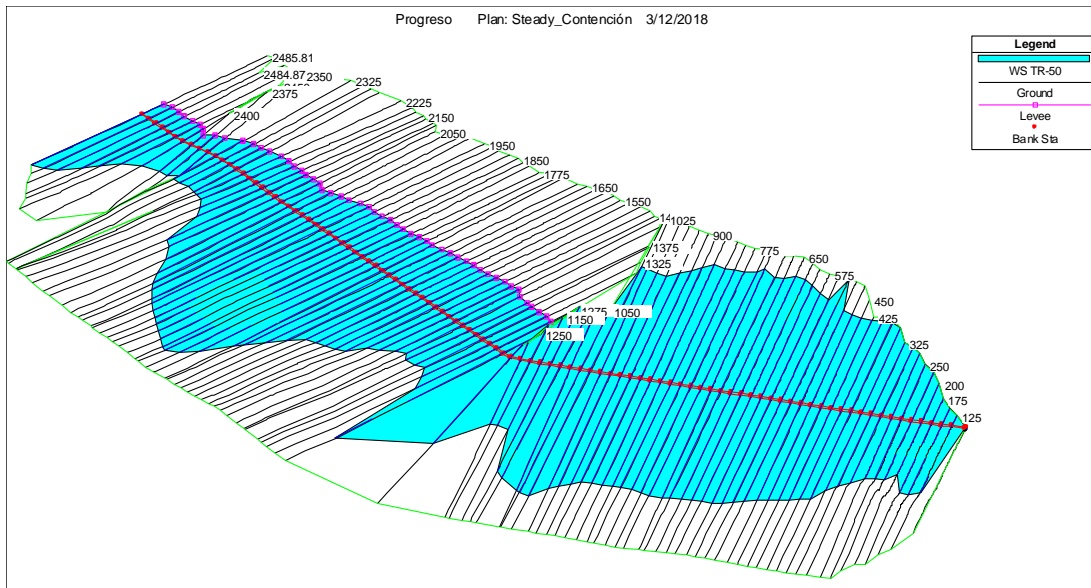
Fuente: Estudio

Ilustración 73. Mapa Inundación Modelación Con Estructura Contención – TR: 25 años



Fuente: Estudio

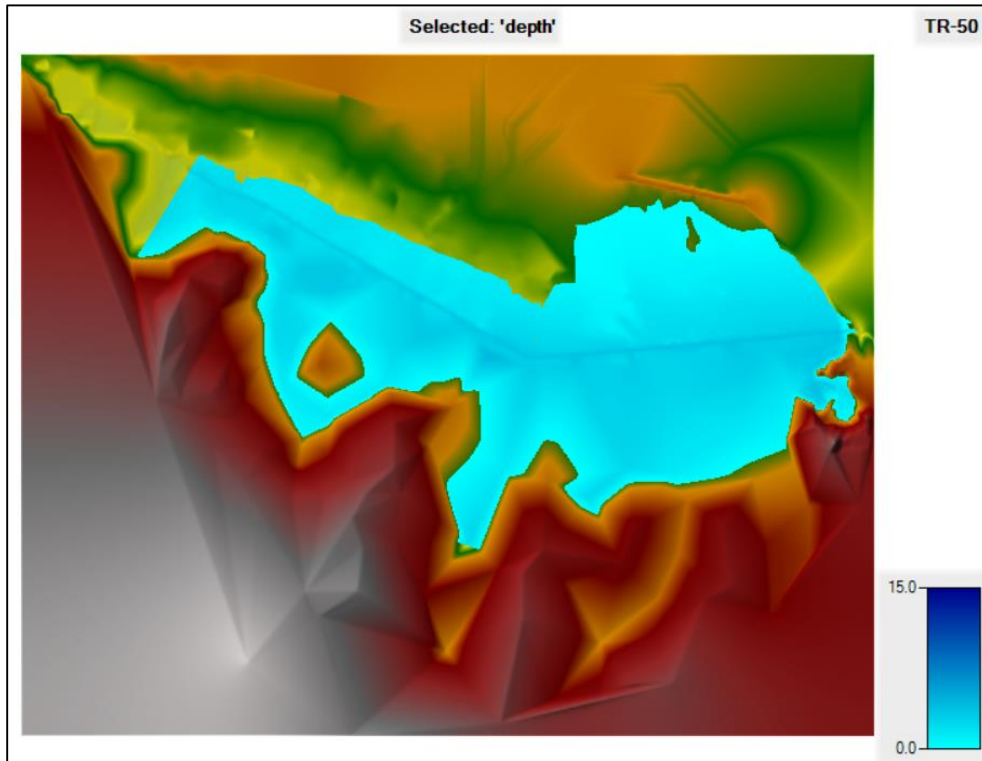
Ilustración 74. Esquema 3D Modelación Con Estructura de Contención– TR: 50 años



Fuente: Estudio

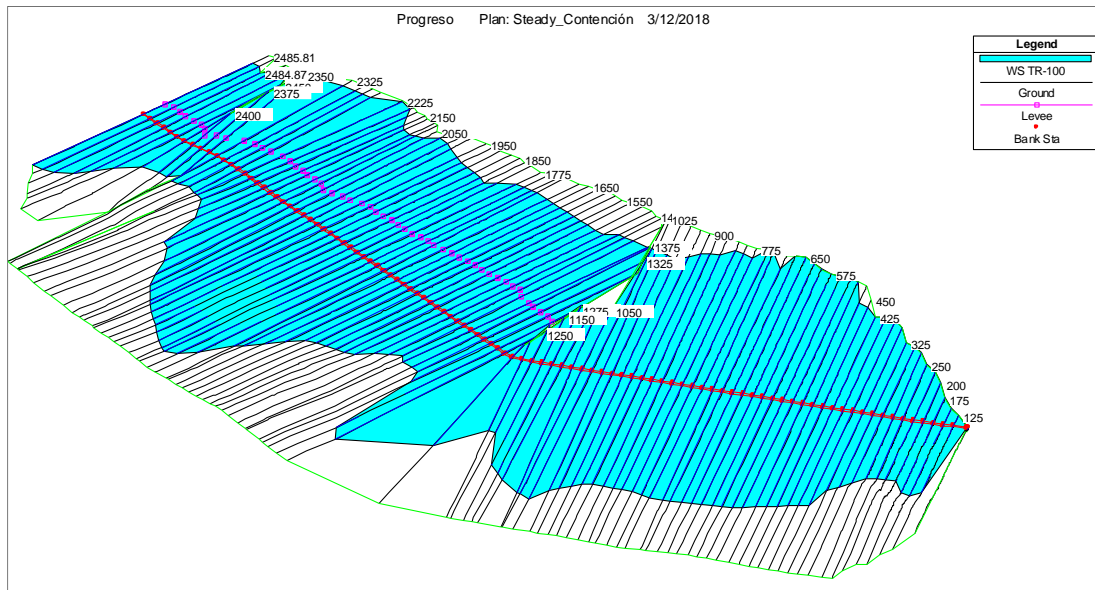


Ilustración 75. Mapa Inundación Modelación Con Estructura Contención – TR: 50 años



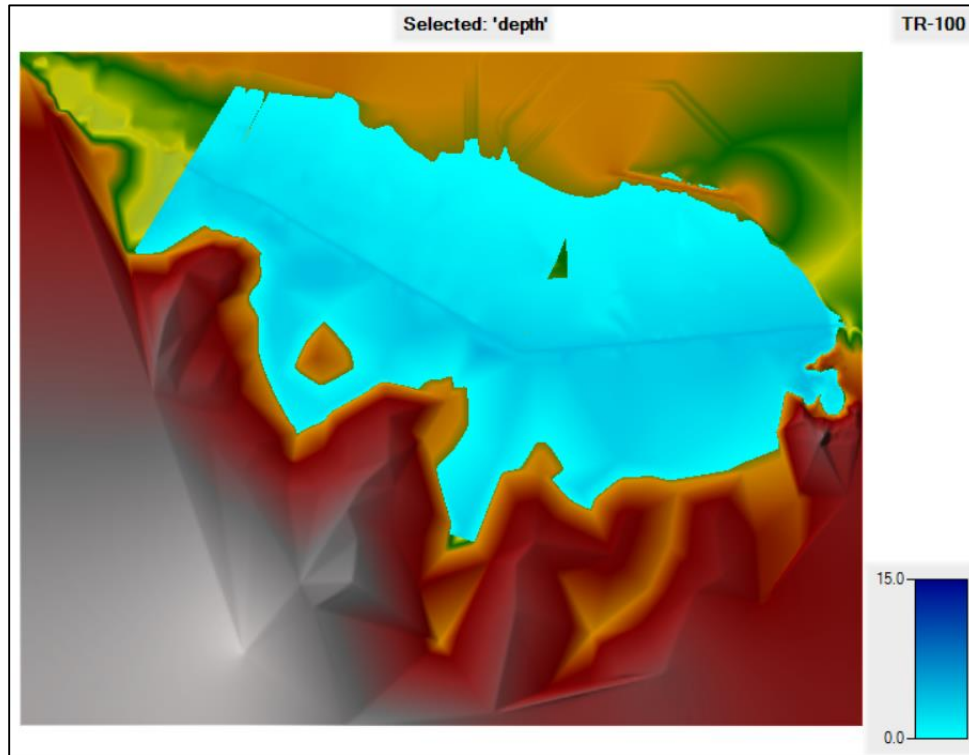
Fuente: Estudio

Ilustración 76. Esquema 3D Modelación Con Estructura de Contención– TR: 100 años



Fuente: Estudio

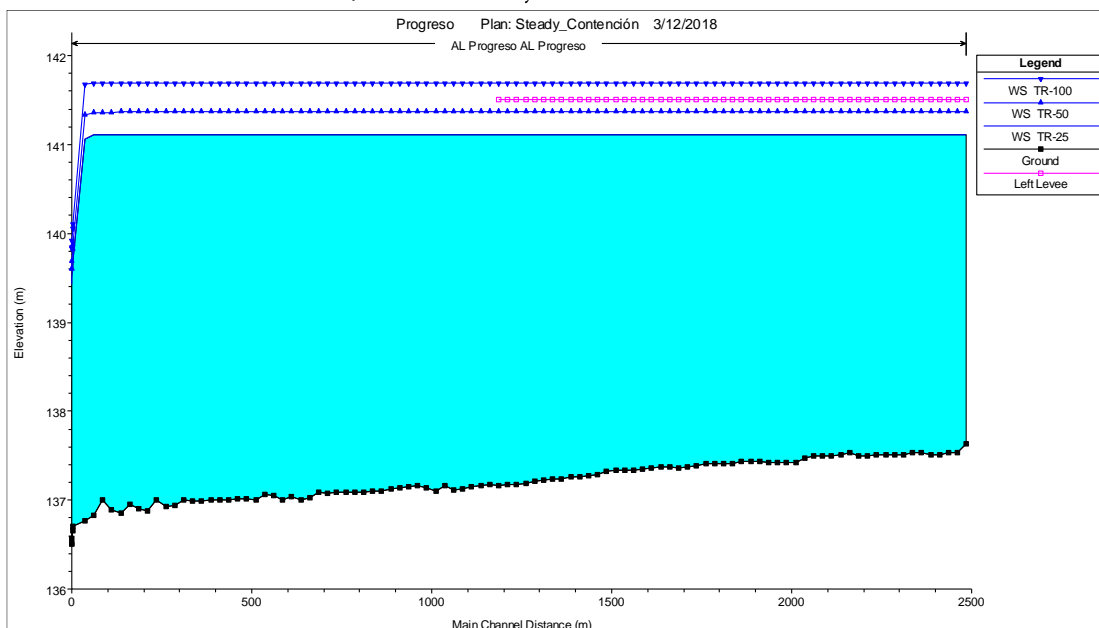
Ilustración 77. Mapa Inundación Modelación Con Estructura Contención – TR: 100 años



Fuente: Estudio

En el resultado de la modelación se puede apreciar que el planteamiento de la estructura de contención, resulta satisfactoria en la mitigación del área de inundación que afecta la población del municipio para un periodo de retorno de hasta 50 años.

Ilustración 78. Perfil de Flujo Con Estructura de Contención



Fuente: Estudio

## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se logró cumplir con el objetivo general del trabajo el cual era diseñar una solución óptima con el fin de mitigar el área de inundación del Canal El Progreso y sus consecuencias ambientales y en salubridad sobre la población del municipio de Puerto Boyacá, en el departamento de Boyacá.
- Con la información recopilada se logró realizar la caracterización física y socioeconómica del municipio de Puerto Boyacá, así como la caracterización física, climatológica e hidrológica del Canal El Progreso sus cuencas afluentes.
- Durante el desarrollo de las modelaciones hidráulicas del proyecto con flujo no permanente, se identificó un error en el cálculo interno del programa debido a la condición de frontera aguas abajo la cual limita la salida de caudal a  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , encontrándose que, en el desarrollo de iteraciones el programa asume caudales negativos para cumplir con dicha condición de frontera, lo que no permite tener confiabilidad en el modelo, razón por la cual el diseño se realizó con base en los modelos a flujo permanente.
- En la evaluación de la estructura de contención, se encontró que, la estructura de contención en concreto armado resulta más costosa que una estructura en material de relleno con elementos geo-sintéticos, razón por la cual se seleccionó ésta segunda opción.
- En la evaluación de alternativas para el mejoramiento del sistema de bombeo, se encontró que, si bien el aumento en el caudal de bombeo podría disminuir el tiempo de duración de la inundación, no se genera una reducción significativa en el volumen de almacenamiento ni en la cota máxima de inundación en el canal, debido a la gran cantidad de escorrentía afluente.
- El costo directo aproximado para la construcción de la estructura de contención en el municipio de Puerto Boyacá es de \$2,031,732,969.
- En el resultado de la modelación se puede apreciar que el planteamiento de la estructura de contención, resulta satisfactoria en la mitigación del área de inundación que afecta la población del municipio para un periodo de retorno de hasta 50 años.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PBOT. (2011). Plan Básico De Ordenamiento Territorial. Puerto Boyaca.

Monsalve G., "Hidrología en la Ingeniería", Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, Santafé de Bogotá D.C., julio de 1995.

Ponce Victor M. "Engineering Hydrology, Principles and Practices", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1989.

Hjelmfelt, Jr. A., Cassidy, J. J., "Hydrology for Engineers and Planners", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1976.

Chow, Ven Te., "Handbook of Applied Hydrology", McGraw Hill Book Company, 1984.

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., "Applied Hydrology", McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, New York, U.S.A., 1988.

Instituto Nacional de Vías, INVIAS, "Manual de Drenaje para Carreteras", Ministerio de Transporte, Subdirección de Apoyo Técnico, Bogotá D.C., 2009.

U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Generalized Computer Program, "HEC-HMS, Hydrologic Modelling Center", September 2014, Version: 4.2.1, Copyright 2017 Haestad Methods, Inc.

U. S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Generalized Computer Program, Haestad Methods, "HEC – RAS for Windows River Analysis System", Hydraulic Reference Manual, 95 NT 98.