

**Modelación hidráulica del río Chicamocha y del drenaje subfluvial de Puente la Balsa
del municipio de Duitama con la inclusión de culverts**

**John Jairo Monroy Sanabria
Cristhian Andrés Sarmiento Cifuentes**

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Tunja
2023**

**Modelación hidráulica del río Chicamocha y del drenaje subfluvial de Puente la Balsa
del municipio de Duitama con la inclusión de culverts**

**John Jairo Monroy Sanabria
Cristhian Andrés Sarmiento Cifuentes**

**Trabajo de grado para optar el título de:
Ingeniero Ambiental**

**Director:
Ingeniero Diego Camilo Guio Sandoval
Msc. Ingeniería Civil Con Énfasis En Hidroambiente**

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Programa de Ingeniería Ambiental
Tunja
2023**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 28 de octubre del 2022

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual

Dedico el desarrollo de mi trabajo de grado a Dios por sobre todas las cosas fortalecerme, protegerme y brindarme esta oportunidad de vida, también esta dedicatoria va para mi madre María Sanabria Camargo, la cual fue artífice de que este sueño se hiciera realidad, por acompañarme en este camino de altas y bajas.

John Monroy

Le dedico el resultado de este trabajo a mis padres, principalmente a mi madre quien gracias a su apoyo y convicción incondicional me fue posible el desarrollo de este proyecto, a mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria también A mis compañeros de estudio, a mis maestros y amigos, quienes con su ayuda y consejos me guiaron a la culminación de este proyecto.

Cristian Sarmiento

Agradecimientos

Queremos agradecer a la Universidad de Boyacá y al ingeniero Diego Camilo Guio Sandoval por brindarnos asesoría en este proceso de formación académica y por suministrarnos su sabiduría e información la cual fue de gran importancia para el éxito del proyecto

Contenido

	Pág.
Introducción.....	16
Definición del problema.....	17
Planteamiento del problema	17
Formulaciones del problema	17
Sistematización del problema.....	18
Objetivos.....	19
Objetivo general	19
Objetivos específicos.....	19
Área de influencia.....	19
Metodología.....	19
Revisión bibliográfica	19
Compilación de información:	19
Ajuste de caudales	20
Modelo de elevación.....	20
Modelo de ejecución:.....	20
Determinación de caudales.....	21
Calibración del modelo.....	21
Visualización de resultados	21
Alternativa de gestión.....	21
Determinación de caudales críticos	21
Estación limnométrica San Rafael.....	22
Caudales mínimos	22
Caudales máximos.....	22
Periodos de retorno.....	25

Histograma	26
Condiciones de entrada.....	27
Topografía	27
Datos de entrada	28
Salto hidráulico río Chicamocha	29
Usos de suelo	30
Geometría Hec-Ras (culverts)	31
Culverts (intersección).....	32
Modelo hidráulico del software Hec-Ras en el río Chicamocha adicionando toda la infraestructura del culvert.....	38
Calibración	38
Cálculo de la raíz media del error (RSME)	39
Río Chicamocha	41
Periodo de retorno de 50 años	41
Periodo de retorno de 100 años	44
Periodo de retorno 200 años	45
Periodo de retorno 500 años	47
Modelo hidráulico del drenaje subfluvial adicionando toda la infraestructura del culvert de la intersección.....	51
Drenaje subfluvial. culverts (intersección).....	51
Periodo de retorno de 2 años	51
Periodo de retorno 5 años	53
Periodo de retorno 10 años	55
Periodo de retorno 25 años	57
Periodo de retorno de 50 años	58
Periodo de retorno de 100 años	60

Conclusiones.....	63
Recomendaciones	64
Bibliografía.....	65
Anexos	67

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Distribuciones de frecuencia de probabilidades.....	22
Figura 2. Test de Kolmogórov-Smirnov.....	25
Figura 3. Histograma de Frecuencias de Caudales.....	27
Figura 4. Elevación Topografía de zona de estudio	28
Figura 5. Ajuste de Condiciones del Río Chicamocha y Drenaje Subfluvial.....	28
Figura 6. Salto Hidráulico	29
Figura 7. Culvert del drenaje subfluvial	30
Figura 8. Culverts intersección con el Río Chicamocha	32
Figura 9. Proyección de Culvert 1 entre Secciones	33
Figura 10. Proyección de Culvert 2 entre Secciones	34
Figura 11. Proyección estructura por debajo del río Chicamocha.....	35
Figura 12. Acotamiento De Culverts.....	35
Figura 13. Obstrucción de la obra hidráulica dentro del cauce del río Chicamocha.....	36
Figura 14. Proyección obstrucción del drenaje dentro del río Chicamocha.....	37
Figura 15. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 50 años, Río Chicamocha	41
Figura 16. Secciones transversales periodo de retorno de 50 años	42
Figura 17. Perfil de velocidad de flujo para el periodo de retorno de 50 años.....	43
Figura 18. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 100 años, Río Chicamocha	44
Figura 19. Secciones transversales periodo de retorno de 100 años	44
Figura 20. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 200 años, Río Chicamocha	46
Figura 21. Secciones transversales periodo de retorno de 200 años	46
Figura 22. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 500 años, Río Chicamocha	48
Figura 23. Secciones transversales periodo de retorno de 500 años	48
Figura 24. Perfil de velocidad de flujo para un periodo de retorno de 500 años.....	50
Figura 25. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 2 años, drenaje subfluvial	51
Figura 26. Secciones transversales periodo de retorno de 2 años	52
Figura 27. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 5 años, drenaje subfluvial	53
Figura 28. Secciones transversales periodo de retorno de 5 años	53

Figura 29. Perfil de velocidades periodo de retorno 5 años 55

Figura 30. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 10 años 55

Figura 31. Secciones transversales periodo de retorno de 10 años 56

Figura 32. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 25 años, drenaje subfluvial 57

Figura 33. Secciones transversales periodo de retorno de 25 años 57

Figura 34. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 50 años, drenaje subfluvial 59

Figura 35. Secciones transversales periodo de retorno de 50 años 59

Figura 36. Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 100 años, drenaje subfluvial 61

Figura 37. Secciones transversales periodo de retorno de 100 años 61

Figura 38. Perfil de velocidades de flujo para periodo de retorno 100 años 62

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Ajuste de probabilidades	24
Tabla 2. Periodos de retorno, río Chimcamocha	25
Tabla 3. Periodos de retorno, drenaje subfluvial	26
Tabla 4. Coeficiente de Maninng Hec-Ras.....	31
Tabla 5. Datos para calibracion	38
Tabla 6. Evaluacion de altura del modelo RSME	40
Tabla 7. Evaluacion de velocidad del modelo RSME.....	40

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto	68
Anexo B. Datos Estaciones Limnimetrica.....	107
Anexo C. Datos Medidos y Prueba RSME95	108

Resumen

Modelación hidráulica del río Chicamocha y del drenaje subfluvial de Puente la Balsa del municipio de Duitama con la inclusión de culverts.

Este estudio presenta los resultados obtenidos de una modelación hidrodinámica de la intersección del río Chicamocha y sistema de drenaje-sub-fluvial en el sector de Puente la Balsa del municipio de Duitama-Boyacá, esta evaluación se hizo adicionando las obras civiles que podemos encontrar dentro del cauce del drenaje y se tuvo en cuenta la estimación de caudales críticos.

El objetivo de la investigación es evaluar hidráulicamente el río Chicamocha incluyendo el drenaje subfluvial de Puente la Balsa con la adición de los culverts los cuales encontramos en la intersección entre el drenaje y el río Chicamocha con el fin de conocer que influencia tiene los culverts en los posibles escenarios de inundación en la intersección del drenaje subfluvial y el río Chicamocha

El desarrollo de esta investigación se hizo 1) Determinando los caudales en el río Chicamocha en condiciones críticas o extremas de precipitaciones (Estación de invierno) 2) Modelo matemático ejecutado con software Hec-Ras en el río Chicamocha 3) Ingresando dentro de la geometría del cauce del drenaje los culverts que se encuentran en la intersección entre el río Chicamocha y el canal del drenaje) Analizando el comportamiento del flujo en la interacción Clima-Río-infraestructura

Los resultados de la investigación muestran una importante actuación por parte de los culverts para los escenarios de inundación, también en riesgo de colapso de la estructura, además que el drenaje subfluvial y su estructura repercute y afecta las condiciones hidrodinámicas del río incrementando posibles escenarios críticos

Palabras claves: Modelación, Infraestructura, Unidimensional, Calibración, Culverts

Abstract

Hydraulic modeling of the Chicamocha river and the Puente la Balsa's subpluvial drainage in the municipality of Duitama with the addition of culverts.

The results of the investigation show an important performance by the culverts for the flood scenarios, also at risk of collapse of the structure, in addition to the fact that the subpluvial drainage and its structure have repercussions and affect the hydrodynamic conditions of the river, increasing possible critical scenarios.

The objective of the research is to hydraulically evaluate the Chicamocha river including the subpluvial drainage of Puente la Balsa with the addition of the culverts which we find at the intersection between the drainage and the Chicamocha river in order to know what influence the culverts have on the rivers. possible flood scenarios at the intersection of the subpluvial drainage and the Chicamocha river

The development of this research was done 1) Determining the flows in the Chicamocha river in critical or extreme rainfall conditions (winter season) 2) Mathematical model executed with Hec-Ras software in the Chicamocha river 3) Entering within the geometry of the drainage channel the culverts that are found at the intersection between the Chicamocha river and the drainage channel) Analyzing the behavior of the flow in the interaction Climate-River-infrastructure

The results of the investigation show an important performance by the culverts for the flood scenarios, also at risk of collapse of the structure, in addition to the fact that the subpluvial drainage and its structure have repercussions and affect the hydrodynamic conditions of the river, increasing possible critical scenarios.

Keywords: Modeling, Infrastructure, Calibration, One-dimensional, Culverts

Introducción

Las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente (IDEAM, 2011, p. 1). El departamento de Boyacá presenta una preocupante susceptibilidad natural a los deslizamientos e inundaciones a causa de altas precipitaciones (Moreno, 2011, p. 2). Entre septiembre de 2010 y mayo de 2011 el territorio colombiano sufrió una ola invernal a causa del fenómeno de la niña y el número de emergencias se elevó a 2.219, conformadas por 1.233 inundaciones (55,6% del total de emergencias), 778 deslizamientos (35,1%), 174 vendavales y 24 avalanchas (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2012, p. 11)

En la parte sur de Duitama existía una zona de pantano que fue secada artificialmente con unos sistemas de drenaje los cuales son los famosos canales de drenaje, tienen unos pasos subfluviales que son canales utilizados para secar dicho terreno, este terreno al ser muy bajo tiene que pasar por debajo del río Chicamocha en el sector de puente la balsa en el sector de puente arepas, pasa en una obra que se conoce como el sector invertido. En el paso de los años Duitama se ha visto involucrada en escenarios de contingencia a causa de inundaciones que vienen a raíz de fenómenos de precipitaciones altas. En el año 2010 hubo más de 800 hectáreas que se inundaron, en el año 2011 hubo 1300 hectáreas y en el 2012, 300 hectáreas inundadas, también hubo afectaciones por el rompimiento de obras de protección en espacio subfluviales (Consejo Municipal de Duitama, 2017, p. 18)

El objetivo del proyecto es Evaluar hidráulicamente el río Chicamocha incluyendo la infraestructura que hay dentro del cauce en la zona de drenaje subfluvial de Duitama-Boyacá para dar una visión amplia de los posibles escenarios que podemos encontrar en eventos de altas precipitaciones y concluir sobre la interacción que hay entre el Clima-Río-Infraestructura, este proyecto se ejecutara con el programa Hec-Ras estableciendo y determinando el ajuste de datos tomados por la estación San Rafael. Luego se tomarán medidas reales de los culverts para incluirlos en la geometría del río y se definirá el modelo, una vez este definida su geometría y los datos de caudales se correrá el modelo para obtener resultados, y por último se dará un análisis de la interacción del flujo con la infraestructura en cuanto a hidrodinámica y calidad del agua

Definición del problema

Planteamiento del problema

El río Chicamocha es la cuenca más importante del departamento de Boyacá, puesto que es la fuente receptora de vertimientos y de captación para procesos productivos de muchas empresas, cultivos o personas, incluso dentro de su recorrido podemos encontrar múltiples infraestructuras como bocatomas, puentes, sistemas de bombeo, alcantarillas, entre otros. Adicionalmente en temporada de altas precipitaciones los embalses como ‘La Copa’ y ‘La Playa’ al detectar aumento en su nivel de retención de agua, vierten sus aguas en el río Chicamocha potencializando la generación de inundaciones a lo largo del recorrido del río, y es donde puede afectar infraestructuras del cauce o aledañas a este. Por lo tanto, es importante conocer la dinámica del flujo en contacto con infraestructuras.

La zona de influencia directa de donde se va a realizar el estudio presenta actividades agropecuarias y es la vía para un importante sitio turístico del departamento, en esta zona podemos encontrar la infraestructura dentro del cauce y sabemos que las estructuras y obstrucciones que están en permanente contacto con el flujo del agua, pueden presentar afectaciones tanto en el fluido (Dinámica y composición) como en la estructura (Socavación).

No se conoce el comportamiento del flujo del agua en contacto con la obra civil. Tampoco hay información de su dinámica en casos de fenómenos naturales con altas precipitaciones o en escenarios como el fenómeno de la niña que se presentan periódicamente al interior del país provocando inundaciones, dejando a su paso múltiples daños (Económicos, Ambientales) como en el año 2010-2011 y/o la presencia de ciclones tropicales, todo esto sumado a los vertimientos de los embalses. De tal manera es importante conocer la dinámica del río en este tramo para la toma de decisiones y para prevenir, mitigar o minimizar impactos ambientales, económicos o de infraestructura.

Formulaciones del problema

¿Cómo influye el culvert que hay dentro del canal Vargas en el comportamiento hidráulico del río Chicamocha?

Sistematización del problema

- ¿Cuál es el comportamiento del flujo al contacto de los culverts?
- ¿Los culverts influyen en los posibles escenarios de inundación?
- ¿La incidencia del flujo del río Chicamocha altera los culverts o los culverts alteran el flujo del río?

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la hidrodinámica del río Chicamocha incluyendo la infraestructura que hay dentro del cauce en la zona de drenaje subfluvial de Duitama-Boyacá.

Objetivos específicos

Evaluar hidráulicamente el río Chicamocha en el sector del drenaje subfluvial de Duitama-Boyacá (sifones invertidos) con la adición de los Culverts.

Analizar el comportamiento del flujo en la interacción río-Infraestructura Culverts.

Área de influencia

El desarrollo del proyecto se presenta en el sector de puente la balsa el cual se sitúa en la vía Duitama-Pantano de Vargas, es allí donde podemos encontrar la primera intersección que hay entre el drenaje sub-fluvial y el río Chicamocha.

Metodología

Revisión bibliográfica

Se indaga información de modelos hidráulicos en donde se han utilizado algún tipo de estructura dentro del modelado y para el análisis de flujo permanente y/o se buscará manuales en donde den instrucciones de modelados con obras civiles, también se buscará casos de estudio para planes de contingencias en zonas de alta inundabilidad y con obras civiles como box Culverts o Puentes.

Compilación de información

Se descargarán las elevaciones asociadas a la zona de estudio mediante la plataforma de referencias espaciales (Spatial Reference), por otro lado, mediante la plataforma de DHIME se consultará y descargará la información meteorológicas y limnométrica de las estaciones cercanas a la zona de estudio y con esta información hacer un ajuste de probabilidad para ajustar los caudales, y por último se irá al lugar de estudio para hacer reconocimiento y obtener las dimensiones de la obra.

Ajuste de caudales

Mediante el software Hidrognomon se determinara la ocurrencia de los caudales, la cual se hace sobre el análisis de frecuencia de los datos arrojados por la estación limnométrica y se establecen sus periodos de retorno, además se ajustan utilizando las distribuciones de frecuencia de probabilidad Normal, Log-Normal, Pearson III o Gama de tres parámetros y los métodos de Gumbel, también se establecerá la correlación de cada método y se tomara las más ajustadas, es decir, las que presenten menos error.

Modelo de elevación

En base la topo batimetría del río se ejecutará un modelo de elevación digital importando los archivos a herramientas de información geográficas (ArcGis) y se creará el archivo TIN con la proyección de coordenadas del lugar de estudio para aplicar las herramientas de HEC-GEORAS para la creación de la geometría del cauce con sus respectivos usos de suelos y se exportaran los archivos para la herramienta HEC-RAS.

Modelo de ejecución

Una vez importada los archivos de geometría a Hec-Ras con sus herramientas se incluirá la estructura de la alcantarilla con sus debidas dimensiones, luego, una vez este

proyectado la obra se ejecutará marcando flujo permanente para obtener el modelo unidimensional.

Determinación de caudales

críticos: se realizará el análisis de probabilidad de ajuste de caudales y mediante la aplicación del método de GUMBEL se determinan los caudales críticos a 100, 200 y 500 años.

Calibración del modelo

se tomarán medidas en campo de caudales y alturas de nivel del flujo y sobre estas se hará el análisis RSME95 para la debida calibración del modelo ajustando los valores de Manning.

Visualización de resultados

la herramienta Hec-Ras nos da soportes de visualización en varios tipos de gráficos para elaborar un análisis minucioso y por cada de sección transversal del cauce, estos gráficos serán: perfil 3D del cauce y del Culverts, perfiles superficiales del agua, velocidades y energías del flujo, para tener certeza de los que los datos son reales y verídicos antes de correr el modelo se realizará la calibración de éste.

Alternativa de gestión

a partir del análisis efectuado al flujo y a la interacción que tiene con la infraestructura, se darán sugerencias de mejora estructural para el paso hidráulico.

Determinación de caudales críticos

Los valores extremos son valores máximos o mínimos seleccionados de conjuntos de datos. Por ejemplo, el caudal máximo anual en un lugar dado es el mayor caudal

registrado durante un año y los valores de caudal máximo anual para cada año de registro histórico conforman un conjunto de valores extremos que puede analizarse estadísticamente. Fisher y Tippett (1928) han demostrado que las distribuciones de valores extremos seleccionados de conjuntos de muestras de cualquier distribución de probabilidad convergen en una de las tres formas de distribuciones de valor extremo, llamadas tipo I, II y III respectivamente, cuando el número de valores extremos seleccionados es grande. Las propiedades de las tres formas limitantes fueron desarrolladas en mayor detalle por Gumbel (1941) para la distribución de Valor Extremo tipo I (EVI, por sus siglas en inglés), por Frechet (1927) para la distribución de Valor Extremo tipo II (EVII) y por Weibull (1939) para la distribución de Valor Extremo tipo III (EVIII) (Chow, Maidment, y Mays, 1994, p. 387).

Estación limnométrica San Rafael

Coordenadas: Longitud: -73.242166, Latitud: 5.708388, Altitud: 2500.

Código: 24037190 Altitud: 2500.

Periodos de registro: 2003-2022 – (CMD) Caudales Medios Diarios.

Caudales mínimos

Mediante los registros de caudales obtenidos por la estación limnométrica se hizo una estimación de caudales mínimos por medio de la ejecución del software hidrogmon, tomando los datos presentados en el análisis de probabilidad de EVI Max (Gumbel) puesto que fue el más ajustado, lo anterior para el Río Chicamocha.

Caudales máximos

Las curvas de duración de caudales CDC es la herramienta utilizada para indicar la distribución de la ocurrencia de niveles de caudales a lo largo del tiempo (Guarín y López, 1986 citado por Gomes y Carvajal, 2017, p. 26).

La determinación de la ocurrencia de los caudales se hace sobre el análisis de frecuencia de los datos arrojados por la estación San Rafael de donde se tomaron los datos máximos de los caudales medios diarios, además se ajustan utilizando las distribuciones de frecuencia de probabilidad Normal, Log-Normal, Exponential, Pearson III , Log Pearson, Gamma y el método de Gumbel Mínimo y Máximo (todas bajo la ley de Weibull) , adicionalmente, se ejecutó el test de Kolmogórov-Smirnov para todos los métodos y se tomó el más ajustado.

Ley de Weibull

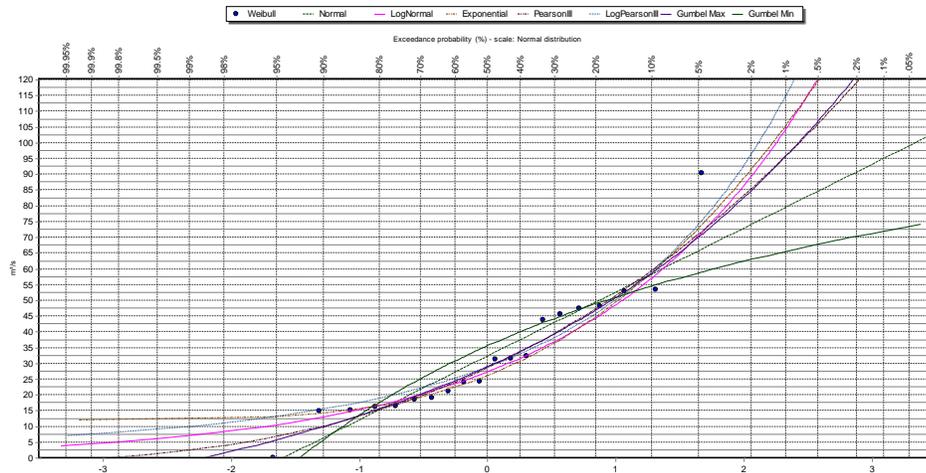
$$Probabilidad (\%) = \frac{M}{(N + 1)}$$

M=Numero de observación

N= Total de Observaciones

Figura 1

Distribuciones de frecuencia de probabilidades



Fuente: Autores

En este caso y según el análisis, tomamos la distribución de frecuencia de EV1-Max (Gumbel) puesto que fue la más ajustada como lo muestra la Figura 2 en donde presenta datos de Dmax de 0.09637 y de Attained a de 96.9431.

Tabla 1

Ajuste de probabilidades

Kolmogorov- Smirnov test for: All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	80.89%	0.12945
Log Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.60%	0.12688
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	83.66%	0.12524
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.88%	0.09661
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	78.03%	0.1336
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.94%	0.09637
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	37.20%	0.19124

Fuente: Autores

A partir de este análisis efectuado se tomaron los valores de caudales máximos para los periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años, y estos se describieron en el análisis de frecuencia de probabilidad más ajustado EV1 (Max Gumbel).

Figura 2

Test de Kolmogórov-Smirnov

Distribution functions plots	Histogram - Density functions plots			Parameter values - Forecasts	
Kolmogorov-Smirnov test for:All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	80.8938%	0.12945
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.6011%	0.12688
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	83.6635%	0.12524
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.7275%	0.09719
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.8810%	0.09661
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	78.0322%	0.13360
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.9431%	0.09637
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	37.2019%	0.19124
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	77.2837%	0.13466
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.1566%	0.09552
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	89.4857%	0.11529
EV2-Max	REJECT	REJECT	REJECT	%	0.95238
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.7869%	0.11274
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96.5829%	0.09772
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.0071%	0.10546
Pareto	REJECT	REJECT	REJECT	0.73501%	0.36096
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	94.1606%	0.10506
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.9331%	0.10808
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.2184%	0.09526
EV2-Max (L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	%	0.95238
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	37.2098%	0.19123
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.8837%	0.10820
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.37823%	0.26316
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	78.0623%	0.13356
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	63.3956%	0.15339
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	86.1163%	0.12127
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.5889%	0.15712

Fuente: Hidrognomon

Periodos de retorno

Según el método EV1-Max (Gumbel) el cual fue el que presento mayor ajuste en los datos de caudales con un valor critico (Dmax) de 0.09657 nos arrojó los siguientes caudales para los diferentes periodos de retorno y con los cuales será modelado el Río Chicamocha.

Tabla 2

Periodos de retorno, Río Chicamocha

Periodos de retorno(m3/s)	Años
84.8919	50
95.9377	100

106.943	200
121.463	500

Gumbel Max

Fuente: Autores

Tabla 3

Periodos de retorno, Drenaje Subfluvial

Tiempo de retorno (Años)	Intensidades Máximas (mm/h)	Caudal Máximo (m3/s)
2	19.25	6.3
5	21.59	7.75
10	23.54	8.95
25	26.4	11.15
50	28.41	12.89
100	30.98	15.37

Fuente: Universidad de Boyacá. (2013). *Modelo de Simulación Para la Gestión Integral de Las aguas Residuales y Pluviales Del Municipio de Duitama Enmarcado Dentro de la Complementación Y Ajuste Del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos - PSMV*

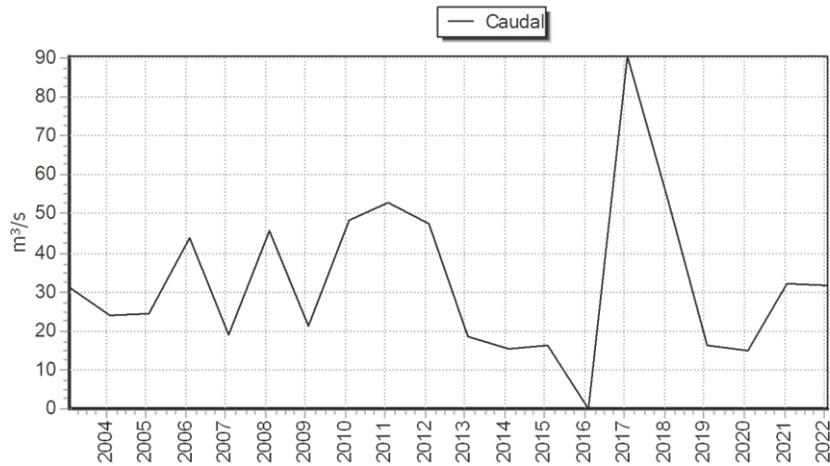
Histograma

Las funciones de probabilidad son de gran ayuda para el análisis estadístico; para la construcción de estas funciones es necesario suponer que se trata de datos totalmente aleatorios y clasificarlos en histogramas de frecuencia, para esta construcción se emplean diversos intervalos que abarquen el total de los datos observados y clasificar dichas observaciones en los intervalos (Uyaban, 2018, p. 22).

Se tomaron datos de caudales medios diarios de la estación limnométrica San Rafael desde el año 2003 hasta el año 2022, la estación limnométrica de San Rafael únicamente registra datos de caudales del río Chicamocha.

Figura 3

Histograma de frecuencias de caudales



Fuente: Autores

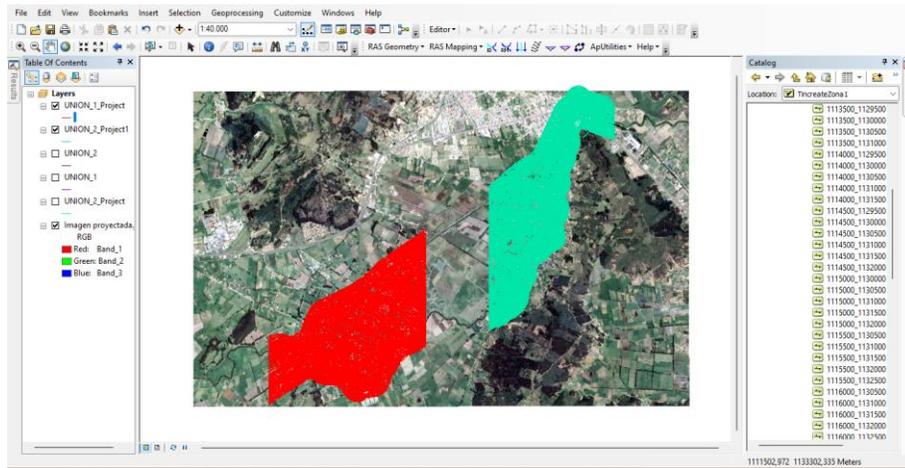
Condiciones de entrada

Topografía

Los datos DEM son conjuntos de datos de elevación digital que registran la expresión de la superficie topográfica de cualquier área. La naturaleza de los datos de elevación es continua, no discreta. Sin embargo, debido a la limitación de la tecnología reciente, los datos DEM se pueden mostrar en formas, es decir, cuadrícula, contorno, perfil y TIN (red irregular de triángulos) que no son completamente continuos (Sarapirome y Surinkum, 2002, p. 2).

Figura 4

Elevación topografía de zona de estudio



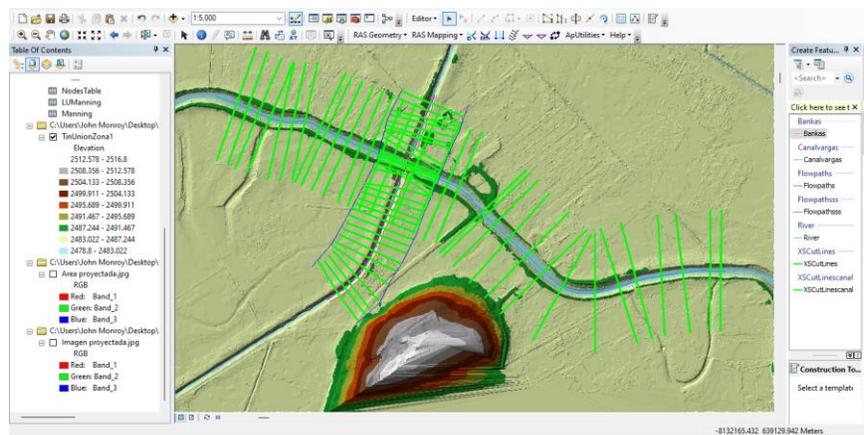
Fuente: Autores

Cabe resaltar que la misma topografía nos da información del cauce del Río Chicamocha como del drenaje Subfluvial, en la Figura 5 nos muestra a detalle que el Río y el Drenaje presenta un punto de intersección que, aunque no interactúan entre si los dos canales, la infraestructura que incluye el drenaje tiene repercusión en el flujo de los caudales del Río Chicamocha como lo muestra la Figura 6.

Datos de entrada

Figura 5

Ajuste de condiciones del río Chicamocha y drenaje subfluvial

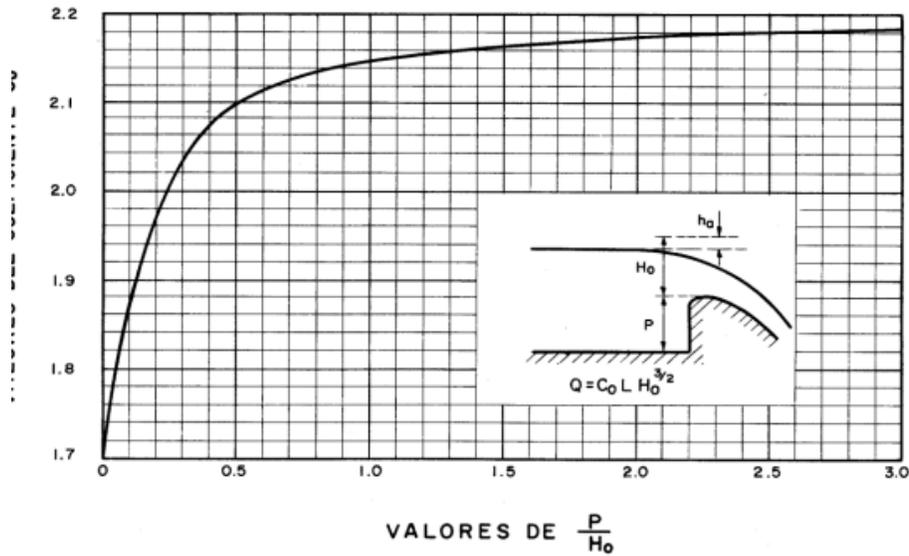


Fuente: Autores

Salto hidráulico río Chicamocha

Figura 6

Salto hidráulico



Fuente: Estrada, G (2018). *Laboratorio de hidráulica de canales*. Manual de hidráulica de canales

Los datos de entrada se establecen para la construcción de la geometría del río y el cauce del drenaje para ser manipuladas en Hec-Ras en donde se incluirá las medidas reales de la obra hidráulica (culverts) la cual se sitúa en la intersección de los dos cauces.

Figura 7*Culvert del drenaje subfluvial*

Fuente: Autores

Usos de suelo

El ajuste del coeficiente de rugosidad de Manning debe basarse en el uso tanto de fotografías aéreas de la zona de estudio como de mapas de uso de suelo y geológicos. Así, en general, se debe zonificar los valores del coeficiente de Manning no solo en el propio cauce del río sino también en las llanuras que supuestamente vayan a inundarse (Leal, 2015, p. 31).

El Ajuste del Coeficiente Manning se hizo en base a los usos de suelo que se presentan en las llanuras de inundación del proyecto con valores puntualizados en el Manual de Hec-Ras. La tabla 4 describe los valores de Manning utilizados.

El culvert también maneja pérdidas de energía y rugosidad según el material en que se elaboró la obra, estas pérdidas fueron tomadas en cuenta al momento de incluir la infraestructura.

Tabla 4

Coefficiente de manning Hec-Ras.

Coefficiente de Manning	
Arroyos Naturales	0.035
Pastos sin maleza	0.04
Hierba Corta	0.03
Cultivo Campo Maduro	0.04
Grava, Sección uniforme, limpia	0.025
Matorral y arboles ligeros	0.05
Concreto Acabado	0.013

Fuente: Brunner, G, (2016) *Energy Loss Coefficients, manual Hec-Ras*, US army corps of engineers, Hydrologic Engineering Center

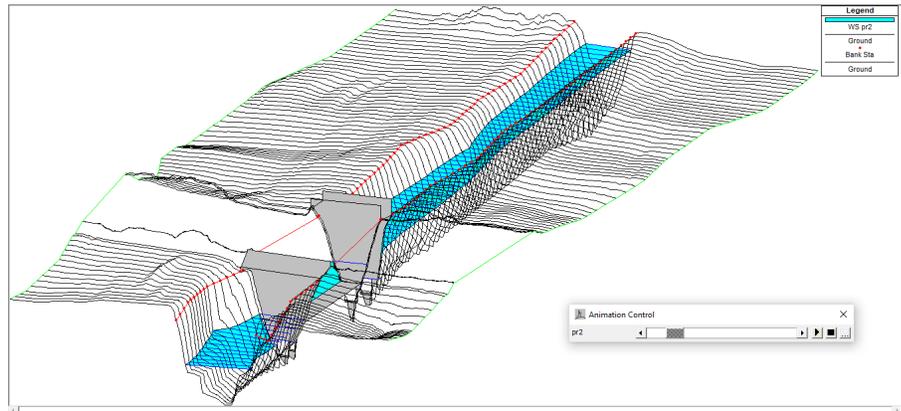
Según Fernández de Córdoba et al., (2018) donde las velocidades de circulación del agua son considerables y el flujo puede alcanzar las llanuras de inundación, la correcta estimación de la n de Manning es de suma importancia, pues un error en este parámetro refleja igual error en la velocidad y caudal, por lo tanto, es indispensable analizar el efecto del nivel o caudal en conjunto con toda la sección compuesta del cauce (p. 19).

Geometría Hec-Ras (culverts)

La geométrica de ArcGIS la cual fue previamente proyectada en el sistema de coordenadas WGS 1994 y en donde se incluyó todas las condiciones geomorfológicas del río Chicamocha y del drenaje subfluvial en el tramo de estudio, se importó a Hec-Ras en donde se ajustaron los culverts con las medidas reales que se tomaron en la entrada al igual que el tipo de material del cual fue construido.

Figura 8

Culverts intersección con el Río Chicamocha



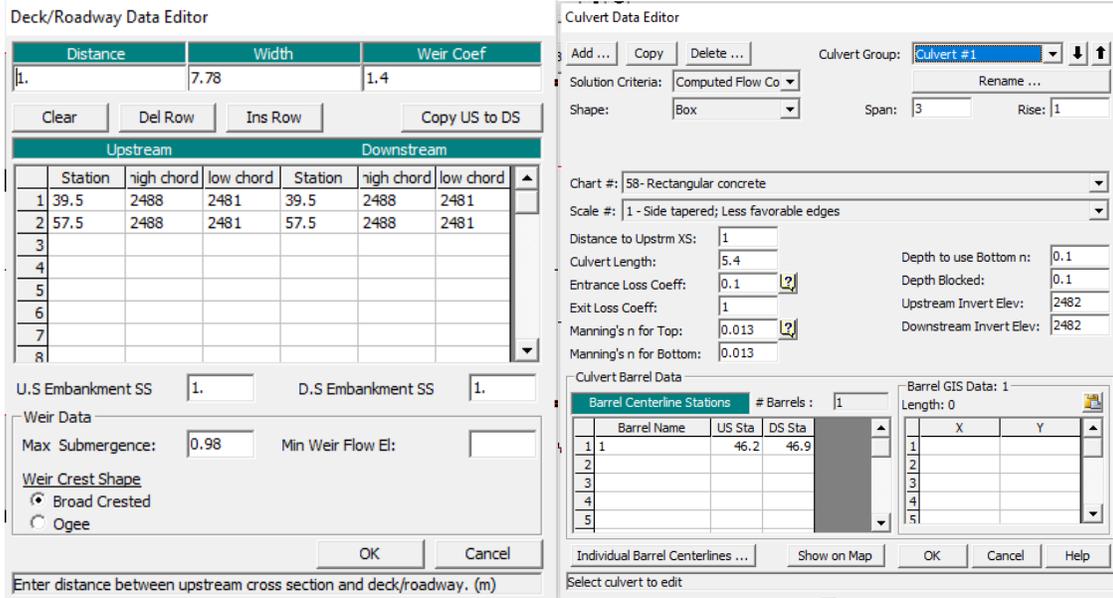
Fuente: Autores

Culverts (intersección)

El primer culvert (entrada) se proyectó a 1 metros de la sección 120.6978 (sección aguas arriba) con un ancho de 7.78 metros sobre el Banks derecho del río Chicamocha, El culvert se dibujó de tipo Box (Caja) de 3 metros de ancho y un alto de 1 metro, con material regular de concreto, un coeficiente de pérdidas a la entrada de 0.01 y un Manning de 0.013 como lo muestra la Figura 8.

Figura 9

Proyección de culvert 1 entre secciones

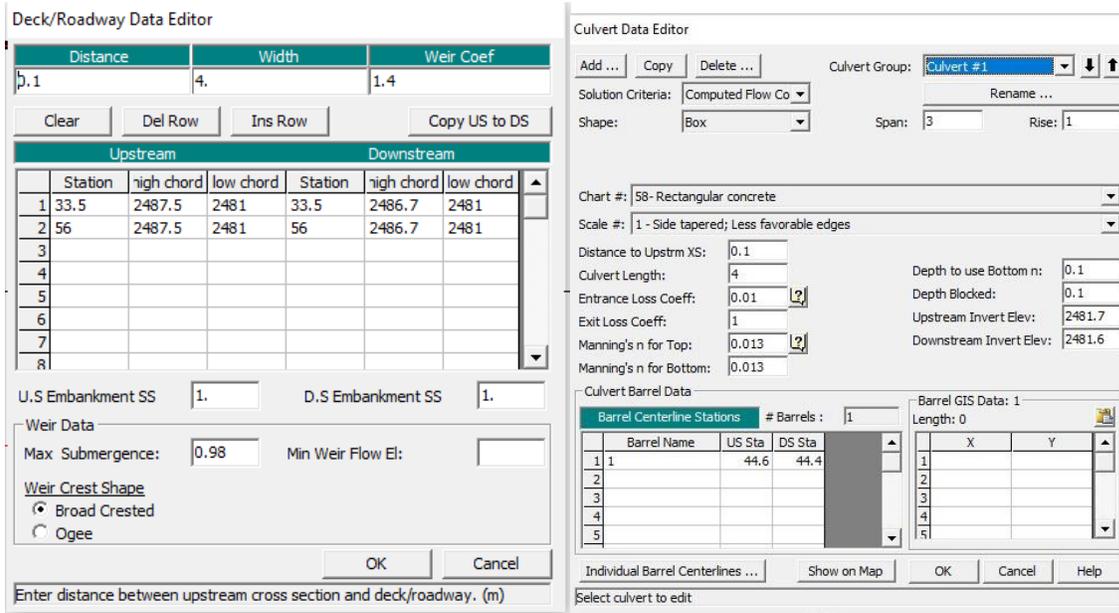


Fuente: Autores

El segundo culvert (salida) fue proyectado a 0.1 metros de la sección 72.5 (sección aguas arriba) con un ancho de 4 metros sobre el Banks izquierdo del río Chicamocha, El culvert se dibujó de tipo Box (Caja) manteniendo las medidas del primer culverts, es decir, de 3 m de ancho * 1 m de alto, con material regular de concreto, un coeficiente de pérdidas a la entrada de 0.01 y un Manning de 0.013, ver figura 10.

Figura 10

Proyección de culvert 2 entre secciones

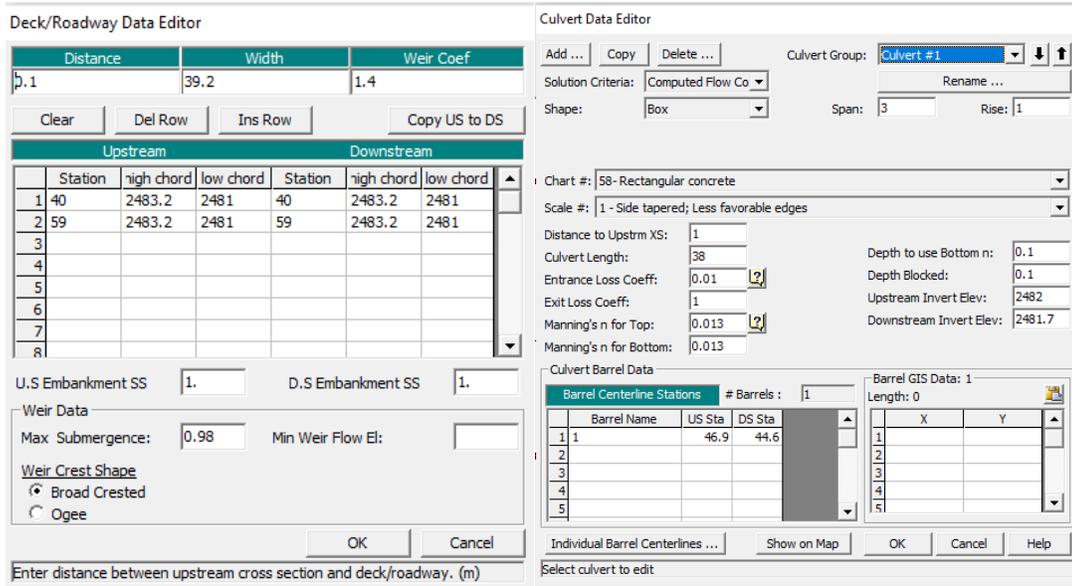


Fuente: Autores

Y por último la caja la cual pasa por debajo del Río Chicamocha se proyectó a lo ancho del río con una longitud de 39.2 metros dentro de las secciones 111.92 y 72.52 y mantiene las condiciones de las anteriores partes de la obra hidráulica.

Figura 11

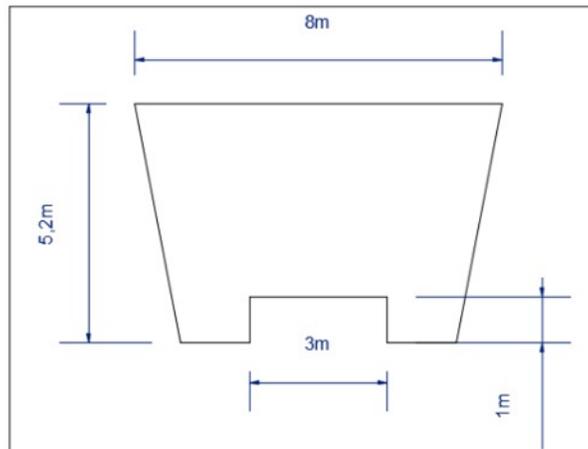
Proyección estructura por debajo del río Chicamocha



Fuente: Autores

Figura 12

Acotamiento de culverts



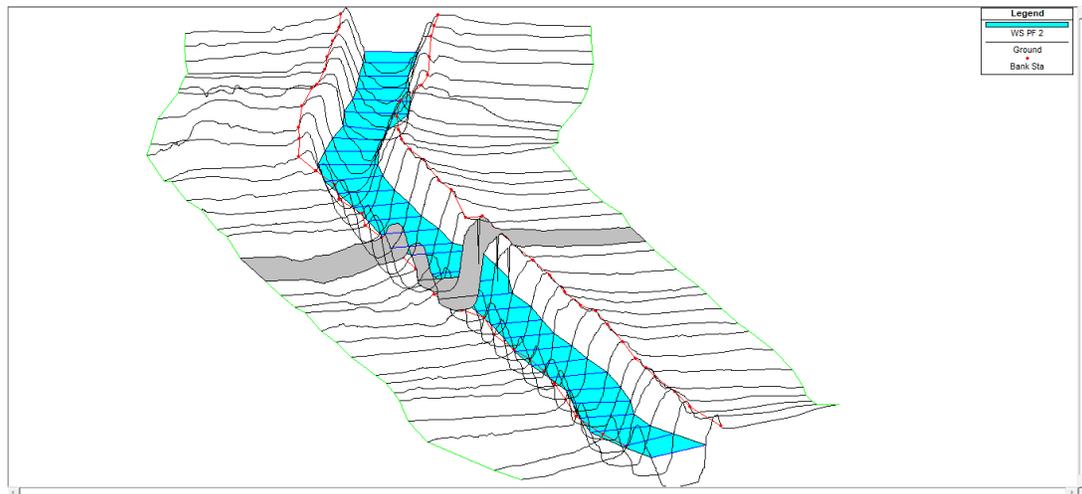
Fuente: Autores

Por otro lado, para la modelación del río Chicamocha se agregó el salto hidráulico que podemos encontrar por la influencia de los culverts y la estructura que pasa por debajo del este, esta estructura genera una influencia directa al flujo del Río Chicamocha, en otras palabras, es

como si el río presentara una obstrucción a razón de que se encuentra la obra hidráulica como lo vimos en figuras anteriores.

Figura 13

Obstrucción de la obra hidráulica dentro del cauce del río Chicamocha

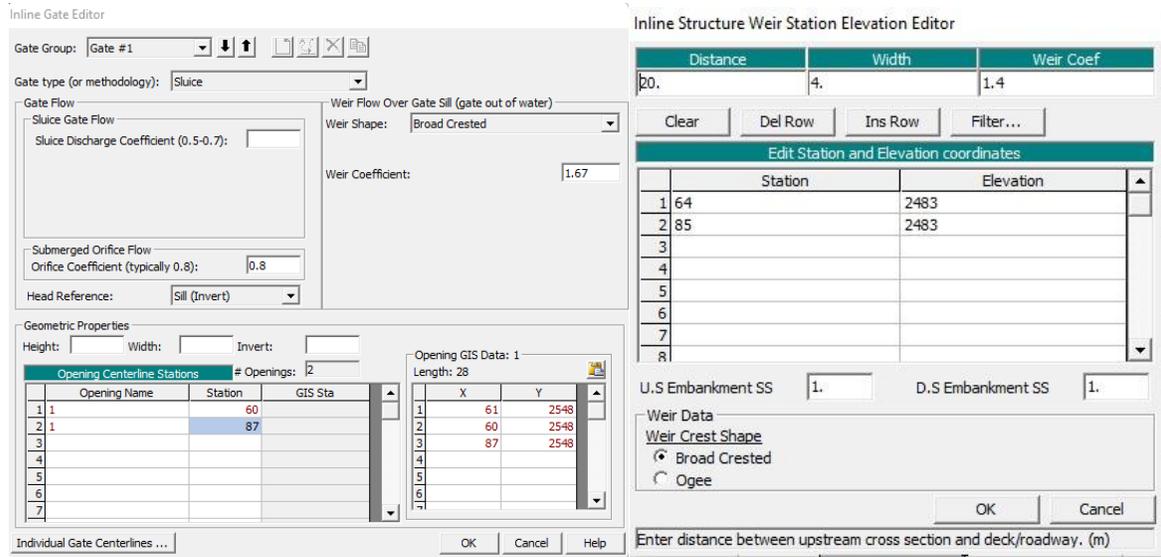


Fuente: Autores

La Obstrucción se proyectó dentro las secciones 330 y 299.37 con Wier Coefficient de 1.67 (coeficiente de presa), un Orifice Coefficient valor típico de 0.8 y con una altura de 1 metro desde la profundidad del cauce, siguiendo las medidas de los culverts ver figura 14.

Figura 14

Proyección obstrucción del drenaje dentro del río Chicamocha



Fuente: Autores

Modelo hidráulico del software Hec-Ras en el río Chicamocha adicionando toda la infraestructura del culvert

Este modelo fue ejecutado para todos los periodos de retorno obtenidos por el análisis de frecuencia de probabilidad más ajustado EV1 (Max Gumbel), adicionalmente se incluyó un valor extremo de 250 m3/s para ver las condiciones críticas y el comportamiento de esta parte del estudio.

Calibración

La importancia de la evaluación del ajuste de modelos radica en que se puede conocer la veracidad de los datos obtenidos y si dichos resultados pueden ser utilizados para la realización de proyectos o para la toma de decisiones (Leal, 2015, p. 38).

En este caso la calibración del modelo se hace modificando valores de Manning puesto a que este parámetro presenta una gran sensibilidad, es decir, que los valores de la tabla 4 fueron modificados dentro del modelo para tener un mejor ajuste de este. De igual manera se realizó una prueba RSME con datos de velocidad y altura de la lámina de agua aforados en campo tomados en diferentes puntos y en diferentes días.

Tabla 5

Datos para calibración

	Datos medidos			Datos Modelo		
	Altura (m)	Velocidad(m/s)	Caudal (m3/s)	Altura (m)	Velocidad(m/s)	Caudal (m3/s)
131.0	0.72	0.17	0.198	0.7	0.15	0.198
1						
134.4	0.69	0.16	0.22	0.66	0.17	0.22
5						
137.5	0.62	0.18	0.189	0.59	0.17	0.189
5						
63.45	0.45	0.28	0.215	0.49	0.24	0.215

60.08	0.4	0.25	0.25	0.39	0.27	0.25
7						
56.72	0.31	0.22	0.208	0.33	0.29	0.208
5						

Fuente: Autores

Cálculo de la raíz media del error (RSME)

El valor RSME se comparará con un valor del RSME calculado para un intervalo de confianza como del 95 % (RSME95). El valor de la RSME se calcula de acuerdo con:

$$RSME = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

Dónde:

\bar{O} : promedio de todas las mediciones

El valor del RSME₉₅ se calcula con la siguiente expresión:

$$RSME_{95} = \frac{100}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (EE_i - t_{m,95})^2}{n}}$$

En la que $t_{m,95}$ es el valor de t Student de m réplicas y 95 % de probabilidad (valor p de 0.95) y n es el número de réplicas. Si el valor de la RSME, es menor que la RSME95 el error total en la simulación es menor que el error total en las mediciones en un intervalo de confianza del 95 %.

En el caso de que no se disponga de réplicas, ni del valor del error estándar (como en el caso de experimentos de largo término o de un trabajo de campo costoso), la coincidencia se puede evaluar contra un nivel del error considerado aceptable como por ejemplo el 10 %.

Tabla 6

Evaluación de Altura del modelo RSME

Lamina modelo (P _i)	Lamina medido (O _i)	(O _i -P _i) ²
0.7	0.72	0
0.66	0.69	0
0.59	0.62	0
0.49	0.45	0
0.39	0.4	0
0.33	0.25	0.01
	0.52	0.01
$RMSE = \frac{100}{O} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} =$		7.942366067
		$RMSE_{95} = 10$

Fuente: Autores

Tabla 7

Evaluación de velocidad del modelo RSME

Velocidad modelo (P _i)	Velocidad medida (O _i)	(O _i -P _i) ²
0.15	0.17	0
0.17	0.16	0
0.17	0.18	0
0.24	0.28	0
0.27	0.25	0
0.29	0.28	0
	0.22	0

$$RMSE = \frac{100}{O} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} = 9.6423652$$

$$RMSE_{95} = 10$$

Fuente: Autores

El valor del RSME para el modelo es igual al 9.642% y 7.94%, comparando este valor con un error aceptable del 10% se puede concluir que el error total en el modelo es menor en las dos variables de altura y velocidad que el error total en las mediciones.

Por lo tanto, el modelo ejecutado está debidamente calibrado para darnos la certeza de obtener valores reales y con alta confiabilidad.

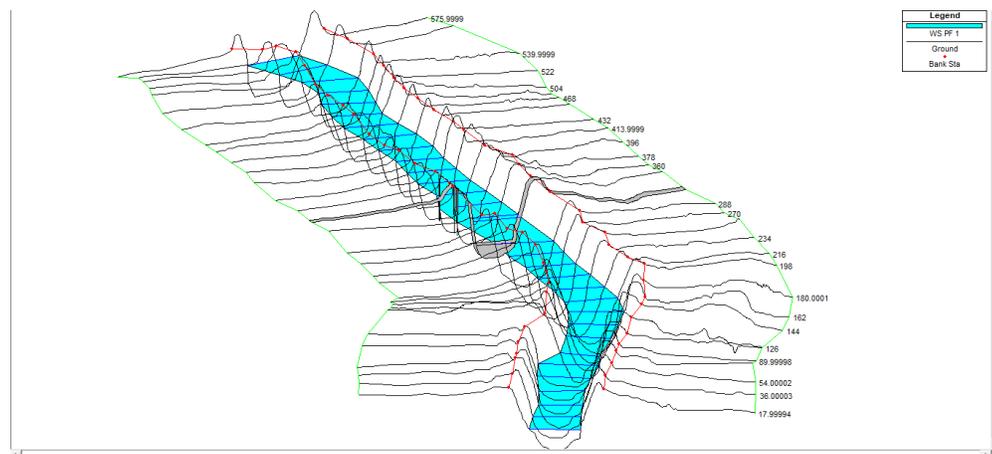
Río Chicamocha

Periodo de retorno de 50 años

Para un periodo de retorno de 50 años obtenemos un caudal de 84.892 m3/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones que tienen más relevancia, mostradas a continuación.

Figura 15

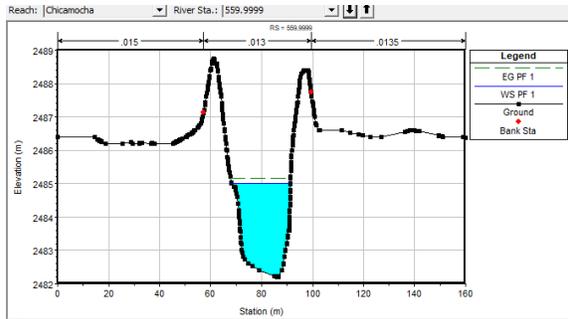
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 50 años, río Chicamocha



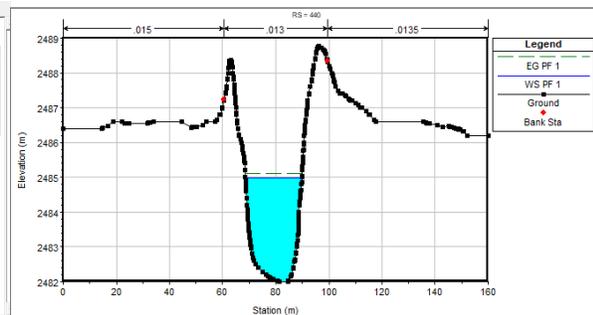
Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Figura 16

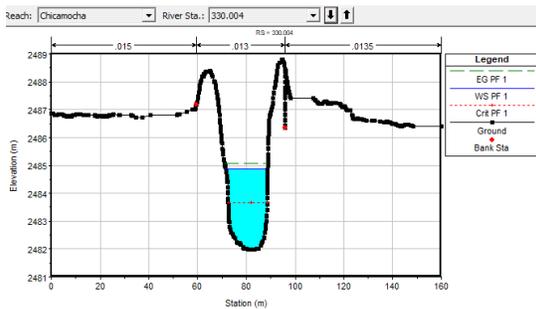
Secciones transversales periodo de retorno de 50 años



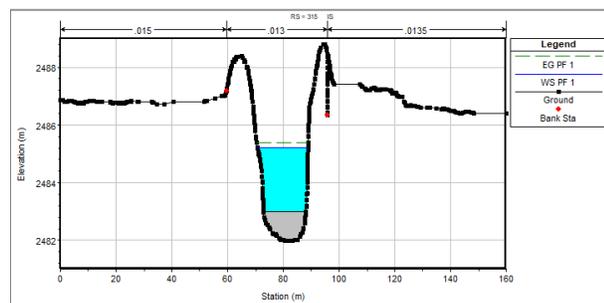
Sección 559.9999



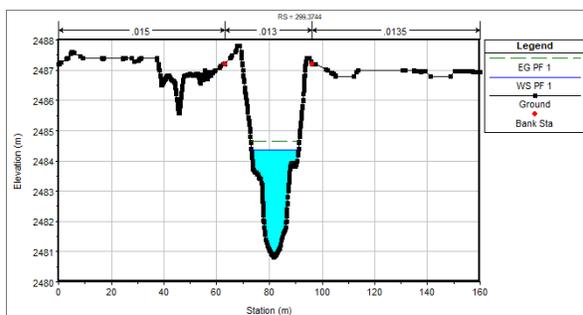
Sección 440



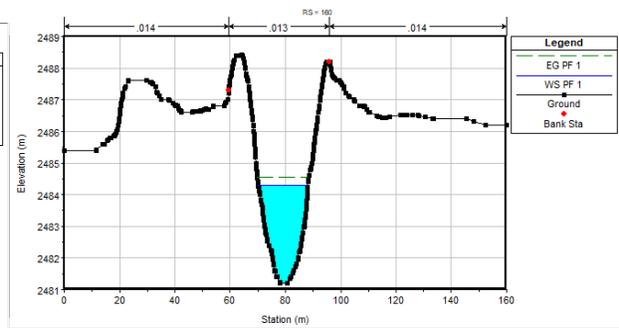
Sección 330.000



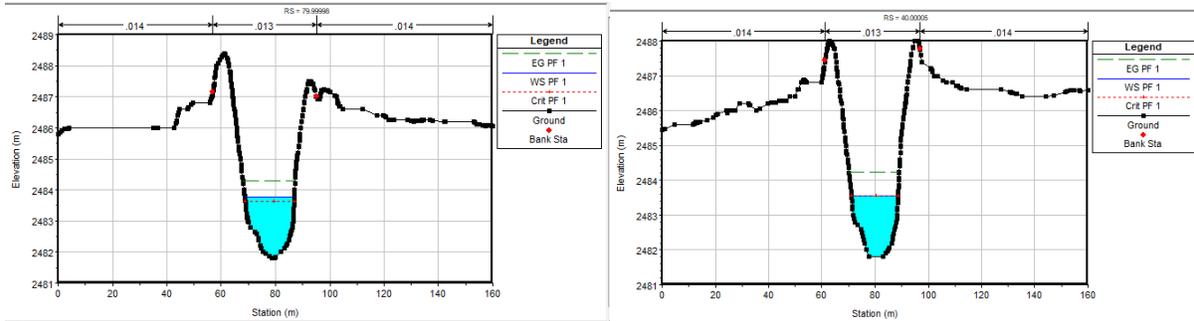
Sección 315



Sección 299.3744



Sección 160



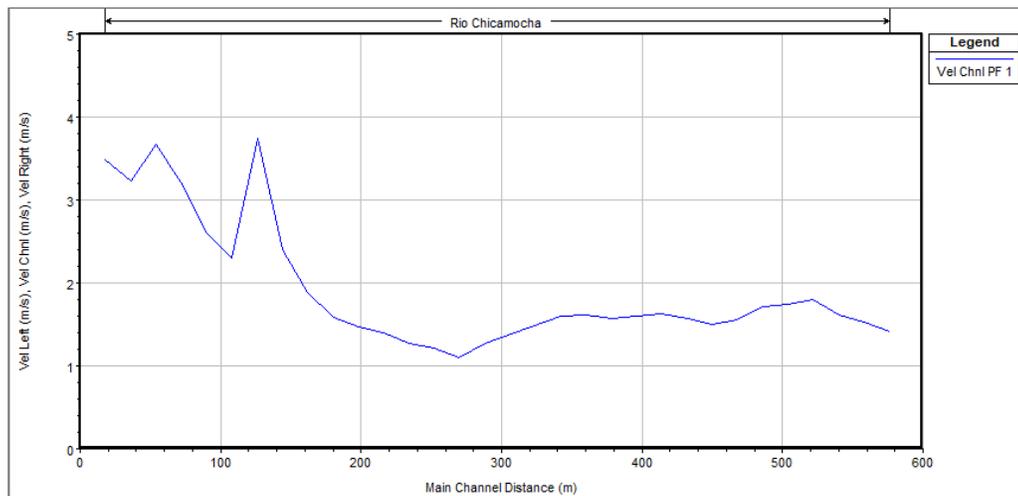
Sección 79.999

Sección 40.000

Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Figura 17

Perfil de velocidad de flujo para el periodo de retorno de 50 años



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

El caudal del periodo de retorno de 50 años nos muestra comportamiento normal del Río Chicamocha en todas las secciones transversales de estudio, no presentan cambios o modificaciones en su dinámica, aunque se evidencia un incremento de altura de la lámina de agua en la sección 315 que es en la cual encontramos la obra hidráulica culverts y aumento de calado en las secciones aguas arriba (Antes del culvert).

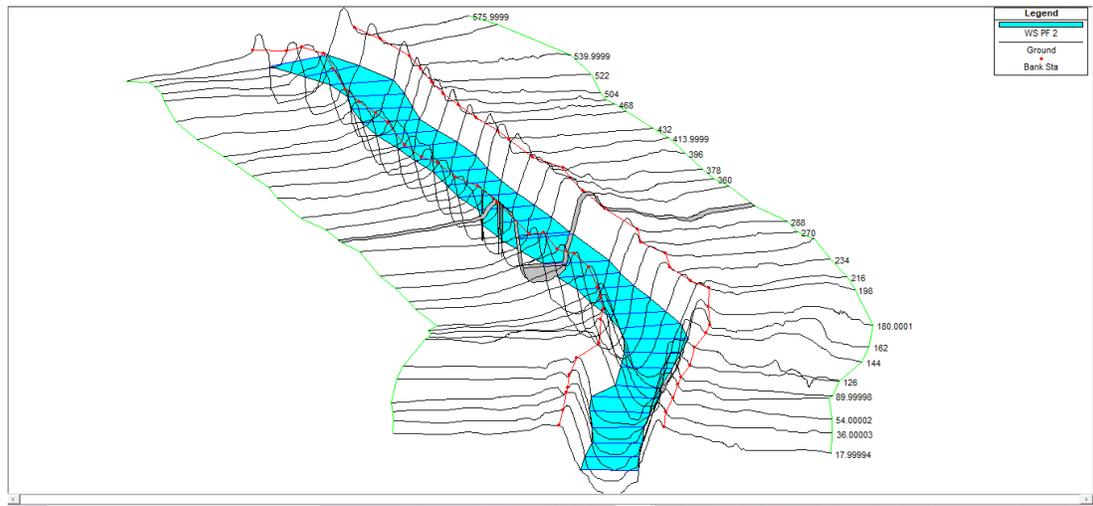
Según la Figura 17 se puede evidenciar que las secciones aguas abajo presentan mayores velocidades en el flujo y un menor calado, se debe a que después de la obstrucción generada por la estructura esta altera el tipo de flujo haciendo que cambie de régimen.

Periodo de retorno de 100 años

Para un periodo de retorno de años obtenemos un caudal de 95.937 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones que tienen más relevancia, mostradas a continuación.

Figura 18

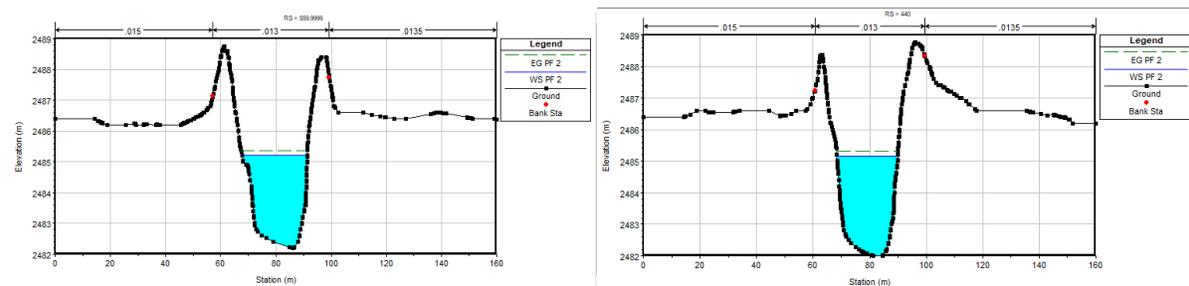
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 100 años, río Chicamocho



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

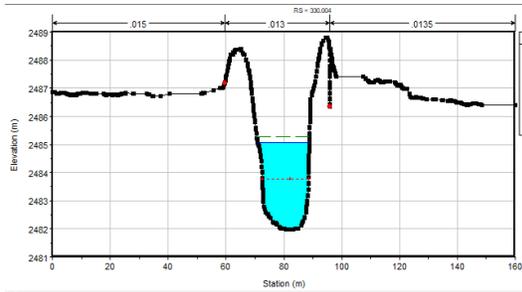
Figura 19

Secciones transversales periodo de retorno de 100 años

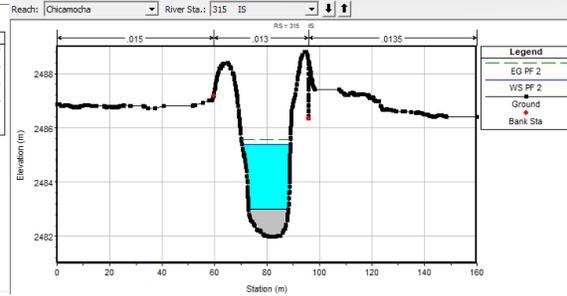


Sección 559.9999

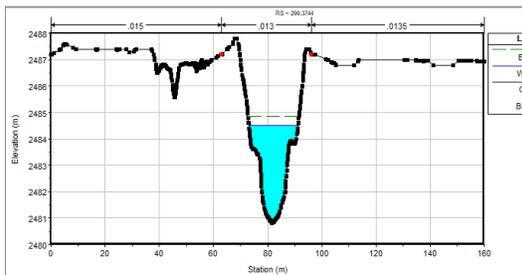
Sección 440



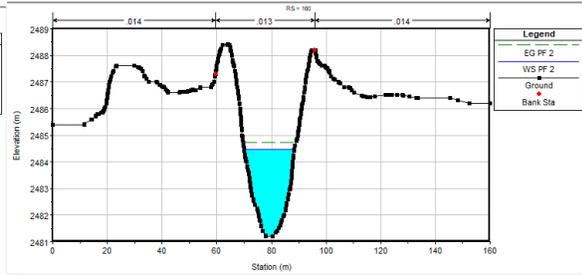
Sección 330.000



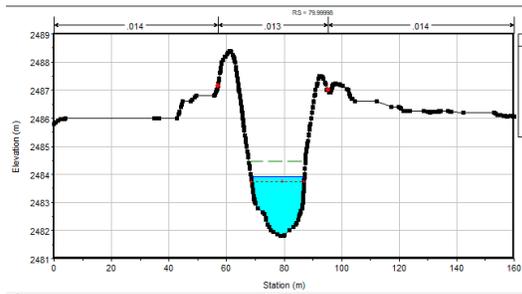
Sección 315



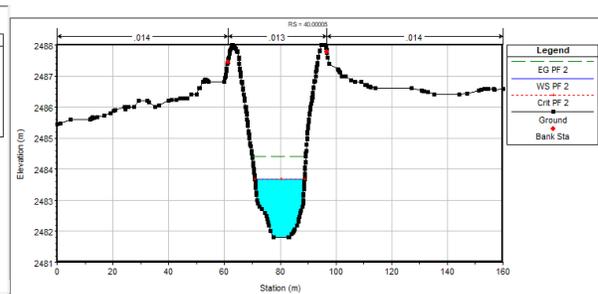
Sección 299.3744



Sección 160



Sección 79.999



Sección 40.000

Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

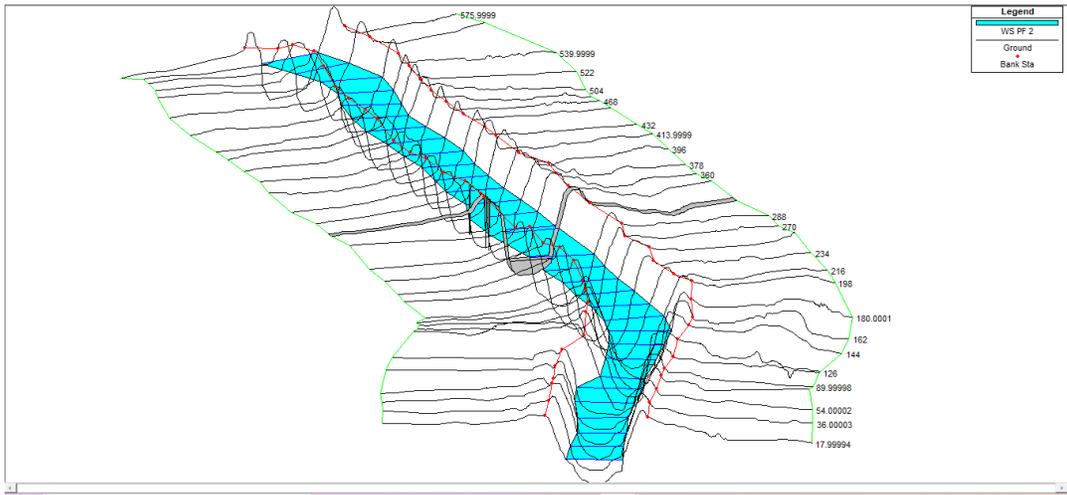
El caudal del periodo de retorno de 100 años de igual manera que el de 50 años, no presenta cambios o modificaciones en la dinámica del río Chicamocha, aunque sigue registrando la diferencia en volumen de la sección 315.

Periodo de retorno 200 años

Para un periodo de retorno de años obtenemos un caudal de 106.943 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones que tienen más relevancia, mostradas a continuación.

Figura 20

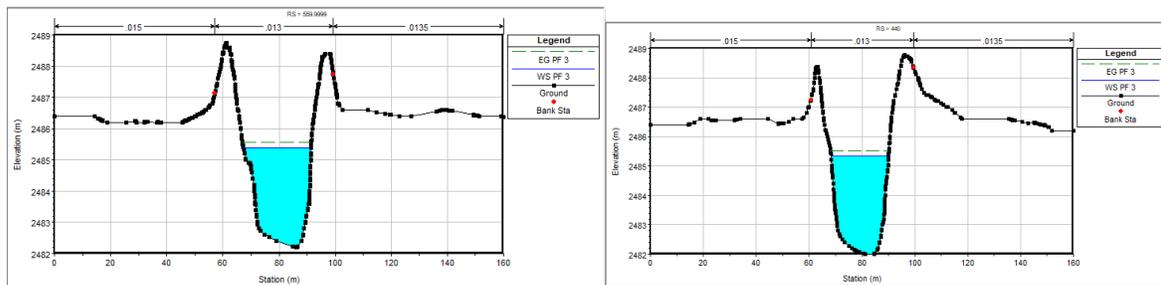
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 200 años, río Chicamocha



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

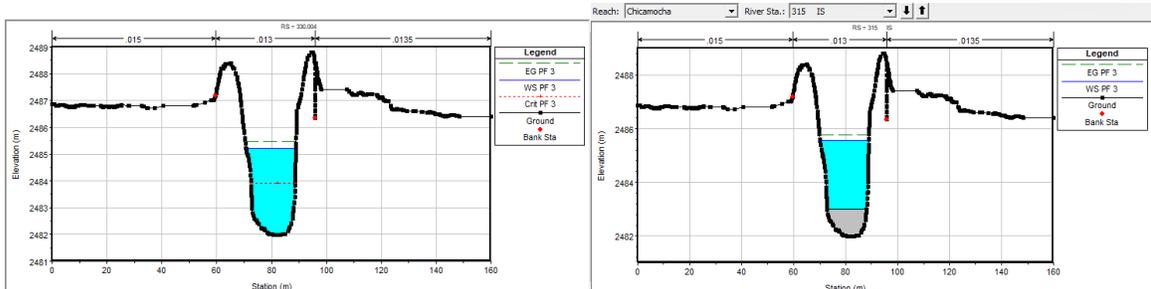
Figura 21

Secciones transversales periodo de retorno de 200 años



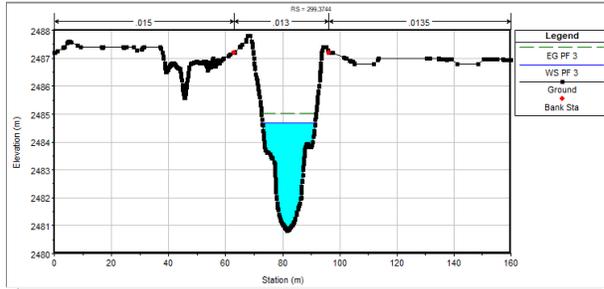
Sección 559.9999

Sección 440

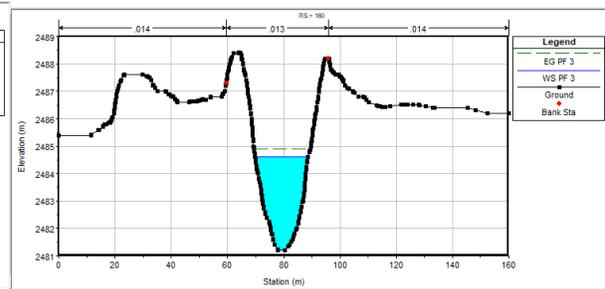


Sección 330.000

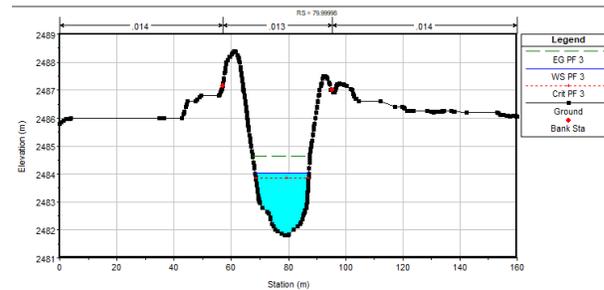
Sección 315



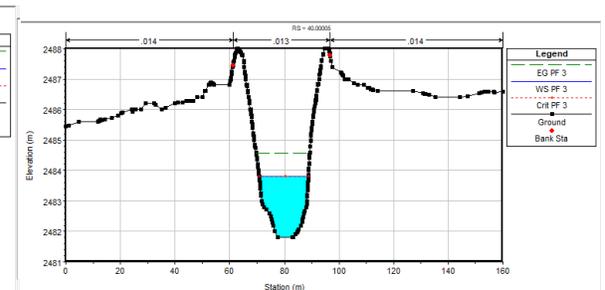
Sección 299.3744



Sección 160



Sección 79.999



Sección 40.000

Fuente: autores

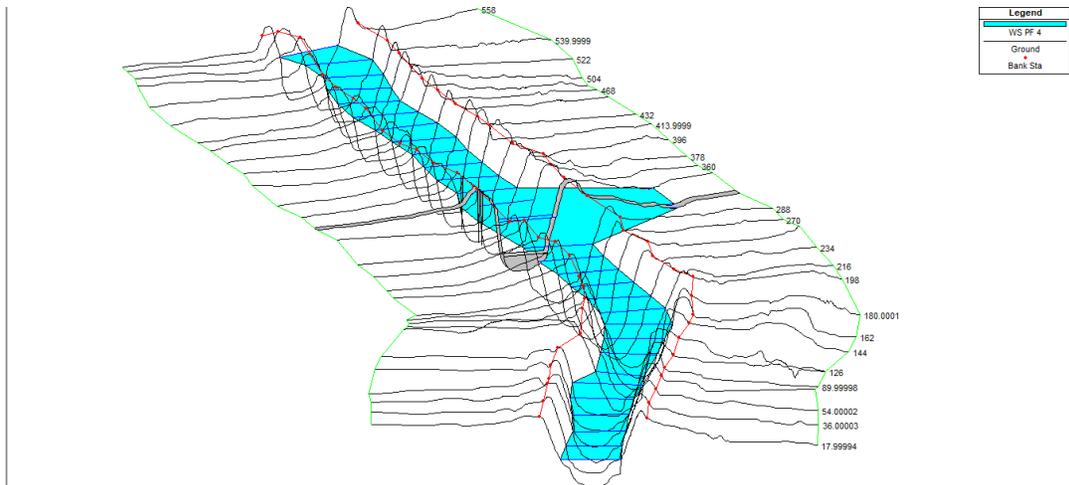
De la misma manera que los anteriores periodos de retorno no se evidencia ningún tipo de anomalía o cambios abruptos en su dinámica, aunque si representa incremento en su nivel de agua en las secciones aguas arriba.

Periodo de retorno 500 años

Para un periodo de retorno de años obtenemos un caudal de 121.463 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones que tienen más relevancia, mostradas a continuación.

Figura 22

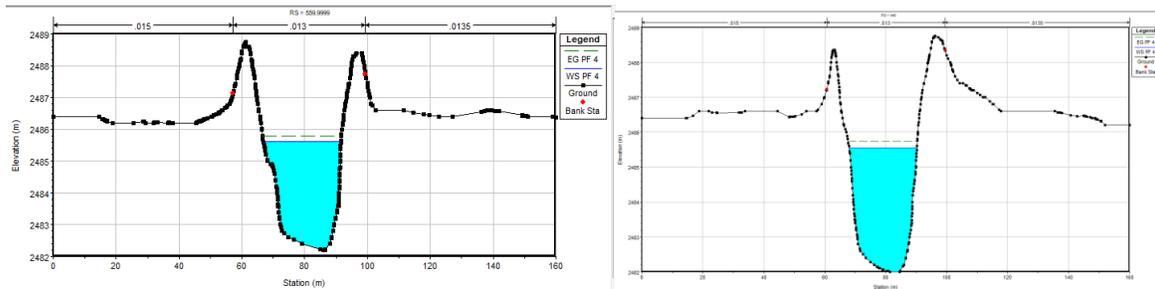
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 500 años, Río Chicamocha



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

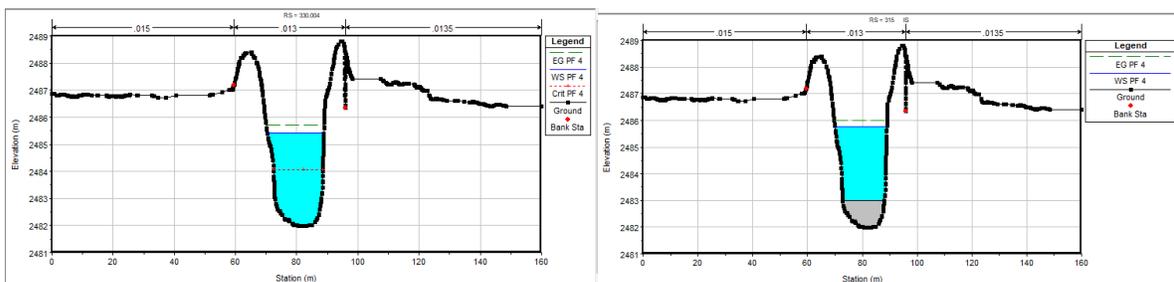
Figura 23

Secciones transversales periodo de retorno de 500 años



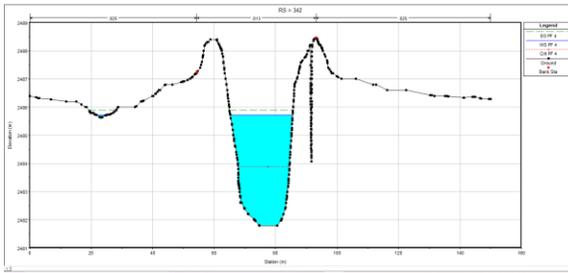
Sección 559.9999

Sección 440

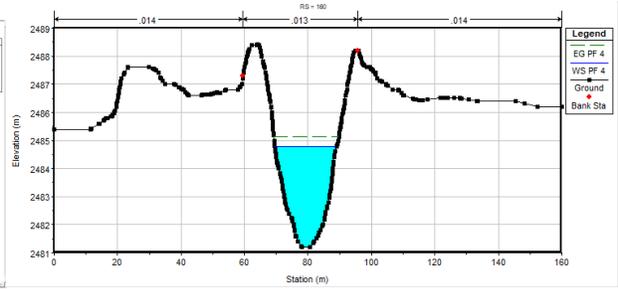


Sección 330.000

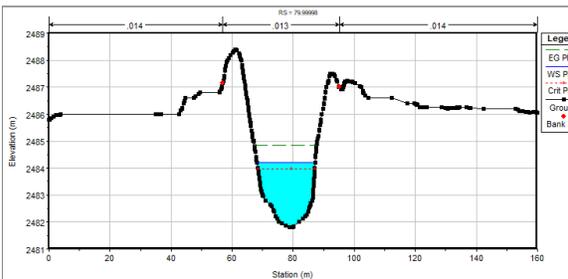
Sección 315



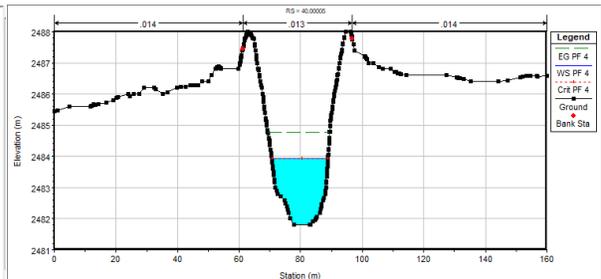
Sección 342



Sección 160



Sección 79.999



Sección 40.000

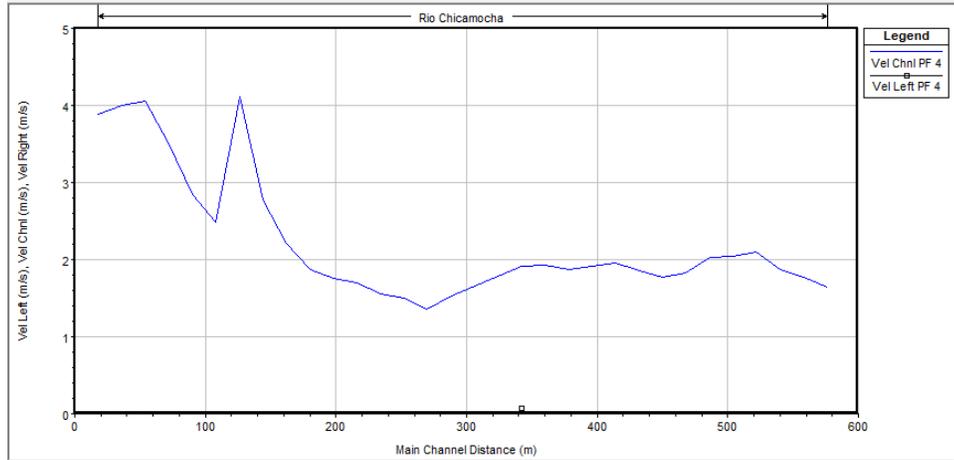
Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Se evidencia con el periodo de retorno de 500 años que hay una creciente en la lámina de agua (calado) de las secciones anteriores a la sección 315 debido a que la estructura genera un tipo de obstrucción y esto hace que retenga el flujo del agua repercutiendo en el incremento de volumen de agua con respecto a las secciones aguas abajo, también encontramos que la sección 342 seguida a la obstrucción de la infraestructura representan una inundación en la ladera izquierda del río Chicamocha, a causa del incremento del volumen de agua hecho por la obstrucción y por el aumento de velocidades del flujo por el efecto vertedero (salto hidráulico) que provoca, ver figura 6.

Por otro lado, las secciones aguas abajo de la estructura evidencia una disminución en el calado y el área mojada del cauce, pero al mismo tiempo un incremento en su velocidad, este efecto puede afectar la dinámica y potencializa escenarios de inundación.

Figura 24

Perfil de velocidad de flujo para un periodo de retorno de 500 años



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Modelo hidráulico del drenaje subfluvial adicionando toda la infraestructura del culvert de la intersección

Este modelo fue ejecutado para todos los periodos de retorno obtenidos en el documento **Modelo de Simulación Para la Gestión Integral de Las aguas Residuales y Pluviales Del Municipio de Duitama Enmarcado Dentro de la Complementación Y Ajuste Del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos - PSMV** (Universidad de Boyaca, 2013) los cuales reflejan un estudio previo en la zona de influencia directa del drenaje subfluvial o también llamado Canal Vargas.

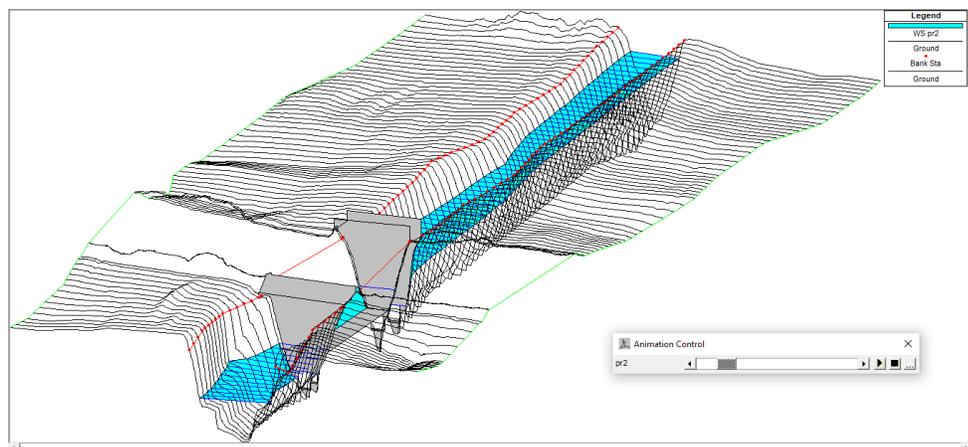
Drenaje subfluvial. culverts (intersección)

Periodo de retorno de 2 años

Para un periodo de retorno de años obtenemos un caudal de 6.30 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones que tienen más relevancia, mostradas a continuación.

Figura 25

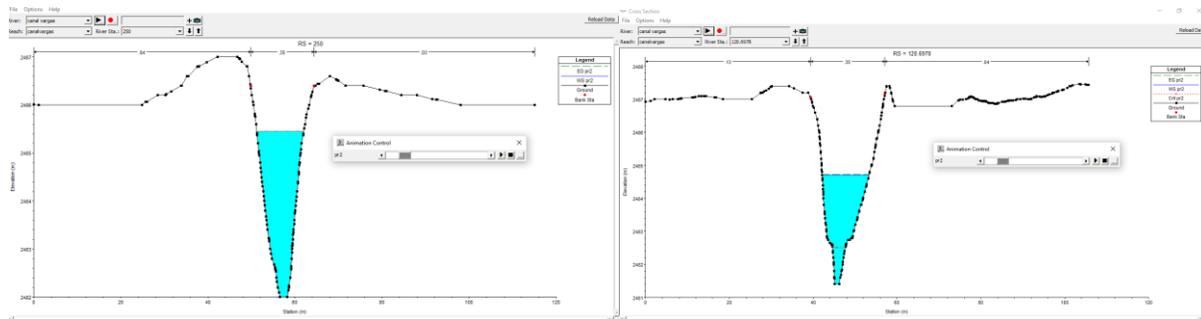
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 2 años, drenaje subfluvial



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

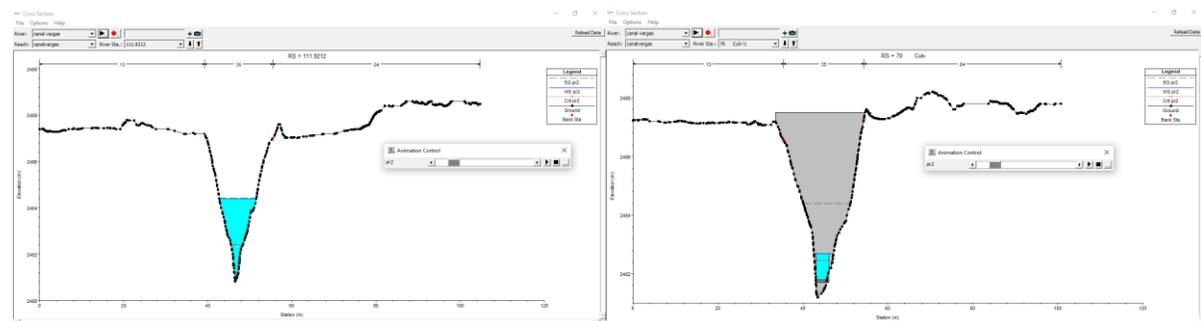
Figura 26

Secciones transversales periodo de retorno de 2 años



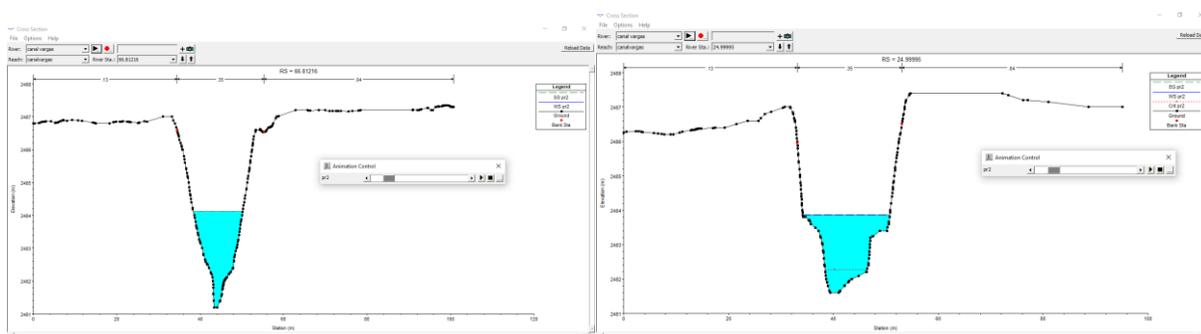
Sección 250

Sección 120.697



Sección 111.9212

Sección 70



Sección 66.81

Sección 24.999

Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

En este caso podemos evidenciar que con un caudal de 6.30 m³/s la lámina de agua de las secciones situadas antes de la entrada del culvert incrementan su nivel, esto debido a que la capacidad de conducción hidráulica del culvert es de 3m/s, es decir, que hay un porcentaje del

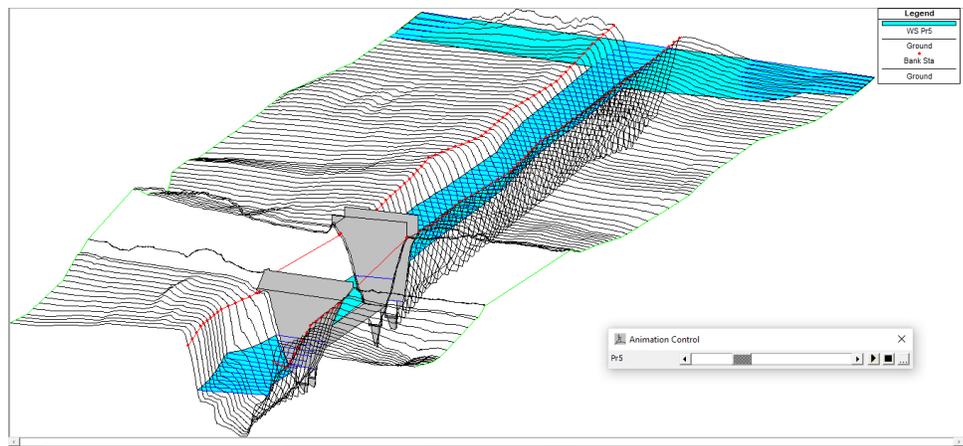
caudal que empieza a retenerse al contacto con la estructura del culvert y este genera un tipo de estancamiento generando incrementos en el volumen del agua.

Periodo de retorno 5 años

Con un periodo de retorno de 5 años obtenemos un caudal de 7.75 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones que tienen más relevancia.

Figura 27

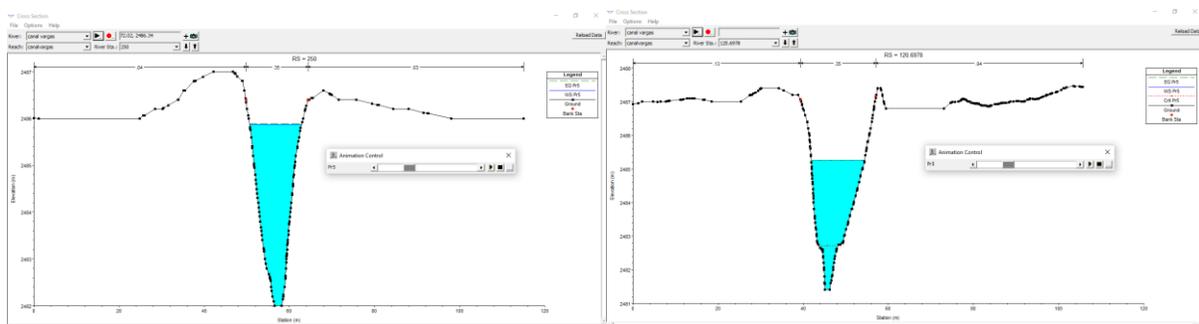
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 5 años, drenaje subfluvial



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

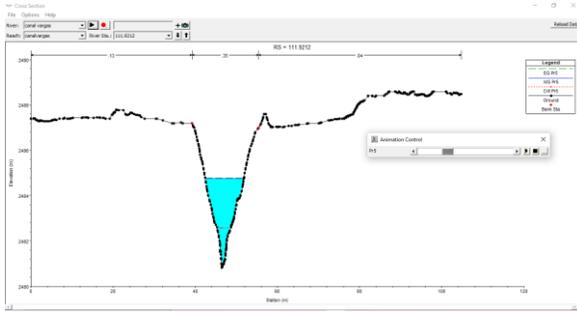
Figura 28

Secciones transversales periodo de retorno de 5 años

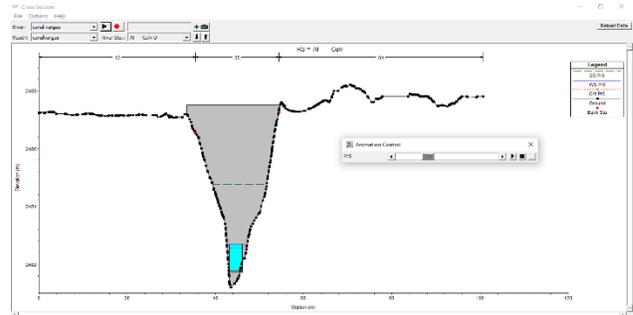


Sección 250

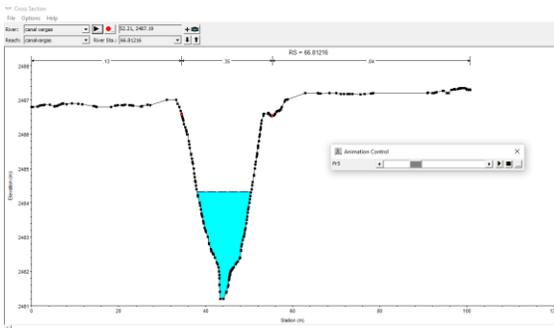
Sección 120.697



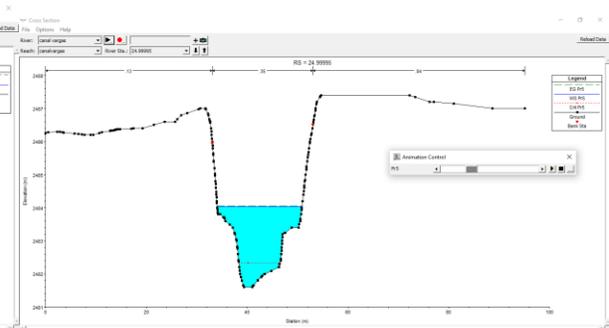
Sección 111.9212



Sección 70



Sección 66.81



Sección 24.999

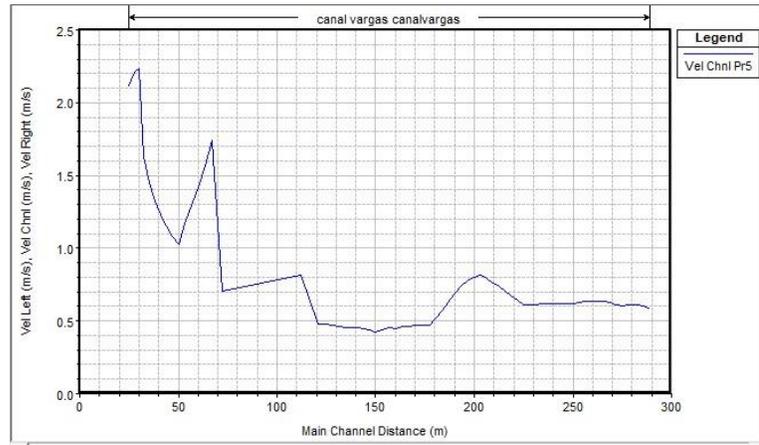
Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Con el aumento de caudal, podemos obtener los mismos efectos hidráulicos en las secciones aguas arriba de la entrada del culverts, estos efectos los obtendremos mientras sigamos aplicando caudales que excedan la capacidad de conducción del culverts, en este caso podemos ver que en las primeras secciones por el incremento de su nivel empiezan a presentar inundaciones.

Por otro lado, el centro del culverts no genera mayor nivel de agua de lo que el canal puede conducir, pero al estar en su total capacidad puede generar aumentos de presión hidráulica en la estructura, lo que puede causar deterioro de esta. También se evidencia que las secciones seguidas a la salida del culverts vuelven a incrementar su nivel de agua y adicionalmente aumenta su velocidad de flujo (ver figura 29).

Figura 29

Perfil de velocidades periodo de retorno 5 años



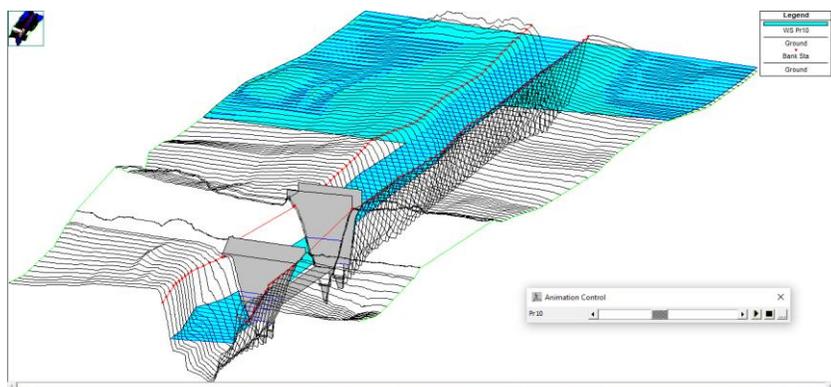
Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Periodo de retorno 10 años

Con un periodo de retorno de 10 años obtenemos un caudal de 8.95 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones.

Figura 30

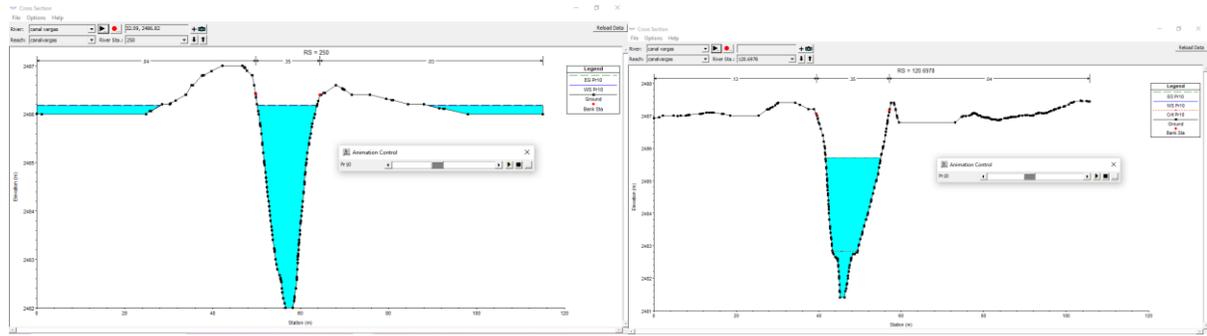
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 10 años



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

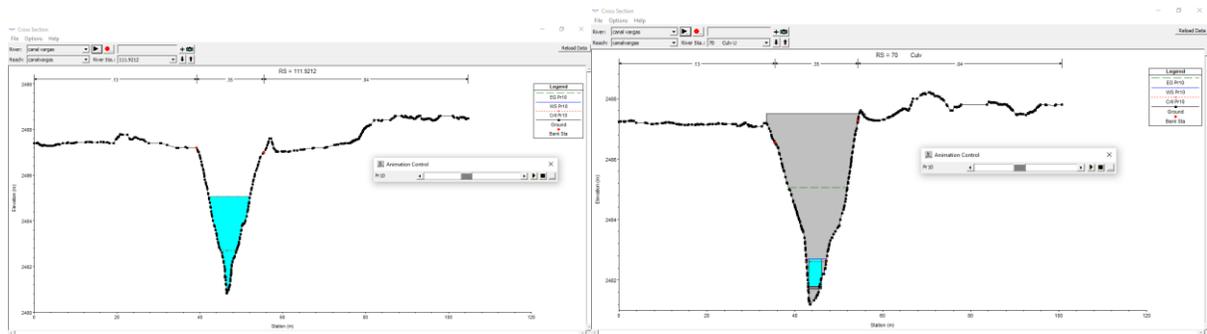
Figura 31

Secciones transversales periodo de retorno de 10 años



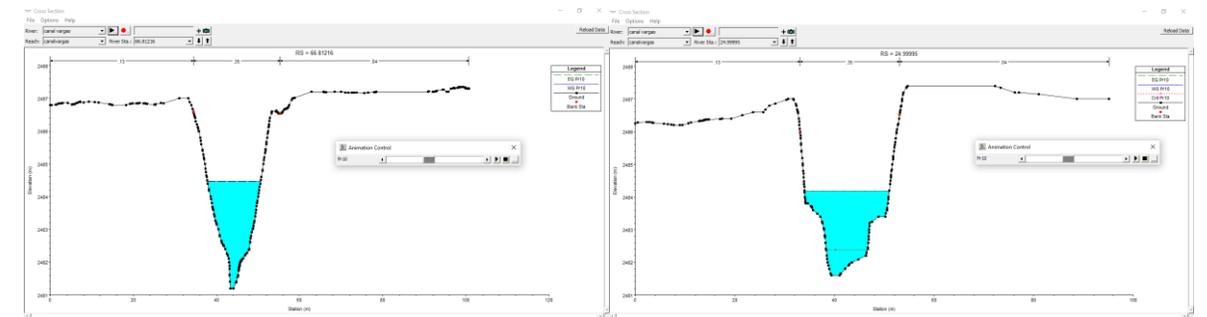
Sección 250

Sección 120.697



Sección 111.92

Sección 70



Sección 66.81

Sección 24.999

Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

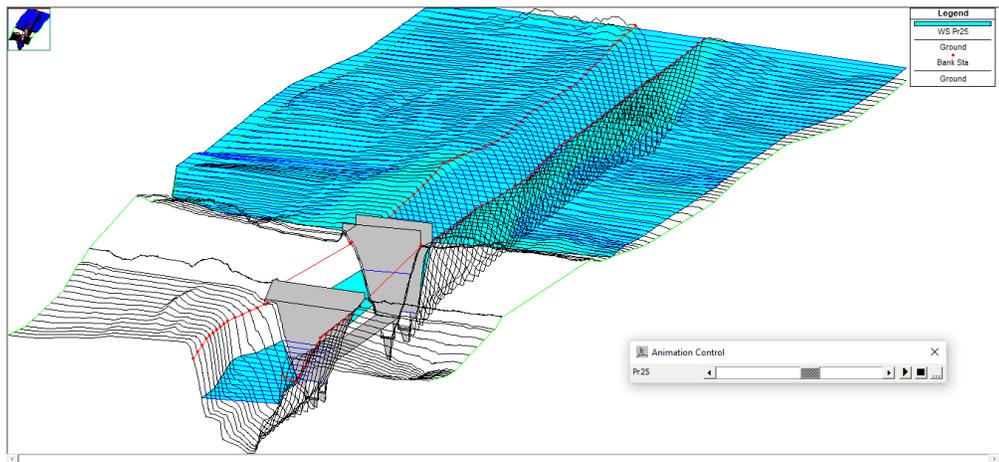
De igual manera que el caso anterior el aumento de caudal genera más zona de inundación, en estas etapas la estructura de los culverts empieza a obstruir el flujo, potencializando la generación de inundaciones.

Periodo de retorno 25 años

Con un periodo de retorno de 25 años obtenemos un caudal de 11.15 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones.

Figura 32

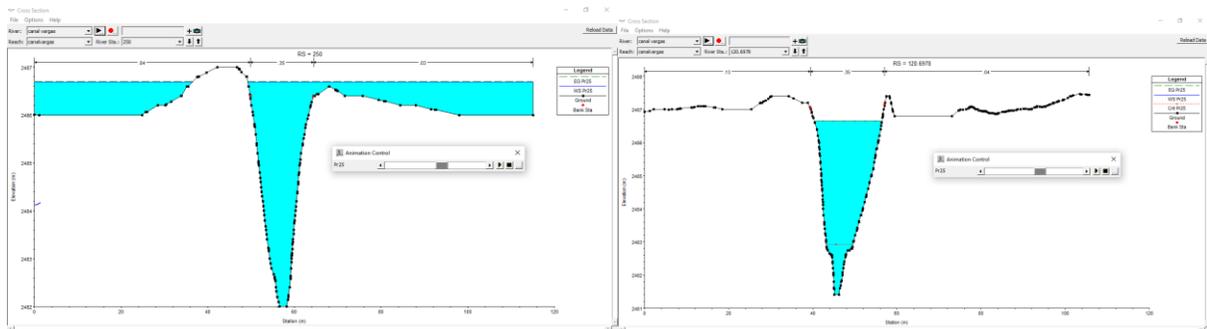
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 25 años, drenaje subfluvial



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

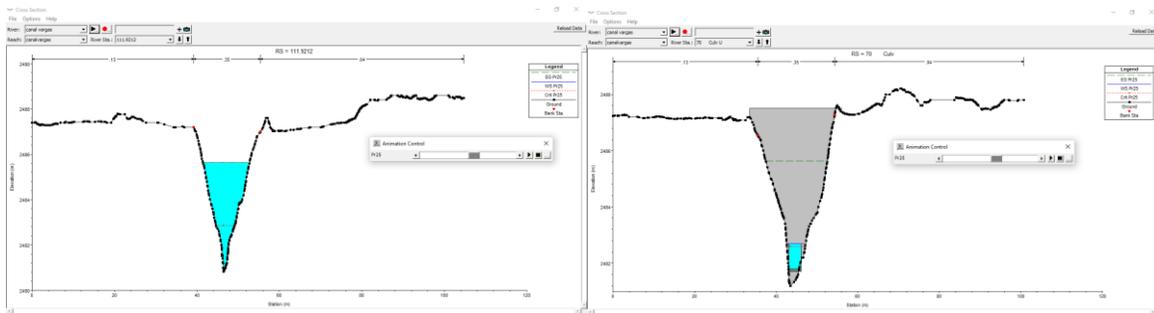
Figura 33

Secciones transversales periodo de retorno de 25 años



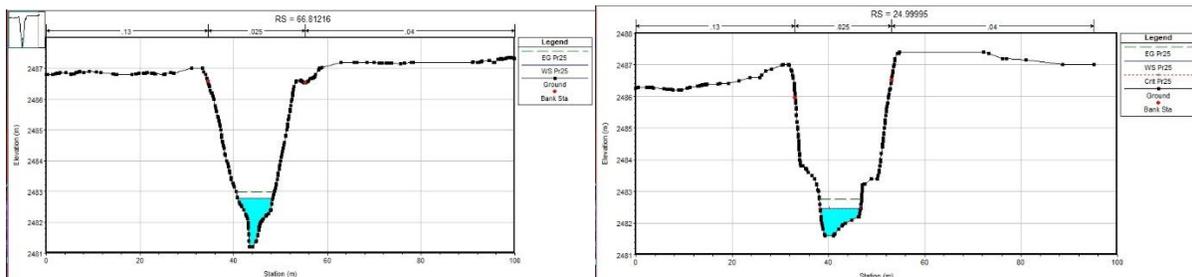
Sección 250

Sección 120.697



Sección 111.921

Sección 70



Sección 66.8

Sección 24

Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

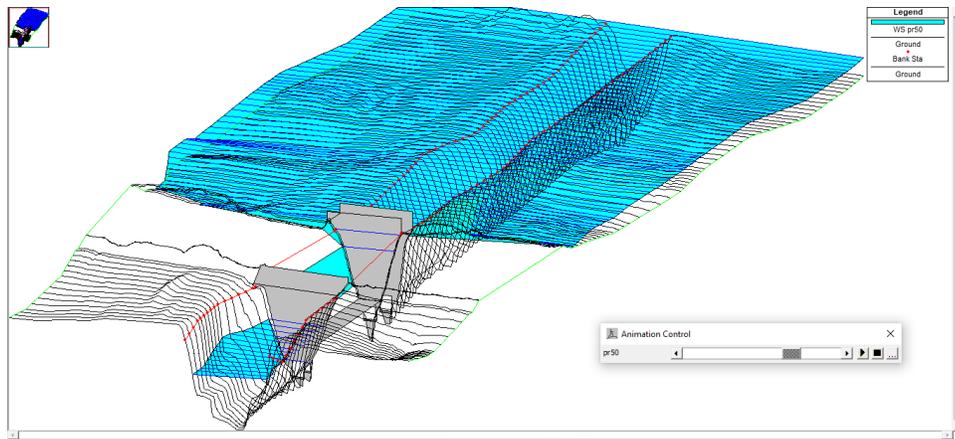
Para un caudal de 11.15 m³/s las secciones anteriores a la entrada del culverts está totalmente inundada, se resalta que la estructura hace que disminuya la capacidad de conducción del drenaje, en esta etapa la zona de inundación es mayor y se evidencia que el flujo del agua empieza a introducirse en el cauce del río Chicamocha.

Periodo de retorno de 50 años

Con un periodo de retorno de 50 años obtenemos un caudal de 12.89 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones.

Figura 34

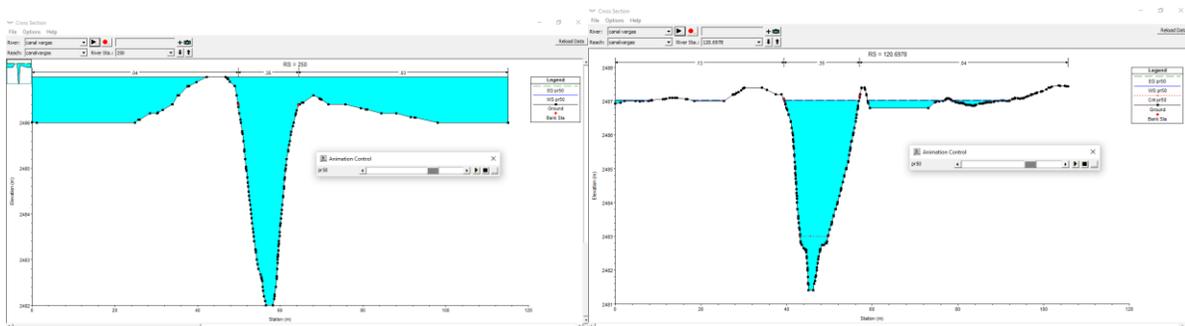
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 50 años, drenaje subfluvial



Fuentes: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

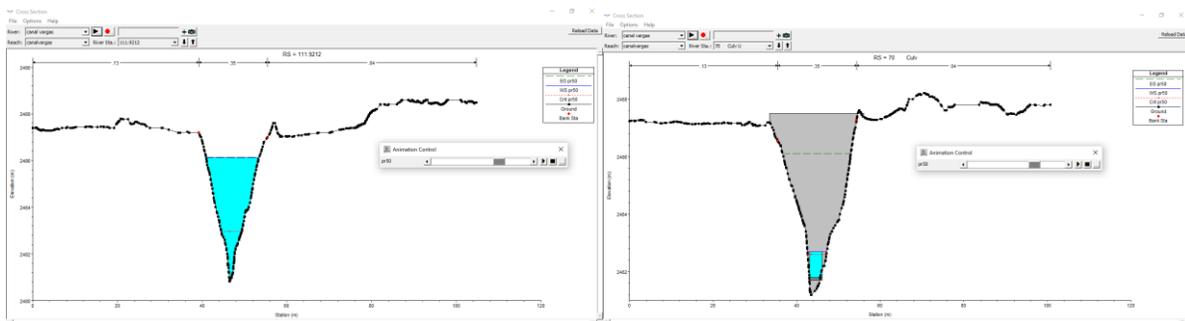
Figura 35

Secciones transversales periodo de retorno de 50 años



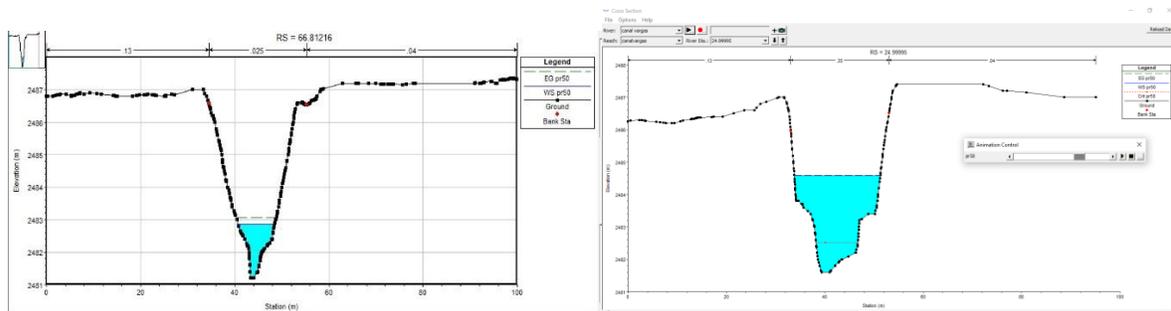
Sección 250

Sección 120.697



Sección 111.921

Sección 70



Sección 66.8

Sección 24

Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Para estos periodos de retorno es evidente que el caudal del drenaje subfluvial ya invade el cauce del río Chicamocha y aumenta su nivel de lo que se puede inferir es que al contacto del flujo del río y el flujo del drenaje este último es sumado al caudal del Río lo que potencializa las inundaciones y el deterioro de la infraestructura.

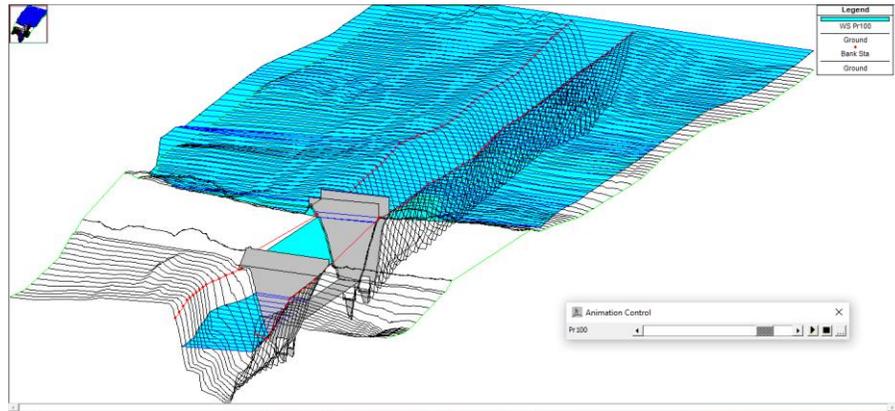
Con este periodo de retorno la presión generada por el incremento de agua es mayor por la parte externa del culverts, y la probabilidad de deterioro o daño total de la infraestructura es mayor.

Periodo de retorno de 100 años

Con un periodo de retorno de 100 años obtenemos un caudal de 15.37 m³/s, para lo cual adquirimos unos perfiles de las secciones.

Figura 36

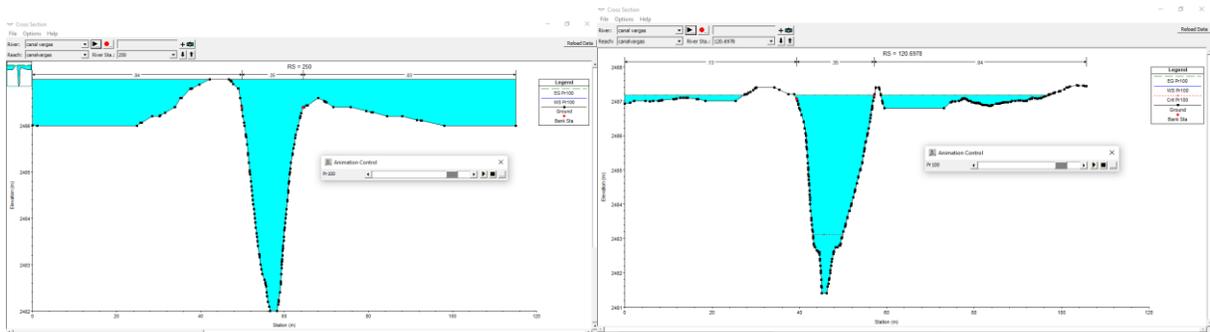
Perfil longitudinal para el periodo de retorno de 100 años, drenaje subfluvial



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

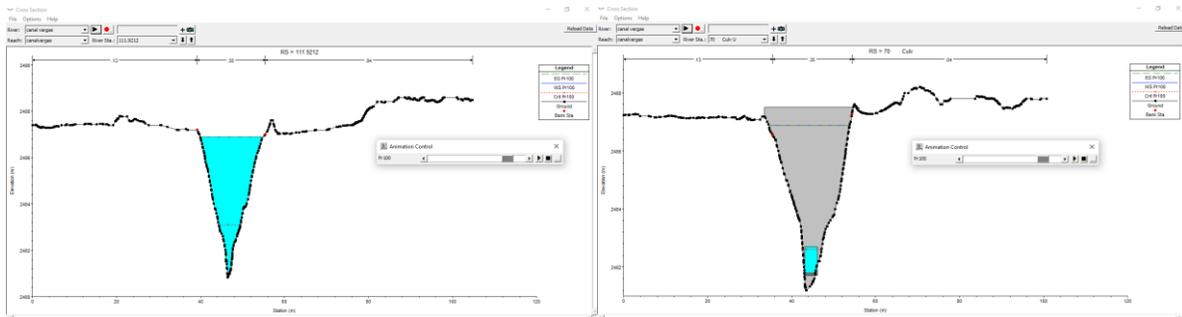
Figura 37

Secciones transversales periodo de retorno de 100 años



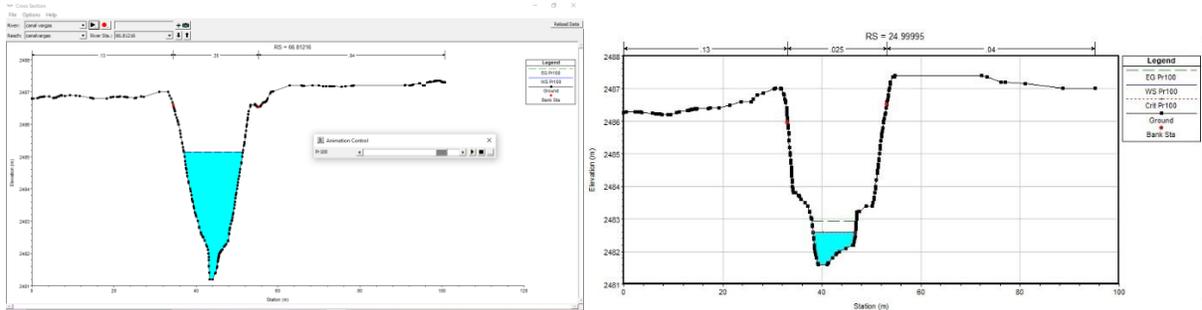
Sección 250

Sección 120.697



Sección 111.942

Sección 70



Sección 66.8

Sección 24

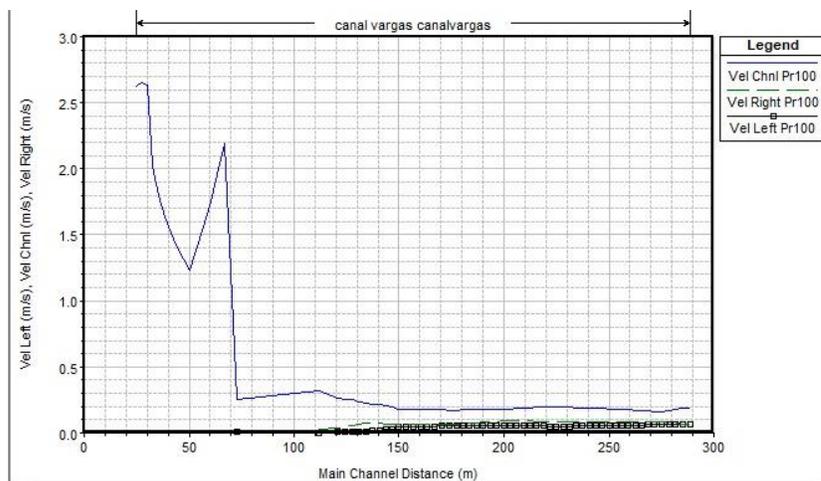
Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Se demuestra que las secciones de la salida del culverts empiezan a subir excesivamente y con velocidades muy altas (ver Figura 38) estoy impacta de manera negativa a toda la zona de las laderas y a las actividades que encontramos cerca.

La capacidad hidráulica del drenaje es muy poca, a comparación del río Chicamocha, pero en el instante de que el flujo del drenaje invada el cauce del río y este se suma con el caudal del río habrá un incremento sustancial en la probabilidad de inundación y daños en la infraestructura.

Figura 38

Perfil de velocidades de flujo para periodo de retorno 100 años



Fuente: Resultados generados de la investigación en Hec-Ras

Conclusiones

Es evidente que las obras hidráulicas cambian la dinámica del flujo, especialmente cuando estas no tienen estudios preliminares del comportamiento de los cauces ni en condiciones mínimas, ni máximas, pues estas obras ofrecen una rápida solución a problemas encontrados en las zonas de influencia, pero en la mayoría de casos esta solución puede ser perjudicial en condiciones extremas.

El río Chicamocha y el Drenaje subfluvial no tiene interacción entre sí en escenarios de normales, pero se infiere que en condiciones críticas y con caudales altos estos dos cauces tienden a unirse y a efecto de ellos pueden ocasionar múltiples impactos negativos por aumentar la posibilidad de inundación de manera masiva.

La influencia que tienen las condiciones estructuras es muy importante dentro de este estudio, según eso, estas estructuras son los principales agentes de las inundaciones provocadas en tiempos de altas precipitaciones por afectar la capacidad hidráulica de los cauces, pues estas en condiciones críticas empiezan a actuar como obstrucciones del flujo.

Las velocidades de flujo son afectadas de manera directa por la infraestructura en los dos cauces pues encontramos que las velocidades disminuyen y se retienen en al contacto con la estructura, pero también aumentan en las secciones aguas abajo después de la infraestructura, lo que puede llegar a causar daños importantes en la zona aledaña en casos de inundación.

Recomendaciones

Se sugiere un estudio hidrológico detallado de la zona de estudio, pues en el desarrollo de este proyecto se tomaron caudales de los periodos de retorno establecidos en estudios previos

Se le recomienda a la entidad que le interese actualizar la información geomorfológica de la zona de estudio, pues estudios ejecutados en la zona pueden llegar a tener error alto por la antigüedad de los datos topográficos y el sesgo de sus datos.

La altura de la lámina de agua en las secciones aguas arriba de la infraestructura tanto como del Río y el drenaje subfluvial suelen ser altas por la obstrucción de flujo, se sugiere darles más altura a las laderas (jarillones) de los dos cauces al igual que donde se encuentra los culverts, para minimizar efectos de inundación.

La capacidad portante de la estructura que pasa por debajo del Río Chicamocha puede verse afectada por las altas presiones que puede generar el flujo en altos volúmenes de agua, por esta razón se sugiere refuerzo y/o reestructuración de la infraestructura.

La capacidad de conducción hidráulica del culverts del drenaje subfluvial es tan solo de 3 m³/s, en escenarios extremos esta capacidad suele estar muy por debajo de lo necesario, dentro de la recomendación se encuentra darle más amplitud a esta cavidad sin afectar la estructura y/o construcción de zonas de alivio dentro del drenaje.

Debido que la capacidad del culverts es bajo se recomienda que la comunidad adopte estrategias de gestión para el mantenimiento del drenaje subfluvial al igual que campañas de educación ambiental para que no arrojen basuras dentro de este, pues su capacidad también se puede llegar a ver afectada por acumulación de material vegetal, basuras y cualquier agente externo que actúe como obstrucción.

Bibliografía

- Amado, O. D. (2015). *Evaluación hidráulica de la influencia del vertimiento de la PTAR de Sogamoso en el Río Chicamocha*. (Trabajo de Grado, Universidad de Boyacá).
- Brunner, G. (2016). Energy Loss Coefficients, *Manual Hec-Ras, US army corps of engineers, Hydrologic Engineering Center*.
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2012). *Valoración de daños y pérdidas. Ola invernal en Colombia, 2010-2011*.
<https://www.cepal.org/es/publicaciones/37958-valoracion-danos-perdidas-ola-invernal-colombia-2010-2011>
- Chow, V. T., Maidment, D., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Mcgraw-Hill Interamericana, S.A.
- Consejo Municipal de Duitama. (2017). *Sesión ordinaria del Concejo Municipal de Duitama, 10 de mayo, (18)*.
<https://www.concejomunicipaldeduitama.gov.co/wp-content/uploads/2022/09/ACTA-032-2017.pdf>.
- Estrada, G. (s.f.). *Laboratorio de hidráulica de canales*.
http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2013/02/05/Manual_de_Hidraulica_de_Canales.pdf
- Fernández de Córdoba, C., León Méndez, A., y Martínez Ramírez, P. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de manning para causas naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, (1),7-31.
- Fisher, R. A., y Tippett, H. C. (1928). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 180-191.
- Frechet, M. (1927). Sur la loi de probabilité de L'ecart maximum ("On the probability law of maximum values"). *Annales de la Societe Polnaise de Mathematique*, 93-116.
- Gallego Arias, S., y Carvajal Serna, L. (2017). Regionalización de curvas de duración de caudales en el Departamento de Antioquia-Colombia. *Revista EIA*, 14(27), 21-30.

- Gumbel, E. (1941). The return period of flood flows. *The Annals of Mathematical Statistics* 12 (2),163-190.
- Guarín Flórez, N. de J., y López Ospina, G. V. (1986). *Regionalización del comportamiento esperado de estructuras hidráulicas de derivación operadas a filo de agua*. (Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia).
- Grupo de Investigación Gestión Ambiental y Gestión de Recursos Hídricos. (2013). *Modelo de simulación para la gestión integral de las aguas residuales y pluviales del municipio de Duitama enmarcado dentro de la complementación y ajuste del plan de saneamiento y manejo de vertimientos - PSMV*. Universidad de Boyacá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2011). *Amenazas inundación*. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>
- Moreno, J. H. (2011). *Susceptibilidad del departamento de Boyacá a inundaciones y deslizamientos*. Gobernación de Boyacá. <http://www.boyaca.gov.co/intensas-lluvias-generan-inundaciones-y-derrumbes-en-boyaca/>
- Sarapirome, S., Surinkum, A. y Saksutthipong, P. (2002). *Application of DEM Data to Geological Interpretation: Thong Pha Phum Area, Thailand*. <https://a-a-r-s.org/proceeding/ACRS2002/Papers/GEO02-3.pdf>
- Uyaban, J. S. (2018). Modelado de los histogramas de frecuencias de los valores diarios de caudales y arrastre de sedimentos del Río Fonce (San Gil, Santander) Mediante El Sistema de Pearson. (Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada). <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17841?show=full>
- Wibull, W. A. (1939). *A statistical theory of the strength of materials*. Generalstabens litografiska anstalts förlag y Stockholm. <https://searchworks.stanford.edu/view/1150953>