



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TEGNOLOGIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES.

**Evaluación hidrológica e hidráulica del río San Francisco en
el cantón Gualaceo**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

Autores

ADAN ELIAS QUITO BONILLA
WILLIAM HERNÁN PICÓN ILLESCAS

Director

CARLOS JAVIER FERNANDEZ DE CORDOVA WEBSTER

CUENCA – ECUADOR

2022

DEDICATORIA.

El presente trabajo está dedicado a toda mi familia, y de manera especial a mis padres Ancelmo y Carmelina, y a mis hermanos María, Mirian, Milton y Mélida, por el apoyo incondicional y el esfuerzo, que ellos siempre me supieron brindar durante la vida universitaria.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme brindado salud y fortaleza para llegar a terminar mi carrera universitaria, a mi padres y hermanos por brindarme siempre el apoyo y los consejos para cada día salir adelante, de manera muy especial a mi hermano Milton, por ese esfuerzo y apoyo que me brindo en cada etapa de la universidad.

Al grupo de profesores que conforman la Facultad de Ciencia y Tecnología, que con sus conocimientos que compartieron, me ayudaron a formarme como profesional y como persona, al ingeniero Javier Fernández de Córdova, por su gran ayuda en este presente trabajo de titulación, por el conocimiento y la capacidad técnica que él supo brindar.

DEDICATORIA.

Esta investigación se la dedico a mis padres Salvador y Elvia por el apoyo incondicional en el transcurso de mi vida académica, por los ánimos para poder cumplir cada una de mis metas; a mis hermanos Cristian y Sebastián por el amor y las alegrías compartidas.

AGRADECIMIENTO.

En primer lugar, agradezco a Dios por la sabiduría, la salud y el haberme brindando una familia maravillosa que está en todo momento a mi lado, brindándome su apoyo y amor. Un agradecimiento especial al ingeniero Javier Fernández de Córdova, por brindar su conocimiento para poder concluir este proyecto de grado. De igual manera a todos los docentes de la Universidad del Azuay por compartir su conocimiento en esta etapa de mi vida.

"Evaluación hidrológica e hidráulica del río San Francisco en el cantón Gualaceo"

RESUMEN

En el presente trabajo se realizaron dos modelos hidrológicos, uno en la zona alta y otro en la zona media del río San Francisco, con el software HEC-HMS, lo que permitió obtener los caudales en cada subcuenca; en la parte baja del río se construyó un modelo hidráulico para obtener manchas de inundación con HEC-RAS, ya que en esta zona existen problemas graves por los constantes desbordamientos. Para generar el modelo hidráulico se realizó previamente, un levantamiento topográfico en las 3 zonas, esto para obtener los modelos digitales de elevaciones (MDE), y con estos realizar las respectivas simulaciones en cada zona, así también se proponen zonas para la ubicación de estaciones de monitoreo hidrometeorológico, que servirán para tener un constante seguimiento del río en las diferentes épocas del año.

Palabras clave: Hec-HMS, Hec-RAS, MDE, simulaciones, inundaciones, estaciones.



.....
Javier Fernández de Córdova Webster.
Director del Trabajo de Titulación.



.....
José Fernando Vásquez Calero.
Director de Escuela.



.....
Adan Elias Quito Bonilla.
Autor.




.....
William Hernán Picón Illescas.
Autor.

"Hydrological and hydraulic evaluation of the San Francisco River in the Gualaceo canton"

ABSTRACT

In the present work, two hydrological models were made, one in the upper zone and the other in the middle zone of the San Francisco River, with the HEC-HMS software, which allowed obtaining the flows in each subbasin; In the lower part of the river, a hydraulic model was built to obtain flood spots with HEC-RAS, since in this area there are serious problems due to constant overflows. To generate the hydraulic model, a topographical survey was previously carried out in the 3 zones, this was done to obtain the digital elevation models (DEM), and with these to carry out the respective stimulations in each zone, as well as zones for the locations of stations. Hydrometeorological monitoring will serve to have constant monitoring of the river at different times of the year.

Keywords: Hec-HMS, Hec-RAS, MDE, simulations, floods, stations.



Javier Fernández de Córdova Webster.

Director of Degree Work.



José Fernando Vásquez Calero.

Principal



Adan Elias Quito Bonilla.

Author.



William Hernán Picón Illescas.

Author.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES.....	3
OBJETIVOS.....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos	4
CAPITULO I.....	5
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO.....	5
1.1 Estado del Arte.....	5
1.2 Marco Teórico	6
1.3 Ubicación e Información del Proyecto	7
CAPÍTULO II.....	9
ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	9
2.1 Información disponible para el estudio.....	9
2.2 Estudio Hidrológico	9
2.3 Pasos para delimitar la Cuenca.....	10
2.4 Delimitación de las Cuencas.....	11
2.4.1 Cuenca Alta.....	11
2.4.2 Cuenca Media.....	29
2.5 Obtención de caudales máximos por el método racional.....	44
2.6 Comparación de caudales máximos en (m³/s).....	50
CAPITULO III.....	51
ESTUDIO HIDRÁULICO	51
3.1 Información del tramo a ser estudiado.....	51
3.1.1 Tramo de Estudio.....	51
3.1.2 Obtención de caudales máximos.....	52

3.1.3 Obtención de los valores de n de Manning.	55
3.2 Construcción del modelo digital de elevaciones (MDE).	55
3.3 Modelación Hidráulica en HEC-RAS.	57
3.3.1 Creación de la Geometría en RAS Mapper	57
3.3.2 Ingreso de Datos en el HEC-Ras.	60
3.3.3 Simulación del modelo.	63
3.4 Resultados.	64
CAPITULO IV	69
PROPUESTA DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO	69
4.1 Descripción de Estaciones de Monitoreo	69
4.1.1 Estación Pluviométrica	69
4.1.2 Estación de Sensor Ultrasónico de Nivel.....	69
4.1.3 Regletas Limnimétricas.	70
4.2 Generalidades para la Ubicación de Estaciones.....	70
4.2.1 Estación Pluviométrica	70
4.2.2 Sensor Ultrasónico	71
4.2.3 Regletas limnimétricas.....	71
4.3 Ubicaciones en la zona de Estudio.	72
4.3.1 Ubicación de estación pluviométrica	72
4.3.2 Ubicación de Estación de Sensor Ultrasónico de Nivel.....	74
4.3.3 Ubicación de Regletas Limnimétricas.	80
CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	84
ANEXOS.....	88

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de los tramos a ser estudiados..... 8

Figura 2.1. Secuencia de comandos..... 10

Figura 2.2. Delimitación cuenca alta. 12

Figura 2.3. Subcuencas de aporte de la cuenca alta..... 12

Figura 2.4. Ubicación de estaciones pluviométricas..... 15

Figura 2.5. Ecuaciones IDF para la estación Gualaceo M0139 15

Figura 2.6. Cuadro de intensidades de la estación Sígsig M0424. 16

Figura 2.7. Polígonos de Thiessen en la cuenca alta. 17

Figura 2.8. Curva IDF de la estación Sígsig M0424 18

Figura 2.9. Hietograma de diseño (T=2 años) de la estación de Sígsig M0424 20

Figura 2.10. Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca alta. 20

Figura 2.11. Cobertura vegetal cuenca alta..... 21

Figura 2.12. Tipo de suelo cuenca alta. 21

Figura 2.13. Mapa interpolado de la cuenca alta. 22

Figura 2.14. Cuenca alta en HEC-HMS 24

Figura 2.15. Hidrograma (T=2 años) de la cuenca alta..... 26

Figura 2.16. Hidrograma (T=5 años) de la cuenca alta..... 27

Figura 2.17. Hidrograma (T=10 años) de la cuenca alta..... 27

Figura 2.18. Hidrograma (T=25 años) de la cuenca alta..... 28

Figura 2.19. Hidrograma (T=50 años) de la cuenca alta..... 28

Figura 2.20. Delimitación cuenca media..... 29

Figura 2.21. Subcuencas de aporte de la cuenca media. 30

Figura 2.22. Polígonos de Thiessen de la cuenca media..... 32

Figura 2.23. Curva IDF de la estación Gualaceo M0139..... 33

Figura 2.24. Hietograma de diseño (T=2 años) de la estación de Gualaceo M0139..... 34

Figura 2.25. Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca media..... 35

Figura 2.26. Cobertura vegetal de la cuenca media..... 36

Figura 2.27. Tipo de suelo de la cuenca media. 36

Figura 2.28. Mapa interpolado de la cuenca media. 37

Figura 2.29. Cuenca media en HEC-HMS..... 39

Figura 2.30. Hidrograma (T=2 años) de la cuenca media.....	41
Figura 2.31. Hidrograma (T=5 años) de la cuenca media.....	42
Figura 2.32. Hidrograma (T=10 años) de la cuenca media.	42
Figura 2.33. Hidrograma (T=25 años) de la cuenca media.	43
Figura 2.34. Hidrograma (T=50 años) de la cuenca media.	44
Figura 2.35. Textura del suelo (%)	45
Figura 2.36. Mapa triangulado entre pendiente, textura y uso de suelo.	46
Figura 2.37. Ubicación de la estación pluviométrica M0139.....	47
Figura 3.1. Tramo donde se realizará el estudio.	51
Figura 3.2. Ubicación de la estación M0139	53
Figura 3.3. Superficie del tramo de estudio.....	56
Figura 3.4. Modelo Digital de Elevación de la cuenca.	57
Figura 3.5. Geometría del cauce principal del río.....	58
Figura 3.6. Geometría de las orillas del río.....	58
Figura 3.7. Geometría de las zonas de inundación.	59
Figura 3.8. Secciones transversales.	60
Figura 3.9. Ingreso de valores de Manning.	61
Figura 3.10. Ingreso de caudales máximos.....	62
Figura 3.11. Ingreso de condiciones de borde.....	63
Figura 3.12. Análisis de flujo constante.....	63
Figura 3.13. Simulación finalizada.	64
Figura 3.14. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=2 años.	65
Figura 3.15. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=5 años.	65
Figura 3.16. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=10 años.....	66
Figura 3.17. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=25 años.....	66
Figura 3.18. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=50 años.....	67
Figura 3.19. Reconstrucción de Inundación 3 de julio de 2022.....	68
Figura 3.20. Inundación para un TR= 2 años.	68
Figura 4.1. Mapa de ubicación de Estación Pluviométrica.	73
Figura 4.2. Tramo recto antes del puente.....	74
Figura 4.3. Ubicación de la estación dentro del puente San Francisco.....	75
Figura 4.4. Mapa de ubicación de Estación Ultrasónica de Nivel.....	76

Figura 4.5. Tramo recto antes del puente S/N..... 77

Figura 4.6.Ubicación de la estacion dentro del puente S/N..... 78

Figura 4.7. Mapa de ubicación de la Estación Ultrasónica de Nivel..... 79

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Características de las subcuencas de aporte.....	13
Tabla 2.2. Cálculo del tiempo de concentración de las subcuencas de aporte.....	14
Tabla 2.3. Intensidades de la estación de Sígsig.....	18
Tabla 2.4. Precipitaciones (T=2 años) de la estación de Sígsig M0242.....	19
Tabla 2.5. Cálculo de número de curva de la cuenca alta.....	23
Tabla 2.6. Datos de subcuencas para el modelamiento en HEC-HMS de la cuenca alta.	25
Tabla 2.7. Datos para el tránsito de avenidas de la cuenca alta.	25
Tabla 2.8. Caudales máximos de la cuenca alta en HEC-HMS.....	29
Tabla 2.9. Características de las subcuencas de aporte.....	30
Tabla 2.10. Cálculo del tiempo de concentración de subcuencas de aporte.	31
Tabla 2.11. Intensidades de la estación de Gualaceo.....	33
Tabla 2.12. Precipitaciones (T=2 años) de la estación de Gualaceo M0139.....	34
Tabla 2.13. Cálculo del número de curva de la cuenca media.....	38
Tabla 2.14. Datos de subcuencas para el modelamiento en HEC-HMS de la cuenca media.	40
Tabla 2.15. Datos para el tránsito de avenidas de la cuenca alta.	40
Tabla 2.16. Caudales máximos de la cuenca media en HEC-HMS.....	44
Tabla 2.17. Valores del coeficiente de escorrentía superficial.	46
Tabla 2.18. Tiempo de concentración de las tres cuencas estudiadas.	47
Tabla 2.19. Intensidades de la cuenca baja.	48
Tabla 2.20. Intensidades de la cuenca media.....	48
Tabla 2.21. Intensidades de la cuenca alta.....	48
Tabla 2.22. Caudales máximos de la cuenca baja.....	49
Tabla 2.23. Caudales máximos de la cuenca media.....	49
Tabla 2.24. Caudales máximos de la cuenca alta.....	49
Tabla 2.25. Comparación de caudales de la cuenca alta.....	50
Tabla 2.26. Comparación de caudales de la cuenca media.....	50
Tabla 3.1 Valor de escorrentía para la cuenca.	52
Tabla 3.2 Tiempo de concentración de la cuenca.	52
Tabla 3.3. Ecuaciones de intensidad.	53
Tabla 3.4. Intensidades máximas para los periodos de retorno.	54
Tabla 3.5. Caudales máximos para los períodos de retorno.	54

Tabla 3.6. Condiciones de borde..... 62

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Gráficas de Hietogramas de diseño.....	88
ANEXO 2. Obtención de número de curva por el método SCS.....	96
ANEXO 3. Obtención del coeficiente de escorrentía superficial “C”	99
ANEXO 4: Curvas Intensidad Duración Frecuencia de la Estación M0139 Gualaceo.....	102
ANEXO 5: Selección de Valores de Manning.	103
ANEXO 6: Fotografías de Inundación.	105
ANEXO 7: Secciones Transversales del río.	106

Adan Elias Quito Bonilla

William Hernán Picón Illescas

Trabajo de Titulación

Ing. Carlos Javier Fernández de Córdova Webster

Julio 2022

Evaluación hidrológica e hidráulica del río San Francisco en el cantón Gualaceo

INTRODUCCIÓN.

El río San Francisco de 23627,649 m de longitud ubicado en el cantón Gualaceo de la provincia del Azuay, desemboca en el río Santa Bárbara, en la parte baja del río donde se encuentran ubicadas viviendas aledañas, se producen las mayores inundaciones y los desbordamientos del río cuando se producen unas intensas lluvias.

Conocer los caudales máximos para diferentes periodos de retorno es de suma importancia para la construcción de cualquier obra hidráulica. Los modelos hidrológicos buscan representar los procesos que se dan en una cuenca hidrográfica, y transforman una precipitación que cae sobre la cuenca en escorrentía. Para lograr obtener valores de caudales para los diferentes periodos de retorno se requiere una caracterización morfométrica de la cuenca, datos hidrometeorológicos de las estaciones, obtener el número de curva (NC) a partir de información sobre tipos y usos de suelo y obtener hietogramas de diseño asociados a los periodos de retorno.

Las inundaciones es un fenómeno natural que ha estado presente a lo largo de la historia, dicho fenómeno es provocado principalmente por el desborde de un río a causa de las intensas lluvias que se producen en la zona, el desbordamiento de un río es un serio problema que se debe realizar un estudio a fondo, ya que en casas aledañas a un río puede ocasionar grandes pérdidas tanto materiales como humanas.

Programas de libre acceso como: el HEC RAS y el HEC HMS son de gran ayuda en la ingeniería, ya que dichos programas ayudan a obtener los modelos hidrológicos e hidráulicos, estos modelos permiten conocer el comportamiento del río.

Este río no cuenta con ningún estudio hidrológico e hidráulico por tal motivo se realiza esta investigación, para simular el comportamiento de la cuenca y el río utilizando los programas HEC RAS y HEC HMS.

Este río no cuenta con ninguna estación de monitoreo, por lo que se pretende por parte de EMAPASG-EP colocar algunas estaciones, para esto en el presente trabajo se propondrán ubicaciones estratégicas, en cada una de las tres zonas establecidas, y con ellos la empresa podrá tener a futuro un constante monitoreo del río y de su comportamiento en cada una de las diferentes épocas.

ANTECEDENTES

El cantón Gualaceo perteneciente a la provincia del Azuay cuenta con 38.587 habitantes, sus principales actividades son la agricultura, el turismo y la artesanía. El cantón esta atravesado por 3 ríos, el Santa Bárbara, San Francisco y Guaymincay, dichos ríos que actúan de maneras muy distintas en las épocas del año en especial en épocas de lluvia, causando daños en los sembríos, daños materiales en las viviendas aledañas debido a los desbordes.

En el caso del río San Francisco de aguas cristalinas con un espectacular y caprichoso entorno natural se impone en el sector del mismo nombre. Es un espacio de conservación natural que conecta la zona rural con la ciudad, separados por un km.

Esta investigación se va a centrar en dicho río ya que no cuenta con ningún estudio realizado, el proyecto construirá un modelo hidrológico e hidráulico utilizando los softwares HEC-HMS y HEC RAS, respectivamente.

Para el estudio, se van a analizar 3 tramos del río, el primero ubicado en la zona alta en el puente San Francisco, el segundo tramo está ubicado en la zona media de la cuenca, ahí se encuentra otro puente con el mismo nombre de San Francisco, en estos dos tramos se va a realizar solo un estudio hidrológico ya que en estas zonas no existen desbordamientos del río, como último tramo se va a realizar desde aguas arriba del puente llamado vía al Oriente, y aguas abajo hasta la unión del río San Francisco con el río Santa Barbara, aquí se realizará un estudio hidráulico ya que en esta parte del río se producen inundaciones de magnitud considerable ocasionando malestares e incomodidad a las personas que viven en la zona, y en múltiples ocasiones el caudal de este río es de gran magnitud, e ingresa en la mayoría de los inmuebles ubicados en las zonas de la orilla de este río.

Este río tiene problemas de inundación desde muchos años atrás, ya que no cuenta con ningún instrumento para que este sea monitoreado constantemente, y al no tener ningún estudio llevar un control sobre el comportamiento de dicho río es una tarea difícil, para esto se propondrá la ubicación de estaciones de monitoreo hidrometeorológicas, y de esta manera se podrá llevar un control del comportamiento de dicho río.

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar un estudio Hidrológico e Hidráulico, del río San Francisco en el cantón Gualaceo.

Objetivos Específicos

- 1 Realizar la modelación hidrológica de la cuenca del río San Francisco para obtener caudales por la presencia de lluvias intensas.
- 2 Realizar el modelo hidráulico en la zona baja del río San Francisco desde el puente vía al Oriente hasta la unión con el río Santa Barbara.
- 3 Determinar las zonas más vulnerables a zonas de inundaciones en el tramo comprendido entre, puente vía al Oriente y la unión del río San Francisco con el río Santa Bárbara.
- 4 Proponer la ubicación de estaciones de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca del río San Francisco.

CAPITULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1 Estado del Arte.

A lo largo de toda la historia se ha registrado un sinnúmero de desastres naturales, que han devastado zonas pobladas y reservas naturales, siendo las inundaciones uno de los principales problemas. Mediante estudios hidrológicos e hidráulicos, se puede tomar una decisión para alertar sobre futuros desastres o que los eventos no provoquen mayores problemas.

A continuación, se puede ver ejemplos de trabajos relacionados con el tema de investigación.

- En el proyecto de (Zambrano Valdez, 2020) se realiza un estudio Hidrológico – Hidráulico de la quebrada “El Chorro” debido al incremento de caudal que se produce en la misma por las intensas lluvias. Se realiza una modelación tanto hidrológica como hidráulica, mediante los programas HEC-HMS y HEC-RAS, respectivamente. Para el estudio hidrológico también se utiliza el método racional para hallar los caudales máximos y compararlos con los del modelo HEC-HMS. Se determinaron los caudales máximos en distintos períodos de retorno para obtener los impactos que se podrían dar a lo largo del tramo.
- Esta tesis (Barrera Ochoa, 2020) consiste en la modelación hidráulica en dos dimensiones de un tramo del río Yanuncay usando el software IBER versión 2.5. Se realizaron varias simulaciones con el modelo para obtener el movimiento del agua al momento de una inundación y las velocidades más críticas en el río. El modelo fue previamente calibrado con información recolectada en campo de las inundaciones reales sucedidas en el tramo de estudio.
- En el trabajo de titulación de (Caivinagua Arévalo, 2020) se realiza la modelación hidráulica en dos dimensiones de un tramo del río Yanuncay comprendido entre la calle Ciudad de Cuenca (Puente de Misicata) y Av. de las Américas, empleando el programa IBER. Se parte de la información obtenida mediante fotogrametría, con una resolución de

6 centímetros. Se generó un modelo digital de elevaciones (MDE), con el cual se ejecutó varias simulaciones con diferentes caudales para obtener manchas de inundación y velocidades de flujo.

- En el trabajo de titulación de (Castro Salinas, 2015) se realiza la construcción de un modelo físico que permita evaluar el comportamiento del flujo, se utiliza el programa de HEC-RAS en 1-D, y el IBER en 2-D, para determinar los niveles de flujo y las obras hidráulicas que permitan captar el caudal indicado, en IBER se asigna una condición de borde el régimen de flujo (subcrítico), y en HEC-RAS se ingresa la pendiente del cauce, de la modelación en 1-D y 2-D, se obtuvo mapas de inundaciones semejantes lo que indica, que se puede usar el modelo de HEC-RAS para modelizar el flujo en este río.
- En el trabajo de titulación de (Maza, 2018), como primer punto se realiza una red neuronal perceptrón multicapa de retro-propagación con Matlab para pronosticar caudales hasta tres días empleando datos de lluvia y caudal. En segundo lugar, se realiza una modelación fluvial con HEC-RAS para calibración y con IBER para modelar seis hidrogramas de crecida, lo que dio como resultado la ubicación de puntos de desbordamiento, áreas máximas, alertas y mapas de inundación de la zona.
- En la tesis de (Arteaga, 2017), se desarrolla un modelo hidrológico lluvia-escorrentía con HEC-HMS para el pronóstico hidrológico y de eventos de crecida en la cuenca del río Cañar, ya que el poblado de Puerto Inca ha sufrido por varios años los efectos de la crecida de dicho río.

1.2 Marco Teórico

Para tener un concepto claro de los estudios que se propone realizar en este trabajo, es necesario tener los conceptos claros y una terminología adecuada, para comprender el proceso que se plantea realizar.

- El estudio hidrológico engloba el cálculo de parámetros morfométricos, tiempos de concentración, duración e intensidad de la lluvia y cálculo de caudales a partir de diferentes metodologías.
- La cuenca de drenaje o hidrográfica de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido (Villón, 2002).
- Métodos Hidrológicos e hidráulicos: son capaces de generar la estimación de los caudales generados en una cuenca o corriente y el cálculo de las velocidad y calados con los que circularán por un determinado tramo fluvial (Díez-Herrero, et.al.2008)
- Análisis Hidrológico: estudio en el cual se pretende determinar los caudales asociados a varios períodos de retorno para la cuenca (Ana Cecilia Arbeláez A., María Victoria Vélez O. y Ricardo Smith Q., 1997)

1.3 Ubicación e Información del Proyecto

Las zonas de estudio corresponden a tres tramos del río San Francisco, ubicadas en tres puentes, el primero comenzando en la zona alta el puente llamado San Francisco, el segundo en la zona media del río llamado igual que el primero puente San Francisco, en estos dos puentes antes mencionados se va a realizar en cada uno de ellos un estudio hidrológico y el tercero en la parte baja donde se localiza la zona urbana de Gualaceo, conocido como puente vía al Oriente, en donde se realizará un estudio hidráulico para obtener zonas de inundación, a cada uno de sus lados de las orillas.

En la Figura 1.1 se puede observar la ubicación del tramo a realizarse el estudio hidráulico, así como también se aprecia los puntos en donde comienza la delimitación de la cuenca alta y a su vez la cuenca media.

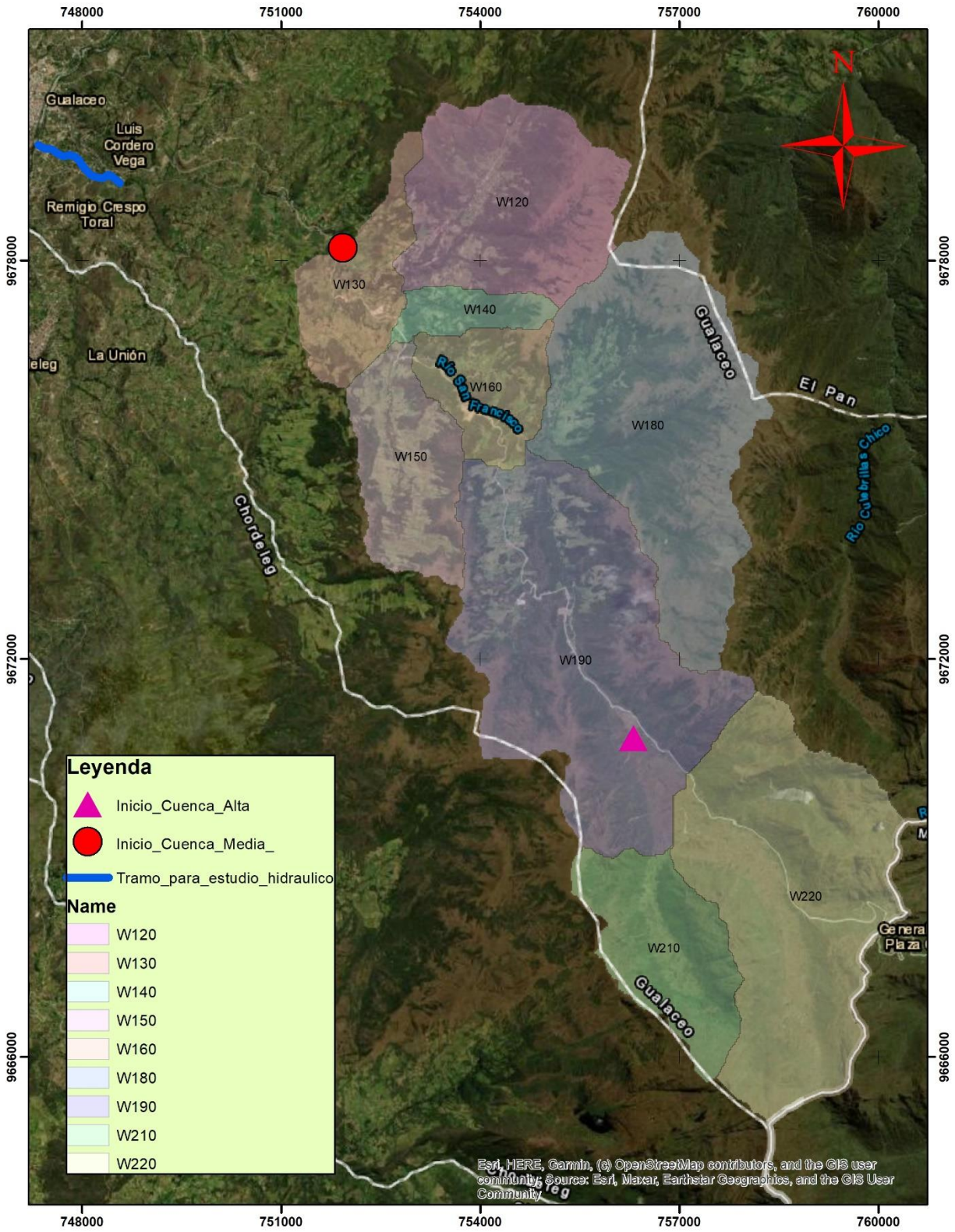


Figura 1.1 Ubicación de los tramos a ser estudiados.

Fuente: Autor

CAPÍTULO II

ESTUDIO HIDROLÓGICO

Ante la ausencia de información de caudales máximos del río San Francisco ubicado en el cantón Gualaceo, este estudio tiene como objetivo obtener dicha información en diferentes periodos de retorno y por dos métodos conocidos, como son el método racional y utilizando un software de modelación hidrológica HEC-HMS.

2.1 Información disponible para el estudio

- Ráster del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que fue facilitado por el (IERSE) de la Universidad del Azuay.
- *Shapefiles* de información hidrográfica, así como mapas de cobertura, uso y textura del suelo, otorgados por la Municipalidad de Gualaceo.

La información hidrometeorológica que se obtuvo de la página principal del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)

2.2 Estudio Hidrológico

Un modelo hidrológico busca representar los procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. La modelación hidrológica comenzó a principios del siglo XIX al utilizarse para el diseño de obras hidráulicas, así, hasta mediados del siglo XX, se limitó a expresiones matemáticas simples para representar mecanismos individuales involucrados en los procesos del ciclo hidrológico. En la década de los años sesenta, con el advenimiento de la revolución digital, se realizó el primer intento por representar casi en su totalidad al ciclo hidrológico en una cuenca (Jorquera et al., 2022). Con información que se obtuvo, el presente estudio se realiza en dos partes que consisten en lo siguiente.

- Con el MDE facilitado por el IERSE, se delimita la cuenca y se obtiene datos espaciales como la pendiente, la longitud del cauce principal, la superficie de cada subcuenca generada. Con los *shapefiles* de cobertura, uso y textura del suelo, se pueden construir mapas que permitirán calcular el valor del número de curva (CN) de las cuencas a ser analizadas, todo este procedimiento mediante HEC-GeoHMS y dichas características se importan directamente al HEC HMS.

- Con la información hidrometeorológica que se obtuvo del INAMHI, se puede obtener los hietogramas de diseño para el modelamiento hidrológico de cada cuenca, dichos hietogramas se utilizan en el programa HEC-HMS.

2.3 Pasos para delimitar la Cuenca.

La extensión HEC-GeoHms del programa ArcMap es una herramienta útil que se utiliza en el procesamiento de data geoespacial y por medio de la que es posible obtener parámetros de entrada para realizar el modelamiento en el programa HEC-HMS.

Como complemento, se debe tener instalado una extensión de la herramienta Spatial Analyst, por lo tanto, se puede generar la cuenca hidrográfica de manera automática al seguir una secuencia de comandos.

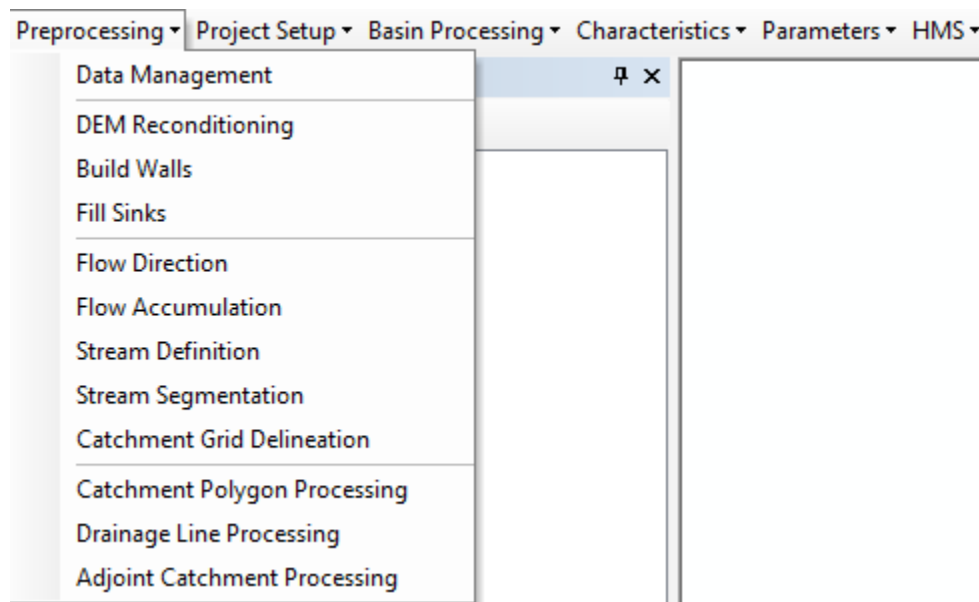


Figura 2.1. Secuencia de comandos.

Fuente: Autor

1. *Fill Sinks*: esta herramienta rellena todas aquellas imperfecciones que se ven en la superficie del MDT, por lo tanto asegura una delineación adecuada de las microcuencas y los arroyos; la finalidad es que corrija los sumideros erróneos y los picos para que la superficie alcance un nivel de terreno similar a los que están alrededor (Cárdenas, 2017).
2. *Flow Direction*: este parámetro genera un ráster que contiene la dirección de flujos en cada una de sus celdas; esta herramienta es manejada para obtener la orientación de las laderas

y la dirección de las pendientes de descenso para cada celda de la superficie (Cárdenas, 2017).

3. *Flow Accumulation*: determina la acumulación del flujo de las celdas que fluyen hacia cada celda descendiendo sobre la pendiente (Franzpc, 2020).
4. *Stream Definition*: definición de la corriente, esta opción tiene un valor predeterminado que es mostrado para definir el umbral del río o corriente, así, es preciso tener en cuenta un umbral más pequeño da una mayor densidad de red de corrientes, por lo tanto, un mayor número de subcuencas es delineado.
5. *Stream Segmentation*: esta función crea un grid de segmentos de ríos que tienen una identificación única, así, un segmento puede ser principal o definido entre dos uniones de segmento; las celdas de un segmento tienen el mismo código de grid (Ingol Blanco, 2016).
6. *Catchment Grid Delineation*: esta función crea un grid en el que cada celda tiene un valor (código) que indica a cuál subcuenca pertenece; el valor corresponde con aquel llevado por el segmento de corriente que drena esa área y es definido en el enlace de la red de corriente (Ingol Blanco, 2016).
7. *Catchment Polygon processing*: esta es una función que convierte la *data ráster* que se realizó a formato vector.
8. *Drainage Line Processing*: esta función convierte el grid de entrada *Stream Link* dentro de una clase entidad “*Drainage Line*” (Ingol Blanco, 2016).
9. *Adjoint Catchment Processing*: esta función genera subcuencas agregadas aguas arriba de la clase entidad de subcuencas (*catchment*) que se generó en un comando anterior (Ingol Blanco, 2016).
10. *Project Point*: como paso adicional, se debe delimitar el punto desde donde se realiza la cuenca.

2.4 Delimitación de las Cuencas.

Para este estudio, se planteó realizar el modelamiento hidrológico en dos tramos del río San Francisco ubicado en el cantón Gualaceo, uno en la parte alta y otro en la parte media.

2.4.1 Cuenca Alta.

Se realizó la primera delimitación de cuenca tomando de referencia el punto de coordenadas UTM WGS84 zona 17S: 756303.7206 E, 9670807.0580 N.

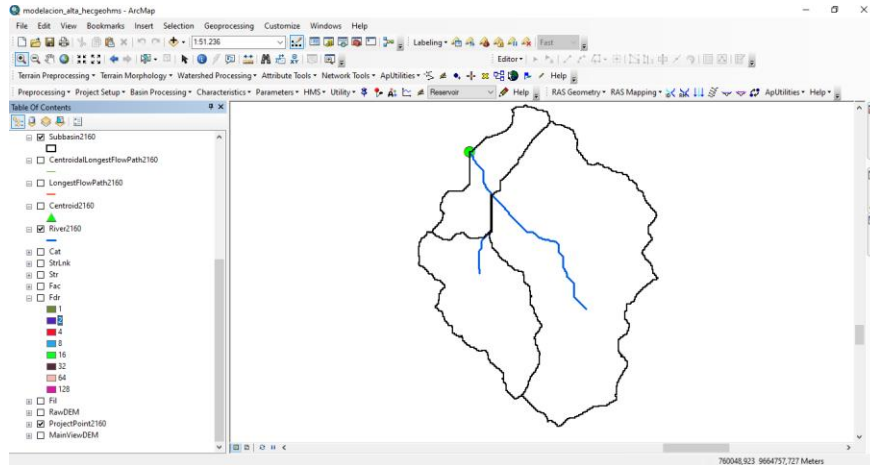


Figura 2.2. Delimitación cuenca alta.

Fuente: Autor

2.4.1.1 Subcuencas de aporte de la cuenca alta.

En este tramo analizado, existen afluentes que aportan al cauce principal, por lo tanto, para el modelamiento hidrológico en HEC-HMS, se consideran estas tres subcuencas que se observa en la Figura 2.3, cuyas características se detallan en la Tabla 2.1.

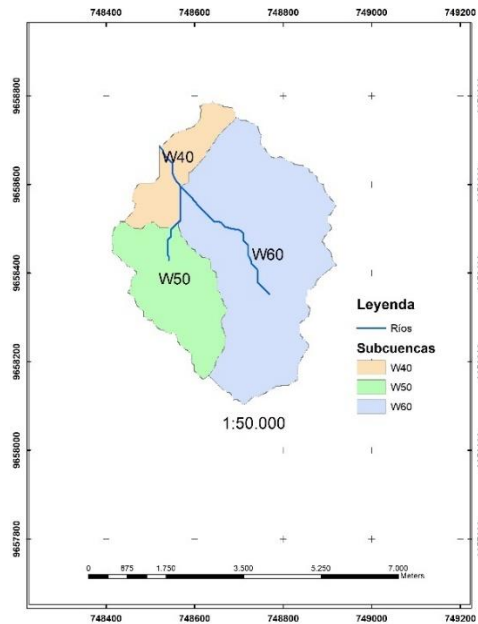


Figura 2.3. Subcuencas de aporte de la cuenca alta.

Fuente: Autor

Tabla 2.1. Características de las subcuencas de aporte.

Subcuenca	Perímetro (Km)	Área (km ²)	Pendiente Subcuenca (m/m)	Longitud Cauce (Km)	Pendiente Cauce (m/m)
W40	11,44	2,6036	0,267720	1,105	0,006
W50	15,48	5,0628	0,5459795	1,794	0,022
W60	22,92	13,9112	0,481563	3,497	0,017

Fuente: Autor

2.4.1.2 Periodo de retorno

El número de años en los que, en promedio, se presenta un evento determinado de igual o mayor intensidad se llama periodo de retorno, intervalo de recurrencia o frecuencia; el periodo de retorno es un parámetro importante al momento de diseñar una obra hidráulicamente destinada a soportar avenidas (Castro, s. f.-a).

$$TR = \frac{1}{1-P} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde:

TR: es el periodo de retorno.

P: probabilidad de que el valor no sea igualado o no excedido.

En el estudio que se realizó, se utilizaron los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

2.4.1.3 Tiempo de concentración

En hidrología, el tiempo de concentración (tc) representa el tiempo de viaje de una gota de lluvia que cae en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca y escurre, superficialmente, hasta su salida, es decir, el tiempo a partir del que toda la cuenca contribuye al caudal en el punto de salida de la cuenca. Por lo tanto, suponiendo una lluvia de intensidad constante, el tc es el tiempo de equilibrio o duración necesaria, para que alcance el caudal máximo (Lisette et al., s.f.). Para el cálculo del tiempo de concentración, se utilizó el método de Kirpich (1940), con modificaciones para trabajar en unidades métricas.

$$tc = 0.01947 * L^{0.77} * S^{-0.385} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Donde:

tc: tiempo de concentración (min).

L: longitud desde el punto hidráulicamente más lejano hasta la salida de la cuenca (m).

S: pendiente promedio de la cuenca (m/m).

En cuanto al tiempo de rezago (Lag Time), se encuentra en la literatura la relación propuesta por el “Soil Conservation Service”, SCS, que propone que es 0,6 veces el tiempo de concentración.(Upegui & Gutiérrez, 2011).

Tabla 2.2. Cálculo del tiempo de concentración de las subcuencas de aporte.

Subcuenca	Longitud del punto más lejano hasta la salida (L) (m)	Pendiente Subcuenca (m/m)	Tiempo de concentración (min)	Lag Time (min)
W40	1104,68037	0,36772	6,3086	3,7851
W50	1794,26407	0,54598	7,8712	4,7227
W60	3496,88384	0,481563	13,8095	8,2857

Fuente: Autor

2.4.1.4 Información hidrometeorológica.

El INAMHI tiene en su poder una gran cantidad de información de las estaciones pluviométricas del Ecuador, por lo que genera diferentes formas de cálculo de intensidades máximas de precipitación. Para este proyecto, se toma en cuenta tres estaciones pluviométricas que se encuentran cercanas a la zona de estudio, entre ellas, están las siguientes.

- M0424 Sígsig con coordenadas UTM WGS84 zona 17S: 746065,500 E, 9662811,500 N.
- M0139 Gualaceo con coordenadas UTM WGS84 zona 17S: 747183,560 E, 9681214,600 N.
- M0431 Sevilla de Oro con coordenadas UTM WGS84 zona 17S: 760920,100 E ,9690528,800 N.

En la Figura 2.4 se observa la ubicación de cada estación pluviométrica de acuerdo con las zonas de estudio, en la Figura 2.5 se puede apreciar las ecuaciones para el cálculo de intensidad de la estación de Gualaceo y por último en la Figura 2.6 se evidencian las ecuaciones de intensidad de la estación de Sígsig en diferentes intervalos de tiempo para algunos diversos periodos de retorno.

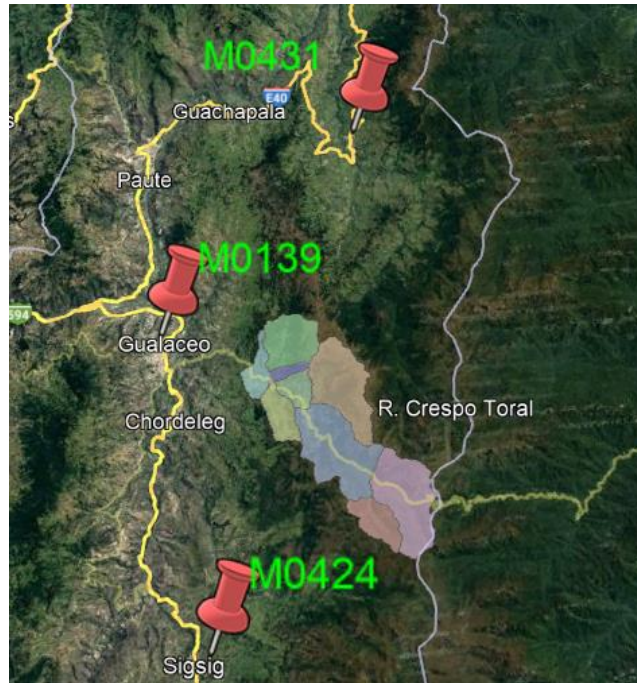


Figura 2.4. Ubicación de estaciones pluviométricas

Fuente: Autor

ESTACIÓN		INTERVALOS DE TIEMPO (minutos)	ECUACIONES	R	R ²
CÓDIGO	NOMBRE				
M0139	GUALACEO	5<30	$i = 163.3335 * T^{0.1753} * t^{-0.4333}$	0.9867	0.9775
		30<120	$i = 374.6061 * T^{0.1845} * t^{-0.6853}$	0.9934	0.9868
		120<1440	$i = 1406.3476 * T^{0.1642} * t^{-0.9557}$	0.9997	0.9993

Figura 2.5. Ecuaciones IDF para la estación Gualaceo M0139

Fuente: INAMHI

Donde:

i = intensidad (mm/h).

T = periodo de retorno (años).

t = tiempo de duración (minutos).

INTENSIDADES																									
T (años)	TIEMPO (minutos)																								
	5	10	15	20	25	30	45	60	75	90	120	150	180	210	240	300	360	420	480	600	720	840	960	1200	1440
2 años	57.19	43.10	36.52	32.47	29.65	27.52	22.55	17.67	14.62	12.52	9.81	8.12	6.95	6.10	5.45	4.51	3.86	3.39	3.02	2.50	2.14	1.88	1.68	1.39	1.19
5 años	64.82	48.84	41.39	36.80	33.60	31.19	25.56	20.02	16.57	14.19	11.12	9.20	7.88	6.91	6.17	5.11	4.37	3.84	3.43	2.84	2.43	2.13	1.90	1.57	1.35
10 años	69.87	52.65	44.62	39.67	36.22	33.62	27.55	21.58	17.86	15.30	11.98	9.91	8.49	7.45	6.65	5.50	4.72	4.14	3.69	3.06	2.62	2.30	2.05	1.70	1.45
25 años	76.26	57.46	48.69	43.30	39.53	36.69	30.07	23.55	19.49	16.70	13.08	10.82	9.27	8.13	7.26	6.01	5.15	4.52	4.03	3.34	2.86	2.51	2.24	1.85	1.59
50 años	81.00	61.03	51.72	45.99	41.98	38.97	31.94	25.02	20.70	17.73	13.89	11.49	9.85	8.64	7.71	6.38	5.47	4.80	4.28	3.54	3.03	2.66	2.38	1.97	1.68
100 años	85.70	64.58	54.72	48.66	44.42	41.23	33.79	26.47	21.90	18.76	14.70	12.16	10.42	9.14	8.16	6.75	5.78	5.07	4.53	3.75	3.21	2.82	2.52	2.08	1.78
500 años	96.57	72.77	61.66	54.83	50.06	46.46	38.08	29.83	24.68	21.14	16.56	13.70	11.74	10.30	9.19	7.61	6.52	5.72	5.10	4.22	3.62	3.17	2.83	2.35	2.01

Figura 2.6. Cuadro de intensidades de la estación Sígsig M0424.

Fuente: (Diana & Sara, 2012)

2.4.1.5 Polígonos de Thiessen

La interpolación mediante el método de los polígonos de Thiessen permite calcular medias areales con base en la ubicación relativa de las estaciones, por lo tanto, este es un método geométrico que no asume ninguna relación de dependencia entre datos medidos entre estaciones vecinas (Hämmerly et al., 2019). Los polígonos de Thiessen son uno de los métodos de interpolación más simples, así, es especialmente apropiado cuando las variables son cualitativas.

Asimismo, está basado en las áreas de influencias de las estaciones que se crean al unir las entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión, Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control (estaciones) (Viteri, 2008).

Para este proyecto, se realizó los polígonos de Thiessen de las tres estaciones pluviométricas: Gualaceo, Sígsig y Sevilla de Oro, para determinar qué estación influye en cada subcuenca determinada. En la Figura 2.7 se aprecia el mapa de dichos polígonos creados en ArcMap y se puede llegar a la conclusión de que la información de la estación pluviométrica M0431 Sevilla de Oro no influye en esta investigación, por lo tanto, queda descartada.

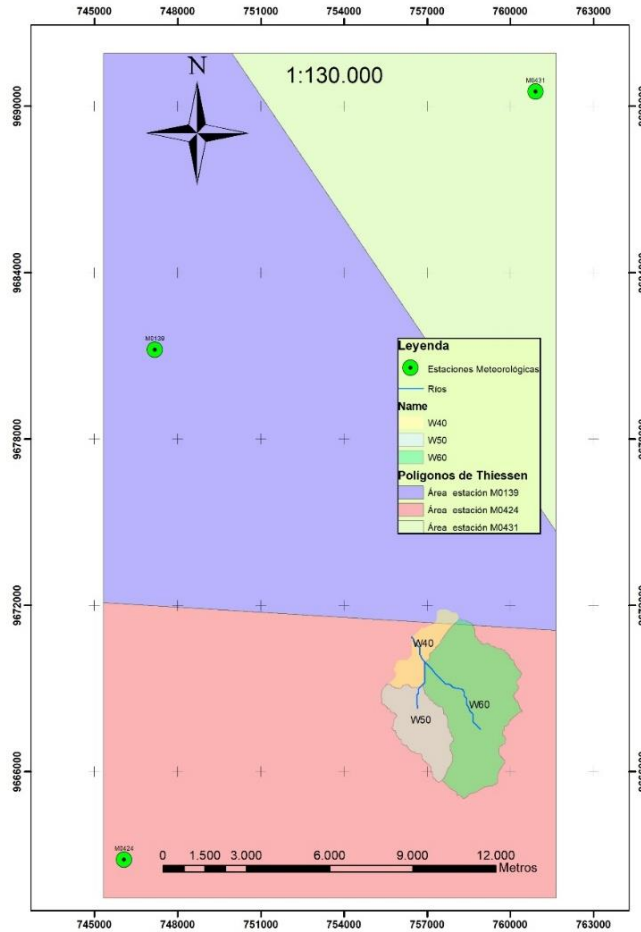


Figura 2.7. Polígonos de Thiessen en la cuenca alta.

Fuente: Autor

2.4.1.6 Curvas Intensidad-Duración- Frecuencia

Las curvas IDF son aquellas que relacionan la intensidad de la lluvia con la duración, igualmente, está incluido el periodo de retorno, así, para cada periodo de obtiene una curva diferente. Para la cuenca alta, como se observa en la Figura 2.7, prácticamente está toda la subcuenca dentro del área de la estación pluviométrica de Sígsig M0424, por lo tanto, para este tramo de estudio se debe tomar datos de intensidad solo de dicha estación. Las curvas de IDF fueron graficadas con periodos de retorno de 2, 5, 10,25 y 50 años.

Tabla 2.3. Intensidades de la estación de Sígsig.

PERIODO DE RETORNO (Años)					
t (min)	2	5	10	25	50
10	43,1	48,84	52,65	57,46	61,03
20	32,47	36,8	39,67	43,3	45,99
30	27,52	31,19	33,62	36,69	38,97
40	24,21	27,44	29,57	32,28	34,28
50	20,92	23,71	25,56	27,90	29,63
60	17,67	20,02	21,58	23,55	25,02
70	15,64	17,72	19,10	20,84	22,14

Fuente: Autor

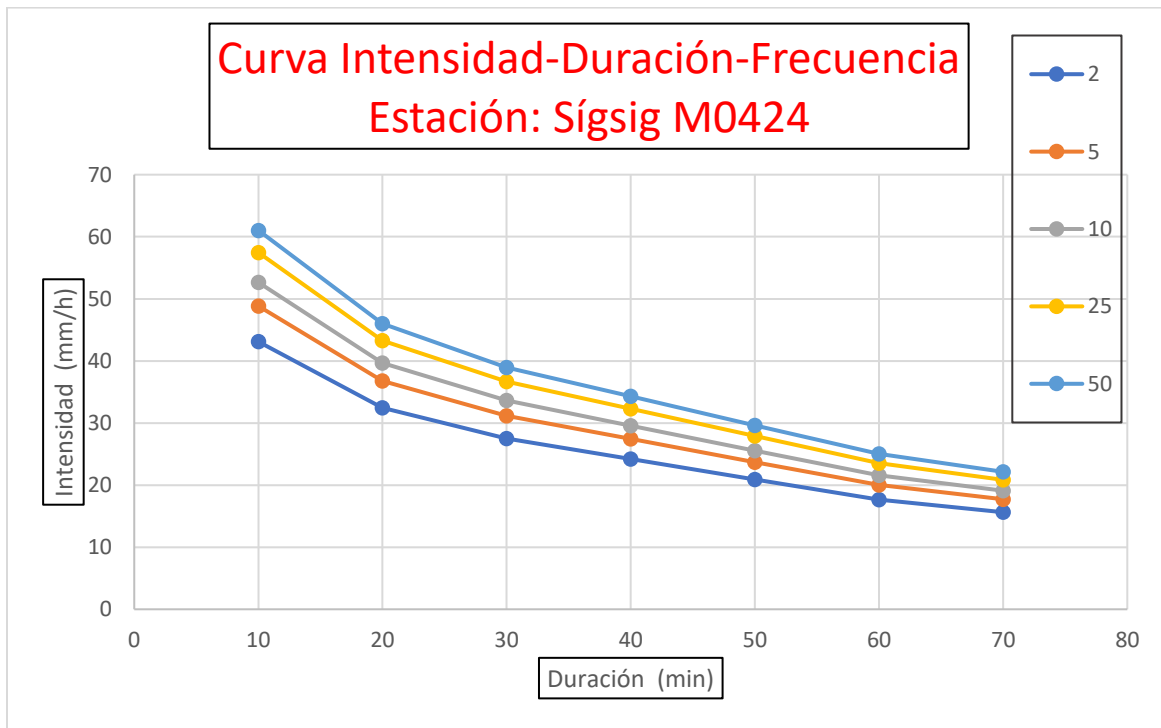


Figura 2.8. Curva IDF de la estación Sígsig M0424

Fuente: Autor

2.4.1.7 Hietograma de Diseño

Para el modelamiento hidrológico en el programa HEC-HMS, es necesario introducir valores de precipitaciones, se utilizó el método de bloques alternos para obtener gráficas de hietogramas de diseño con información de las curvas IDF.

El método de bloques alternos consiste en reordenar en una secuencia temporal de modo que se coloca la máxima precipitación para una duración específica en el centro del hietograma y se alterna el resto de valores de precipitación en orden descendente entre derecha e izquierda (Valdez, 2020). El hietograma se elaboró con intervalos de tiempo de cada 10 minutos hasta los 70 minutos, pues el tiempo de concentración de toda la cuenca es menor a ese tiempo (1 hora con 10 minutos), con esto, se asegura obtener el caudal máximo para la subcuenca de estudio; los cálculos para un periodo de retorno de dos años se muestran en la Tabla 2.4, y como se observa en la Figura 2.9 se obtuvo la gráfica del hietograma para el periodo de retorno de 2 años y los cálculos para los diferentes periodos de retorno se exponen en el Anexo A1.1

Tabla 2.4. Precipitaciones (T=2 años) de la estación de Sígsig M0242

Período de retorno de 2 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	43,1	7,18	7,18
20	0,33	32,47	10,82	3,64
30	0,50	27,52	13,76	2,94
40	0,67	24,21	16,14	2,38
50	0,83	20,92	17,44	1,30
60	1,00	17,67	17,67	0,23
70	1,17	15,64	18,24	0,57

Fuente: Autor



Figura 2.9. Hietograma de diseño (T=2 años) de la estación de Sígsig M0424

Fuente: Autor

2.4.1.8 Número de curva por medio de ArcGIS.

Una manera sencilla de obtener el número de curva es utilizando el software ArcGIS, así, para obtener dicho valor, se necesita de tres shapefiles importantes: el MDE, el tipo hidrológico del suelo y la cobertura vegetal.

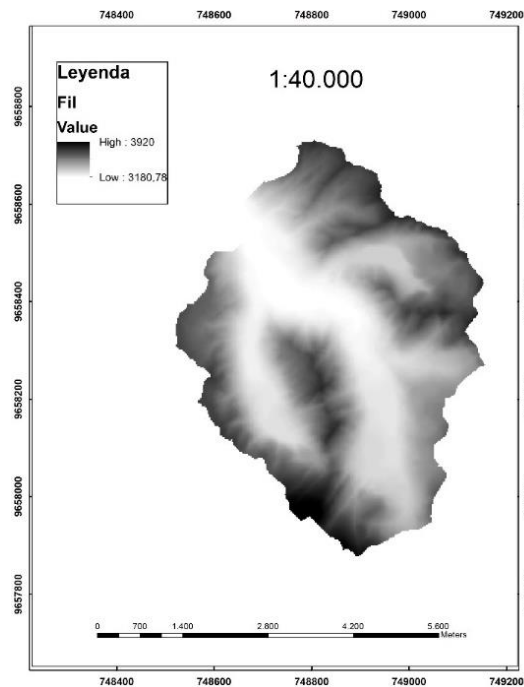


Figura 2.10. Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca alta.

Fuente: Autor

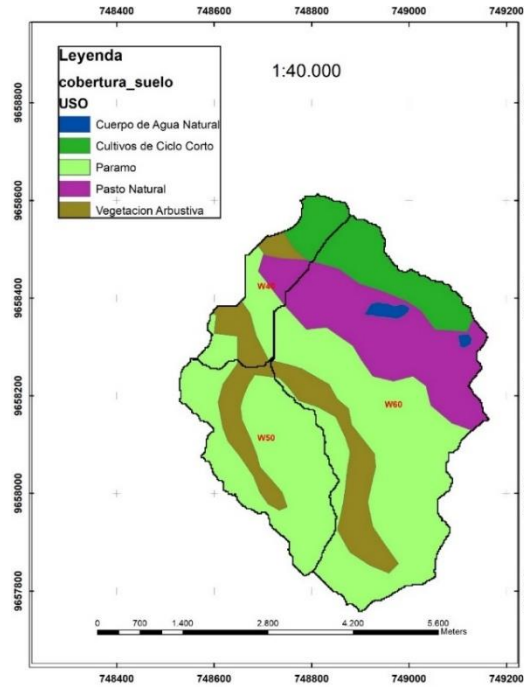


Figura 2.11. Cobertura vegetal cuenca alta.

Fuente: Autor

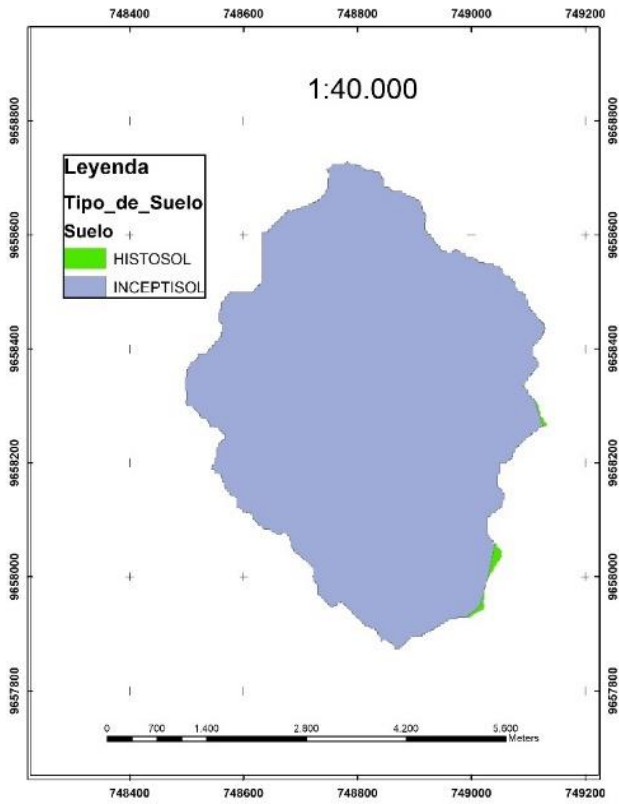


Figura 2.12. Tipo de suelo cuenca alta.

Fuente: Autor

El mapa de la Figura 2.11, se le puede reclasificar de acuerdo con cada uso de suelo y se le asigna un código para cada uno de acuerdo al Anexo A2.1.

Con el mapa de tipo de suelo Figura 2.12, de igual manera se le asigna un grupo hidrológico al grupo que pertenece de acuerdo con el Anexo A2.2

Una vez obtenidos estos mapas reclasificados, es posible combinarlos entre sí y obtener un solo mapa, este proporciona información un poco más detallada del tipo y uso del suelo para cada subcuena, como se muestra en la Figura 2.13, a su vez, se le puede asignar a un valor de NC a cada área de uso de suelo de acuerdo con el Anexo A2.3

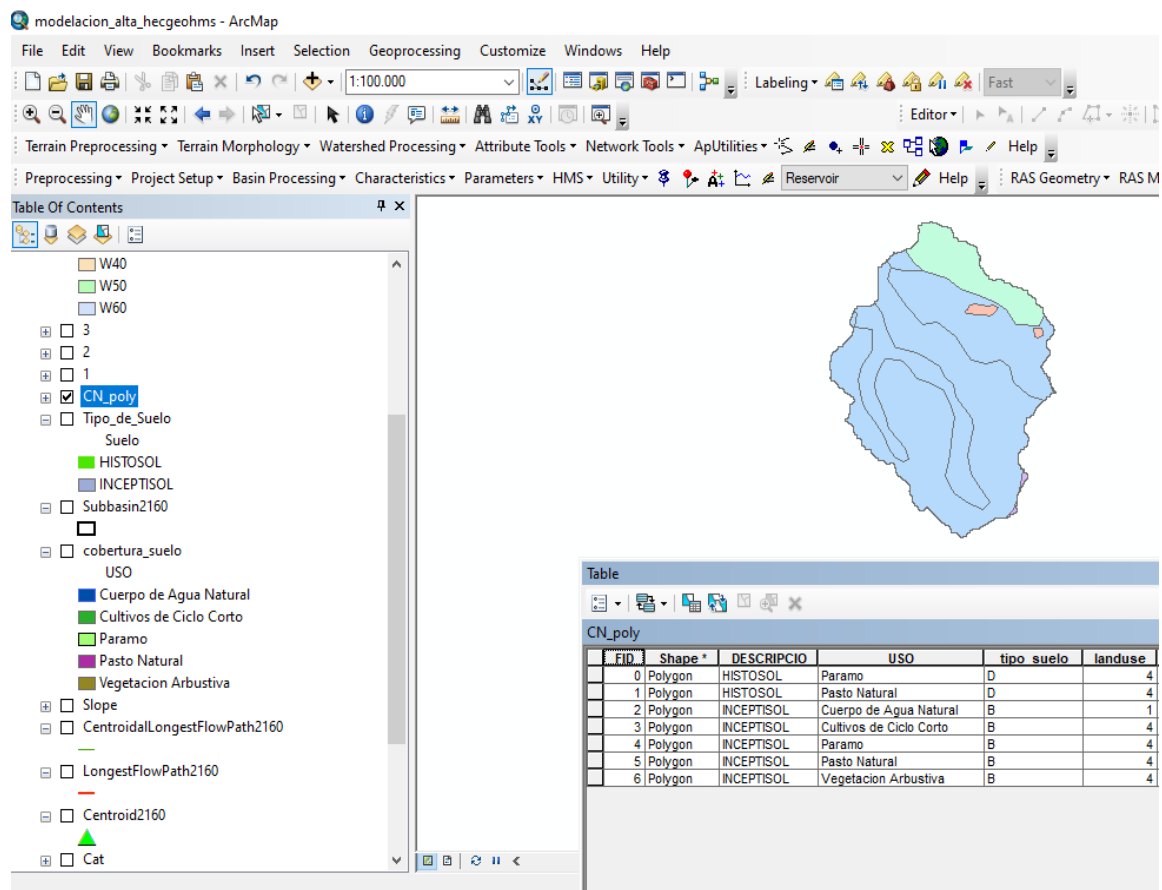


Figura 2.13. Mapa interpolado de la cuenca alta.

Fuente: Autor

En cada subcuenca se obtiene una variedad de uso de suelos, por ello, se utiliza la Ecuación 2.3, para definir un NC ponderado para cada subcuenca, como se observa en la Tabla 2.5.

$$NC \text{ ponderado} = \frac{\sum(NC_i * A_i)}{\sum A_i} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Tabla 2.5. Cálculo de número de curva de la cuenca alta

	Tipo de Suelo	Grupo Hidrológico	Uso de Suelo	NC	Área (Km ²)	NC*Área	NC ponderado
W 40	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo Corto	71	0,648	45,989	67
	INCEPTISOL	B	Paramo	66	0,889	58,682	
	INCEPTISOL	B	Pasto Natural	66	0,366	24,142	
	INCEPTISOL	B	Vegetación Arbustiva	66	0,701	46,263	
W 50	INCEPTISOL	B	Paramo	66	4,209	277,776	66
	INCEPTISOL	B	Vegetación Arbustiva	66	0,854	56,369	
W60	HISTOSOL	D	Paramo	83	0,054	4,510	67
	HISTOSOL	D	Pasto Natural	83	0,010	0,862	
	INCEPTISOL	B	Cuerpo de Agua Natural	100	0,175	17,492	
	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo Corto	71	1,742	123,681	
	INCEPTISOL	B	Paramo	66	6,600	435,612	
	INCEPTISOL	B	Pasto Natural	66	3,715	245,219	
	INCEPTISOL	B	Vegetación Arbustiva	66	1,614	106,521	

Fuente: Autor

2.4.1.9 Coeficiente de rugosidad de Manning

La n de Manning es una de las formas de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces naturales o artificiales, este coeficiente de resistencia al flujo es variable, porque depende de una serie de factores como la vegetación, la irregularidad, las obstrucciones, el nivel, el caudal, el régimen de circulación, entre otros (Fernández de Córdova Webster et al., 2018).

Se realizó un análisis comparativo con otros cauces principales y se obtuvo un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,033, pues dicho valor representa las características de un cauce que presenta irregularidad, vegetación, rugosidad artificial, etc.

2.4.1.10 Modelación Hidrológica en el programa HEC-HMS.

El programa HEC-HMS es un programa que fue elaborado por “El Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos”, en este, se puede realizar una simulación hidrológica, obteniendo como resultados hidrogramas de salida de una subcuenca.

Para obtener esta simulación, se requiere un cierto número de características de la cuenca, estas fueron calculadas por medio de la extensión HECGeo-HMS del ArcGIS, de igual manera, requiere el ingreso de hietogramas de diseño calculados en el Anexo A1.1

En la Figura 2.14 se aprecia el modelo de la cuenca alta en el programa de modelación Hidrológica HEC-HMS.

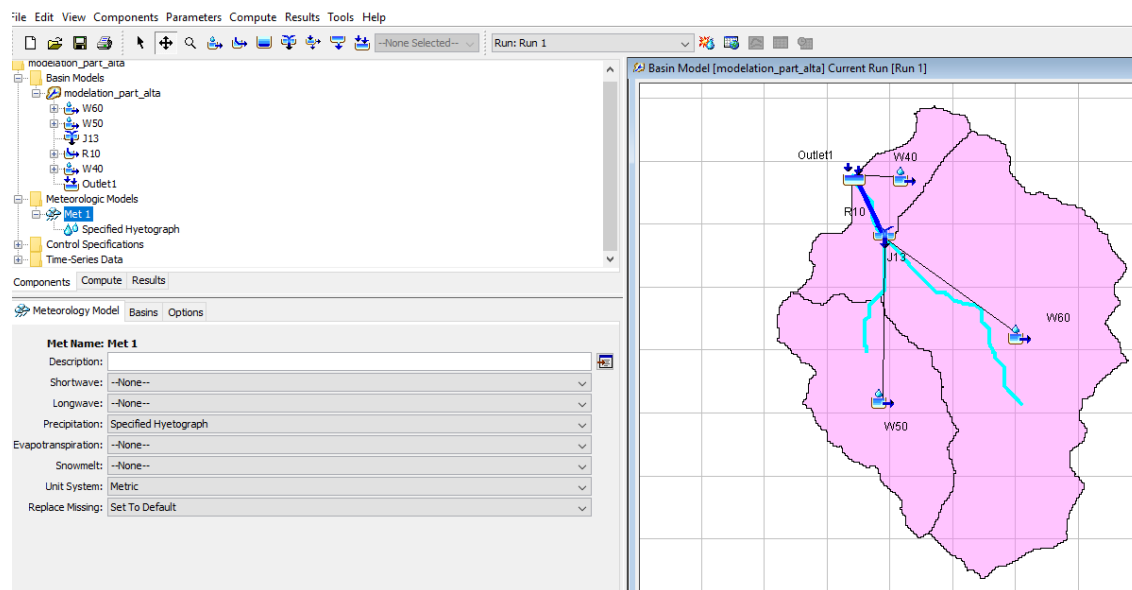


Figura 2.14. Cuenca alta en HEC-HMS

Fuente: Autor

2.4.1.11 Métodos a utilizarse en HEC-HMS.

1. Para el método de pérdida, se aplica el Número de Curva, desarrollada por el SCS en el cual estima la infiltración. Técnica que considera las pérdidas netas, pero omite la

evaporación real. Para el uso de este método se obtuvo con anterioridad el NC de cada subcuenca.

2. Para el método de transformación, se aplica el hidrograma unitario SCS, es un hidrograma de escorrentía directa que se produciría a la salida de una cuenca, si sobre esta cae una precipitación neta unitaria de una determinada duración.
3. Para el método de tránsito de avenidas, se aplica el método Muskingum-Cunge, es un método que mejora el clásico método Muskingum. El método Muskingum-Cunge método de enrutamiento del flujo de avenidas, por medio de la aplicación de métodos físicos y numéricos.

El método Muskingum-Cunge a veces se denomina método de “coeficiente variable”, ya que los parámetros de enrutamiento se vuelven a calcular cada paso de tiempo en función de las propiedades del canal y la profundidad del flujo. (HEC-HMS, s. f.)

2.4.1.12 Datos ingresados en el programa HEC-HMS.

En la Tabla 2.6 se observa de manera simplificada los valores introducidos en el programa HEC-HMS de cada subcuenca.

Tabla 2.6. Datos de subcuencas para el modelamiento en HEC-HMS de la cuenca alta.

Subcuenca	Área (Km ²)	NC	Tiempo de retardo (min)
W40	2,6036	67	3,7852
W50	5,0628	66	4,7228
W60	13,9112	67	8,2857

Fuente: Autor

Ya que esta cuenca, cuenta con un solo tramo de tránsito de avenidas como se observa en la Figura 2.14, los valores asumidos para dicho tramo se observan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Datos para el tránsito de avenidas de la cuenca alta.

Tramo	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	n de Manning	Ancho promedio de la sección transversal (m)
J13 - Outlet1	1104,6803	0,0055	0,0330	3,000

Fuente: Autor

Una vez insertadas las características de cada subcuenca, al igual que los datos para el tránsito de avenidas, se introduce los valores de precipitaciones con los cuales se realizaron los hietogramas de diseño de acuerdo al Anexo A1.1 y se asigna en cada subcuenca.

Por último, paso se asigna una fecha y un tiempo de inicio y fin en el cual se plantea realizar el modelamiento, estos datos no causan impacto en el modelo por el cual se puede asignar valores deseados.

A continuación, se muestra resultados de Hidrogramas de salida de la cuenca alta en diferentes periodos de retorno.

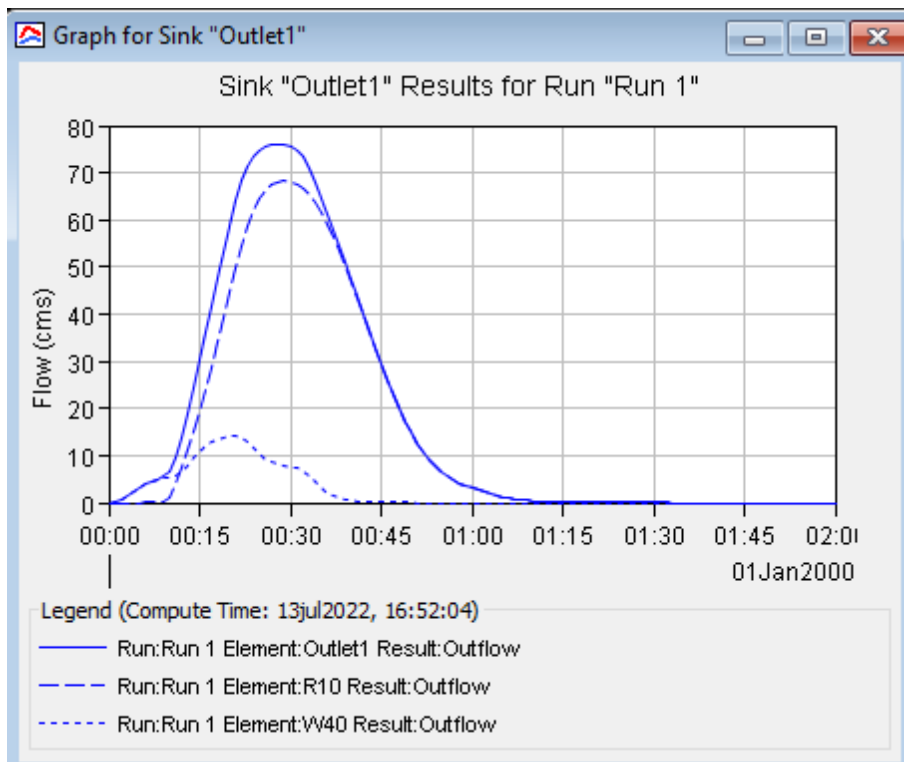


Figura 2.15. Hidrograma (T=2 años) de la cuenca alta.

Fuente: Autor

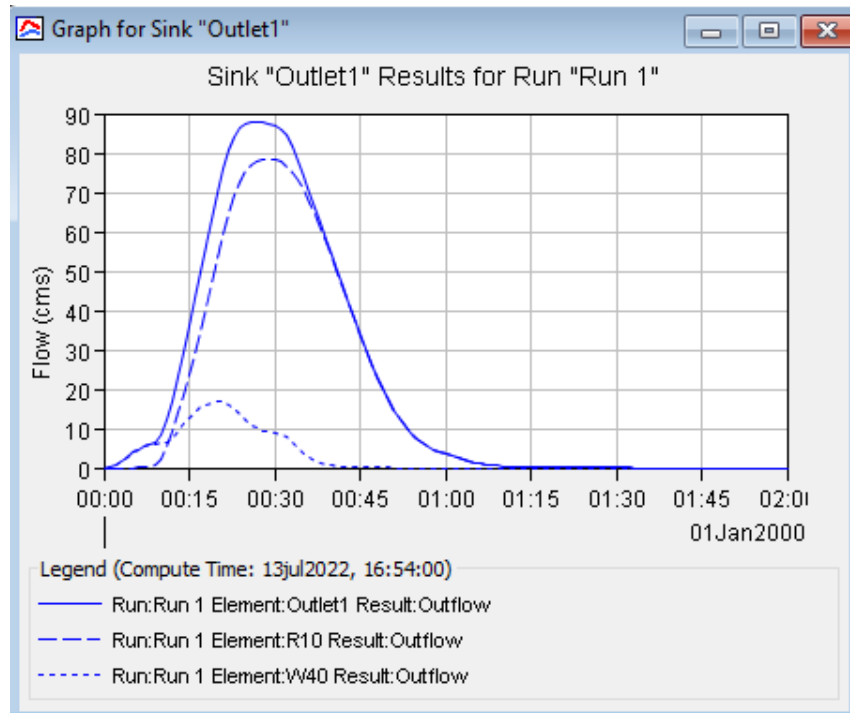


Figura 2.16. Hidrograma (T=5 años) de la cuenca alta.

Fuente: Autor

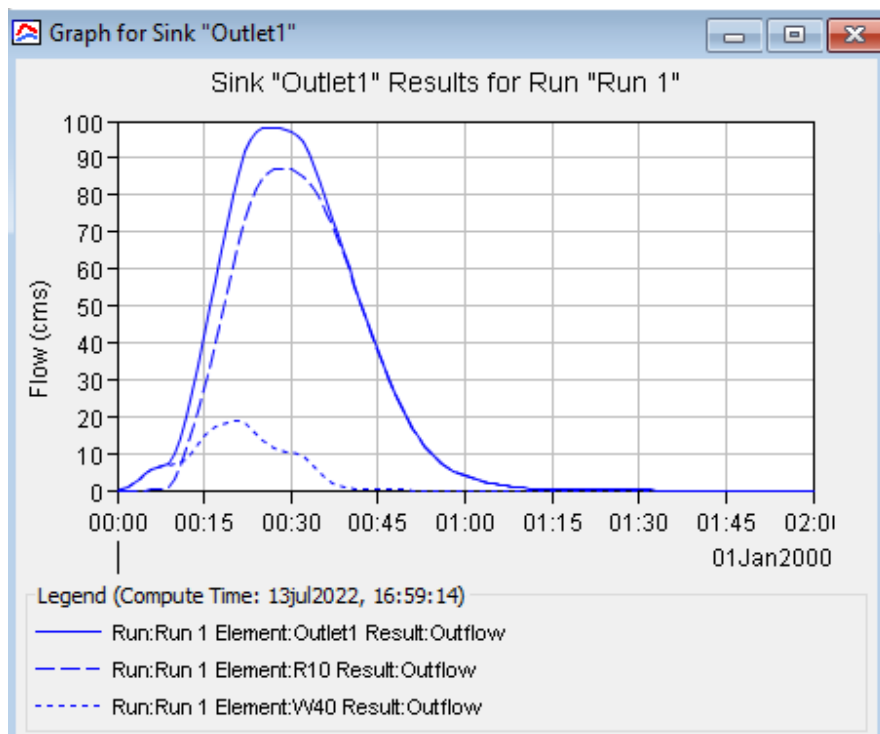


Figura 2.17. Hidrograma (T=10 años) de la cuenca alta.

Fuente: Autor

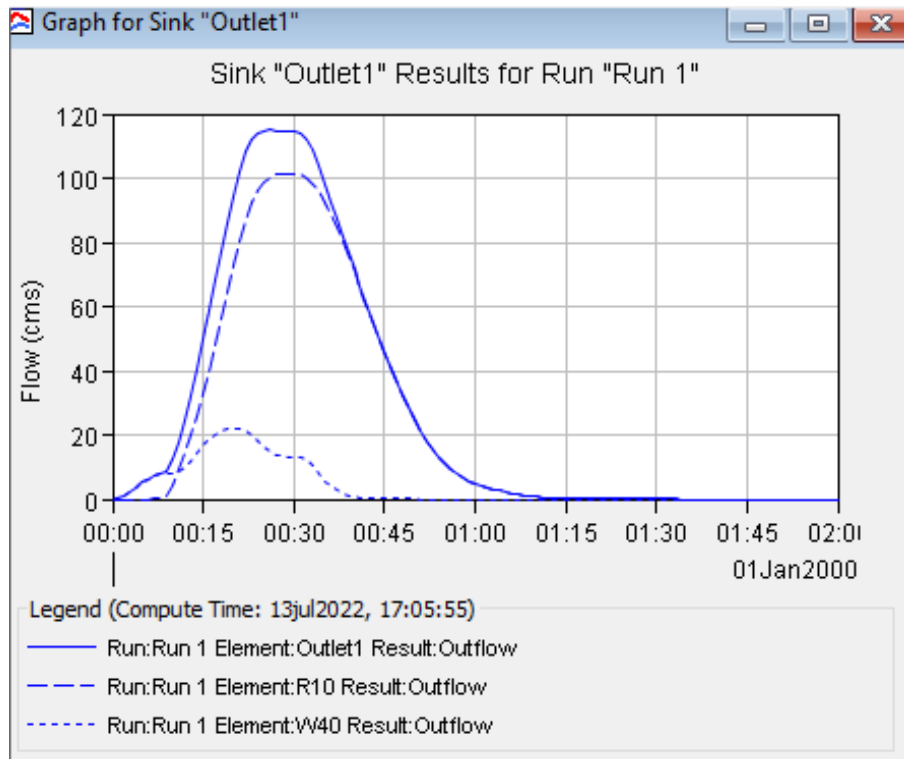


Figura 2.18. Hidrograma (T=25 años) de la cuenca alta.

Fuente: Autor

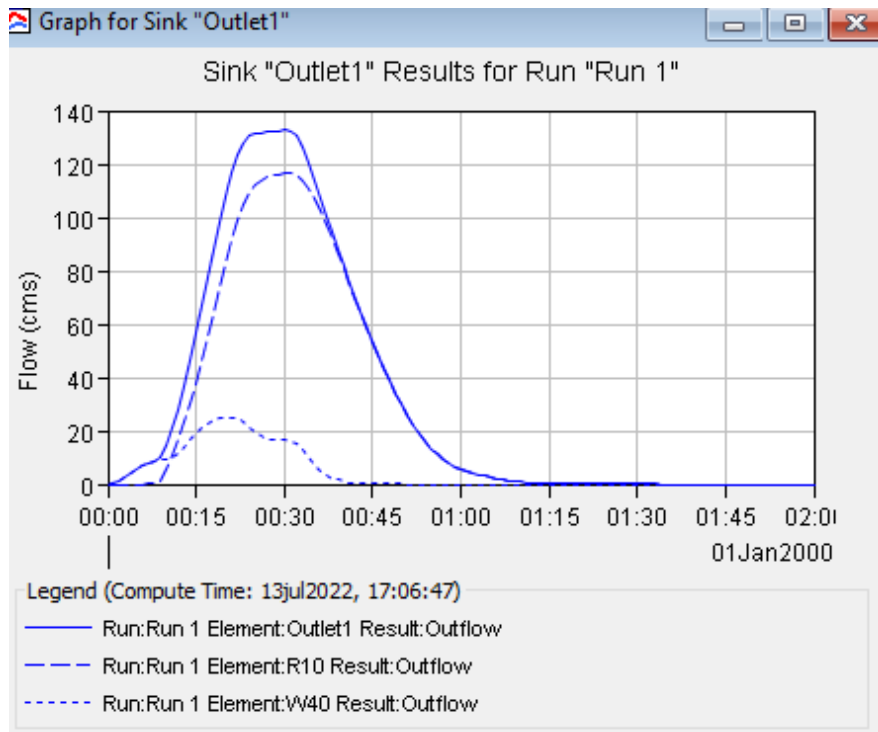


Figura 2.19. Hidrograma (T=50 años) de la cuenca alta.

Fuente: Autor

En la siguiente tabla se muestra los caudales máximos en forma numérica.

Tabla 2.8. Caudales máximos de la cuenca alta en HEC-HMS.

T (años)	Q (m3/s)
2	76,1
5	87,9
10	98,3
25	115
50	132,8

Fuente: Autor

2.4.2 Cuenca Media.

Para el estudio de esta sección, se realizó el mismo procedimiento de la cuenca alta, para delimitarla, se tomó de referencia el punto de coordenadas UTM WGS84 zona 17S: 751927.9590 E, 9678197.0692 N.

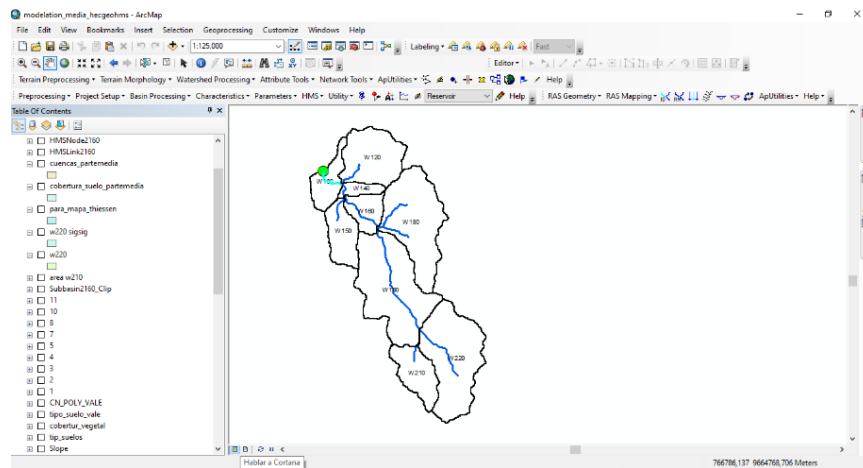


Figura 2.20. Delimitación cuenca media.

Fuente: Autor

2.4.2.1 Subcuencas de aporte de la cuenca media.

Se obtiene nueve subcuencas de aporte que se observan en la Figura 2.21, cuyas características se detallan en la Tabla 2.9.

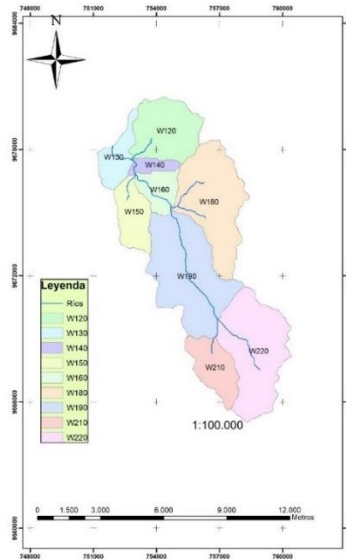


Figura 2.21. Subcuencas de aporte de la cuenca media.

Fuente: Autor

Tabla 2.9. Características de las subcuencas de aporte.

Subcuenca	Perímetro Km	Área km ²	Pendiente Subcuenca m/m	Longitud Cauce Km	Pendiente Cauce m/m
W120	15,280	8,264	0,3668	1,6682	0,0018
W130	12,920	3,526	0,3860	1,5791	0,0165
W140	8,000	1,426	0,5280	0,8808	0,0007
W150	12,720	4,621	0,3078	1,5337	0,0016
W160	9,640	3,234	0,5739	2,8259	0,0006
W180	23,080	13,280	0,3307	2,4532	0,0014
W190	25,280	15,953	0,3882	6,4927	0,0006
W210	15,480	5,063	0,5459	1,7943	0,0002
W220	22,920	13,911	0,4815	3,4969	0,0002

Fuente: Autor

2.4.2.2 Tiempo de concentración

Para obtener los tiempos de concentración de esta cuenca, al igual que para la cuenca alta se utiliza la Ecuación (2.2) y como se mencionó con anterioridad el Lag Time es 0,6 veces el tiempo de concentración, por lo tanto, se obtiene.

Tabla 2.10. Cálculo del tiempo de concentración de subcuencas de aporte.

Subcuenca	Longitud del punto más lejano hasta la salida (L) (m)	Pendiente Subcuenca m/m	Tiempo de concentración (min)	Lag Time (min)
W120	1668,233765	0,3668	8,67	5,20
W130	1579,116882	0,3860	8,15	4,89
W140	880,832611	0,5280	4,61	2,77
W150	1533,675324	0,3078	8,70	5,22
W160	2825,929291	0,5740	10,95	6,57
W180	2453,208512	0,3307	12,15	7,29
W190	6492,691193	0,3883	24,16	14,50
W210	1794,264069	0,5460	7,87	4,72
W220	3496,883835	0,4816	13,81	8,29

Fuente: Autor

2.4.2.3 Polígonos de Thiessen

Se realizó los polígonos de Thiessen de las tres estaciones pluviométricas: Gualaceo, Sígsig y Sevilla de Oro, para determinar qué estación influye en cada subcuenca determinada. En la Figura 2.16 se aprecia el mapa de dichos polígonos creados en ArcMap y se puede llegar a la conclusión de que la información de la estación pluviométrica M0431 Sevilla de Oro no influye en esta investigación, por lo tanto, queda descartada.

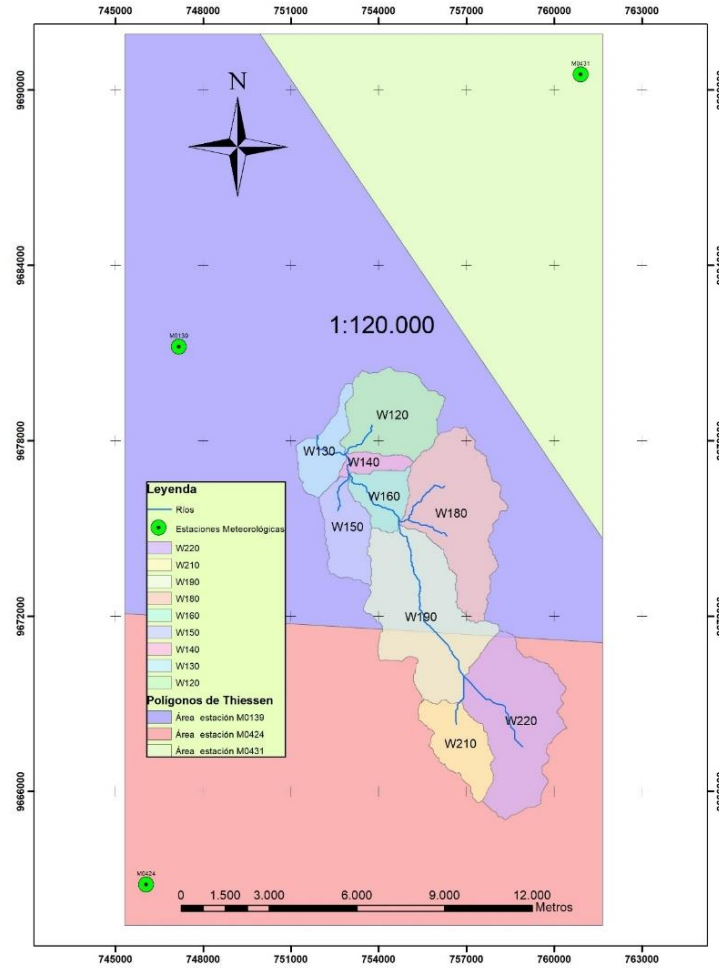


Figura 2.22. Polígonos de Thiessen de la cuenca media.

Fuente: Autor

2.4.2.4 Curvas Intensidad-Duración- Frecuencia

Para la cuenca media, se debe tomar la información de intensidades de las estaciones pluviométrica de Sígsig M0424 y Gualaceo M0139. Las curvas de IDF fueron graficadas con periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Las curvas IDF de la estación de Sígsig de la Figura 2.8, también se debe utilizar para este tramo, ya que falta las curvas de IDF de la estación de Gualaceo M0139 se debe calcular, por lo tanto, las curvas de dicha estación se muestran en la Figura 2.23, cuyas intensidades fueron calculadas con la segunda ecuación de la Figura 2.5.

Tabla 2.11. Intensidades de la estación de Gualaceo

t (min)	PERIODO DE RETORNO (Años)				
	2	5	10	25	50
10	87,9	104,0	118,2	140,0	159,1
20	54,6	64,7	73,5	87,1	99,0
30	41,4	49,0	55,7	66,0	74,9
40	34,0	40,2	45,7	54,2	61,5
50	29,2	34,5	39,2	46,5	52,8
60	25,7	30,5	34,6	41,0	46,6
70	23,2	27,4	31,2	36,9	41,9
80	21,1	25,0	28,4	33,7	38,3
90	19,5	23,1	26,2	31,1	35,3

Fuente: Autor

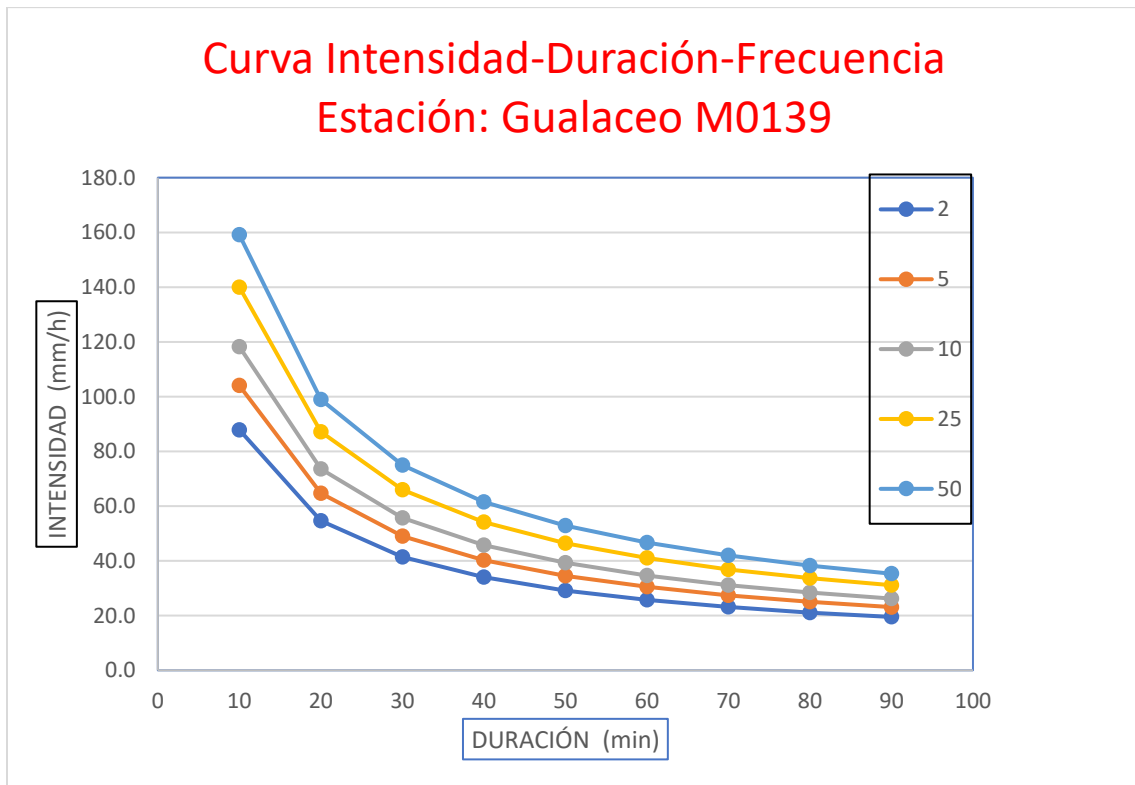


Figura 2.23. Curva IDF de la estación Gualaceo M0139

Fuente: Autor

2.4.2.5 Hietograma de Diseño

El hietograma se elaboró con intervalos de tiempo de cada 10 minutos hasta los 90 minutos, pues el tiempo de concentración de toda la cuenca es menor a ese tiempo (1 hora con 30 minutos), con esto, se asegura obtener el caudal máximo este tramo de estudio. En esta cuenca se toma información de dos pluviómetros, por ello, los cálculos de la estación de Sígsig M0424 sacados para la cuenca alta aún se los debe utilizar para este tramo; los cálculos para un periodo de retorno de dos años de la estación de Gualaceo M0139 se muestran en la Tabla 2.12 y los cálculos para los diferentes periodos de retorno se exponen en el Anexo A1.2

Tabla 2.12. Precipitaciones (T=2 años) de la estación de Gualaceo M0139

Período de retorno de 2 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	87,9	14,64	14,64
20	0,33	54,6	18,21	3,57
30	0,50	41,4	20,69	2,48
40	0,67	34,0	22,65	1,96
50	0,83	29,2	24,30	1,65
60	1,00	25,7	25,74	1,44
70	1,17	23,2	27,02	1,28
80	1,33	21,1	28,13	1,12
90	1,50	19,5	29,25	1,12

Fuente: Autor



Figura 2.24. Hietograma de diseño (T=2 años) de la estación de Gualaceo M0139

Fuente: Autor

2.4.2.6 Número de curva por medio de ArcGIS.

Se obtiene los tres shapefiles importantes: el MDE, el tipo hidrológico del suelo y la cobertura vegetal de la cuenca media.

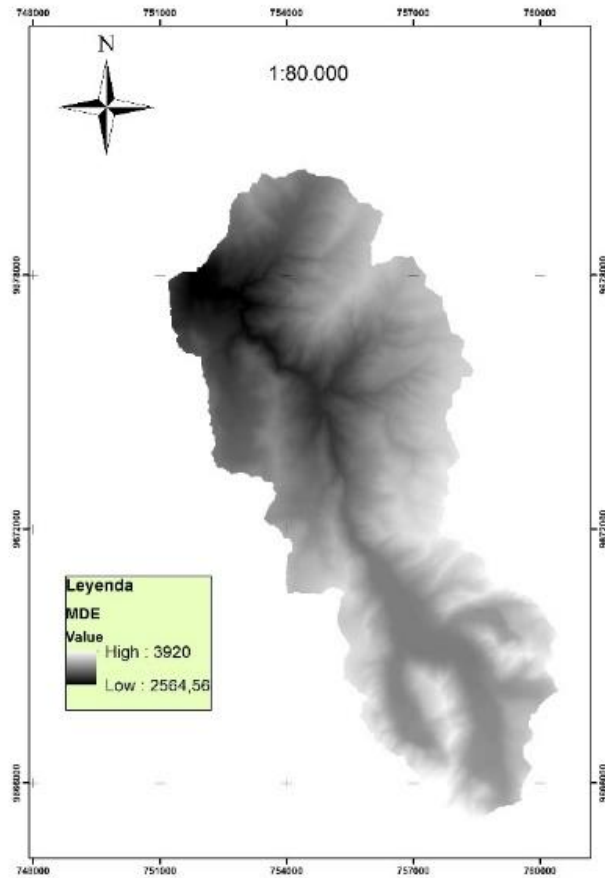


Figura 2.25. Modelo Digital de Elevaciones de la cuenca media.

Fuente: Autor

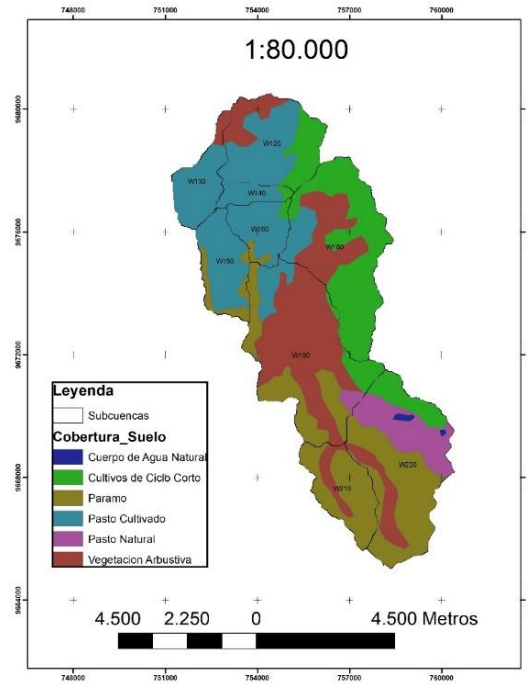


Figura 2.26. Cobertura vegetal de la cuenca media.

Fuente: Autor

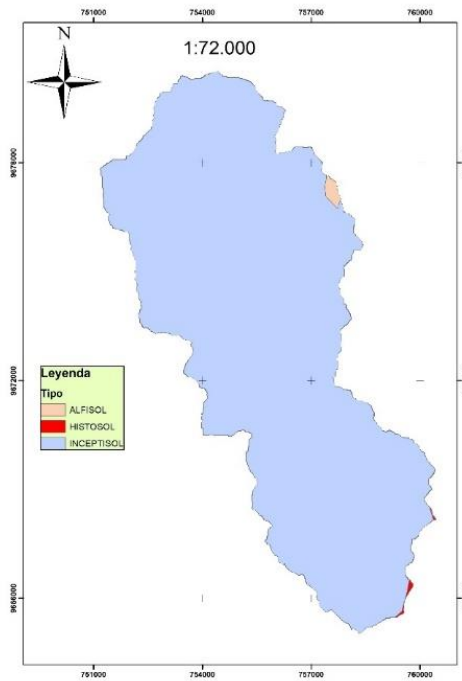


Figura 2.27. Tipo de suelo de la cuenca media.

Fuente: Autor

Se realiza un procedimiento igual al de la cuenca alta, se interpolan los 3 mapas y de esta manera se obtiene información más detallada y ordenada. Así ya se le puede asignar un valor de NC.

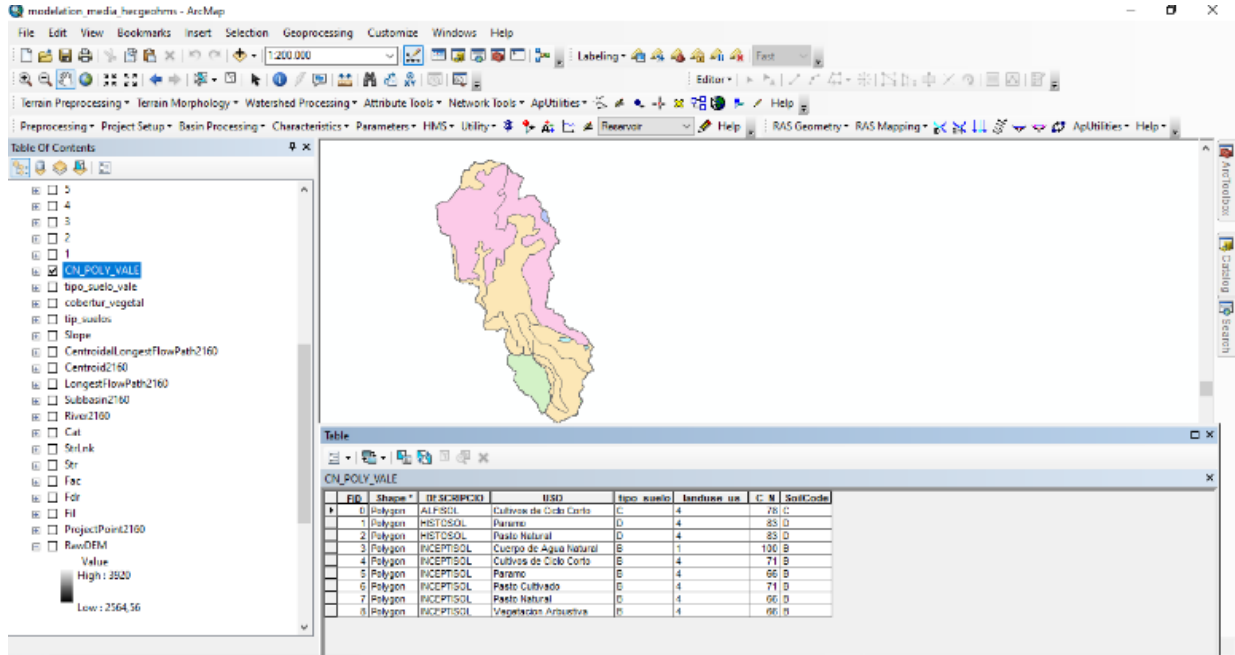


Figura 2.28. Mapa interpolado de la cuenca media.

Fuente: Autor.

En cada subcuenca se obtiene una variedad de uso de suelos, por ello, se utiliza la Ecuación (2.3), para definir un NC ponderado para cada subcuenca, y los resultados se observa en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Cálculo del número de curva de la cuenca media.

	Tipo de Suelo	Grupo Hidrológico	Uso de Suelo	NC	Área (Km²)	NC*Área	NC ponderado
W 120	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo corto	71	2,084	147,986	70
	INCEPTISOL	B	Pasto Cultivado	71	4,608	327,203	
	INCEPTISOL	B	Vegetación arbustiva	66	1,572	103,726	
W 130	INCEPTISOL	B	Pasto Cultivado	71	3,171	225,126	71
	INCEPTISOL	B	Vegetación arbustiva	66	0,355	23,444	
W140	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo corto	71	0,16	11,36	71
	INCEPTISOL	B	Pasto Cultivado	71	1,26	89,46	
W150	INCEPTISOL	B	Paramo	66	1,011	66,693	70
	INCEPTISOL	B	Pasto Cultivado	71	3,611	256,359	
W160	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo corto	71	0,173	12,256	71
	INCEPTISOL	B	Paramo	66	0,237	15,649	
	INCEPTISOL	B	Pasto Cultivado	71	2,824	200,524	
W180	ALFISOL	C	Cultivos de Ciclo corto	78	0,231	18,022	70
	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo corto	71	8,214	583,188	
	INCEPTISOL	B	Pasto Cultivado	71	1,223	86,832	
	INCEPTISOL	B	Vegetación arbustiva	66	3,612	238,369	
W190	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo corto	71	1,112	78,929	67
	INCEPTISOL	B	Paramo	66	4,131	272,658	
	INCEPTISOL	B	Pasto Cultivado	71	1,258	89,29	
	INCEPTISOL	B	Pasto Natural	66	0,366	24,142	
	INCEPTISOL	B	Vegetación arbustiva	66	9,087	599,738	

W210	INCEPTISOL	B	Paramo	66	4,209	277,776	66
	INCEPTISOL	B	Vegetación arbustiva	66	0,854	56,369	
W220	HISTOSOL	D	Paramo	83	0,054	4,51	67
	HISTOSOL	D	Pasto Natural	83	0,01	0,862	
	INCEPTISOL	B	Cuerpo de Agua natural	100	0,175	17,492	
	INCEPTISOL	B	Cultivos de Ciclo corto	71	1,742	123,681	
	INCEPTISOL	B	Paramo	66	6,6	435,612	
	INCEPTISOL	B	Pasto Natural	66	3,715	245,219	
	INCEPTISOL	B	Vegetación arbustiva	66	1,614	106,521	

Fuente: Autor

2.4.2.7 Modelación Hidrológica en el programa HEC-HMS.

De igual manera como todos los parámetros de la cuenca media se lo obtuvieron en ArcGIS y posteriormente se lo exportó al HEC-HMS en la Figura 2.29 se observa la cuenca media en dicho programa.

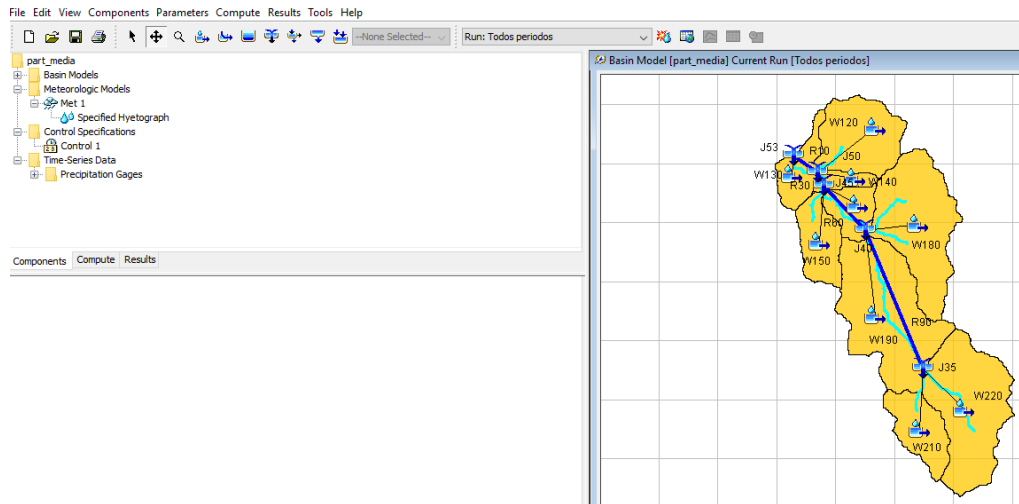


Figura 2.29. Cuenca media en HEC-HMS

Fuente: Autor

2.4.2.8 Datos ingresados en el programa HEC-HMS.

En la Tabla 2.12 se observa de manera simplificada los valores introducidos en el programa HEC-HMS de cada subcuenca.

Tabla 2.14. Datos de subcuencas para el modelamiento en HEC-HMS de la cuenca media.

Subcuenca	Área (Km ²)	NC	Tiempo de retardo (min)
W120	8,264	70	5,204
W130	3,526	71	4,892
W140	1,426	71	2,766
W150	4,621	70	5,218
W160	3,234	71	6,573
W180	13,280	70	7,288
W190	15,953	67	14,497
W210	5,063	66	4,723
W220	13,911	67	8,286

Fuente: Autor

Esta cuenca, cuenta con cuatro tramos de tránsito de avenidas como se observa en la Figura 2.29, los valores asumidos para dicho tramo se observan en la Tabla 2.13.

Tabla 2.15. Datos para el tránsito de avenidas de la cuenca alta.

Tramo	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	n de Manning	Ancho promedio de la sección transversal (m)
J35 - J40	6492,69	0,000555	0,0330	1,500
J40 - J45	2825,92	0,000566	0,0330	1,500
J45 - J50	880,83	0,000681	0,0330	1,500
J50 - J53	1579,11	0,01646	0,0330	1,500

Fuente: Autor

Se introduce los valores de precipitaciones con los cuales se realizaron los hietogramas de diseño de acuerdo al Anexo A1.2 y se asigna en cada subcuenca.

Se asigna una fecha y un tiempo de inicio y fin en el cual se plantea realizar el modelamiento, estos datos no causan impacto en el modelo por el cual se puede asignar valores deseados.

Posteriormente, se muestra resultados de Hidrogramas de salida de la cuenca media en diferentes periodos de retorno.

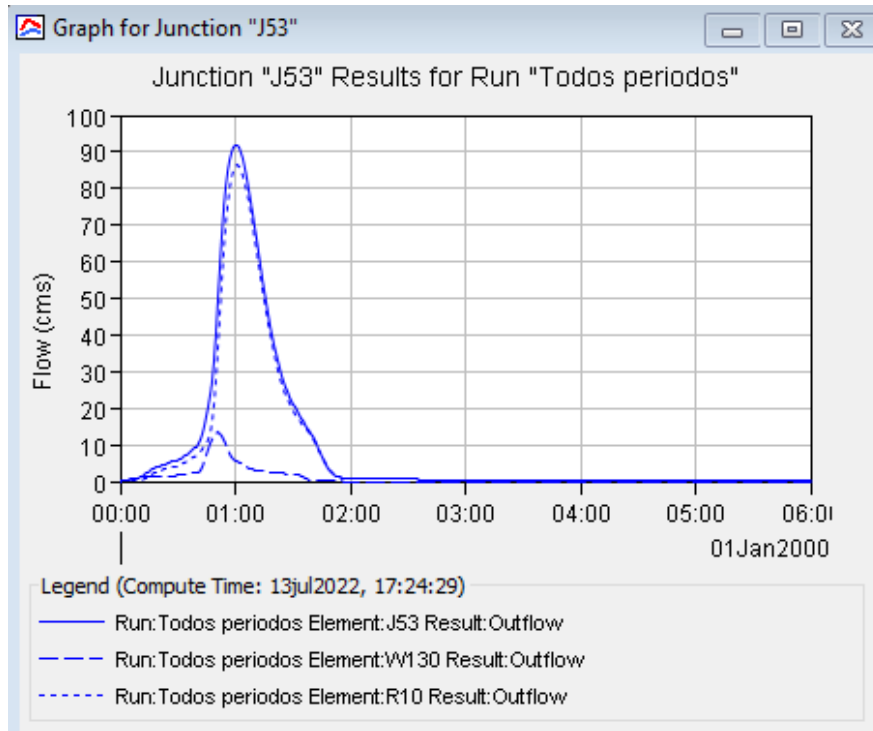


Figura 2.30. Hidrograma (T=2 años) de la cuenca media.

Fuente: Autor

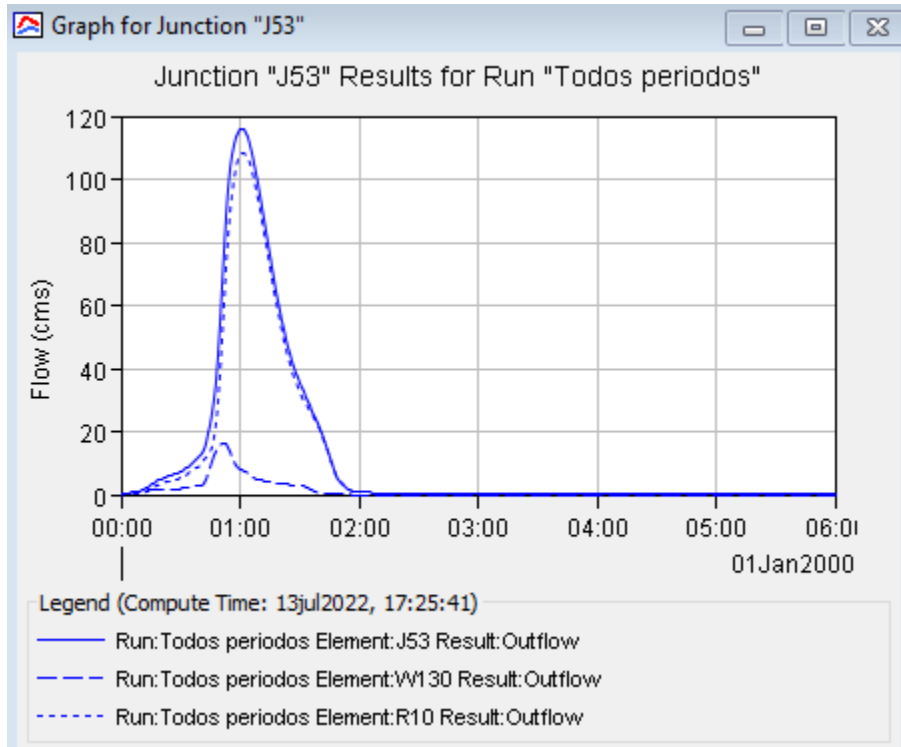


Figura 2.31. Hidrograma (T=5 años) de la cuenca media.

Fuente: Autor

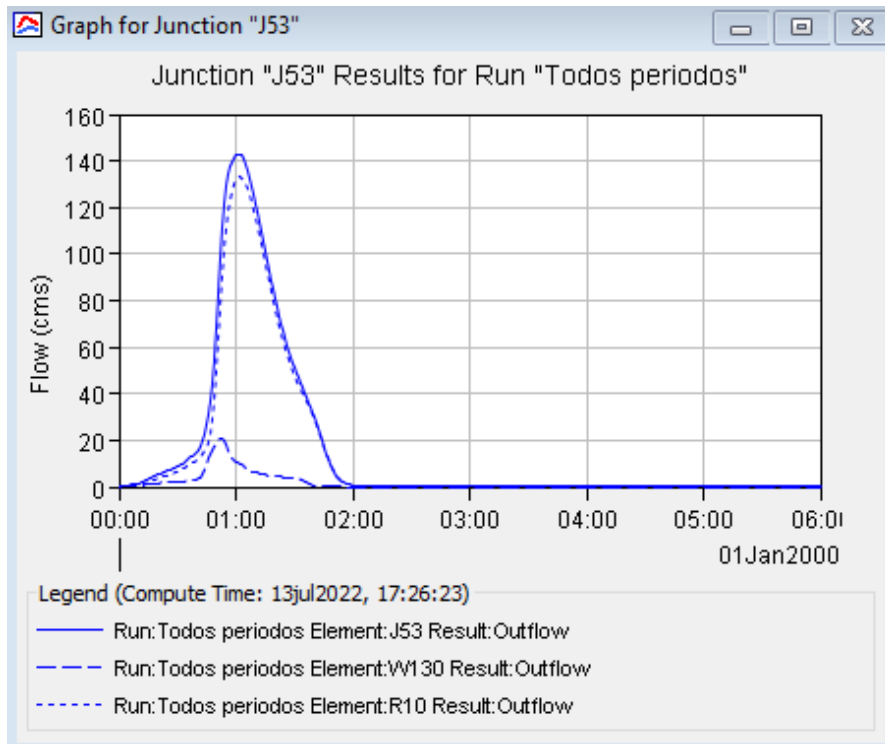


Figura 2.32. Hidrograma (T=10 años) de la cuenca media.

Fuente: Autor

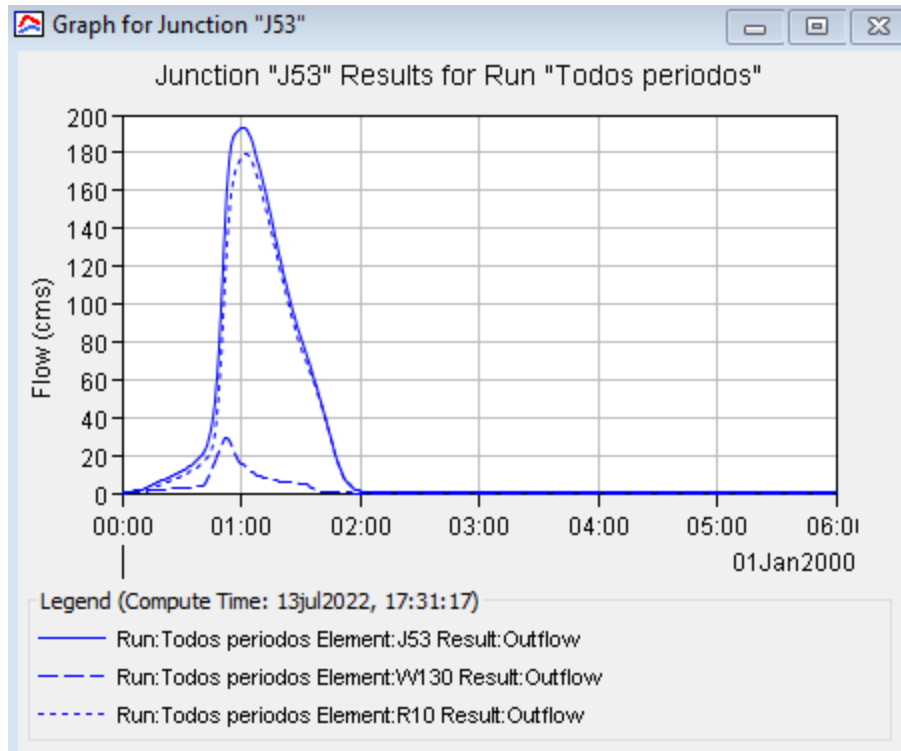


Figura 2.33. Hidrograma (T=25 años) de la cuenca media.

Fuente: Autor

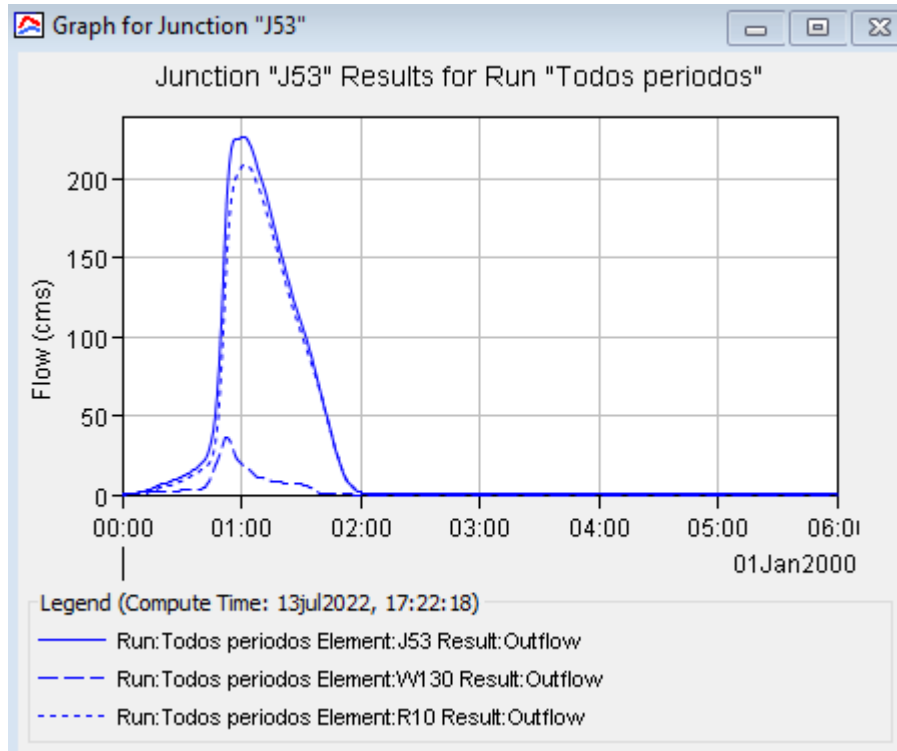


Figura 2.34. Hidrograma (T=50 años) de la cuenca media.

Fuente: Autor

En la Tabla 2.16 se muestra los caudales máximos de la cuenca media en forma numérica.

Tabla 2.16. Caudales máximos de la cuenca media en HEC-HMS.

T (años)	Q (m3/s)
2	91,7
5	116,2
10	143
25	193,5
50	248,4

Fuente: Autor

2.5 Obtención de caudales máximos por el método racional.

Para la obtención de los caudales máximos, se utilizó el método racional para nuestra cuenca de estudio, para la aplicación de este método se debe tener en cuenta algunas variables como,

coeficiente de escorrentía superficial, la intensidad máxima, y el área de influencia de nuestra cuenca.

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{360} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Donde:

C: Coeficiente de escorrentía superficial (adimensional)

I: Intensidad de la lluvia (mm/h)

A: Área de influencia de la cuenca (ha)

El coeficiente de escorrentía (C) representa la fracción de agua total de lluvia precipitada que realmente genera escorrentía superficial una vez se ha saturado el suelo por completo. Su valor depende de las características concretas del terreno que determinan la infiltración del agua en el suelo. (Asensio et al., s. f.)

Para la obtención del coeficiente de escorrentía se utilizó el método de Pevert, este método es basado en parcelas experimentales, con el siguiente contenido.

Uso del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo (%)		
		Arenos-limoso Limoso-arenoso	Limoso Limoso-arcilloso	Arcilloso
Bosque	0 – 5	0,10	0,30	0,40
	5 – 10	0,25	0,35	0,50
	10 – 30	0,30	0,40	0,60
	> 30	0,32	0,42	0,63
Pastizal	0,15	0,15	0,35	0,45
	5 – 10	0,30	0,40	0,55
	10 – 30	0,35	0,45	0,65
	>30	0,37	0,47	0,68
Cultivo agrícola	0 – 5	0,30	0,50	0,60
	5 – 10	0,40	0,66	0,70
	10 – 30	0,50	0,70	0,80
	> 30	0,53	0,74	0,84

Figura 2.35. Textura del suelo (%)

Fuente: (Asensio et al., s. f.)

El cálculo del coeficiente de escorrentía se lo hace en el software ArcGIS, en el cual, con la pendiente, textura y el uso del suelo de la cuenca, por medio de una triangulación entre estas tres

capas se obtiene la tabla del Anexo A3.1 en la cual se obtiene un código, que a su vez será clasificado de acuerdo al Anexo A3.2 y a la Figura 2.35, por ende se obtiene el valor del coeficiente de escorrentía para cada área como se muestra en el Anexo A3.3, ya que el programa ArcGIS ofrece la herramienta de recortar tramos de áreas, se recorta las áreas de cada cuenca a ser estudiada y se obtiene el valor de C para cada cuenca como se muestra en la Tabla 2.17.

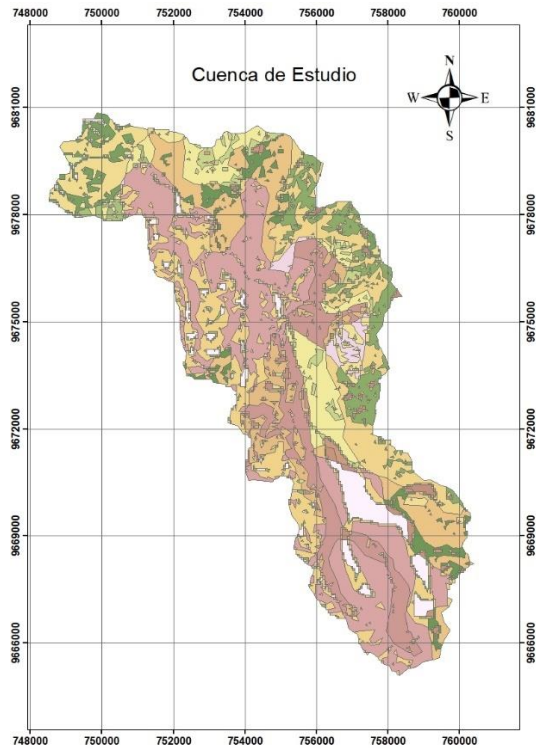


Figura 2.36. Mapa triangulado entre pendiente, textura y uso de suelo.

Fuente: Autor

Tabla 2.17. Valores del coeficiente de escorrentía superficial.

Cuenca	A*C	AT Cuenca	Valor de C
Baja	3440.8	7803.8	0.441
Media	2869.85	6927.88	0.414
Alta	827.55	2157.76	0.383

Fuente: Autor

Para el cálculo del tiempo de concentración de los tramos de estudio, se utiliza la Ecuación (2.2).

Tabla 2.18. Tiempo de concentración de las tres cuencas estudiadas.

Cuenca	Longitud del punto más lejano hasta la salida (L) (m)	Pendiente	Tiempo de concentración (min)
Baja	19504.22	0.08510	101.09
Media	15275.5	0.088	82.4
Alta	4601.56	0.160	26.03

Fuente: Autor

De acuerdo a la Ecuación (2.4) para obtener los caudales máximos en diferentes periodos de retorno se necesita valores de intensidad, ya que la estación M0139, se encuentra localizada en el cantón Gualaceo, (Latitud: 747183.56, Longitud:9681214.6) y dicha estación influye en toda la cuenca se utiliza las ecuaciones de cálculo de intensidad de esta estación.

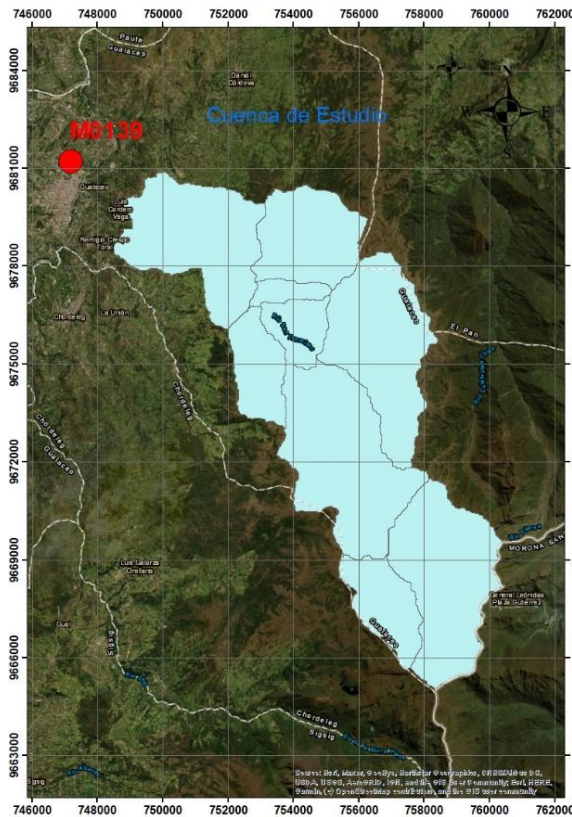


Figura 2.37. Ubicación de la estación pluviométrica M0139

Fuente: Autor

Por medio de las fórmulas de la Figura 2.5, se obtiene los valores de intensidad de acuerdo a cada tramo de estudio y a su tiempo de concentración, dichos valores de intensidad en mm/h para cada cuenca se presentan a continuación.

Tabla 2.19. Intensidades de la cuenca baja.

i (2)	18.00
i (5)	21.32
i (10)	24.22
i (25)	28.69
i (50)	32.60

Fuente: Autor

Tabla 2.20. Intensidades de la cuenca media.

i (2)	20.70
i (5)	24.52
i (10)	27.86
i (25)	32.99
i (50)	37.50

Fuente: Autor

Tabla 2.21. Intensidades de la cuenca alta.

i (2)	44.93
i (5)	52.75
i (10)	59.57
i (25)	69.95
i (50)	78.99

Fuente: Autor

Con todos los datos calculados y utilizando la Ecuación 2.4, se pueden obtener los caudales máximos en los tres tramos de estudio y para los diferentes periodos de retorno. Los caudales se detallan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 2.22. Caudales máximos de la cuenca baja.

Intensidades (I)		Area (A)	Coefficiente de escorrentia	Qmax (m3/s)
I (2)	18.00	7803.8	0.4409	172.04
I (5)	21.32	7803.8	0.4409	203.73
I (10)	24.22	7803.8	0.4409	231.52
I (25)	28.69	7803.8	0.4409	274.17
I (50)	32.60	7803.8	0.4409	311.57

Fuente: Autor

Tabla 2.23. Caudales máximos de la cuenca media.

Intensidades (I)		Area (A)	Coefficiente de escorrentia	Qmax (m3/s)
I (2)	20,70	6927,88	0,4	159,34
I (5)	24,52	6927,88	0,4	188,73
I (10)	27,86	6927,88	0,4	214,48
I (25)	32,99	6927,88	0,4	253,98
I (50)	37,50	6927,88	0,4	288,63

Fuente: Autor

Tabla 2.24. Caudales máximos de la cuenca alta.

Intensidades (I)		Area (A)	Coefficiente de escorrentia	Qmax (m3/s)
I (2)	44,93	2157,76	0,38	102,323
I (5)	52,75	2157,76	0,38	120,153
I (10)	59,57	2157,76	0,38	135,676
I (25)	69,95	2157,76	0,38	159,317
I (50)	78,99	2157,76	0,38	179,901

Fuente: Autor

2.6 Comparación de caudales máximos en (m³/s)

Como se obtuvo caudales en diferentes periodos de retorno y en diferentes cuencas, se realizará una comparación de caudales obtenidos en el HEC-HMS y por el método racional.

Tabla 2.25. Comparación de caudales de la cuenca alta.

Periodo de Retorno. (años)	Caudales máximos (m³/s)	
	HEC-HMS	Método Racional
2	76,1	102,323
5	87,9	120,153
10	98,3	135,676
25	115	159,317
50	132,8	179,901

Fuente: Autor

Tabla 2.26. Comparación de caudales de la cuenca media.

Periodo de Retorno. (años)	Caudales máximos (m³/s)	
	HEC-HMS	Método Racional
2	91,7	159,34
5	116,2	188,73
10	143	214,48
25	193,5	253,98
50	248,4	288,63

Fuente: Autor

CAPITULO III

ESTUDIO HIDRÁULICO

3.1 Información del tramo a ser estudiado.

3.1.1 Tramo de Estudio.

Para determinar el tramo de estudio a ser analizado y poder llegar a determinar los objetivos planteados para este estudio, el presente río San Francisco ubicado en la provincia del Azuay, en el cantón Gualaceo. El tramo de estudio está comprendido entre, aguas arriba del puente vía al Oriente y aguas abajo del mismo, hasta la unión de los ríos San Francisco con el rio Santa Barbara con una longitud de 1500 metros. Las orillas del río San Francisco dentro del tramo a ser estudiado, están compuestas por una cantidad baja de árboles de eucalipto y en su gran mayoría por arboles de sauce, así mismo existe áreas cubiertas por pasto natural (kikuyo).



Figura 3.1. Tramo donde se realizará el estudio.

Fuente: Google Earth.

3.1.2 Obtención de caudales máximos.

Como se describe en el punto 2.5. del Capítulo 2, en donde se detalla la forma en la que se realizó el cálculo de los caudales máximos, aplicando el método citado anteriormente, se llega a obtener un valor de C detallado en la tabla 3.1, para la cuenca baja en la que se realiza el estudio hidráulico, de la misma manera se obtiene un tiempo de concentración que se detalla en la tabla 3.2

Tabla 3.1 Valor de escorrentía para la cuenca.

A*C	AT Cuenca	Valor de C
3440.8	7803.8	0.441

Fuente: Autor.

Tabla 3.2 Tiempo de concentración de la cuenca.

Longitud del punto más lejano hasta la salida (L) (m)	Pendiente	Tiempo de concentración (min)
19504.22	0.08510	101.09

Fuente: Autor.

Mediante un estudio realizado por el INAMI, en donde se determina las ecuaciones para el cálculo de las intensidades máximas, se utiliza las ecuaciones de la estación M0139, esta se encuentra localizada en el cantón Gualaceo, (Latitud: 747183.56, Longitud:9681214.6)(Castro, s. f.-b)

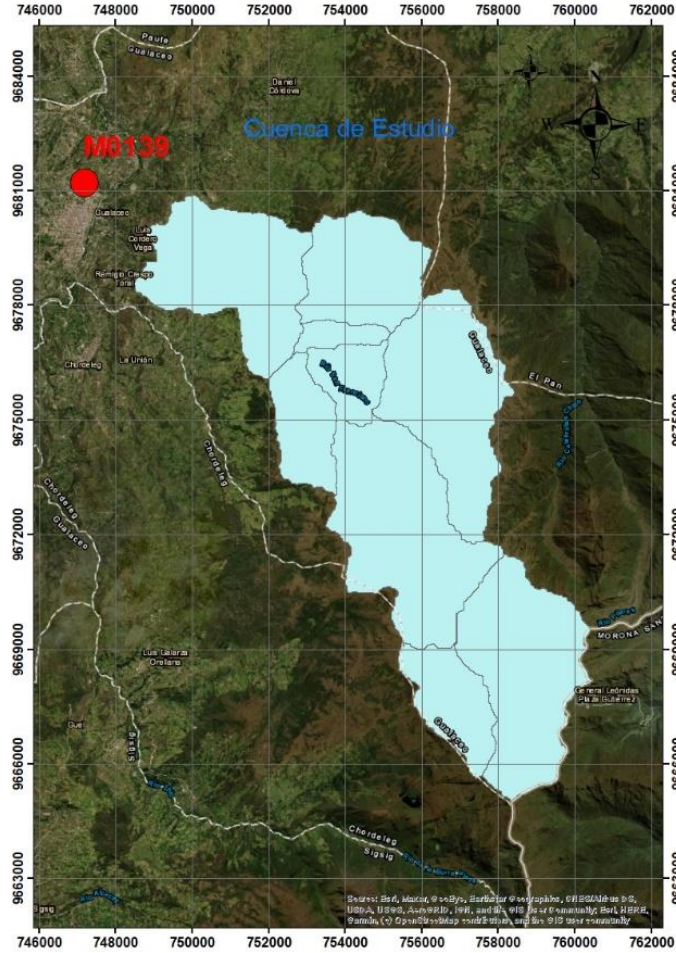


Figura 3.2. Ubicación de la estación M0139

Fuente: Autor.

Tabla 3.3. Ecuaciones de intensidad.

ESTACIÓN		INTERVALOS DE TIEMPO (minutos)	ECUACIONES	R	R ²
CÓDIGO	NOMBRE				
M0139	GUALACEO	5<30	$i = 163.3335 * T^{0.1753} * t^{-0.4333}$	0.9867	0.9775
		30<120	$i = 374.6061 * T^{0.1845} * t^{-0.6853}$	0.9934	0.9868
		120<1440	$i = 1406.3476 * T^{0.1642} * t^{-0.9557}$	0.9997	0.9993

Fuente: (Castro, s. f.-b)

Donde:

i: Intensidad (mm/h)

T: Período de retorno (años)

t: Tiempo de duración (minutos)

Con el tiempo de concentración de 101.09 minutos, se utiliza la tercera formula de la tabla anterior, para el cálculo de la intensidad con los periodos de retorno de 2,5,10,25,50 años como se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 3.4. Intensidades máximas para los periodos de retorno.

i (2)	18.00
i (5)	21.32
i (10)	24.22
i (25)	28.69
i (50)	32.60

Fuente: Autor.

Con todos los datos calculados, se pueden obtener los caudales máximos, para los diferentes periodos de retorno, con los cuales se va a desarrollar la respectiva simulación en el software Hec-Ras. Los caudales se detallan a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 3.5. Caudales máximos para los períodos de retorno.

Intensidades (I)		Area (A)	Coefficiente de escorrentia (c)	Qmax (m/s3)
i (2)	18.00	7803.8	0.4409134	172.04
i (5)	21.32	7803.8	0.4409134	203.73
i (10)	24.22	7803.8	0.4409134	231.52
i (25)	28.69	7803.8	0.4409134	274.17
i (50)	32.60	7803.8	0.4409134	311.57

Fuente: Autor.

3.1.3 Obtención de los valores de n de Manning.

Si bien los modelos que permiten reproducir el complejo sistema lluvia-escurrimiento-tránsito por la red hidrográfica, hay numerosos factores empíricos que deben ser valorados una y otra vez hasta lograr que los modelos reproduzcan lo más fielmente posible el comportamiento de la naturaleza. (*Manual Río Yanuncay: Determinación de la n de Manning en un río entre tramos de puentes* / Universidad del Azuay Casa Editora, 2021, p. 1)

La representación de la resistencia al movimiento del fluido en un río, está determinado por la n de Manning, este valor se asume dependiendo las características del cual está compuesto el canal y sus orillas, para la selección del valor de n de Manning de nuestro proyecto utilizamos un valor para el canal y otro valor tanto para la orilla derecha como la izquierda.

Valor de n Manning para el canal, $n=0.033$, ya que el canal se compone de un depósito aluvial proveniente de una formación glacial, principalmente de andesita con gravas bien o mal graduadas, sine estratificaciones. (*Manual Río Yanuncay: Determinación de la n de Manning en un río entre tramos de puentes* / Universidad del Azuay Casa Editora, 2021) (Anexo 5.1)

Para el valor de las orillas tanto derecha como la izquierda, asumimos el valor de $n=0.150$, esto en base a la descripción de las orillas del canal ya que constan, de una gran cantidad de sauces. ((PDF) *Ven Te Chow - HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS* / David Abarca Gutiérrez - Academia.edu, s. f., p.) (Anexo 5.2)

3.2 Construcción del modelo digital de elevaciones (MDE).

En este caso de la palabra elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura. Este término se utiliza con frecuencia en los estados unidos para describir un arreglo rectangular o hexagonal de puntos con valores de elevación obtenidos por métodos fotogramétricos o cartográficos. (Fallas, s. f.)

La obtención de este modelo digital de elevaciones (MDE) es parte fundamental para poder desarrollar de manera exitosa el estudio hidráulico, para esto se tiene que obtener de manera rigurosa y precisa los datos en campo, y a su vez con los datos obtenidos se tiene que realizar un postproceso de manera minuciosa. Esto con el fin de que la modelación que se necesita en dos dimensiones arroje resultados que, satisfagan los objetivos planteados dentro de este capítulo. Por otro lado, si el postproceso es realizado de manera errónea no generara los resultados apegados a la realidad.

Para la generación de este modelo digital de elevaciones, se realizó un levantamiento topográfico en el tramo de la zona de estudio, tomando puntos en el centro del cauce del río, en las orillas y a cada uno de los costados del cauce con una longitud de 50 metros, hacia la derecha y a la izquierda, en la zona más problemática se amplió esta sección, debido a que por evidencia fotográfica se puede observar la magnitud de la inundación. (Anexo 6)

Con los puntos obtenidos se importa al software CIVIL CAD como se detalla en la figura 3.4, en donde con los mismos se crea una superficie de trabajo con curvas de nivel, que servirán para procesar el MDE, en el programa de ARC MAP, como se aprecia en la figura 3.5.

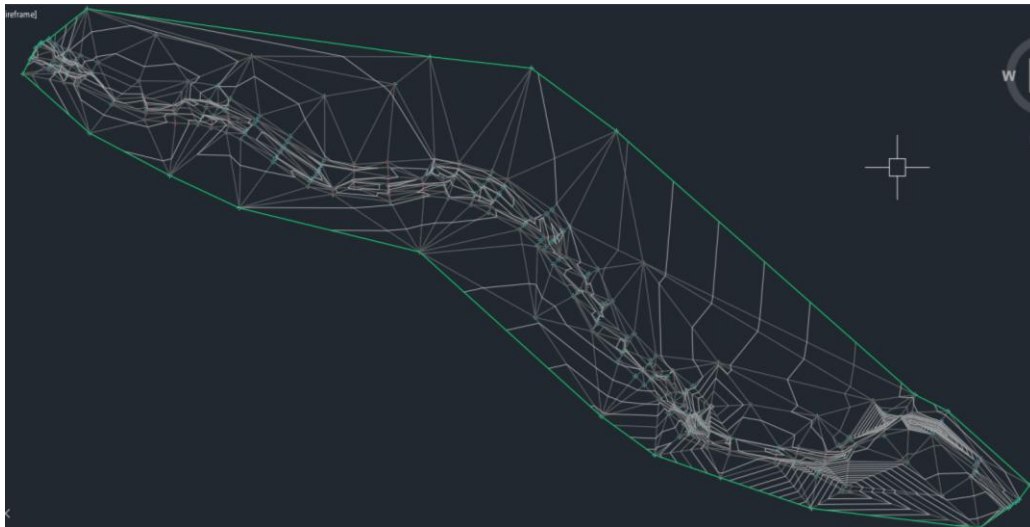


Figura 3.3. Superficie del tramo de estudio.

Fuente: Autor.



Figura 3.4. Modelo Digital de Elevación de la cuenca.

Fuente: Autor.

3.3 Modelación Hidráulica en HEC-RAS.

Cuando se estudia un tramo de un río, para determinar cuál es su comportamiento, para esto se debe tener en cuenta varios factores que son de vital importancia, como son la forma de cauce, la pendiente, el material del cual está compuesto el cauce y la presencia de vegetación en sus orillas. Para saber cuál es el comportamiento se utilizó el software HEC-RAS que fue desarrollado por Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers. Es un software gratuito el cual facilita aún más los procesos de modelación hidráulica.

Este software permite realizar la simulación de diferentes caudales, los cuales ayudan para llegar a obtener resultados ya sea en secciones, en tablas o de forma gráfica, en este caso ayudará para obtener las manchas de inundación en las orillas del cauce, dentro de los diferentes caudales máximos ya calculados con sus diferentes periodos de retorno.

3.3.1 Creación de la Geometría en RAS Mapper

Para la creación de la geometría de la zona de estudio, se empleó la herramienta RAS Mapper, la cual se encuentra dentro del mismo software HEC-RAS, para esto se importa el MDE, se procede a realizar la geometría tanto del cauce, de las orillas y de las zonas de inundación.

Esta geometría es muy importante ya que de esto depende el correcto funcionamiento de la simulación que se procederá a realizar de manera posterior, en esta sección se tiene que tener una buena precisión, esto debido a que se tiene que crear de manera que concuerde con el cauce y las

orillas en campo, para esto se ayuda del MDE, en el cual se aprecia el cauce del río y sus orillas, y así se realiza la geometría del tramo de estudio.

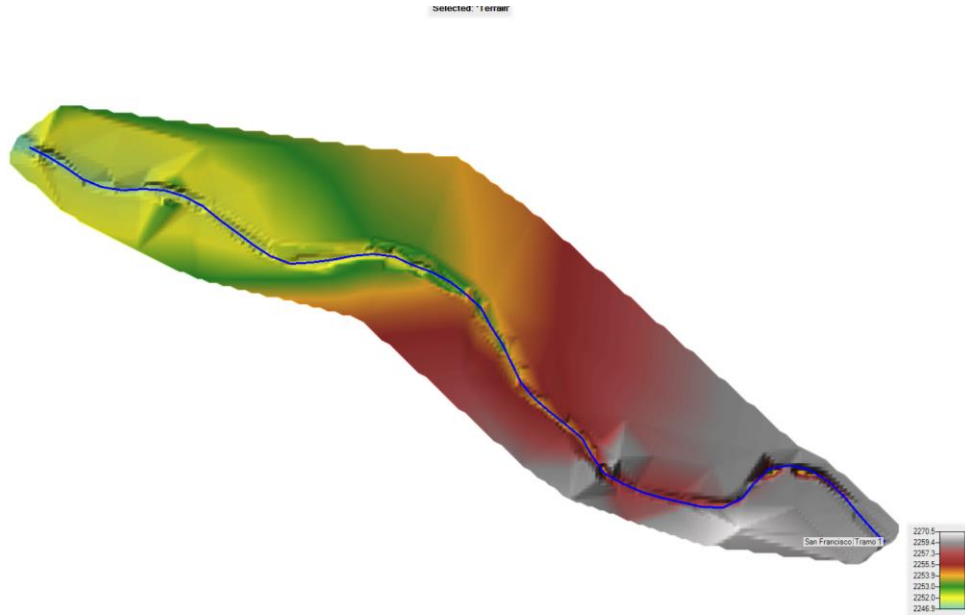


Figura 3.5. Geometría del cauce principal del río.

Fuente: Autor.

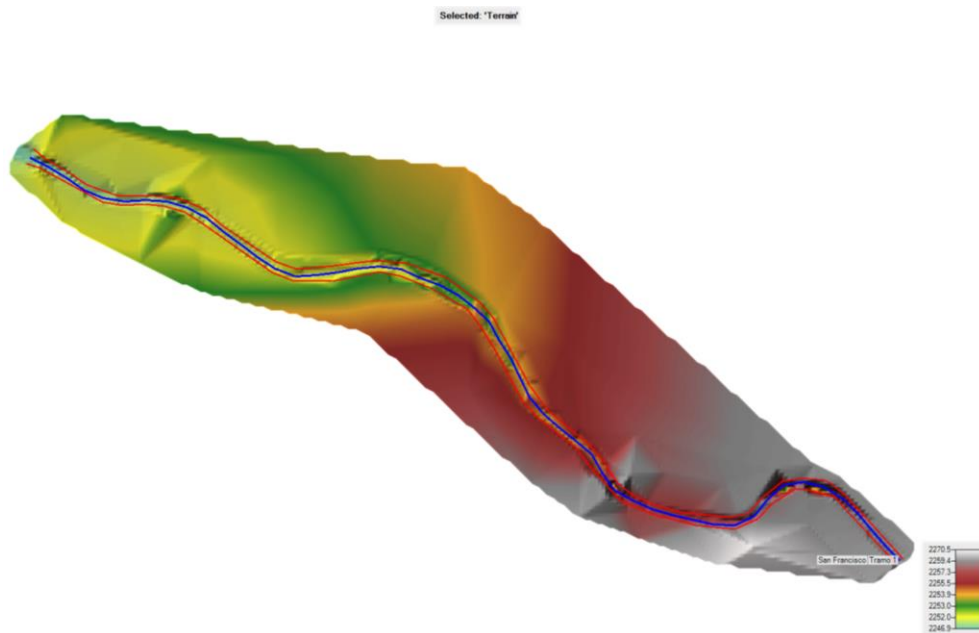
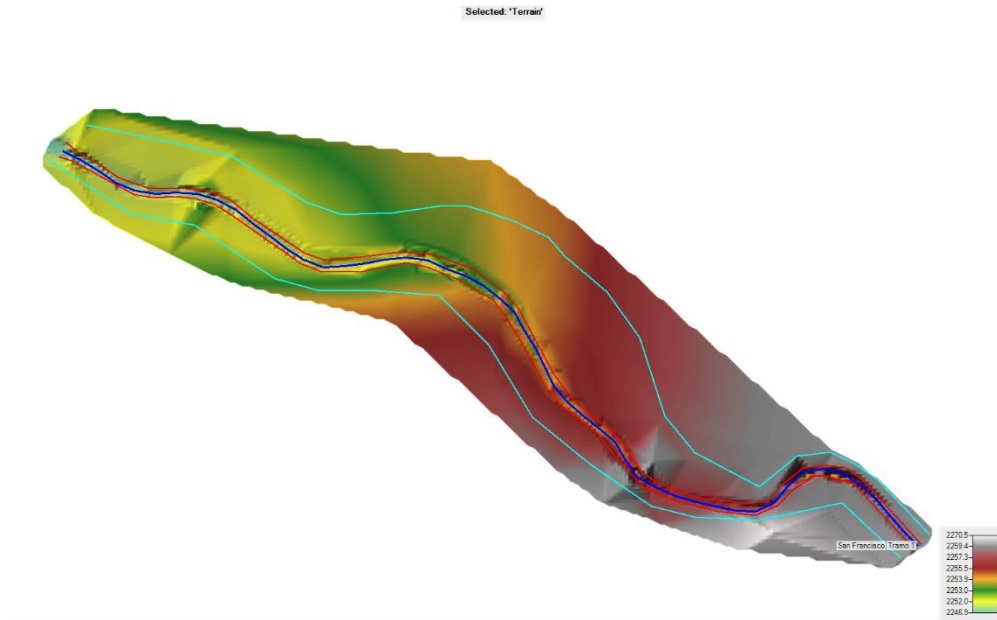


Figura 3.6. Geometría de las orillas del río.

Fuente: Autor.

Figura



3.7.

Geometría de las zonas de inundación.

Fuente: Autor.

A continuación, se realizan las secciones transversales en toda la longitud del río, estas se las realizó cada 10m, y con una longitud transversal al cauce de 100m, en la zona que se da la mayor inundación allí se amplió la longitud de la sección, esto con el fin de abarcar la mayor parte en esta zona.

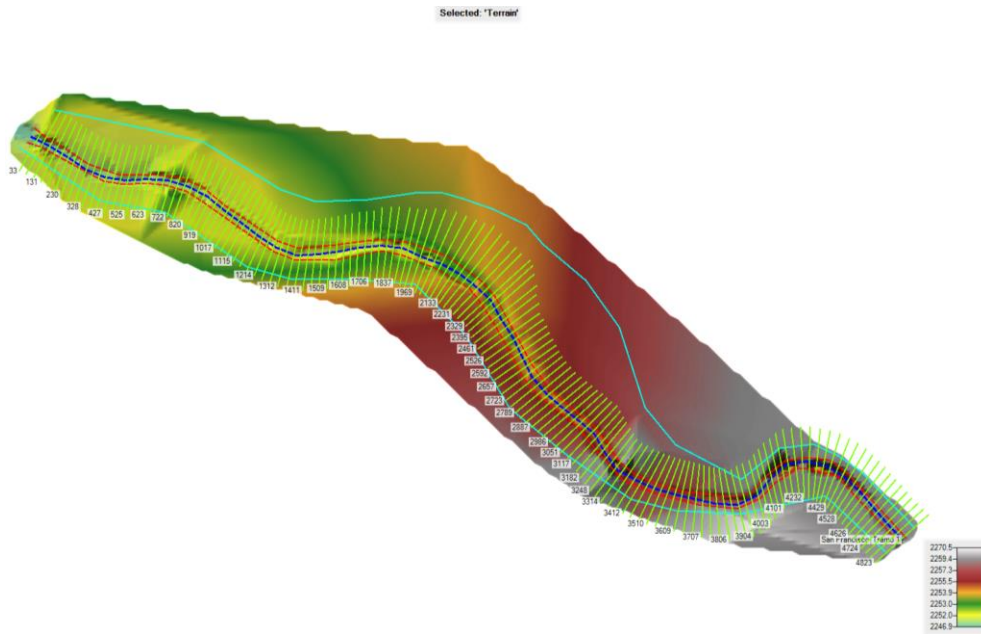


Figura 3.8. Secciones transversales.

Fuente: Autor.

3.3.2 Ingreso de Datos en el HEC-Ras.

Una vez que se tiene la geometría en el RAS Mapper, se procede al ingreso de los diferentes datos que se necesita para proceder con la simulación, esto se lo realiza ya en el programa de HEC-RAS, como primer paso se procede a ingresar los valores del n de Manning.

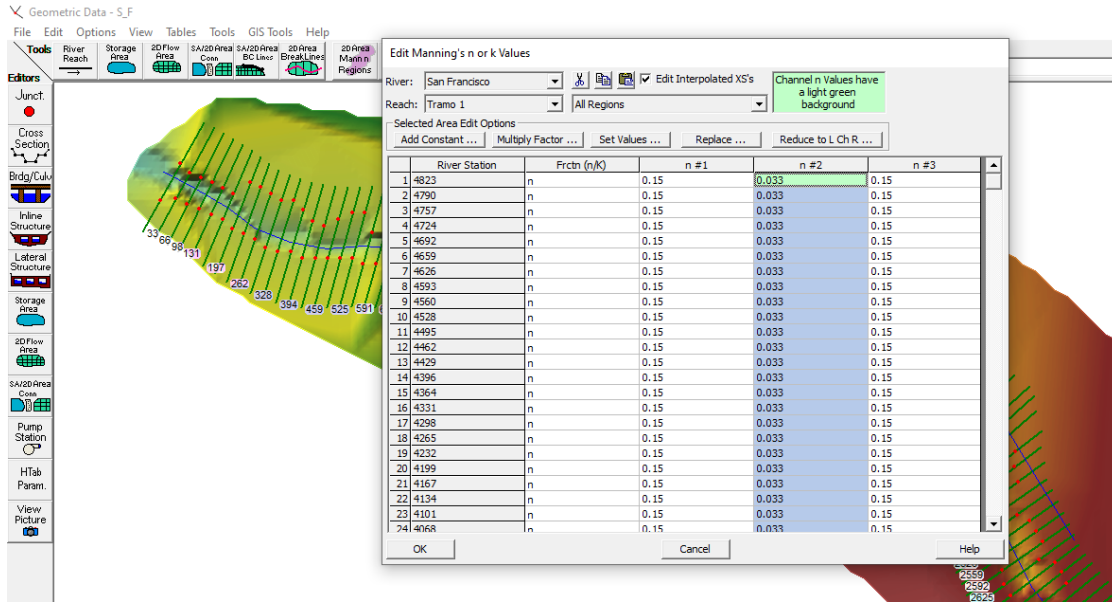


Figura 3.9. Ingreso de valores de Manning.

Fuente: Autor.

Como se aprecia en la figura 3.9. se ingresan los tres valores del n de Manning, en la columna n#1 se ingresa el valor para la orilla izquierda $n=0.150$, en la columna n#2 se ingresa el valor del cauce $n=0.033$, y en la columna n#3 se ingresa el valor de $n=0.150$ el cual corresponde a la orilla derecha.

A continuación, se procede a crear un flujo constante, para esto se pide algunos parámetros como son: el caudal y las condiciones de borde. Se introducen los datos de caudales máximos ya calculados, estos caudales corresponden a los periodos de retorno de 2,5,10,25 y 50 años.

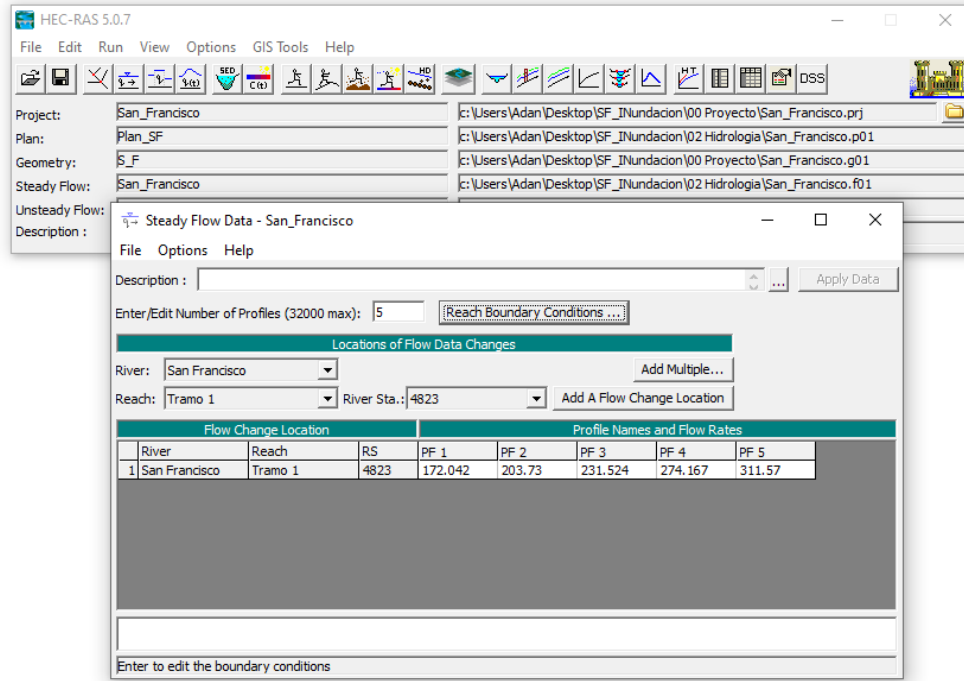


Figura 3.10. Ingreso de caudales máximos.

Fuente: Autor.

Seguido de esto se procede a ingresar las condiciones de borde, esto es parte fundamental para la simulación ya que estas condiciones, son las que precisan cual es el comportamiento del modelo en los límites, los cuales son aguas arriba y aguas abajo. Para este modelo se escogen las condiciones de calado normal, y utilizando la pendiente del tramo entre las dos secciones consecutivas más cercanas tanto para aguas abajo como para aguas arriba.

Tabla 3.6. Condiciones de borde.

Condiciones de Borde	
Aguas Arriba	0.02786
Aguas Abajo	0.01762

Fuente: Autor.

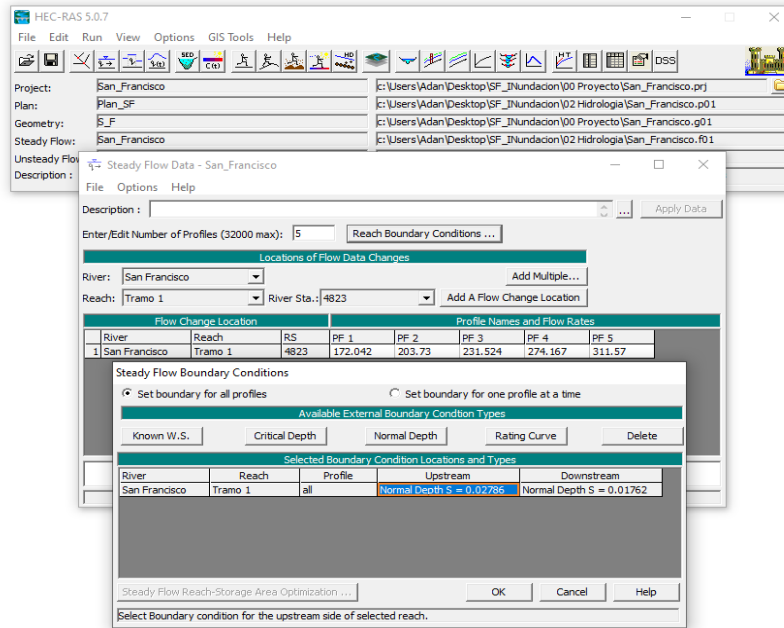


Figura 3.11. Ingreso de condiciones de borde.

Fuente: Autor.

3.3.3 Simulación del modelo.

Una vez que se ingresa todos los datos, se procede a dar paso a la simulación del modelo hidráulico, mediante la simulación de flujo constante. Como se detalla en la imagen a continuación.

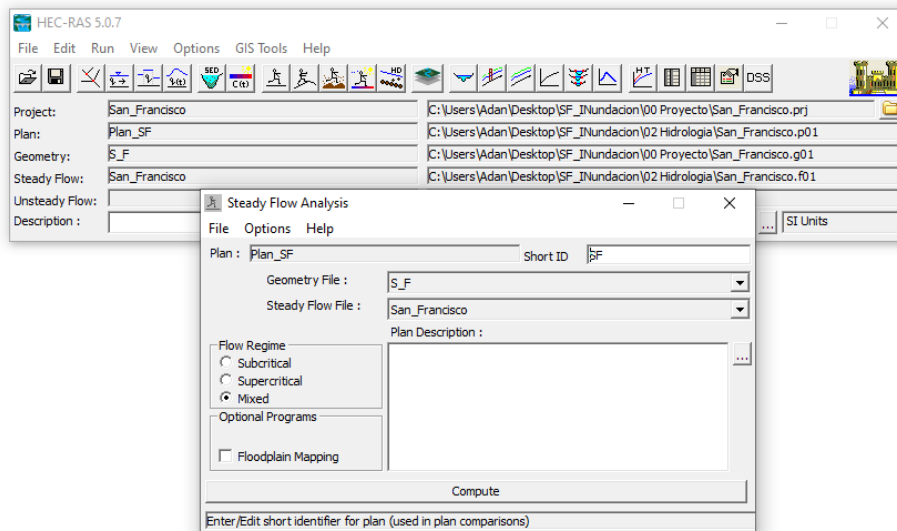


Figura 3.12. Análisis de flujo constante.

Fuente: Autor.

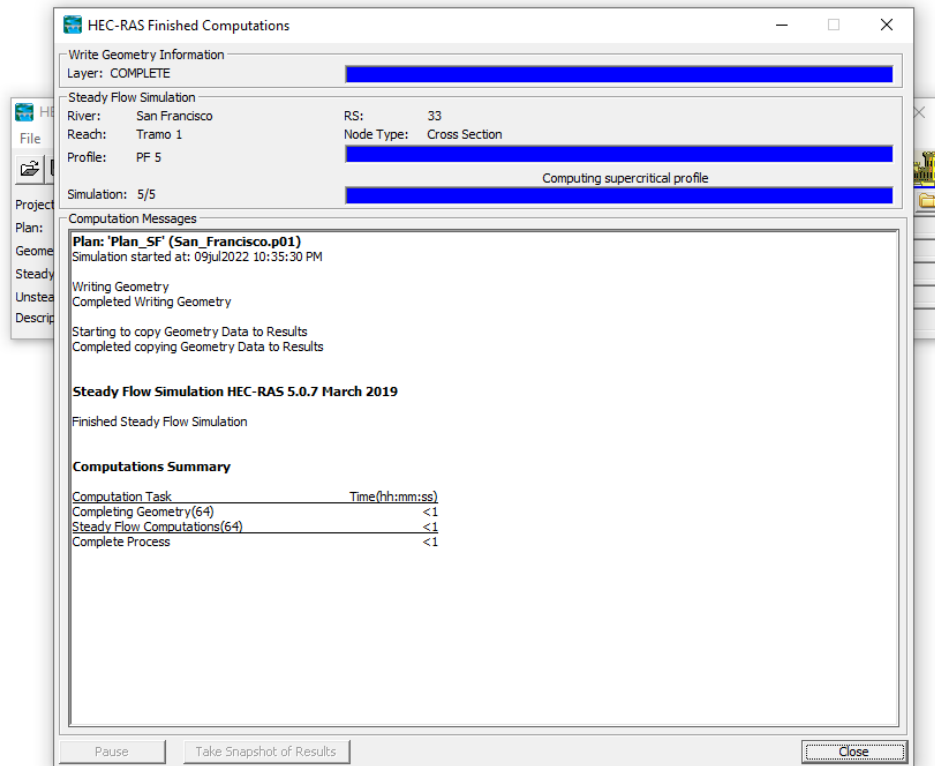


Figura 3.13. Simulación finalizada.

Fuente: Autor.

3.4 Resultados

Una vez que la simulación del modelo se completa con éxito, se procede a visualizar los resultados del mismo en RAS-MAPPER, aquí se procederá a observar las manchas de inundaciones generadas por el software, para los diferentes caudales y cuáles son las zonas afectadas por las inundaciones generadas. Como se detalla en las figuras a continuación.

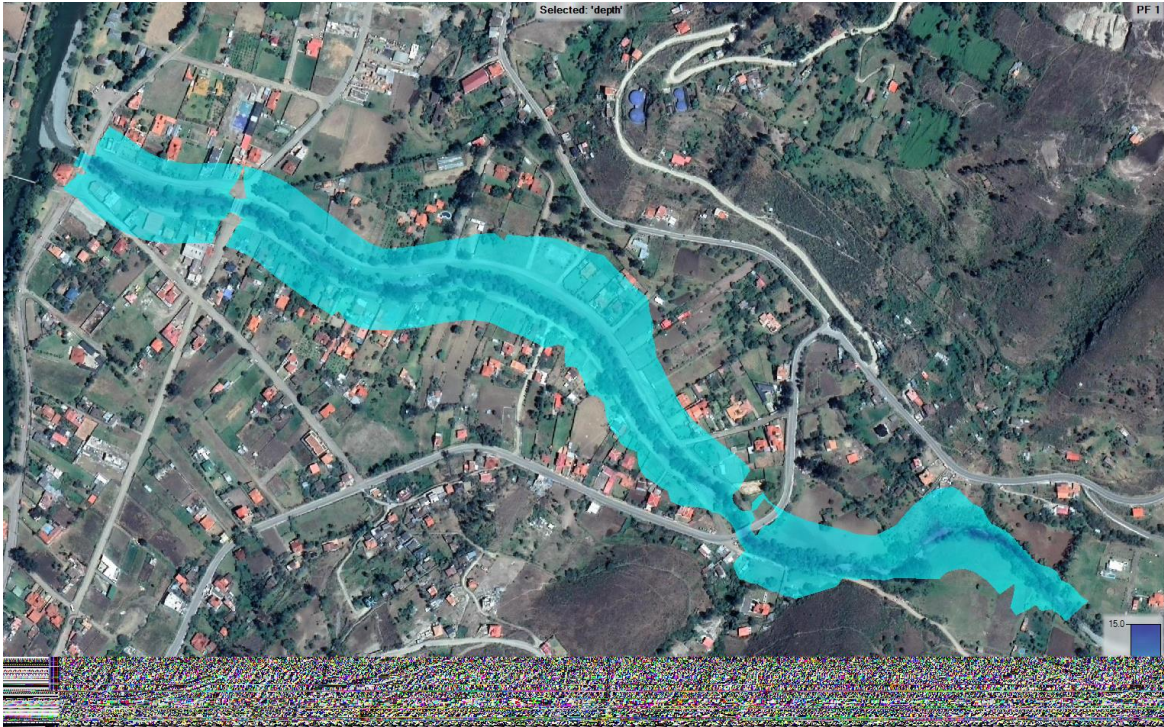


Figura 3.14. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=2 años.

Fuente: Autor.

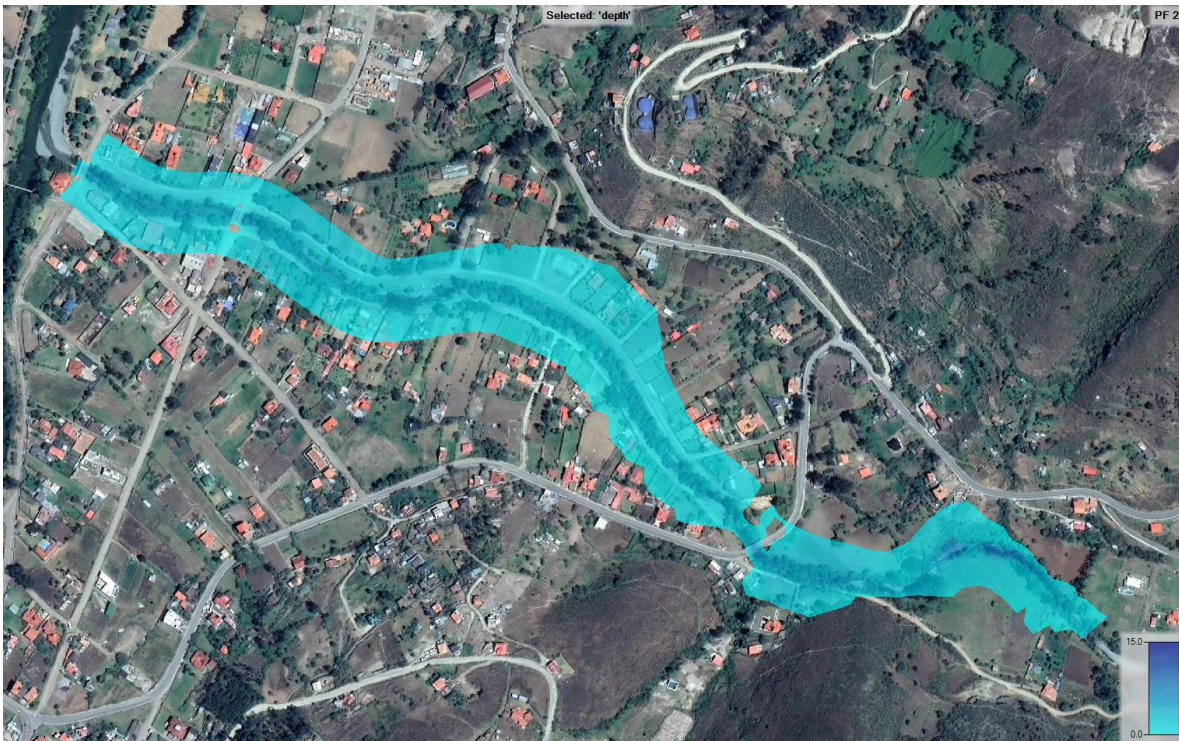


Figura 3.15. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=5 años.

Fuente: Autor.



Figura 3.16. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=10 años.

Fuente: Autor.



Figura 3.17. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=25 años.

Fuente: Autor.



Figura 3.18. Vista en planta de la mancha de inundación para un TR=50 años.

Fuente: Autor.

En la inundación registrada el día 3 de julio de 2022, se pudo notar la magnitud de la inundación en un periodo constante de lluvia, dicho evento provocó el desbordamiento del cauce del río, el cual puso en evidencia las zonas más afectadas por la inundación, por consiguiente, se hace la reconstrucción de dicho evento, como se lo puede visualizar en la figura 3.19. En el cual se ve que la zona más afectada es la parte derecha de la orilla, mediante esta reconstrucción, comparamos con las manchas de inundación ya obtenidas, es así que la más parecida a nuestra reconstrucción, es para un periodo de retorno TR = 2 años como se aprecia en la figura 3.20.



Figura 3.19. Reconstrucción de Inundación 3 de julio de 2022.

Fuente: Autor.

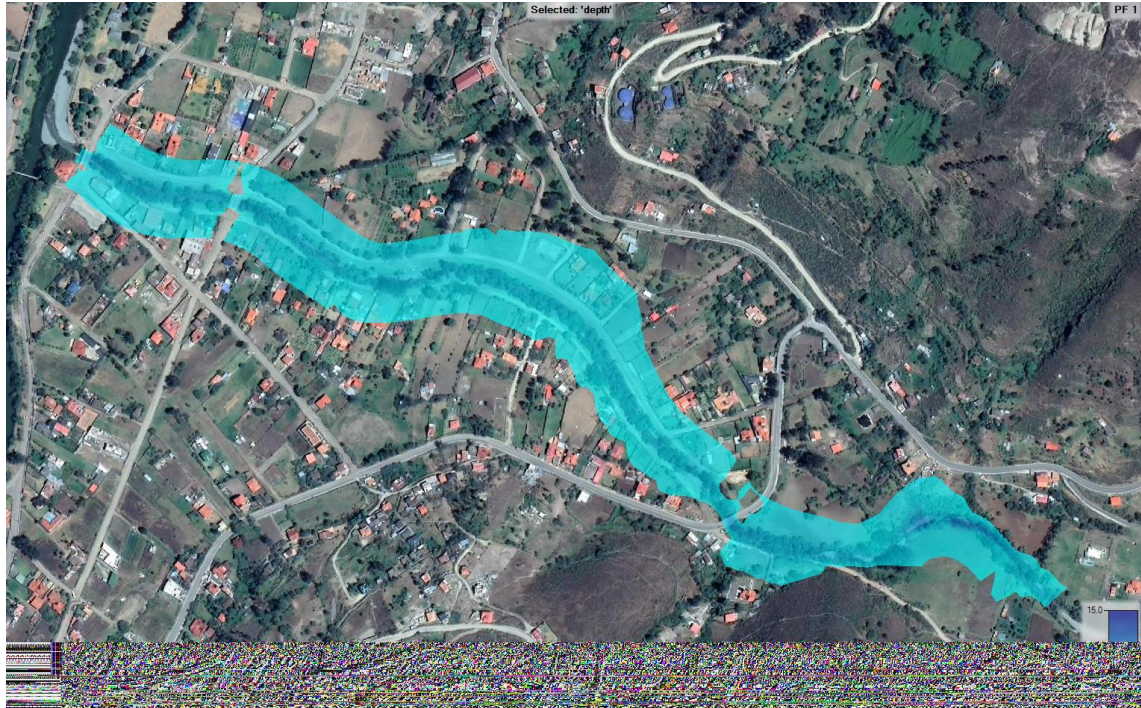


Figura 3.20. Inundación para un TR= 2 años.

Fuente: Autor.

CAPITULO IV

PROPUESTA DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO

4.1 Descripción de Estaciones de Monitoreo

4.1.1 Estación Pluviométrica

El monitoreo de precipitaciones es un parámetro muy importante para muchas áreas de aplicación, un ejemplo claro es que, puede estar lloviendo mucho en un lugar, pero no en otro, el cual se puede encontrar a unas cuerdas de distancia, esto revela que las precipitaciones en una zona especifican pueden varían en cuestión de cuerdas, para lo cual es importante tener estaciones de medición de precipitaciones. Es así que una estación pluviométrica es la que se compone como su nombre lo indica de un pluviómetro o recipiente, el cual nos ayuda a tener una medida de la cantidad de lluvia que cae en esa región entre dos mediciones realizadas consecutivamente. Lo cual es de mucha ayuda para tener datos reales de las precipitaciones que caen en la zona.

4.1.2 Estación de Sensor Ultrasónico de Nivel

Las estaciones hidrológicas tienen por objetivo recopilar información o datos, de los diferentes recursos hídricos ya sean estos superficiales, de distribución geográfica o variabilidad por medio del tiempo, así también es algo sumamente importante la magnitud y la frecuencia, tanto de las inundaciones como de las épocas de sequía.

Dentro de las estaciones hidrológicas existe la clasificación:

Estaciones convencionales, estas son directamente operadas por personal previamente capacitado para la toma de lecturas de las reglas limnimétricas.

Estaciones automáticas, estas trabajan mediante sensores digitales los cuales almacenan datos, y estos necesariamente requieren de la toma de información en el sitio.

Estaciones automáticas de satélite, estas estaciones tienen la característica peculiar que muestran los datos en tiempo real, además de estar provistas de sensores digitales, es decir que cuando en un río el nivel de agua aumenta, en ese instante estas estaciones comunican este suceso a través de un computador.

Para este caso recomendamos la instalación de una estación automática de satélite como es, la estación de sensor ultrasónico de nivel, debido a la facilidad y rapidez en la entrega de información ante cualquier evento que se presente, como el aumento del caudal del río.

Hoy en día el control de los niveles en un río es de suma importancia para el control de inundaciones, es así que existe la estación de sensor ultrasónico de nivel. Este sistema incluye un instrumento virtual, a través del cual se activa automáticamente una alarma visual en la pantalla del computador, así como también una alarma sonora, esto ocurre cuando el nivel de agua en un río haya sobrepasado un cierto límite definido como riesgo de inundación. Este desarrollo podrá ser usado en una aplicación real, para alertar oportunamente a la población cuando hay riesgo de inundación. (MARÍN et al., s. f.)

4.1.3 Regletas Limnimétricas.

Son aparatos que toma medidas de nivel de agua sin que estas queden registradas, por lo tanto, se requiere de toma de medidas in situ.

4.2 Generalidades para la Ubicación de Estaciones

4.2.1 Estación Pluviométrica

El lugar donde se piensa ubicar la estación debe ser muy bien analizada ya que es de suma importancia, ya que al no tomar en cuenta este factor se puede tener errores de representatividad elevados cuando se tratan de estaciones aisladas.

La ubicación idónea debe ser en un lugar geográficamente delimitado, también debe ser un lugar amplio de aproximadamente 10 por 7 o 14 metros, según su categoría; la estación se debe colocar sobre un terreno llano y cubierta de grama o hierba baja. “En lo posible no debe haber laderas próximas y no debe ubicarse en una hondonada. Además, debe estar alejada de árboles, edificios y otros obstáculos”. (Jiménez, 2014).

Una recomendación que nos hace la Organización Meteorológica Mundial (OMM), es que las estaciones pluviométricas deben ser inspeccionadas al menos cada tres años, o con una mayor frecuencia de ser necesario, esto con el fin de garantizar el mantenimiento de las normas de observación de gran calidad, así también el correcto reglaje y funcionamiento de sus instrumentos. De igual manera es importante que ante cualquier cambio que se haya dado en el entorno alrededor de la estación, se deba adoptar medidas adecuadas para garantizar el correcto funcionamiento de la estación. Otra recomendación que nos da, es que las estaciones pluviométricas deben estar más

cercanas unas de otras, pero la densidad dependerá netamente de las características geográficas y de las consideraciones económicas. (Organización Meteorológica Mundial (Ginebra), 2017)

4.2.2 Sensor Ultrasónico

Este sensor mide el nivel del cauce por medio de ultrasonido, esto quiere decir que la estación genera una onda hacia el río y toma el tiempo que se tarda en ir y volver, por lo tanto, no es directamente con el contacto del cauce, mientras menos toque el agua más durabilidad tendrá el aparato.

La infraestructura para sostener este dispositivo debe ser metalmecánica robusta para que quede bien anclada y como el sensor funciona con un panel solar, al momento que se quede sin energía y después vuelva a encenderse no se mueva, así evitando que el dispositivo se pierda.

Dicho dispositivo debe estar a la vista y al alcance de los operarios, para dar un adecuado mantenimiento.

Por lo tanto, la ubicación idónea para la colocación de este sensor puede ser anclada a un puente ya que se podrá dar mantenimiento y se tendrá acceso a dicha estación.

4.2.3 Regletas limnimétricas.

De acuerdo al Reglamento Técnico de la OMM (Organización Meteorológica Mundial), recomienda ciertas consideraciones generales para la ubicación de regletas limnimétricas.

- a. Esta regleta deberá ubicarse con preferencia cerca de la orilla del río, de esta manera se puede permitir la lectura directa del nivel.
- b. Este aparato debe ser colocado lo más cerca que se pueda de la sección de medición, pero evitando que esta acción afecte las condiciones de corriente en ese punto.
- c. Debe ser ubicada en un lugar de fácil y cómodo acceso, con el objetivo de que el observador pueda hacer las mediciones lo más cerca posible del nivel de sus ojos.

4.3 Ubicaciones en la zona de Estudio.

4.3.1 Ubicación de estación pluviométrica

Debido a que en la zona de la cuenca del San Francisco no existe ninguna estación pluviométrica, se ve la necesidad de ubicar una estación en la zona alta de la cuenca, para tener datos reales de las precipitaciones que caen en la zona de la cuenca. Para esto se ha propuesto la ubicación de dicha estación, la cual estará ubicada del puente San Francisco aguas arriba unos 250 metros, ya que es una zona propicia, no contiene laderas por ningún lado, y es una zona plana para la colocación de la estación, se da como opción la ubicación detallada en la figura 4.1.

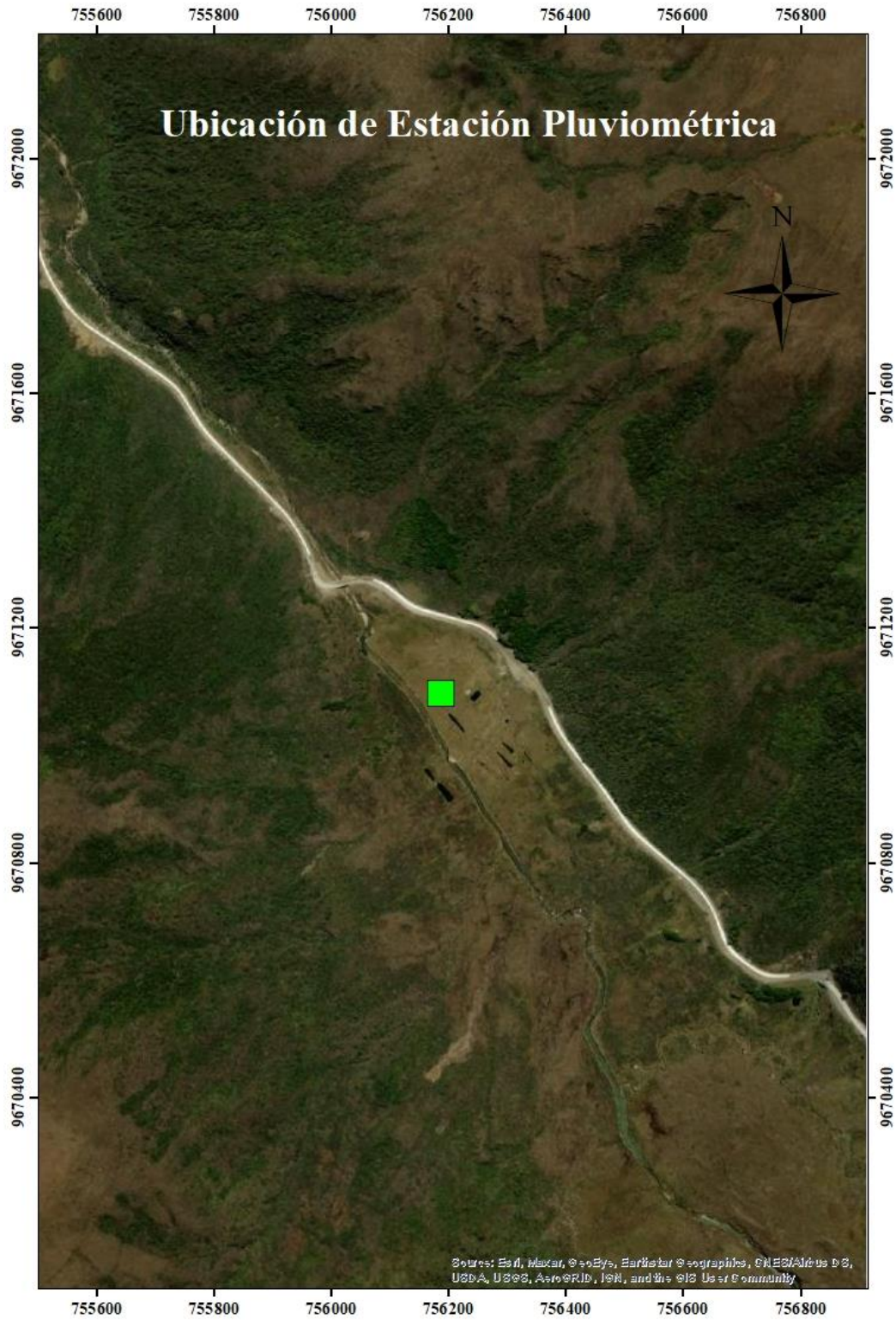


Figura 4.1. Mapa de ubicación de Estación Pluviométrica.

Fuente: Autor.

4.3.2 Ubicación de Estación de Sensor Ultrasónico de Nivel.

Se recomienda ubicarlas en la zona de los puentes en dirección aguas arriba, y tiene que ser un tramo en lo posible recto, es así que se propone dos puentes para la ubicación de dichas estaciones, la ubicación que se propone es en la zona media de la cuenca en el puente llamado San Francisco, y otra estación en la parte baja en el puente S/N, esto para tener una referencia de los caudales en esas dos zonas ya que debido a las constantes inundaciones en la zona baja, es importante color esta estación en dicha ubicación ya que existes zonas pobladas a los dos lados de la orilla del rio que se está estudiando. Las ubicaciones de las estaciones se detallan en las siguientes figuras 4.2 y 4.3



Figura 4.2. Tramo recto antes del puente

Fuente: Autor.

A continuación, en la figura 4.3 se puede observar el lugar tentativo en el puente, donde iría la estación antes mencionada, ya que esta debe estar ubicada en una zona del puente que sea de fácil acceso para su instalación y su posterior mantenimiento.



Figura 4.3. Ubicación de la estación en el puente San Francisco.

Fuente: Autor.

Así también se observa un mapa de ubicación de la zona donde se encuentra el puente en la figura 4.4, en donde se pretende colocar la estación, dicho puente se encuentra en la zona media de la cuenca del San Francisco.

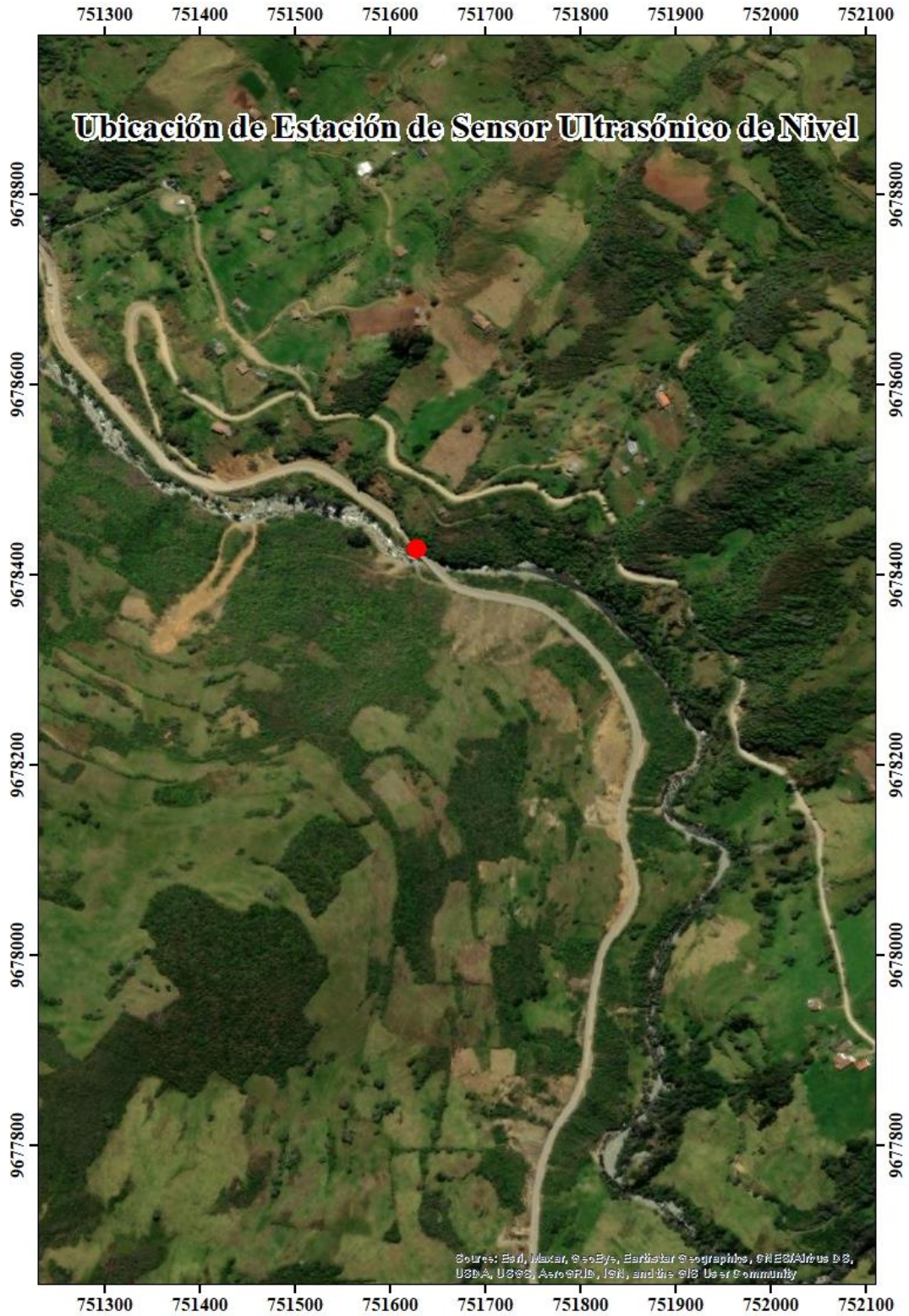


Figura 1.4. Mapa de ubicación de Estación Ultrasónica de Nivel.

Fuente: Autor.

Como se menciona en el punto 4.3.2, en la parte baja de la cuenca, donde hay zonas pobladas se recomienda colocar otra estación de Sensor Ultrasonico de Nivel. La ubicación se detalla a continuación en la figura 4.5.



Figura 4.5. Tramo recto antes del puente S/N.

Fuente: Autor.

En la figura 4.6 donde se puede observar la ubicación tentativa, en el puente donde ira dicha estacion, lugar de facil acceso para su instalacion y su mantenimiento posterior.



Figura 4.6.Ubicación de la estacion dentro del puente S/N.

Fuente: Autor.

Igualmente se detalla un mapa de la zona de ubicación del puente, donde se observa que existe zonas pobladas a cada lado de la orilla del río que se realizaron los estudios hidrológico e hidráulico.



Figura 4.7. Mapa de ubicación de la Estación Ultrasónica de Nivel.

Fuente: Autor.

4.3.3 Ubicación de Regletas Limnimétricas.

Como se mencionó con anterioridad con este tipo de aparatos se obtiene datos de nivel de cauce in situ, por lo tanto, el lugar idóneo para su ubicación, sería el lugar donde se propone colocar los sensores ultrasónicos ya que de esta manera se podría comparar los niveles del cauce obtenidos con ambos aparatos.

CONCLUSIONES

Para el estudio hidrológico que se planteó realizar, se logró recopilar una cierta cantidad de información necesaria para su desarrollo, consultando varias fuentes importantes como son el IERSE, el INAMHI, la empresa de agua EMAPASG-EP y la Municipalidad de Gualaceo, dicha información fue examinada y clasificada para su uso adecuado.

Por medio de los polígonos de Thiessen que se realizaron en este proyecto se pudo visualizar que la estación de Sevilla de Oro M031 no abarca territorio de la cuenca del San Francisco, por lo tanto, datos sobre precipitaciones de dicha estación, no fueron válidas para este proyecto.

Se puede concluir que las estaciones hidrometeorológicas que influyen sobre la cuenca del río San Francisco son: la de Gualaceo M0139 dicha estación abarca gran cantidad de territorio de la cuenca y la de Sígsig M0424 abarca solo una pequeña área en la parte alta de la cuenca.

La extensión del programa ArcGIS, denominada HEC-GeoHMS es de suma importancia para realizar modelaciones hidrológicas, ya que, por su fácil uso, se pudo obtener parámetros morfométricos muy necesarios para cualquier estudio, como son área, perímetro, pendientes y otros más de cualquier tipo de cuenca, al igual se puede obtener información de ríos que atraviesan la cuenca, por ende, estas características permitieron realizar el modelamiento con más exactitud.

Al realizar la comparación de caudales obtenidos para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años por el método racional y por el modelamiento hidrológico en el software HEC-HMS, existe una gran diferencia entre los dos métodos, por lo tanto, se podría concluir que los caudales más cercanos a la realidad serían los obtenidos por el software HEC-HMS, ya que en ese programa se puede colocar mayor información y parámetros sobre la cuenca a ser estudiada.

Con la obtención de los caudales máximos mediante el método racional, para los diferentes periodos de retorno dos, cinco, diez, veinte y cinco, y cincuenta años, el resultado de simular estos cinco periodos de retorno, da zonas de alto riesgo de inundación, ya que comenzando con el periodo de retorno de dos años se puede obtener manchas de inundación de longitudes considerables a cada costado de las orillas, esto debido a que los caudales máximos son de gran magnitud.

Para los periodos de cinco y diez años, se puede observar la variación de la mancha solo en el lado izquierdo de la orilla del río, esto se debe a que, para el periodo de dos años, la zona de la orilla del lado derecho con dicho caudal inunda en su mayoría la zona derecha.

Para los periodos de retorno de 25 y 50 años se puede observar que se inunda en su totalidad la zona izquierda igualando a la zona derecha de inundación, se puede decir que se inunda una longitud de 50 metros tanto a la derecha como a la izquierda del centro del río, afectando a la zona poblada que se asienta en las orillas de la parte de la cuenca baja del río San Francisco.

Cómo se puede observar, la reconstrucción de la última inundación producida, la mancha de inundación se asemeja, a la mancha para un periodo de retorno $TR = 2$ años, nuestro modelo se apega a lo sucedido en la realidad con la última inundación producida en el río San Francisco.

Las ubicaciones propuestas para que las estaciones de medición sean instaladas, son en base a las condiciones requeridas por cada modelo de estación, ya que son de fácil acceso para realizar su instalación y posterior su mantenimiento.

Estas estaciones ayudarán en un futuro a tener datos exactos y reales sobre las condiciones climáticas y meteorológicas, a los cuales se verá expuesta la cuenca del San Francisco, dichos datos serán de gran ayuda para estudios posteriores sobre la cuenca.

RECOMENDACIONES

Ya que son los primeros datos de información sobre caudales máximos para varios periodos de retorno de la cuenca del río San Francisco, se recomienda calibrar el modelo generado en el HEC-HMS.

Para obtener una mayor precisión de caudales máximos es necesario contar con estaciones hidrometeorológicas que tengan gran influencia sobre la cuenca del río San Francisco y a su vez que cuenten con información de varios años.

Como se puede observar la mancha de inundaciones para el periodo de retorno de dos años, es muy considerable debido a que inunda en su mayoría las zonas pobladas existentes a los lados de la orilla, esto trae consecuencias desastrosas tanto para la población como para las infraestructuras que se encuentran ubicadas en las zonas de inundación, ya que por el arrastre de materiales como palos, sedimentos, rocas, maleza, provoca el taponamiento de las vías que se encuentran a los costados del río, y aún más a las viviendas que se encuentran allí, poniendo en riesgo la vida de las personas que aquí pernoctan, por tanto se recomienda a la empresa EMAPASG-EP tomar acciones inmediatas para evitar a futuro desgracias que se puedan lamentar, se recomienda ver una zona ideal para realizar un desazolve del río, esto con el fin de evitar que las inundaciones a futuro tengan un mayor impacto, ya que los caudales para los periodos de, cinco, diez, veinte y cinco, y cincuenta años, son de gran magnitud.

Así también se da la recomendación de que las instalaciones de las estaciones de monitoreo, se den a la brevedad, ya que poder contar con datos reales de precipitaciones y niveles, ayudará en un futuro a la empresa a calibrar los modelos hidrológico e hidráulico, que se han realizado. De igual manera contar con estaciones hidrológicas será muy útil, ya que cuando el nivel del agua empiece a subir en la zona poblada, este emitirá una alarma, la cual podrá alertar tanto a los técnicos de la empresa, como a la población que se encuentra aledaña a las orillas y poder tomar acciones a tiempo, antes que la inundación llegue a la zona poblada.

BIBLIOGRAFÍA

- Arbeláez, A., Vélez, M., & Smith, R. (1997). *DISEÑO HIDROLÓGICO CON INFORMACIÓN ESCASA UN CASO DE ESTUDIO: RÍO SAN CARLOS. Avances en recursos hidráulicos, 1-18.*
- Arteaga, M. (2017). *Evaluación del modelo hidrológico hec-hms para la predicción hidrológica y de crecidas, en la cuenca baja del río Cañar. (Tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional, Quito.*
- Asensio, I., Ramón, M., Blanquer, G., & Manuel, J. (s. f.). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. 7.*
- Barrera Ochoa, M. S. (2020). *Modelación hidráulica en 2D del tramo puente av. Felipe II-Tres Puentes del río Yanuncay utilizando Iber. Biblioteca Hernán Malo González. <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/85933>*
- Caivinagua Arévalo, J. L. (2020). *Modelación Hidráulica en 2D del Tramo Calle Ciudad de Cuenca (Puente de Misicata) – Av. De las Américas, del Río Yanuncay. Biblioteca Hernán Malo González. <https://biblioteca.uazuay.edu.ec/buscar/item/85103>*
- Cárdenas, V. (2017). *Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el Bosque y Vegetación Protectora Aguarongo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico. 127.*
- Castro Salinas, S. V. (2015). *Universidad de Cuenca. Evaluación del comportamiento hidráulico de obras de captación mediante modelamiento hidrodinámico del flujo en 1-D y 2-D. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23118>.*

Castro, V. G. (s. f.). *DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA*. Recuperado 6 de julio de 2022, de https://www.academia.edu/27047715/DETERMINACION_DE_ECUACIONES_PARA_EL_CALCULO_DE_INTENSIDADES_MAXIMAS_DE_PRECIPITACION_INSTITUTO_NACIONAL_DE_METEOROLOGIA_E_HIDROLOGIA

Díez, A., Laín, L., & Llorente, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Instituto geológico y minero de España., 1-190.*

Editora, C., & Córdova, C. J. F. de. (s. f.). *Manual Río Yanuncay* [Text.Chapter]. Universidad del Azuay Casa Editora. Recuperado 13 de julio de 2022, de <https://publicaciones.uazuay.edu.ec/index.php/ceuzuay/catalog/view/165/136/885>

Fallas, J. (s. f.). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones.* 86.

Fernández de Córdova Webster, C. J., León Méndez, A. J. F., Rodríguez López, Y., Martínez Ramírez, P. G., & Meneses Meneses, D. M. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 39(1), 17-31.

franzpc. (2020, enero 26). *Delimitar automáticamente una cuenca hidrográfica en ArcGIS Pro.* El blog de franz. <https://acolita.com/delimitar-automaticamente-una-cuenca-hidrografica-en-arcgis-pro/>

Generación del Mapa Temático de Curva Número CN ANA. | Hidrología | Ingeniería Hidráulica | Cartografía. (2015). uDocz. <https://www.udocz.com/apuntes/55918/generacion-del-mapa-tematico-de-curva-numero-cn-ana-apoyame-con-un-me-gusta-gracias>

Hämmerly, R. del C., París, M. del C., & Paz González, A. (2019). Determinación de campos areales de precipitación y evapotranspiración en la margen izquierda de la cuenca del Paraná en territorio de Argentina. I: Polígonos de Thiessen y kriging. *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular*, 41, 75-97. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2019.41.1.5818>

HEC-HMS. (s. f.). Recuperado 27 de julio de 2022, de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

Ingol Blanco, E. (2016). *Tutorial Modelamiento Hidrológico Geoespacial Usando HEC-GeoHMS*. 47.

Jiménez, V. L. L. (2014). Propuesta Metodológica para el Rediseño de una Red Meteorológica en un Sector de la Región Andina Colombiana. *Publicaciones e Investigación*, 8, 55-76. <https://doi.org/10.22490/25394088.1281>

Jorquera, E., Weber, J., & Reyna, S. (2022). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*.

Lisette, B., Luis, S., & Mario, G. P. (s. f.). *Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay*. 11.

Manual Río Yanuncay: Determinación de la n de Manning en un río entre tramos de puentes | Universidad del Azuay Casa Editora. (s. f.). Recuperado 6 de julio de 2022, de <https://publicaciones.uazuay.edu.ec/index.php/ceuazuay/catalog/book/165>

MARÍN, J. A., ARREDONDO, C. A., OYOLA, J. S., ARISTIZÁBAL, A. J., & GORDILLO, G. (s. f.).

Desarrollo de Estación de Monitoreo de Actividad Pluviométrica y de Nivel de Agua en Ríos, Usando Instrumentación Virtual.

Maza, A. (2018). *Integración de un sistema de alerta temprana mediante modelación hidrodinámica y predicción de flujos con redes neuronales. Caso de estudio: río Tomebamba. (Tesis de Maestría). Universidad de Cuenca, Cuenca.*

Organización Meteorológica Mundial (Ginebra), (Suiza). (2017). *Guía del sistema mundial de observación.* Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.

Upegui, J. J. V., & Gutiérrez, A. B. (2011). *ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES.* 14.

Valdez, X. M. Z. (2020). *INGENIERO CIVÍL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES.* 107.

Villón, M. (2002). *Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos en cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico tropical de investigación y enseñanza., 1-72.*

Viteri, R. J. M. (2008). *SISTEMA DE INFORMACION PARA LA INTERPOLACION ESPACIAL Y TEMPORAL DE DATOS SOBRE EL TIEMPO ATMOSFERICO Y EL CLIMA DEL ECUADOR.* 134.

Zambrano Valdez, X. M. (2020). *Estudio Hidrológico-Hidráulico, de un tramo de la quebrada “El Chorro” en el sector de Ucubamba. (Tesis de pregrado). Universidad del Azuay, Cuenca. (Castro Salinas, 2015)*

ANEXOS

ANEXO 1. Gráficas de Hietogramas de diseño.

A1.1 Hietogramas de diseño de la estación Sísgig M0424 para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

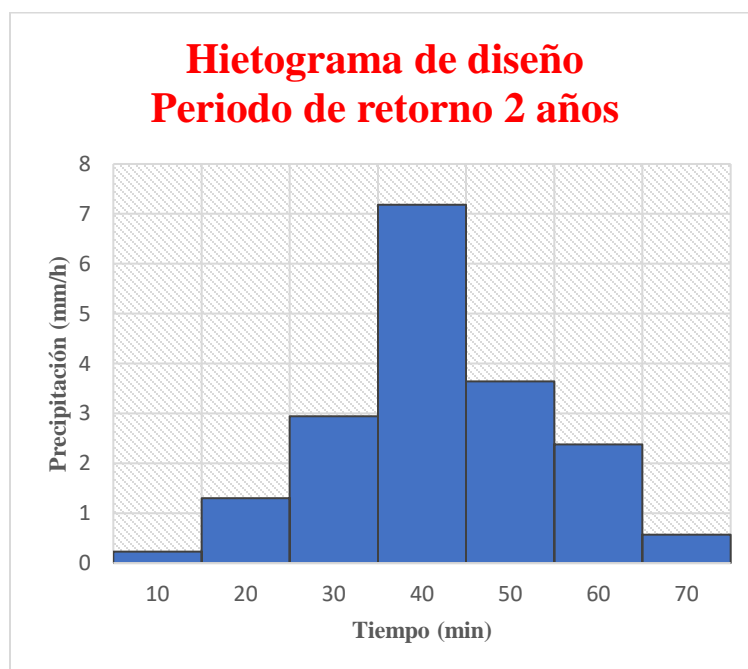
Período de retorno de 2 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	43,1	7,18	7,18
20	0,33	32,47	10,82	3,64
30	0,50	27,52	13,76	2,94
40	0,67	24,21	16,14	2,38
50	0,83	20,92	17,44	1,30
60	1,00	17,67	17,67	0,23
70	1,17	15,64	18,24	0,57

Período de retorno de 5 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	48,84	8,14	8,14
20	0,33	36,8	12,27	4,13
30	0,50	31,19	15,60	3,33
40	0,67	27,44	18,29	2,70
50	0,83	23,71	19,76	1,47
60	1,00	20,02	20,02	0,26
70	1,17	17,72	20,67	0,65

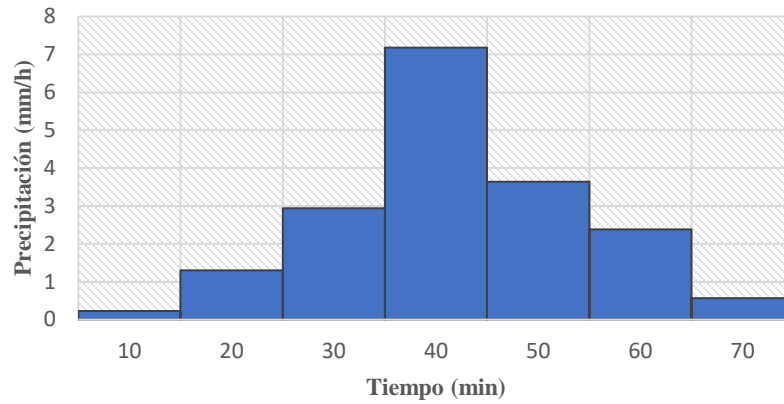
Período de retorno de 10 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	52,65	8,78	8,78
20	0,33	39,67	13,22	4,45
30	0,50	33,62	16,81	3,59
40	0,67	29,57	19,72	2,91
50	0,83	25,56	21,30	1,58
60	1,00	21,58	21,58	0,28
70	1,17	19,10	22,28	0,70

Período de retorno de 25 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	57,46	9,58	9,58
20	0,33	43,3	14,43	4,86
30	0,50	36,69	18,35	3,91
40	0,67	32,28	21,52	3,17
50	0,83	27,90	23,25	1,73
60	1,00	23,55	23,55	0,30
70	1,17	20,84	24,32	0,77

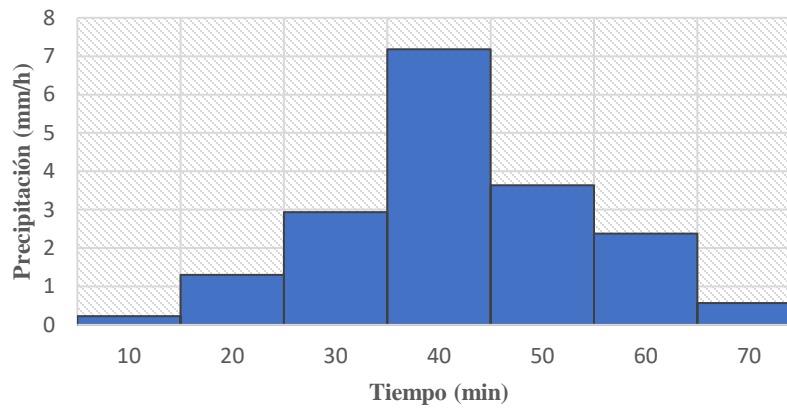
Período de retorno de 50 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	61,03	10,17	10,17
20	0,33	45,99	15,33	5,16
30	0,50	38,97	19,49	4,16
40	0,67	34,28	22,86	3,37
50	0,83	29,63	24,69	1,84
60	1,00	25,02	25,02	0,33
70	1,17	22,14	25,83	0,81



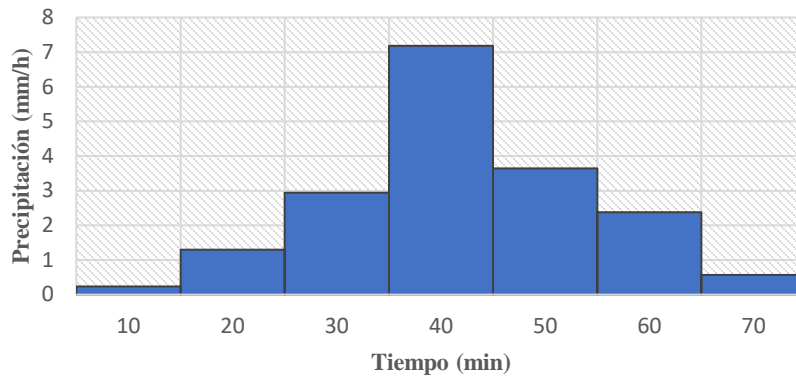
Hietograma de diseño Periodo de retorno 5 años



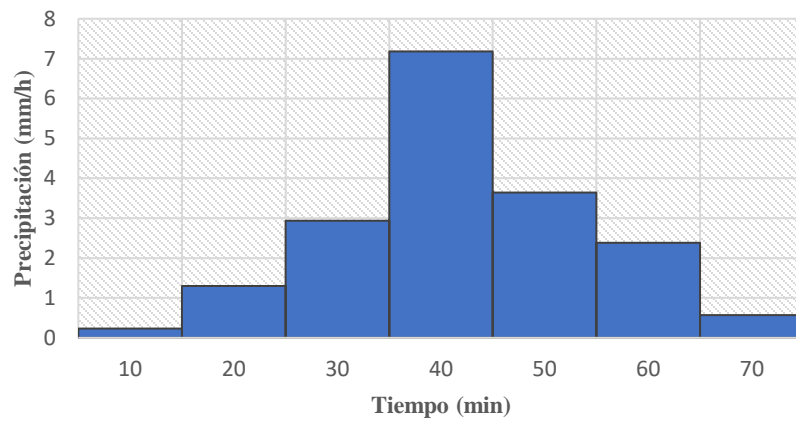
Hietograma de diseño Periodo de retorno 10 años



Hietograma de diseño Periodo de retorno 25 años



Hietograma de diseño Periodo de retorno 50 años



A1.2. Hietogramas de diseño de la estación Gualaceo M0139 para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Período de retorno de 2 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	87,9	14,64	14,64
20	0,33	54,6	18,21	3,57
30	0,50	41,4	20,69	2,48
40	0,67	34,0	22,65	1,96
50	0,83	29,2	24,30	1,65
60	1,00	25,7	25,74	1,44
70	1,17	23,2	27,02	1,28
80	1,33	21,1	28,13	1,12
90	1,50	19,5	29,25	1,12

Período de retorno de 5 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	104,0	17,34	17,34
20	0,33	64,7	21,57	4,23
30	0,50	49,0	24,50	2,94
40	0,67	40,2	26,83	2,32
50	0,83	34,5	28,78	1,95
60	1,00	30,5	30,48	1,70
70	1,17	27,4	31,99	1,51
80	1,33	25,0	33,33	1,34
90	1,50	23,1	34,65	1,32

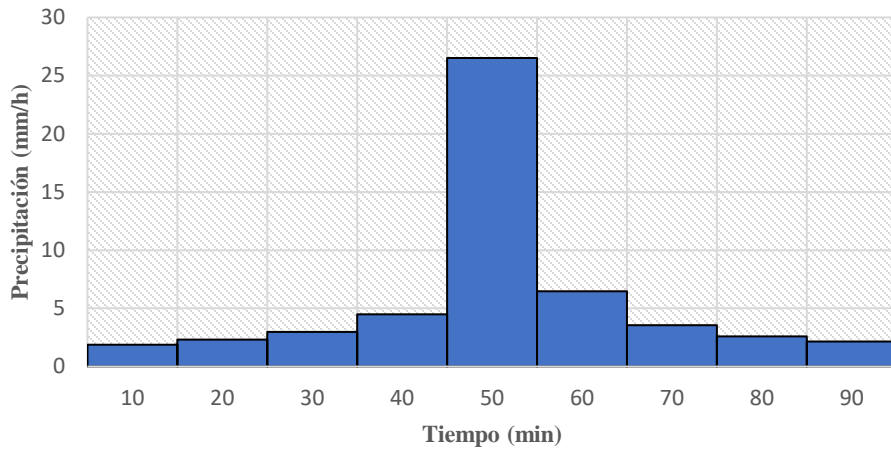
Período de retorno de 10 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	118,2	19,71	19,71
20	0,33	73,5	24,51	4,80
30	0,50	55,7	27,85	3,34
40	0,67	45,7	30,49	2,64
50	0,83	39,2	32,70	2,22
60	1,00	34,6	34,63	1,93
70	1,17	31,2	36,36	1,72
80	1,33	28,4	37,87	1,51
90	1,50	26,2	39,30	1,43

Período de retorno de 25 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	140,0	23,34	23,34
20	0,33	87,1	29,03	5,69
30	0,50	66,0	32,98	3,95
40	0,67	54,2	36,10	3,12
50	0,83	46,5	38,73	2,63
60	1,00	41,0	41,01	2,29
70	1,17	36,9	43,05	2,04
80	1,33	33,7	44,93	1,88
90	1,50	31,1	46,65	1,72

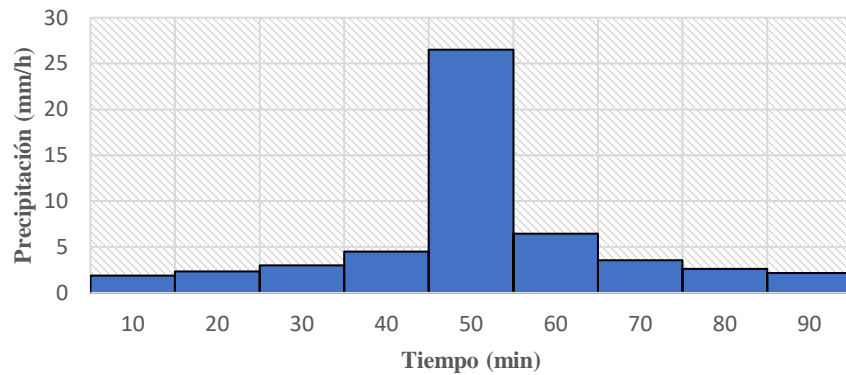
Período de retorno de 50 años				
t (min)	t (horas)	I (mm/h)	P (mm)	Δ P
10	0,17	159,1	26,52	26,52
20	0,33	99,0	32,99	6,46
30	0,50	74,9	37,47	4,49
40	0,67	61,5	41,03	3,55
50	0,83	52,8	44,01	2,98
60	1,00	46,6	46,61	2,60
70	1,17	41,9	48,93	2,32
80	1,33	38,3	51,07	2,14
90	1,50	35,3	52,95	1,88



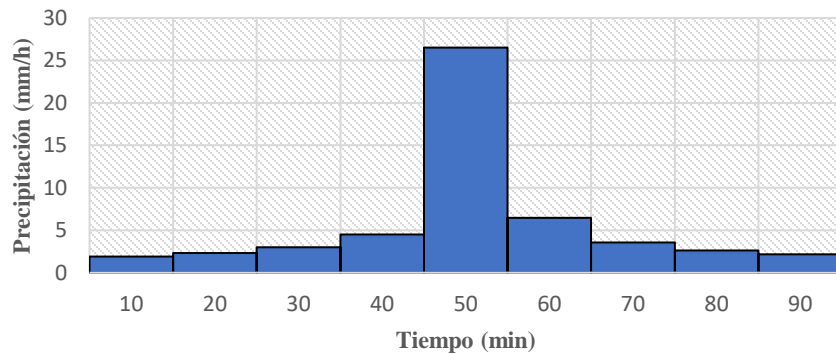
Hietograma de diseño Periodo de retorno 5 años



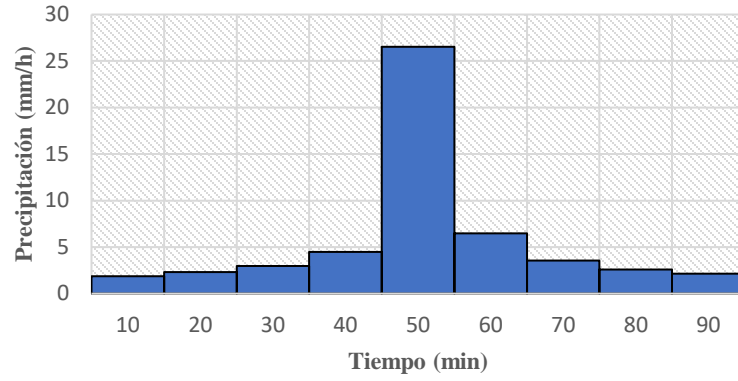
Hietograma de diseño Periodo de retorno 10 años



Hietograma de diseño Periodo de retorno 25 años



Hietograma de diseño Periodo de retorno 50 años



ANEXO 2. Obtención de número de curva por el método SCS.

A2.1 Código de reclasificación para las diferentes coberturas vegetales.

<i>DESCRIPCION DE COBERTURAS</i>	<i>RECLASIFICACION</i>
Cuerpos de agua	1
Nevados	2
Centros poblados	3
Cultivos/Áreas intervenidas	4
Matorral arbustivo abierto	5
Pradera en zona de clima frío	6
Sabana de árboles leñosos	7
Sabana hidromorfica	8
Selva lluviosa tropical	9
Selva lluviosa tropical con bambúes	10
Selva temporal de hojas anchas	11
Selva hidrolítica	12
Desierto en zona de clima árido	13

Fuente: (Generación del Mapa Temático de Curva Número CN ANA. | Hidrología | Ingeniería Hidráulica | Cartografía, 2015)

A2.2 Grupo Hidrológico para los diferentes tipos de suelo.

DESCRIPCION DE SUELOS	SIMBOLOGIA	GRUPO HIDROLOGICO
Acrisol háplico - Alisol háplico - Lixisol háplico	ACh-ALh-LXh	C
Acrisol háplico - Alisol háplico - Luvisol crómico	ACh-ALh-LVx	C
Arenosol háplico - Solonchak háplico	ARh-SCh	A
Cambisol districo - Acrisol háplico	OMd-ACh	C
Cambisol districo - Acrisol háplico - Lixisol háplico	OMd-ACh-LXh	C
Cambisol districo - Alisol háplico	OMd-ALh	C
Cambisol districo - Nitisol háplico	OMd-NTh	C
Cambisol éutrico - Phaeozem háplico	OMe-PHh	B
Cambisol éutrico - Vertisol éutrico	OMe-VRe	C
Fluvisol éutrico - Gleysol éutrico	FLe-GLe	B
Fluvisol éutrico - Regosol éutrico	FLe-RGe	B
Gleysol districo - Cambisol districo	GLd-CMd	B
Gleysol districo - Histosol fibrico	GLd-HSf	D
Gleysol districo - Lixisol háplico - Fluvisol districo	GLd-LXh-FLd	A
Leptosol districo - Afloramiento lítico	LPd-R	B
Leptosol districo - Andosol -mbrico - Afloramiento lítico	LPd-ANu-R	B
Leptosol districo - Andosol vitrico	LPd-ANz	B
Leptosol districo - Cambisol districo - Regosol districo	LPd-CMd-RGd	B
Leptosol districo - Regosol districo - Afloramiento lítico	LPd-RGd-R	B
Leptosol éutrico - Afloramiento lítico	LPe-R	B
Leptosol éutrico - Cambisol éutrico	LPe-CMe	C
Leptosol éutrico - Cambisol éutrico - Regosol éutrico	LPe-CMe-RGe	B
Leptosol éutrico - Kastanozem háplico - Afloramiento lítico	LPe-KSh-R	B
Leptosol éutrico - Regosol éutrico - Afloramiento lítico	LPe-RGe-R	B
Leptosol lítico - Afloramiento lítico	LPq-R	B
Lixisol háplico - Gleysol districo	LXh-GLd	B
Luvisol crómico - Cambisol éutrico	LVx-CMe	C
Regosol districo - Afloramiento lítico	RGd-R	B
Regosol districo - Cambisol districo	RGd-CMd	C
Regosol éutrico - Andosol móllico	RGe-ANm	C
Regosol éutrico - Calcisol háplico	RGe-CLh	C
Regosol éutrico - Cambisol éutrico	RGe-CMe	C
Solonchak háplico - Leptosol éutrico	SCh-LPe	A

Fuente: (Generación del Mapa Temático de Curva Número CN ANA. / Hidrología / Ingeniería Hidráulica / Cartografía, 2015)

ANEXO 3. Obtención del coeficiente de escorrentía superficial “C”

A 3.1. Tabla obtenida del ArcGIS, producto de la triangulación de shapefiles de uso, textura y pendiente de suelos, en la cual se utilizó la columna de códigos generados llamada gridcode.

FID	Shape *	gridcode	Área_ha
0	Polygon	111	46.228
1	Polygon	112	314.873
2	Polygon	113	3.750
3	Polygon	121	21.918
4	Polygon	122	46.081
5	Polygon	123	43.699
6	Polygon	132	26.414
7	Polygon	133	17.965
8	Polygon	211	33.996
9	Polygon	212	92.528
10	Polygon	213	55.712
11	Polygon	221	30.098
12	Polygon	222	22.805
13	Polygon	223	31.467
14	Polygon	232	2.453
15	Polygon	233	16.740
16	Polygon	311	332.692
17	Polygon	312	901.301
18	Polygon	313	58.879
19	Polygon	321	140.604
20	Polygon	322	249.479
21	Polygon	323	434.805
22	Polygon	332	142.519
23	Polygon	333	155.863
24	Polygon	344	0.592
25	Polygon	411	715.217
26	Polygon	412	1674.808
27	Polygon	413	106.693
28	Polygon	421	445.417
29	Polygon	422	700.054
30	Polygon	423	587.384
31	Polygon	432	66.903
32	Polygon	433	267.454
33	Polygon	442	0.250
34	Polygon	444	16.180

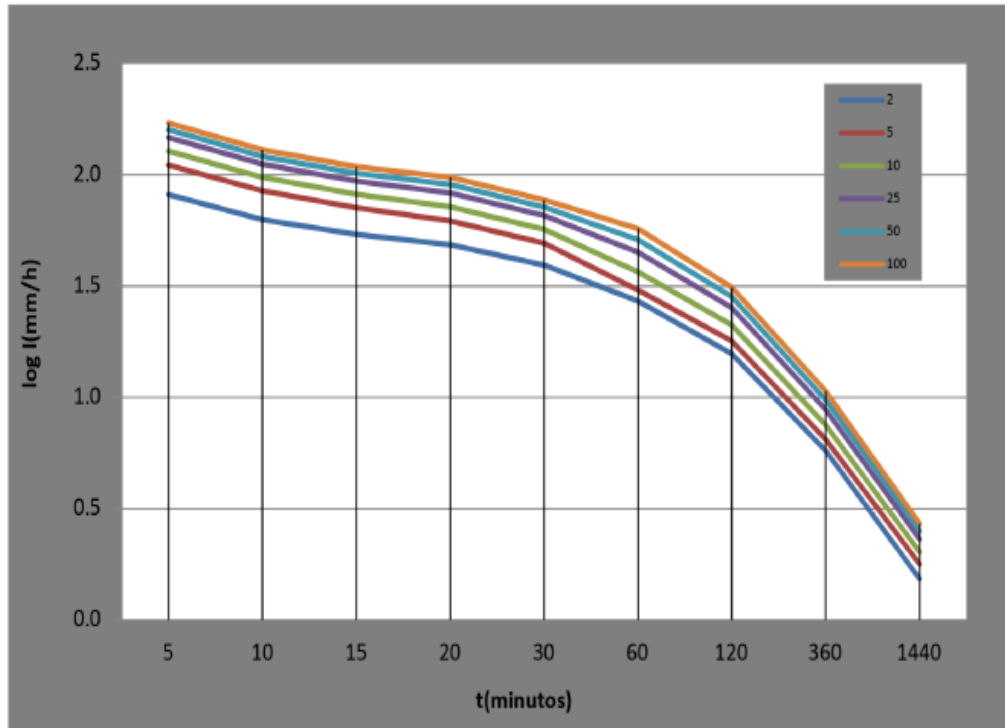
A 3.2. Tabla de codificación en la que el uso de suelo nos indicada la unida, la textura indica decena y la pendiente la centena, y de esta manera se podrá ir clasificando las áreas de un mapa de acuerdo al gridcode generado en ArcGIS.

PENDIENTE		TEXTURA		USO	
Centena		Decena		Unidad	
100	0-5	10	Arenoso	1	Bosques
200	5-10	20	Limoso	2	Pastizal
300	10-30	30	Arcilloso	3	Cultivo
400	>30	40	Cuerpos de agua	0	Cuerpos de agua

A 3.3. Tabla con coeficientes de escorrentía asignados para cada gridcode que fue generado en el ArcGIS.

FID	gridcode	Coefficient
1	111	0.10
2	112	0.30
3	113	0.30
4	121	0.30
5	122	0.40
6	123	0.50
7	132	0.55
8	133	0.60
9	211	0.25
10	212	0.30
11	213	0.40
12	221	0.35
13	222	0.40
14	223	0.66
15	232	0.55
16	233	0.70
17	311	0.30
18	312	0.35
19	313	0.50
20	321	0.40
21	322	0.45
22	323	0.70
23	332	0.65
24	333	0.80
25	344	0.00
26	411	0.32
27	412	0.37
28	413	0.53
29	421	0.42
30	422	0.47
31	423	0.74
32	432	0.68
33	433	0.84
34	442	0.00
35	444	0.00

ANEXO 4: Curvas Intensidad Duración Frecuencia de la Estación M0139 Gualaceo.



T (min)	Periodo de Retorno T (años)					
	2	5	10	25	50	100
5	91.8	107.8	121.8	143.0	161.5	182.3
10	68.0	79.9	90.2	105.9	119.6	135.0
15	57.0	67.0	75.6	88.8	100.3	113.3
20	50.4	59.1	66.8	78.4	88.5	100.0
30	41.4	49.0	55.7	66.0	74.9	85.2
60	25.7	30.5	34.6	41.0	46.6	53.0
120	16.2	18.9	21.1	24.6	27.5	30.9
360	5.7	6.6	7.4	8.6	9.6	10.8
1440	1.5	1.8	2.0	2.3	2.6	2.9

INTENSIDAD MAXIMA (mm/h)

Figura A 4.1 Curvas IDF

Autor: (Castro, s. f.-b)

ANEXO 5: Selección de Valores de Manning.

A 5.1. Selección del valor de Manning para el canal.

3.3 Coeficientes de rugosidad para diferentes fórmulas (Tabla 3.1)

Tabla 3.1.

Coefficientes de rugosidad para diferentes fórmulas Puente Av. Felipe II

Meyer-Peter y Müller (1948): n=0,033

Puente Av. Felipe II							
		H (m)	A (m ²)	P (m)	R (m)	dB4 (m)	n
		Limerinos (1970):	Aguas arriba	0.50	5.237	18.094	0.289
0.75	10.014			20.147	0.497	0.42	0.077
1.00	15.074			21.319	0.707	0.42	0.066
1.25	20.380			22.490	0.906	0.42	0.061
1.50	25.932			23.661	1.096	0.42	0.058
1.75	31.732			24.833	1.278	0.42	0.055
2.00	37.777			26.064	1.449	0.42	0.054
2.25	44.070			27.176	1.622	0.42	0.052
2.50	58.200			25.310	2.299	0.42	0.049
Aguas abajo	0.50		4.114	14.890	0.276	0.42	0.114
	0.75		8.395	19.544	0.430	0.42	0.083
	1.00		13.512	21.231	0.636	0.42	0.069
	1.25		18.802	21.877	0.859	0.42	0.062
	1.50		24.191	22.523	1.074	0.42	0.058
	1.75		29.679	23.169	1.281	0.42	0.055
	2.00		35.266	23.815	1.481	0.42	0.053
	2.25		40.951	24.461	1.674	0.42	0.052
	2.50		60.880	27.900	2.182	0.42	0.050

Figura A 5.1 Coeficiente de Rugosidad.

Fuente(*Manual Río Yanuncay: Determinación de la n de Manning en un río entre tramos de puentes / Universidad del Azuay Casa Editora, 2021*)

A 5.2. Selección del valor de Manning para las orillas.

DESARROLLO DEL FLUJO UNIFORME Y DE SUS ECUACIONES 111

Tabla 5-6. Valores del coeficiente de rugosidad n (continuación)
(las cifras en **negritas** son los valores generalmente recomendados para el diseño)

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<i>b.</i> Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
<i>a.</i> Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<i>b.</i> Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<i>c.</i> Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
<i>d.</i> Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
<i>a.</i> Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	0.060
<i>b.</i> Sección irregular y rugosa	0.035	0.100

Figura A 5.2 Coeficientes de escorrentía.

Fuente: ((PDF) Ven Te Chow - HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS / David Abarca Gutiérrez - Academia.edu, s. f.)

ANEXO 6: Fotografías de Inundación.



Figura A.6.1. Inundación del 3 Julio 2022.

Fuente: Autor.



Figura A.6.2. Inundación del 3 Julio 2022.

Fuente: Autor.



Figura A.6.3. Inundación del 3 Julio 2022.

Fuente: Autor.

ANEXO 7: Secciones Transversales del río.

A 7.1 Anexo Digital.