



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

CARRERA MEDIO AMBIENTE

**TESIS PREVIA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
EN MEDIO AMBIENTE**

TEMA:

**MODELAMIENTO DEL ESCURRIMIENTO POR EL SOFTWARE
HEC-HMS PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO
DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL**

AUTORA:

MARTHA DANIELA SANTOS RUEDA

TUTOR:

Q.F. PATRICIO NOLES AGUILAR, MG.

CALCETA, JUNIO 2017

DERECHOS DE AUTORÍA

Martha Daniela Santos Rueda, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual y su reglamento

.....

MARTHA D. SANTOS RUEDA

CERTIFICACIÓN DE TUTOR

Xavier Patricio Noles Aguilar, certifica haber tutelado la tesis **MODELAMIENTO DEL ESCURRIMIENTO POR EL SOFTWARE HEC-HMS PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL**, que ha sido desarrollada por **Martha Daniela Santos Rueda**, previa la obtención del título de Ingeniera en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TESIS DE GRADO DE TERCER NIVEL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

.....
Q.F. XAVIER PATRICIO NOLES AGUILAR, MG.

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

Los suscritos integrantes del tribunal correspondiente, declaran que han aprobado la tesis titulada **MODELAMIENTO DEL ESCURRIMIENTO POR EL SOFTWARE HEC-HMS PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL**, que ha sido propuesta, desarrollada y sustentada por Martha Daniela Santos Rueda, previa la obtención del título de Ingeniera en Medio Ambiente, de acuerdo al **REGLAMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE TESIS DE GRADO DE TERCER NIVEL** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

.....
Ing. Teresa Vivas Saltos, M.Sc
MIEMBRO

.....
Blga. Fernanda Pincay Cantos, Mg.
MIEMBRO

.....
Ing. Joffre Andrade Candell, M.Sc.

PRESIDENTE

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López que me da la oportunidad de una educación superior de calidad y en la cual estoy forjando mis conocimientos profesionales día a día.

Al Q.F. Patricio Noles Aguilar Tutor de tesis, le expreso mis sinceros sentimientos de respeto, admiración y agradecimiento por su generoso asesoramiento y colaboración para la culminación del presente trabajo investigativo.

Al Ing. Fabián Peñarrieta, por su incondicional e invaluable colaboración, por su paciencia; por creer en mí y brindarme su ayuda durante todo este tiempo en el desarrollo de la tesis.

A todos los docentes que durante la carrera me han brindaron todos sus conocimientos y que me han guiado hasta lograr con éxito la culminación del presente trabajo.

MARTHA D. SANTOS RUEDA

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por haberme permitido culminar con éxito todos los objetivos propuestos.

A mis queridos padres Camilo y Ángela por su apoyo, sacrificio, amor y paciencia durante mi formación profesional y personal, ya que sin su entrega no podría haber logrado todas mis metas, gracias por todo, los amo mucho.

A mi tías maternas y sus esposos, que han sido un impulso más durante mi vida, gracias por su cariño.

A mis abuelitos Edita y Aquiles; personas de trabajo y dedicación; y por todo sus consejos, su legado es lo que me ha hecho perseverar.

MARTHA D. SANTOS RUEDA

CONTENIDO GENERAL

CARÁTULA	i
DERECHOS DE AUTORÍA	ii
CERTIFICACIÓN DE TUTOR	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
CONTENIDO GENERAL	vii
CONTENIDO DE CUADROS, FIGURAS Y GRÁFICOS	viii
RESUMEN	x
PALABRAS CLAVES	x
ABSTRACT	xi
KEYWORDS	xi
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	12
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	12
1.2. Justificación	14
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general.....	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
1.4. Hipótesis a defender	16
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	17
2.1. Datos meteorológicos y topográficos que inciden sobre la modelación del comportamiento hidrológico.....	17
2.2. Comportamiento hidrológico en cuencas y subcuencas hidrográficas.....	25
2.3. Proyección del comportamiento hidrológico	30
CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO	42
3.1. Ubicación.....	42
3.2. Duración	42
3.3. Método.....	43
3.4. Variables.....	43
3.4.1. Variable dependiente	43
3.4.2. Variable independiente	43
3.5. Procedimiento.....	43
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	50

4.1.Obtención de información geográfica y meteorológica de los factores que influyen en el escurrimiento de la subcuenca del río Carrizal.....	50
4.1.1.Datos de precipitaciones del subcuenca del río Carrizal (2011 - 2015)	50
4.1.2.Recopilación de datos del volumen captado en la senagua, estación meteorológica de la represa la Esperanza.	51
4.1.3.Recopilación de datos cartográficos y geográficos.	52
4.2.Calcular a través de un software el escurrimiento de la subcuenca río Carrizal	53
4.2.1. Recopilación de información acerca del modelo del software HEC-HMS.....	55
4.2.2. Aplicación del modelo con los datos obtenidos en la subcuenca desde el 2011 hasta el 2015.....	56
4.2.3. Modelación de las precipitaciones del año 2012	60
4.2.4. Recopilación de información acerca del modelo del software HEC-RAS.....	63
4.2.5. Modelación del río Carrizal con el software HEC-RAS	63
4.2.6. Pronóstico del comportamiento hídrico de la subcuenca río Carrizal en base a los resultados obtenidos.....	70
4.3. Comparación de los resultados obtenidos en el modelamiento en la subcuenca del río Carrizal	73
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
5.1.Conclusiones.....	75
5.2.Recomendaciones.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS.....	83

CONTENIDO DE CUADROS, FIGURAS Y GRÁFICOS

CUADROS

Cuadro 2.2. Zonas de inundación del área de Manabí.....	30
Cuadro 2.3. Áreas de inundaciones de la subcuenca del río Carrizal.....	30
Cuadro 3.1. Caracterización física de la subcuenca del río Carrizal.....	49

Cuadro 4.1. Se representa los datos de precipitaciones 2011-2015 de la subcuenca del río Carrizal.....	52
Cuadro 4.2. Se representa los datos de caudal del 2011-2015 de la subcuenca del río Carrizal.....	53
Cuadro 4.3. Resultado de las precipitaciones del año 2011-2015.....	58
Cuadro 4.4. Sumatoria de los resultados del 2011-2015 de la subcuenca del río Carriza.....	60
Cuadro 4.5. Resultados de las precipitaciones del río Carrizal año 2012.....	61
Cuadro 4.6. Sumatoria de los resultados de la subcuenca del río Carrizal 2012.....	61
FIGURAS	
Figura 3.1. Mapa de la ubicación de la subcuenca del río Carrizal	43
Figura 3.2. Fases para la modelación de la subcuenca del río Carrizal.....	44
Figura 4.1. Mapa de delimitación Geográfica de la subcuenca del río Carrizal.....	54
Figura 4.2. Cartografía de la subcuenca del río Carrizal.....	55
GRÁFICOS	
Gráfico 4.1 Hietograma e hidrograma de la subcuenca del río Carrizal de los años 2011-2015.....	59
Gráfico 4.2. Hietograma e hidrograma de la subcuenca del río Carrizal año 2012.....	63
Gráfico 4.3. Sección transversal del río Carrizal 2011.....	66
Gráfico 4.4. Perspectiva del perfil del río Carrizal 2011.....	66
Gráfico 4.5. Sección transversal del río Carrizal 2012.....	67
Gráfico 4.6. Perspectiva del perfil del río Carrizal 2012.....	67
Gráfico 4.7. Sección transversal del río Carrizal 2013.....	68
Gráfico 4.8. Perspectiva del perfil del río Carrizal 2013.....	69
Gráfico 4.9. Sección transversal del río Carrizal 2014.....	69
Gráfico 4.10. Perspectiva del perfil del río Carrizal 2014.....	70
Gráfico 4.11. Sección transversal del río Carrizal 2015.....	70
Gráfico 4.12. Perspectiva del perfil del río Carrizal 2015.....	71
Gráfico 4.13. Pronóstico del comportamiento de precipitaciones de la subcuenca del río Carrizal.	73
Gráfico 4.14 Pronóstico del comportamiento de caudales en un tiempo de retardo de 10 años.....	74

RESUMEN

El objetivo de esta tesis fue validar el modelamiento del proceso lluvia-escorrentamiento adaptada a la subcuenca del río Carrizal, ubicada en el extremo oriental de la Provincia de Manabí, cuyo propósito fue analizar y simular el comportamiento hidrológico de las precipitaciones y el caudal correspondiente mediante la calibración del modelo matemático hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) y de la aplicación de la extensión del HEC-RAS; en donde el software HEC-HMS permitió representar con suficiente precisión el comportamiento hídrico de los años escogidos 2011-2015, obteniendo como resultado que en el año 2012 fue donde ocurrió la mayor precipitación que propició inundaciones en la provincia de Manabí. Para el estudio de estos modelos matemáticos de infiltración, escorrentamiento, tránsitos de crecientes se analizaron datos de precipitación y caudal de la estación de monitoreo de la ESPAM facilitando la identificación de las áreas de riesgo de inundación y con ello la aprobación de los modelos de estimación del proceso lluvia - escorrentamiento en la subcuenca del río Carrizal. El programa HEC-HMS contribuyó a modelar la pérdida de infiltración del suelo en los mayores meses de precipitaciones de la zona, con los datos meteorológicos ingresados al programa el que constató el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río de los años escogidos, determinando los caudales máximos y las precipitaciones, a través de los resultados obtenidos se pronosticó utilizando la ecuación de Gumbel el comportamiento hídrico de los próximos años para la subcuenca del río Carrizal.

PALABRAS CLAVES

Cuencas hidrográficas, infiltración, comportamiento hidrológico, precipitaciones, probabilidad estadística, modelo.

ABSTRACT

The objective of this research was to validate the modeling of the rainfall-drainage process adapted to the Carrizal River subbasin, located in the eastern end of the Province of Manabí, whose purpose was to analyze and simulate the hydrological behavior of the precipitations and the corresponding flow through The calibration of the hydrological mathematical model HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) and the application of the HEC-RAS extension; Where the HEC-HMS software allowed to represent with sufficient precision the water behavior of the selected years 2011-2015, obtaining as a result that in 2012 was where the highest precipitation that caused floods in the province of Manabí occurred. For the study of these mathematical models of infiltration, runoff, and floods, rainfall and flow data from the ESPAM monitoring station were analyzed, facilitating the identification of flood risk areas and, therefore, approval of the estimation models of the rain - drainage process in the Carrizal river sub - basin. As a final conclusion, the HEC-HMS program helped to model the loss of soil infiltration in the highest rainfall months in the area, with meteorological data entered into the program, which shows the hydrological behavior of the river subbasin of the selected years, Determining the maximum flows and precipitations, through the results obtained was predicted using the Gumbel equation the water behavior of the next years for the subbasin of the Carrizal river.

KEYWORDS

Watersheds, infiltration, hydrological behavior, rainfall, statistical probability, model.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La ubicación del Ecuador ha creado una gran diversidad climática y una gran variabilidad de los recursos hídricos, lo cual ha coadyuvado en los últimos años a ejecutar y planificar una serie de proyectos respecto al conocimiento del comportamiento hidrológico, el mismo que permite estimar la disponibilidad de los recursos hídricos y el diseño de los proyectos ante dichos eventos, así como la toma de decisiones referentes a una gestión integral de recursos hídricos y la influencia de las diferentes obras en la ocurrencia y propagación de crecidas aguas abajo de las mismas. (Pullupaxi, J. y Villarreal, S. 2013)

Según CONADE *et al*, (1991) en la provincia de Manabí de manera concordante con la amplia fluctuación estacional y anual de la precipitación, el escurrimiento anual del sistema fluvial varía también notablemente de estación en estación y de año en año. Por lo tanto, resulta necesario para el desarrollo de los recursos hídricos de la provincia construir presas de almacenamiento, no sólo para una regulación estacional de los escurrimientos de los ríos (que significa almacenar el agua de la estación lluviosa para usarla en la estación seca), sino también para una regulación multianual (almacenar agua durante los años lluviosos y usarla durante los años secos).

Para la proyección de una obra de contención se hace necesario el estudio sobre la cuenca que por medio de escurrimientos aportará la cantidad de agua que llegará hasta la construcción, es decir el Volumen de Escurrimiento Medio Anual con el que la cuenca contribuirá para el aprovechamiento de la población, en donde las características fisiográficas de una cuenca son la clave para la determinación de los escurrimientos, como lo son: el área de la cuenca, la

pendiente, el tipo de uso de suelo y vegetación existentes; además es necesario tener conocimiento de factores climatológicos propios del sitio de estudio, como registros de precipitación y temperatura de los años anteriores.(Martínez, M. 2010)

Precedentes que sustentan la importancia de realizar estudios de inundabilidad, convirtiéndose en la actualidad una herramienta eficaz para delimitar la capacidad de transporte hídrico que puede tener un determinado río. Al respecto García, A. (2013), afirma que esto se realiza para asegurarse de que las aguas quedarán a una determinada cota durante una lluvia estadística con un determinado período de retorno. Por lo tanto, los sistemas de pronóstico hidrológico suelen ser extremadamente complejos y difíciles de cuantificar debido a que hay fenómenos en la naturaleza que quizás nunca se entiendan en su totalidad; sin embargo, en ausencia de un conocimiento acabado pueden representarse en forma simplificada por medio de modelos conceptuales que traten de dar respuesta a cada una de las partes del sistema hidrológico.

Esta investigación tiene como objetivo el análisis de un sistema hidrológico, que permita estudiar la operación del sistema y predecir sus salidas de la subcuenca del río Carrizal; dado que una de las herramientas utilizadas en el mundo, que intentan disminuir la exposición de las personas que ocupan zonas propensas a inundaciones, son los llamados sistemas de alerta temprana, apoyados en modelos matemáticos, que simulan fenómenos hidrológicos y meteorológicos, de tal manera que se puedan estimar de manera anticipada valores probables de las avenidas y sus niveles de agua antes de que se rebase la capacidad del cauce y utilizar estas previsiones como elementos de apoyo a los tomadores de decisiones para emprender acciones y prevenir daños ante las amenazas de inundaciones (Pérez, G. 2015)

Para la elaboración del estudio antes mencionado es necesario la aplicación de un modelamiento de escurrimiento a través del software HEC-HMS diseñado

para simular procesos de lluvia-escorrentamiento en sistemas dendríticos de cuencas; para Bastidas, C. (2011) asevera que el software HEC-HMS se usa en estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronósticos de flujo, futuras urbanizaciones, reducción del daño por inundaciones, etc., argumentación que contribuye que dentro del estudio de los caudales de la subcuenca del río Carrizal se aplique el software HEC-RAS, el cual permitirá determinar los caudales máximos y analizar el régimen hidráulico de los años escogidos.

Con estos factores se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo se relacionan los datos meteorológicos y topográficos con el comportamiento hidrológico en la subcuenca del río Carrizal?

1.1. JUSTIFICACIÓN

Según estudios realizados por la SENAGUA (2009), en los últimos años se han registrado eventos climatológicos extremos con impactos severos en la pérdida de calidad de vida de la gente y en la infraestructura social y productiva por lo que se plantea la necesidad de que a través del enfoque de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos se pueda impulsar un análisis de las interrelaciones entre el clima, las demandas por uso y el ciclo hidrológico para identificar directrices de gestión.

Dentro del ámbito legal, la presente investigación tiene sustento en el Art. 14 de la Constitución de la República del Ecuador (2008), "El Estado garantizará la conservación, recuperación y manejo integral de los recursos hídricos, cuencas hidrográficas y caudales ecológicos asociados al ciclo hidrológico, se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. Al mismo tiempo el objetivo 7 del PNBV (Plan Nacional del Buen Vivir) implica

garantizar los derechos de la naturaleza y promover la sostenibilidad ambiental territorial y global. (SENPLADES, 2013).

Por consiguiente, el agua es un elemento determinante en el desarrollo económico y social de un país; al mismo tiempo cumple la situación básica de mantener la integridad del entorno natural. A pesar de ello, el agua es solo uno de los recursos naturales vitales y resulta por ello imperativo que los temas hídricos no sean tratados de forma aislada, en donde un mal manejo de estos sistemas puede provocar problemas severos de erosión de suelo, pérdida de grandes volúmenes del agua, volúmenes difíciles de manejar y controlar para los gestores tanto gubernamentales como del sector privado, generando tomar decisiones complicadas sobre la asignación del agua.

La aplicación de sistemas computacionales para el alcance de nuestra naturaleza se hace de gran valor, ya que se puede caracterizar algunas de las conductas de la naturaleza. Por esta razón la presente propuesta sugiere como alternativa para proporcionar una metodología de cálculo de caudales y precipitaciones para diferentes períodos de retorno, utilizar modelos hidrológicos que consideren un registro de precipitación actualizado; y se pueda caracterizar el comportamiento hídrico de la subcuenca del río Carrizal mediante la ayuda del software HEC-RAS y el software HEC-HMS para simulación de precipitación-escorrimento de cuencas, tránsito por ríos, combinación en confluencias y derivaciones, en donde los hidrogramas de escurrimento se calculan a partir de datos de lluvia, pérdidas por infiltración, hidrogramas unitarios u ondas cinemáticas y caudal base.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la relación entre el comportamiento hidrológico y los factores meteorológicos y topográficos en la subcuenca del río Carrizal mediante la aplicación del software HEC-HMS.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener información geográfica y meteorológica de los factores que influyen en el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Carrizal.
- Calcular a través del software HEC-HMS, el comportamiento hidrológico en la subcuenca río Carrizal.
- Pronosticar el comportamiento hídrico de la subcuenca río Carrizal en base a los resultados obtenidos.

1.3. HIPÓTESIS A DEFENDER

Los factores meteorológicos y topográficos permiten modelar el comportamiento hidrológico en la subcuenca del río Carrizal de años anteriores, permitiendo proyectar el mismo comportamiento a futuro.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. DATOS METEOROLÓGICOS Y TOPOGRÁFICOS QUE INCIDEN SOBRE LA MODELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO

La estación meteorológica es un equipo que está destinado para medir y registrar diversas variables meteorológicas en tiempo determinado y se utiliza para la elaboración de predicciones a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos. (Kennedy, D. 2015)

Una estación meteorológica es una instalación con instrumentos para la recopilación de datos sobre fenómenos atmosféricos. Muchas de estas estaciones están vinculadas a otras instalaciones, satélites y equipos de campo para mejorar la precisión. El término "estación meteorológica" también puede significar aparatos domésticos pequeños que dan información relacionada con el clima. (Kennedy, D. 2015)

Domínguez *et al.*, (2008) ellos sostienen que los datos meteorológicos son muchos de los fenómenos que estudian en hidrología se dispone de información solo en algunos puntos aislados a pesar de que la variable que los representa es continua en el espacio. Así ocurre, por ejemplo con la mayoría de las variables meteorológicas, como la precipitación. Los procedimientos geo-estadísticos de interpolación suponen que los valores registrados de la función corresponden a la realización de una variable aleatoria, cuyo comportamiento no se puede predecir con exactitud.

Durante la precipitación existen diversos factores que atenúan el proceso de

lluvia- escurrimiento, parte del agua de lluvia al caer es interceptada por casas, edificios y vegetación. Este proceso ocasiona que solo un porcentaje de la lluvia escurra y otro se infiltre en el terreno. En general la respuesta de la cuenca ante los diferentes fenómenos, depende de las características propias de la misma como son: su tipo y uso de suelo, vegetación existente, arreglo de corrientes naturales, longitud de sus cauces y topografía, la interacción de los factores antes mencionados ocasiona la disminución o el aumento del escurrimiento superficial. (Domínguez *et al.*, 2008)

Según Tapia, J. (2012), indica que para el desarrollo de estos estudios y dada la información hidrometeorológica favorable en el área representativa, utilizó una metodología muy sintética de tal manera que, mediante la aplicación de cálculos simples poder presentar los parámetros más importantes y sus características hidrometeorológicas con una confiabilidad aceptable de una forma rápida y de buena calidad.

El escurrimiento participa como el agua de una tormenta que drena o escurre sobre la superficie del suelo. A medida que circula desde las partes más lejanas hacia la desembocadura, fluye por los cauces incrementando su volumen hasta lograr el caudal pico, a partir del cual comienza suavemente a decrecer al poco tiempo de terminada la lluvia. El agua que fluye por sobre la superficie del terreno hasta el cauce más cercano y sólo se produce en los eventos de lluvia. En un evento de lluvia, cuando la intensidad de la misma es superior la tasa de infiltración, se produce un almacenamiento superficial que primero llena las depresiones del terreno. (Gaspari *et al.*, 2007)

Luego que las depresiones se han llenado se inicia el almacenamiento detención, el cual genera el escurrimiento. Lo anterior es importante conocerlo ya que indica que la escorrentía no sólo depende de la infiltración sino del micro-relieve. La tasa de escurrimiento dependerá del volumen del almacenamiento de detención y de la pendiente y rugosidad del terreno. En cuencas de suelos muy

permeables, de cobertura densa y de poca pendiente, el escurrimiento es muy pequeño, por el contrario, en suelos arcillosos y con poca cobertura el escurrimiento es mayor; lo anterior es de suma importancia conocerlo ya que la escorrentía es el principal factor en la erosión de los suelos. (Gaspari *et al.*, 2007)

Aparicio, F. (2011), define el escurrimiento como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente, o la que fluye de los cauces de los ríos.

Según Jhonny, J. (2008), indica que los escurrimientos superficiales es la porción de la precipitación que fluye hacia los arroyos, canales, ríos, lagos, océanos como corriente superficial. De dicha definición que concluye que, el escurrimiento superficial es solo una parte de la precipitación, ya que el resto puede ser interceptado por la vegetación, puede ser almacenada, infiltrada o ser retenida por el suelo, o bien puede evaporarse.

Para estimar los escurrimientos superficiales, es necesario considerar la porción de la precipitación que se intercepta en sus diferentes formas y posteriormente estimar la cantidad de lluvia que forma en sus diferentes formas y posteriormente estimar la cantidad de lluvia que forma el escurrimiento. Para calcular el volumen de agua que puede almacenarse, basta con conocer el escurrimiento medio de la cuenca y el área de la misma, sin embargo, para la mayoría de las obras de conservación, es necesario determinar los escurrimientos máximos. (Jhonny, J. 2008).

Dentro del cálculo de escurrimiento está el criterio de coeficiente de escurrimiento este criterio supone que las pérdidas en cada momento son proporcionales a la intensidad de la lluvia en el mismo momento. A la constante de proporcionalidad se le considera característica de cada cuenca hidrológica y se le denomina coeficiente de escurrimiento. Se estima con la expresión

siguiente:

$$C = \frac{VED}{VLL} \quad (2.1)$$

Dónde:

C es el coeficiente de escurrimiento;

VED es el volumen de escurrimiento directo; y

VLL es el volumen llovido.

El coeficiente de escurrimiento, este criterio es totalmente empírico y para su aplicación se necesita tener una amplia experiencia y además, de ser posible, contar con mediciones simultáneas de lluvia y escurrimiento, que permitan tener una idea del valor del coeficiente para la zona en estudio. (SAGARPA, 2011)

Para determinar la capacidad de infiltración media, se resta a la altura de precipitación total una lámina constante de agua por unidad de tiempo, a la cual se le llama índice de infiltración. Según este criterio, el índice de infiltración es característico de cada cuenca e independiente de la intensidad de la lluvia y se mide en mm/h. (SAGARPA, 2011)

Para la determinación del número de curva, a través de la modelación hidrológica se busca determinar el escenario de un evento extremo de lluvia, es decir establecer la condición de humedad antecedente que representa la saturación máxima del terreno y por ende la de menor infiltración. El uso del suelo se refiere a la cobertura de la cuenca, diferenciando suelos cultivados, prado y bosques. La condición hidrológica describe el porcentaje de área cubierta según el uso del suelo, el tratamiento del suelo y su condición hidrológica para poder estimar el CN. (Morris, H. 2006)

Para cuencas compuestas por diferentes tipos y usos del suelo es necesario determinar un CN compuesto de la siguiente manera:

$$CN(I) = \frac{4.2 * CN}{10 - 0.058 * CN} \quad (2.2)$$

$$CN(III) = \frac{23 * CN}{10 + 0.13 * CN} \quad (2.3)$$

El método de número de curva de escorrentía fue desarrollado principalmente para aplicaciones de diseño de cuencas hidrográficas. (Morris, H. 2006)

Gutiérrez, A. (2010) indica que el tiempo de concentración es una variable utilizada extensivamente en el diseño hidrológico para determinar la capacidad hidráulica máxima de diferentes estructuras; se trata de variables que son propias de cada sitio y que dependen de las características geomorfológicas de la cuenca y de la lluvia. El tiempo de concentración también conocido como el tiempo de respuesta o equilibrio.

Témez.

Tc: Tiempo de concentración en horas,

L: Longitud del cauce principal en kilómetros,

So: Diferencia de cotas sobre L en porcentaje.

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{50,25} \right)^{0,77} \quad (2.4)$$

Para SAGARPA, (2011) las pérdidas de lluvia en cuencas urbanas, son aquellas cuyas condiciones se modifican con el tiempo, de manera que las características estadísticas de los escurrimientos no pueden ser determinadas directamente a partir de éstos y se tiene que recurrir a estimar:

- Primero, las características estadísticas de las tormentas;
- Segundo, mediante un modelo lluvia-escorrentía, determinar las avenidas, suponiendo que su probabilidad de ocurrencia es idéntica a la de la tormenta utilizada para generarla.

Además, es común que no se cuente con registros adecuados de escorrentías en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para diseño y operación de obras hidráulicas.

Normalmente, los registros de lluvia son más abundantes que los de escorrentía y además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escorrentía en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación.

Las características de la cuenca se conocen por medio de planos topográficos y de uso del suelo y la precipitación se conoce a través de mediciones directas. Los parámetros principales que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escorrentía son los siguientes:

- Área de la cuenca
- Área total de precipitación
- Características generales de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.).
- Distribución de la lluvia en el tiempo
- Distribución espacial de la lluvia y de las características de la cuenca.

Ahora bien, debido a que la cantidad y calidad de la información disponible varía de un problema a otro y por otro lado, no siempre se requiere la misma precisión

en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia-escorrentamiento.

En general, para estimar el gasto producido por lluvia sobre una cuenca, existen diferentes métodos, los cuales se clasifican en:

1. Métodos directos o empíricos

Consideran que el escurrimiento provocado por una tormenta es función, principalmente, de las características físicas de la cuenca: ejemplo de estos métodos son el de Burkli-Ziegler, el racional y el gráfico alemán.

2. Métodos hidrológicos

Consideran que existe una relación funcional, generalmente lineal, entre la distribución de la lluvia en el tiempo y el hidrograma de Clark a la salida de la cuenca. Dicha relación funcional se basa en principios hidrológicos y puede calibrarse con registros simultáneos de lluvias-escorrentamientos en la cuenca que se estudia, sin considerar explícitamente sus características físicas. Ejemplo de estos métodos es el Road Research Laboratory y el del Hidrograma Unitario. (SAGARPA, 2011)

Muchos de los métodos empíricos y prácticamente todos los hidrológicos, relacionan la lluvia efectiva con el escurrimiento directo, por lo que para su aplicación se requiere primero de la estimación de las pérdidas. Por esta razón, se mencionan algunos criterios para calcular las pérdidas.

Dentro de los factores que afectan el escurrimiento sobre una cuenca o subcuenca son:

La precipitación es cualquier forma de hidrometeoro que baja de la atmósfera y alcanza a la superficie terrestre. Este fenómeno incluye lluvia, llovizna, nieve, aguanieve, granizo, pero no neblina ni rocío, que son formas de condensación y no de precipitación. El total de precipitación sobre un punto de la superficie terrestre es llamada pluviosidad, o monto pluviométrico.

La precipitación es una parte importante del ciclo hidrológico, transportando agua dulce a la parte emergida de la corteza terrestre y, por ende, favoreciendo la vida en nuestro planeta, tanto de animales como de vegetales, que requieren agua para vivir. La precipitación se crea en las nubes, cuando alcanzan un punto de saturación; en este punto las gotas de agua aumentan de tamaño hasta alcanzar una masa en que se precipitan por la fuerza de gravedad. (SAGARPA, 2011)

La cuenca o área de drenaje, el agua uno de los elementos más importantes de la naturaleza, cae del cielo en forma de lluvia y fluye por la superficie de la tierra creando arroyos, ríos y lagunas. El agua, en constante movimiento, fluye de acuerdo a la topografía por donde se desliza. De esta manera, el agua viaja siguiendo la trayectoria que le marcan los suelos, los declives, las quebradas y hondonadas, formando lo que llamamos una cuenca. (SAGARPA, 2011)

La topografía y el relieve, definen la forma de la cuenca, la topografía es uno de los elementos fisiográficos más importante en la definición del comportamiento hidrológico de una cuenca y por lo tanto es necesario el mayor detalle posible. (Rojas, R. 2009)

Según Tapia, J. (2012), las características fisiográficas de una cuenca pueden ser expresadas a partir de ciertas medidas o parámetros que se consiguen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía del área de estudio. Los parámetros morfométricos son indicadores de la influencia que tiene la forma de la cuenca en el movimiento y captación del agua de lluvia

y permiten el análisis de las características morfológicas y funcionales de la cuenca hidrográfica. La forma de la cuenca controla la velocidad con que la gota de lluvia llega al cauce principal desde la divisoria hasta el punto de aforo o desembocadura y por lo general son invariables.

2.2. COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO EN CUENCAS Y SUBCUENCAS HIDROGRÁFICAS

Según Bastidas, C. (2011), una cuenca es una unidad de territorio que capta la precipitación, transita el escurrimiento y la escorrentía, hasta un punto de salida en el cauce principal o igualmente, es un área delimitada por una divisoria topográfica que drena a un drenaje común. Por lo tanto una cuenca es toda el área por las que drenan las aguas pertenecientes a un solo sistema fluvial o lacustre.

Una subcuenca es toda área en la que su drenaje va a directamente al río principal de la cuenca. También se puede definir como una subdivisión de la cuenca. Es decir que en una cuenca puede haber varias subcuencas. Una micro-cuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una subcuenca; o sea que una subcuenca está dividida en varias micro-cuencas. (San Nicolás, E. 2002).

La delimitación de cuenca es la divisoria de aguas o *divortium aquarum* es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre cuencas hidrográficas y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos. También se denomina "parteaguas". (Ordoñez, J. 2011)

Tradicionalmente la delimitación de cuencas, se ha realizado mediante la interpretación de los mapas cartográficos. Una cuenca hidrológica es la zona de la superficie terrestre en la cual, todas las gotas de agua procedentes de una precipitación que caen sobre ella se van a dirigir hacia el mismo punto de salida (punto que generalmente es el de menor cota o altitud de la cuenca). Sus límites quedan establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones; también conocido como "parteaguas" (Su contorno o perímetro se encuentra limitado por el lomo o filo de las montañas, denominado parteaguas). (Brugal, M. 2017)

La cuenca hidrográfica es el área de escurrimiento del agua lluvia hacia un río o punto determinado. Su contorno perímetro se encuentra limitado por el lomo o filo de las montañas, denominado parteaguas. En otras palabras la cuenca hidrográfica tiene forma cóncava como la un de cucharón, donde escurre el agua que llueve hacia las quebradas y a los ríos. El borde de ese cucharón llamado cuenca, lo conforman las montañas más altas alrededor de esos ríos y quebrada.

Las cuencas hidrográficas son divisiones naturales del paisaje. Debido a la topografía y delimitación del parteaguas, el agua drena a través de corrientes superficiales a un punto común pudiendo desembocar en el mar, en un cuerpo de agua interior o infiltrarse antes de encontrar algún cuerpo o superficie colector. (SEMARNAT, 2013)

Según Duarte, M. (2016), el término "cuenca hidrográfica" se usa con el mismo sentido que el de cuenca colectora o de captación y se entiende por él toda la porción de superficie terrestre cuyas aguas vierten a un determinado río o curso de agua, grande o pequeño, o que van a descargar en un río, lago o mar.

En la cuenca hidrográfica, se distinguen por lo general tres sectores característicos: Alto, Medio y Bajo, los cuales en función a las características

topográficas del medio pueden influir en sus procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos. (Llerena, C. 2003)

Técnicamente, las cuencas hidrográficas son unidades territoriales que permiten acceder a una dimensión amplia del ciclo del agua, por cuanto contienen en sí mismas diversas subunidades de paisaje, básicamente involucran regiones en que confluyen afluentes de ríos y/o lagos, así como otros diversos cuerpos de agua como, manantiales, saltos, etc., y han sido a menudo discriminadas arbitrariamente por límites político administrativos lo que dificulta su gestión y manejo. (Pacheco-Vega, A. y Basurto, F. 2008)

El ciclo hidrológico “supone un movimiento o transferencia de masas de agua de forma continua como consecuencia de un flujo energético”. Se trata de un conjunto de procesos simultáneos interrelacionados. A pesar de ello, por motivos didácticos, se suele asumir que comienza en los océanos con la evaporación del agua, una parte del agua superficial fluye hasta el mar; y otra parte se infiltra en el terreno y el resto, se evapora.

El agua que se infiltra, atraviesa una zona no saturada, donde puede evapora transpirarse por acción de las plantas o fluir hasta el acuífero (zona saturada). Debido a las fuerzas de presión y de gravedad, el agua subterránea se mueve de zonas de mayor a menor potencial hidráulico. Además mantiene una estrecha relación con el agua superficial siendo sus aportaciones en muchos casos imprescindibles para mantener el caudal de los ríos. El ser humano es un agente activo del ciclo. El hombre ha intervenido en el ciclo del agua y lo ha logrado adaptar a sus necesidades. (Lados *et al.*, 2007)

El comportamiento hidrológico de una cuenca depende de muchos factores los cuales deben ser analizados separadamente a fin de conocer sus detalles; éstos son luego analizados en conjunto para determinar su influencia dentro del ciclo

hidrológico. El análisis de las características hidrológicas de la cuenca permite determinar las variables y parámetros que serán utilizados en las diferentes metodologías hidrológicas que servirán para el análisis de la cuenca y así determinar las potencialidades y problemas de la misma. Por otra parte, el conocimiento pleno de las características de la cuenca es indispensable para estimar los parámetros de diseño de obras y acciones que se realizarán dentro de la cuenca. (Rojas, R. 2009)

Las inundaciones son procesos naturales en las planicies de grandes ríos. Su conversión en catástrofes resulta sobre todo de la acción humana, por una parte, debido al descontrol de las aguas producido por la deforestación y manejo inadecuado de cuencas y planos de inundación y, por otra, a causa de desequilibrios sociales y económicos, que obligan a la población deprimida a ocupar zonas de riesgo.

Hay una creciente influencia de cambios climáticos globales, que irán agravando la situación, estos no explican todos los procesos recientes. Ante todo hay que reiterar que las inundaciones son, en lo fundamental, fenómenos naturales. Las inundaciones ocurren periódicamente por el desbordamiento de los ríos hacia su planicie de inundación, un sistema formado por ciénagas, depresiones y tierras bajas. Las planicies inundables se distinguen por su geomorfología y vegetación. (Márquez, G. 2008)

Para Aguilera, E. (2010), una crecida es un aumento del caudal del agua, significativamente mayor que el flujo medio de éste. Durante la crecida, el caudal de un curso aumenta en tales proporciones que el lecho del río puede resultar insuficiente para contenerlo. Entonces, el agua lo desborda e invade el lecho mayor también llamado llanura de inundación manual.

Los caudales máximos de crecidas están condicionados por el aporte de las lluvias en el tiempo. Además de la magnitud de las lluvias, las crecidas están influidas por la topografía del terreno teniendo influencia no solo en el caudal

sino también en el tiempo de concentración. Lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas, en tanto que en cuencas grandes se necesita lluvias de menor intensidad pero de mayor duración y cubrimiento grande. (Aguilera, E. 2010).

Cuadro 2.2. Zonas de inundación del área de Manabí

ZONA	CARACTERÍSTICAS
Inundada permanente	Manglares y otros ecosistemas
Inundadas temporalmente	Inundada en períodos lluviosos
Propensas a inundaciones	Por desbordamiento de río o fuertes precipitaciones

Cuadro 2.3. Áreas inundables de la subcuenca del río Carrizal

CARACTERÍSTICAS	SUBCUENCA CARRIZAL	
	Km ²	%
Área de la Subcuenca	2337.8	100
Áreas de inundación permanente	34.9	1.5
Áreas de inundación temporalmente		
Áreas susceptibles a inundaciones ante precipitaciones fuertes	373.5	16
Área total afectada por inundaciones	408.3	17.5

Estas zonas se distribuyen en las superficies con cotas bajas, y ocupan principalmente los cauces de los ríos y sus riberas en donde las pendientes entre 0 y 5 %. En este caso el incremento del nivel de los ríos ocasiona inundaciones, en dependencia de los caudales de crecida. (Clavijo, H. y Peñaherrera, C. 2013)

Algunos centros poblados se encuentran entre las áreas susceptible a inundaciones (Calceta, Tosagua, Bachillero, San Antonio, entre otros) con afectaciones frecuente las comunidades, Según INEC, (2010) la población de los centros urbanos mencionados asciende a 81.193 habitantes, no incluyendo la población rural. (Clavijo, H. y Peñaherrera, C. 2013)

2.3. PROYECCIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO

Un modelo es una representación cualitativa y/o cuantitativa simplificada de un sistema real, y no una duplicación completa o exacta de éste. Es de gran importancia porque permite, entre otras cosas, estudiar el comportamiento de un sistema en diversas condiciones de operación, sin necesidad de construir el sistema y someterlo a las condiciones de operación real. (Rodríguez *et al.*, 2010)

Un modelo hidrológico tiene como objetivo la representación de los procesos que conforman el ciclo hidrológico y la interrelación entre las variables que influyen en el mismo. Estos modelos se pueden dividir en determinísticos o probabilísticos. (Mediero, L. 2007)

La ocurrencia de lluvias intensas sobre una zona causa el aumento de los escurrimientos en una red de corrientes. Este aumento, conocido como avenida, alcanza eventualmente grandes dimensiones, desbordarse provocando inundaciones, daños materiales en zonas aledañas a los ríos y, en ocasiones, la pérdida de vidas humanas. Para aplicar medidas de prevención o mitigación de los daños causados por las avenidas, es necesario conocer su magnitud, su evolución en el tiempo y probabilidad de ocurrencia.

Un modelo hidrológico se define como una simplificación de un sistema natural, tal como el proceso lluvia-escurrimiento, y sus componentes sobre una cuenca. Los modelos hidrológicos son de parámetros concentrados o distribuidos, dependiendo del esquema de desratización espacial utilizado para describir las características de las cuencas, y estar fundamentados en bases físicas o ser conceptuales, dependiendo del grado de analogía matemática empleada en su análisis. (Mendoza *et al.*, 2002)

Así mismo Mendoza *et al.*, (2002) dice que en un modelo hidrológico tradicional se considera que el escurrimiento se produce por la precipitación excedente. A este componente del gasto se le denomina escurrimiento directo o superficial, y a la porción del volumen de precipitación que la produce se le llama precipitación en exceso o efectiva.

El objetivo principal de un modelo hidrológico es determinar con eficiencia y precisión los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca y estimar el comportamiento y magnitud (abundancia y carencia) del agua en fenómenos poco frecuentes. El uso de estos modelos es primordial en la valoración, simulación y predicción de daños causados por inundaciones, también son importantes en el diseño, planeación, gestión y toma de decisiones de los recursos hidráulicos en una cuenca. (Martínez, J. 2013)

En general, la modelación en cuencas está diseñada principalmente para cumplir dos objetivos principales. El primero es entender mejor el comportamiento hidrológico de la cuenca como los cambios en esta pueden afectar estos comportamientos. El segundo objetivo es la generación de datos hidrológicos sintéticos para planificar entre otras cosas, la planeación del manejo de los recursos hídricos, la protección contra las inundaciones, la mitigación de contaminantes, los derechos de consumo de agua para la agricultura o uso industrial, etc. En este contexto, la modelación de lluvia-escurrimiento resulta una tendencia trascendental para la investigación en hidrología aplicada. (Miranda, L, 2008)

Según Pérez, G. (2015), para las modelaciones hidrológicas existen herramientas informáticas empleadas en la modelación hidrológica, existen tantos software para la modelación hidrológica como modelos hidrológicos, el avance en el campo de la hidrología no ha sido tan significativo en las últimas décadas, pero los sistemas informáticos y de información si han tenido un gran desarrollo, por lo que las plataformas informáticas son las que han tenido un

notable progreso, por lo que existe una amplia variedad de software tanto de licencia restringida como libre, que puede incluir uno o más modelos hidrológicos, a continuación se mencionan algunos ejemplos de estos tipos de plataformas que han sido y son utilizadas para la simulación hidrológica continua, sistemas que fueron desarrollados en diversas latitudes en países, como Holanda, Dinamarca, Alemania, EUA, Suecia, China, Italia, Francia, Suiza, entre otros, tenemos los siguientes:

NWSRFS-SAC-SMA, NATIONAL WEATHER SERVICE RIVER FORECAST SYSTEM - SOIL MOISTURE ACCOUNTING: El Modelo Sacramento, desarrollado por el National Weather Service (NWS) de los EEUU, es un modelo conceptual que considera la humedad del suelo. Parametriza las características de la humedad del suelo en una forma que distribuye lógicamente la humedad aplicada en varias profundidades y estados de energía en el suelo y tiene características racionales de percolación.

FEWS (FLOOD EARLY WARNING SYSTEMS): El Sistema de Alerta Temprana contra Inundaciones es una plataforma informática, que posee un conjunto de herramientas informáticas, elaboradas por Deltares de Holanda, en las que se provee un sistema de código abierto para el manejo de pronóstico y manejo de series de tiempo.

SISTEMA CHPS/FEWS: Puede considerarse como la continuación del NWSRFS, de acuerdo con la página, es una adaptación efectuada para la NWS en la plataforma FEWS, en donde se integra Modelo Sacramento.

SHE (SYSTEME HYDROLOGIQUE EUROPÉEN): El Sistema Hidrológico Europeo, SHE, es un sistema de modelación hidrológica de base física desarrollado en conjunto por el Instituto Danés de Hidráulica (DHI), el Instituto Británico de Hidrología y la consultora francesa SOGREAH SHE simula la fase terrestre del ciclo hidrológico. Posee una arquitectura modular. Es un sistema de modelación distribuida espacialmente. Los procesos hidrológicos son modelados

mediante representaciones en diferencias finitas de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento; y ecuaciones empíricas para ciertos procesos. La versión actual se denomina MIKE SHE y es comercializada por DHI, que también ha desarrollado otras herramientas de simulación hidráulica, tal como MIKE FLOOD, entre otras.

PRMS (THE PRECIPITATION-RUNOFF MODELING SYSTEM, USGS): es un sistema de modelación hidrológica determinístico y distribuido desarrollado para evaluar los impactos de las diversas combinaciones de precipitación, clima y uso del suelo sobre los caudales, la producción de sedimentos y la hidrología de la cuenca a escala de eventos o continua en el tiempo. Su diseño modular otorga un marco flexible para la mejora del mismo.

El modelo HBV fue desarrollado en Suecia, forma parte del HBV/IHMS (Sistema Integrado de Modelización Hidrológica), es un sistema computarizado para la predicción hidrológica, la simulación de la descarga, los cómputos de crecidas para proyectos, y estudios sobre cambio climático.

HEC-HMS (HYDROLOGIC MODELING SYSTEM): El Sistema de Modelación Hidrológica HMS, del US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, de los EUA, está diseñado para simular el proceso lluvia-escurrimiento mediante diversos modelos que tiene incluidos dentro de su software, por ejemplo el método para calcular las pérdidas del SCS (Soil Conservation Service), actualmente NRCS, (National Resources Conservation Service), entre otros.

El HEC-HMS, es capaz de modelar diferentes sistemas de cuencas, tanto rurales como urbanas, concebido para la simulación de eventos hidrológicos aislados, principalmente; sin embargo, se puede utilizar como modelo de simulación continua mediante la utilización del modelo de pérdidas llamado: SMA (Soil

Moisture Accounting), que es similar al modelo Sacramento utilizado por el NWSRFS de los EUA. La información requerida para la aplicación del modelo es la siguiente:

- Área de la cuenca y/o subcuencas
- Tiempo de retardo (Lag)
- Tormentas registradas en pluviógrafos u observatorios.
- Precipitación diaria y/o horaria correspondiente a las fechas del período a simular.
- Gastos máximos horarios y/o diarios de la creciente que se quiere simular, para poder calibrar.

Una de las ventajas de este software es su fácil de implementación, aunque si bien, no fue diseñado para simulación continua, por lo que el ingreso de los datos puede consumir tiempo, lo que operacionalmente puede ser de poco provecho, sin embargo, mediante programas externos se pueden preparar los datos de entrada.

CWMS (CORPS WATER MANAGEMENT SYSTEM): El Sistema de Manejo del Agua del US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, es un sistema integrado de hardware y software que inicia con la recepción de datos hidrometeorológicos, cuencas hidrográficas, y el estado del proyecto. Es un sistema más robusto que HEC-HMS, ya que incluye no solo a este, sino a otras 16 de 120 herramientas de modelación matemática como HEC-RAS entre otros paquetes del US Army Corps of Engineers.

HYDROTEL: Es un modelo hidrológico distribuido que genera series diarias de gastos, con base en series diarias de láminas de precipitación y temperatura, así como en las características fisiográficas detalladas de las cuencas. Para este propósito, la cuenca en función del relieve y la hidrografía en unidades

hidrológicas relativamente homogéneas (UHRH), con información específica sobre uso de suelo y textura del mismo. Con este modelo se puede simular en cada UHRH el escurrimiento diario mediante seis procesos. La calibración se hace por grupos de UHRH con respecto a series hidrométricas, obteniendo el mejor ajuste posible en volumen, forma y sincronización del hidrograma, al ser un modelo hidrológico distribuido, se requiere de información espacial de detalle en tiempo real, además de la topográfica.

Los ejemplos anteriores muestran tan solo algunos casos de herramientas para modelación hidrológica continua que se han ido desarrollando, puede decirse que existe un gran número de modelos aplicados a estos procesos, pudiéndose encontrar desde modelos simples de producción o transferencias a modelos más complejos que comprenden ambos procesos, más el de tránsito de crecidas. La Organización Meteorológica Mundial, ha sido una de las principales organizaciones mundiales que se ha dado a la tarea de difundir el uso y aplicación de Sistemas de Alerta Temprana, los cuales utilizan modelos matemáticos que simulan procesos hidrológicos, hidráulicos o meteorológicos. (Pérez, G. 2015)

Características del software HEC-HMS, los resultados de la simulación se pueden ver en el mapa de la cuenca. Se generan tablas sumarias globales y de elemento, que incluyen la información sobre el flujo máximo y el volumen total. También están disponibles, una tabla de serie de tiempo, el gráfico por elementos, los resultados de múltiples elementos y corridas de simulación. Finalmente, el programa HEC-HMS tiene la capacidad de imprimir todos los gráficos y tablas.

El modelo contiene:

- Descripción física de la cuenca
- Descripción meteorológica
- Simulación hidrológica

- Estimación de parámetros
- Análisis de simulaciones
- Conexión con SIG

El lapso de tiempo de una simulación es controlado por las especificaciones de control que incluyen: la fecha y hora de inicio, de terminación y un intervalo de tiempo. (Bastidas, C. 2011)

En el contenido del módulo según Bastidas, C. (2011) existen tres módulos para la simulación del escurrimiento de una cuenca:

1. Módulo de precipitación: permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño.
2. Módulo de la cuenca: permite la representación del sistema físico con los elementos antes Citados, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos. Así, cada componente incluye la información necesaria para construir la hidrógrafa total de salida.
3. Módulo de control: incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación (u optimización) y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos. (Bastidas, C. 2011).

El software HEC-RAS, el Hydrologic Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS) es un modelo unidimensional que permite ejecutar análisis

hidráulicos del flujo de agua en lámina libre en régimen permanente y no permanente.

Para el HEC-RAS, un proyecto representa la introducción de una serie de datos o archivos que contienen un sistema específico de río, en el que el software puede realizar cualquier tipo de análisis incluido en su paquete. Así, mediante la incorporación de datos geométricos, tipos de flujo, sedimentos y de diseño hidráulico, permite, a partir de su modelamiento, realizar diferentes tipos de planes para obras de prevención o la determinación del comportamiento de los flujos a las estructuras hidráulicas construidas por el hombre. (Carrillo, L. 2013)

Carrillo, L. (2013), afirma que para simulación con el programa es necesario conocer los perfiles transversales de los ríos que se van a estudiar, las distancias entre cada sección transversal, los valores de coeficiente Manning para cada porción de cada una de las secciones transversales, las condiciones de borde, y los caudales de diseño. Para las condiciones se debe establecer si el cálculo se realiza para un flujo sub-crítico, supercrítico o la combinación de ambos.

Para el análisis hidráulico en régimen permanente, HEC-RAS es capaz de realizar cálculos de los perfiles de la superficie del agua en flujo gradualmente variado. Perfiles de la superficie del agua en régimen subcrítico, supercrítico y mixto pueden ser calculados. Los perfiles de la lámina de agua son calculados de sección en sección resolviendo la ecuación de energía por medio del procedimiento iterativo del paso estándar (Cuervo, A. 2012).

Para el cálculo del perfil de la lámina de agua en régimen variable, HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint Venant en una dimensión, que consiste en un sistema en derivadas parciales formado por la ecuación de continuidad y la de conservación de la cantidad de movimiento. Para la solución de las ecuaciones HEC-RAS utiliza el esquema de Preissmann o esquema de los cuatro puntos.

Dicho esquema implícito en diferencias finitas es utilizado por varios programas comerciales. (Cuervo, A. 2012)

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica unidimensional compuesto por 4 tipos de análisis en ríos:

- Modelización de flujo en régimen permanente
- Modelización de flujo en régimen no permanente
- Modelización del transporte de sedimentos
- Análisis de calidad de aguas

Los modelos estadísticos son aquellos que representan al sistema en forma matemática. Sus variables pueden ser funciones del espacio y del tiempo, y también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias que no tienen un valor fijo en un punto particular del espacio y del tiempo, pero que están descritas a través de distribuciones de probabilidad y permiten hacer predicciones. (Alvarez, I. 2007)

Para Flores, E. y Flores, L. (2013), sostienen que para el análisis de frecuencia de precipitación máxima, una vez escogida la distribución de probabilidad que mejor se ajusta, se realizó la determinación de precipitaciones máximas para los períodos de retorno de 25, 50, 100 y 200 años, valores usualmente utilizados en diseños para soportar caudales máximos distribuciones de Log Normal 3 p y Log Gumbel son las que se ajustan mejor las precipitaciones máximas de 24 horas en todas las estaciones de la vertiente del lago Titicaca, para caudales y precipitaciones máximas.

La distribución de Gumbel ha sido utilizada con buenos resultados para valores extremos independientes de variables meteorológicas y parece ajustarse bastante bien a los valores máximos de la precipitación en diferentes intervalos

de tiempo y después de muchos años de uso parece también confirmar su utilidad en los problemas prácticos de ingeniería de dimensionamiento de redes de drenaje y diversas obras hidráulicas. (Franquet, J. 2016)

Si n es el número anual de valores diarios independientes de un cierto elemento meteorológico e hidrológico y Ex el número medio anual de valores diarios que exceden el valor x , la probabilidad de que un valor diario sea superior a x es: Ex/n , mientras que la probabilidad de que sea menor será, como resulta bien claro, la complementaria: $1 - \left(\frac{Ex}{n}\right)$

La probabilidad: $p = F(x)$, expresada en tanto por uno, de que el máximo anual sea menor que x vendrá dada por: $F(x) = \left(1 - \frac{Ex}{n}\right)^n$, y si n es suficientemente grande, entonces: $F(x) \approx e^{-Ex}$, ya que se trataría de un límite indeterminado del tipo:

Como se quería demostrar. Si se hace: $y = -\ln Ex$, se tiene que: $F(x) = e^{-y}$, ya que también:

$$-y = \ln Ex; Ex = e^{-y} \quad (2.6)$$

Y es la variable reducida, $y = -\ln[1/F(x)]$, y e es la base de los logaritmos neperianos o naturales, tal como ya hemos visto en el epígrafe correspondiente de este mismo trabajo.

En la aplicación de la teoría de los valores extremos suele expresarse la probabilidad en términos del período de retorno o de recurrencia $T(x)$, que para un valor particular de x es "el intervalo medio, expresado en años, en que el valor extremo alcanza o supera a x una sola vez". La relación existente entre la

probabilidad: $p = F(x)$ y el período de retorno: $n = T(x)$ viene dada por la expresión:

$$T(x) = 1/[1 - F(x)], \text{ o sea, } n = 1/(1 - p) \quad (2.7)$$

El período de retorno así definido no es el mismo que el intervalo medio entre ocurrencias de valores máximos iguales o superiores a x , $T_1(x)$, ya que en estas series, llamadas de duración parcial, no se considera el año que se han registrado estos valores máximos, pudiendo haber algunos con dos o más y otros sin ninguno. Según SEELYE, T y T_1 , están relacionadas por la ecuación:

$$(1/T_1)\ln T = \ln(T - 1) \quad (2.8)$$

En algunas aplicaciones puede ser conveniente emplear $T_1(x)$, aunque la diferencia entre T_1 y T es muy pequeña y tiende rápidamente hacia $1/2$ cuando T aumenta.

La variable reducida viene dada por la expresión:

$$y = (x - u) \quad (2.9)$$

Siendo y y u parámetros que pueden calcularse a partir de la serie de valores extremos x .

Para estimar estos parámetros pueden utilizarse diferentes métodos, si bien para el presente estudio se ha adoptado el del ajuste de regresiones por el método de los mínimos cuadrados ordinarios. También se describirá y aplicará el de probabilidad máxima de FISHER que, aunque se acostumbra a considerar como el mejor para encontrar los parámetros, no se utiliza generalmente ya que requiere unos cálculos bastante complicados y laboriosos. (Franquet, J. 2016)

Método de Gumbel: x_T

Sea "p" la probabilidad de un evento extremo: $p = P(X \geq x_T)$

Sea probabilidad está relacionada de no ocurrencia de retorno T en la forma: $p = 1/T$

Por tanto, la probabilidad de no ocurrencia de un evento extremo, para un año, será:

$$P = (X < x_T) = 1 - p = 1 - \frac{1}{T} \quad (2.10)$$

Probabilidad de no ocurrencia de la lluvia de cálculo para N = 50 años: $P(X < x_T) = 10\%$ sustituyendo en esa expresión:

$$P(X < x_T) = 0,1 = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{20} \rightarrow 0,1^{\frac{1}{5}} = 1 - \frac{1}{T} \rightarrow T = 2,219 \text{ años} \quad (2.11)$$

Valor de precipitación X_T para el período de retorno T:

$$\frac{1}{T} = P(X \geq X_T) = 1 - P(X < X_T) = 1 - P(X_T) \rightarrow P(X_T) = \frac{T-1}{T} \quad (2.12)$$

3.3. MÉTODO

El método empleado fue cualitativo – deductivo de nivel no experimental, este método se lo utilizó para determinar mediante un modelo los datos obtenidos del escurrimiento, el cual sirvió de información como base de datos, a su vez se demostró que con los resultados se culminó esta investigación.

3.4. VARIABLES

3.4.1. VARIABLE DEPENDIENTE

Comportamiento Hidrológico

3.4.2. VARIABLE INDEPENDIENTE

Datos Meteorológicos, Datos Topográficos.

3.5. PROCEDIMIENTO

Los procedimientos que se llevaron a cabo como parte esencial del modelamiento del escurrimiento por el software HEC-HMS para predecir el comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Carrizal se realizaron tres fases, siendo estas las siguientes:

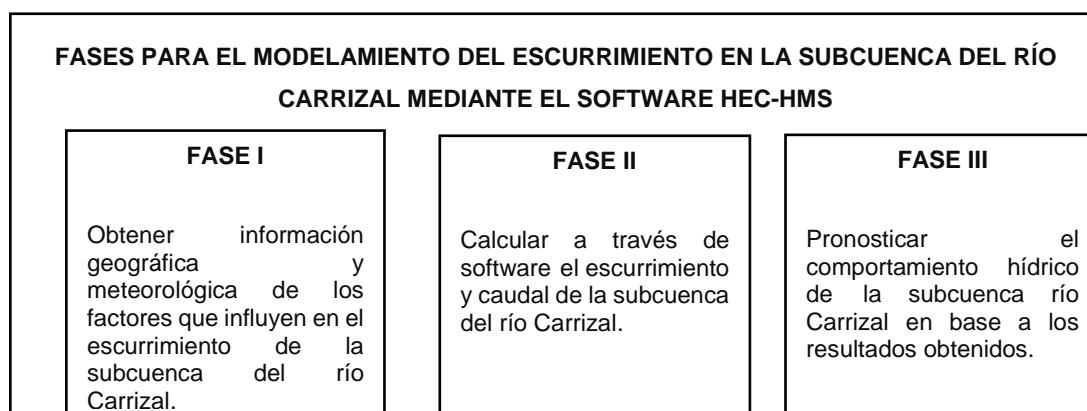


Figura 3.2. Fases para la modelamiento de la subcuenca del río Carrizal

FASE I. OBTENER INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y METEOROLÓGICA DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ESCURRIMIENTO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL

La recopilación de información es el primer paso y sumamente importante para realizar cualquier estudio en el campo de la hidrología. Lastimosamente la recopilación de dicha información es muy complicada ya que se trata de conocer el comportamiento del régimen hidrológico en una zona determinada; regularmente se realiza un proceso de análisis, ajuste y completado de datos basados en técnicas estadísticas para lograr una serie de datos confiable.

Para poder obtener información respecto a los factores que influyen en el escurrimiento de la subcuenca del río Carrizal fue necesario la ejecución de tres actividades que permitieran crear una base de datos geográficos y meteorológicos dentro del período establecido 2011-2015.

- **Actividad 1.-** Recopilación de datos de precipitaciones en la Estación Meteorológica de la ESPAM MFL de los años 2011-2015.

La información perspectiva, y que es aplicable a la subcuenca del río Carrizal es bastante deficiente, la estación de Chone posee información de precipitaciones mensuales de años históricos en un 60%, pero hay períodos sin registrar, probablemente por no existir información, o por ser muy pobre. Por lo tanto se procedió a recopilar los datos de la estación meteorológica ESPAM MFL, ya que son los más actuales y confiables, los mismos que son reportados en el INAMHI, obteniendo un registro de precipitaciones de los años 2011 al 2015, ya que no existe registro de años históricos los cuales fueron plasmados en el software HEC-HMS.

- **Actividad 2.-** Recopilación de datos del volumen captado en el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) en la ciudad de Quito del año 2011-2015.

Se utilizaron datos suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología correspondientes a volúmenes de caudales máximos ubicados en la subcuenca, sirviendo como base para validar la información generada en el software HEC-HMS, modelando en el hietograma los años con mayor cantidad de volumen en la subcuenca del río Carrizal.

- **Actividad 3.-** Recopilación de datos Cartográficos y Geográficos.

Adicional a la información recopilada por la Estación Meteorológica ESPAM MFL y el INAMHI, se realizaron los mapas cartográficos y geográficos de la subcuenca del río Carrizal mediante el programa AutoCAD, los cuales sirvieron para identificar las CN (número de curvas), que el software HEC-HMS incluye dentro del cálculo, para lo cual se procedió a tomar los puntos de coordenadas en la subcuenca del río Carrizal, para la ubicación de la zona de estudio y la realización de los mapa, en donde se realizó la medición de la velocidad, la profundidad del río, la longitud y la calicata en diferentes puntos de la subcuenca.

FASE 2. CALCULAR A TRAVÉS DEL SOFTWARE HEC-HMS, EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO EN LA SUBCUENCA RÍO CARRIZAL.

Como sustento de la modelación del escurrimiento sobre el caudal de la subcuenca del río Carrizal, se aplicaron las siguientes diligencias:

- **Actividad 4.-** Recopilación de información acerca del modelo del software HEC-HMS Y HEC –RAS.

Se realizó la búsqueda de manuales de información que indicaron el uso del modelo hidrológico del software HEC-HMS y HEC-RAS, que fueron de gran importancia dentro de la investigación de esta tesis.

- **Actividad 5.-** Aplicación del modelo con los datos obtenidos.

Con los datos obtenidos se procedió a aplicar el modelo hidrológico HEC-HMS, para simular el proceso de precipitación-escorrentía de la subcuenca del río Carrizal, y simular el caudal y con el número de curvas de la subcuenca mediante el software HEC-RAS, el cual modela el caudal de los 5 años de muestra.

Se realizaron los cálculos de las características físicas de la subcuenca del río Carrizal, que son para elaborar los hidrogramas de crecidas con HEC-HMS, incluye dentro del programa, para poder realizar los respectivos análisis de los años a muestrear.

Para la caracterización de la subcuenca se utilizó los siguientes conceptos físicos-geográficos: área de drenaje, perímetro, pendiente, coeficiente de compacidad y el factor de forma, que se describe a continuación:

- Área de drenaje (km^2).- es la superficie delimitada por la línea de cumbres en donde se genera el escurrimiento superficial de la subcuenca.
- Perímetro (km^2).- es la longitud de la línea de las cumbres
- Pendiente.- resulta de la relación entre el producto de la diferencia de cotas promedio entre curvas de nivel consideradas, con la longitud total de las curvas de nivel y el área de la subcuenca.
- Coeficiente de compacidad o GRAVELIOUS.- Es el resultado del cociente entre el perímetro de la subcuenca y el perímetro de un círculo de área equivalente al área de la subcuenca. Mientras más se acerque a la unidad este valor, el riesgo de crecidas y erosión será mayor.

$$Kc = 0.28 \frac{P}{A^{0.5}}$$

P: Perímetro de la subcuenca (Km) y

A: Área de drenaje (Km²)

Para realizar los cálculos de la caracterización de la subcuenca fueron las siguientes ecuaciones:

ECUACIÓN DE TEMEZ

$$Tc = 0,3 \left(\frac{L}{50,25} \right)$$

$$Tc = 9,08 \text{ horas}$$

Tiempo de retardo

$$T = 0,02 L^{0,77} S^{-0,385}$$

$$T = 0,02(24,4 \text{ Km})^{0,77} (0,001934)^{-0,385}$$

$$T = 10,35 \text{ min}$$

$$T = \frac{L}{1,5 D} \sqrt[5]{\frac{M^2}{F}}$$

$$T = \frac{79 A}{1,5 D} \sqrt[5]{\frac{(1347,09)^2}{0,0004439}}$$

$$T = 98,03 \text{ horas}$$

$$T = 2,56 \text{ horas}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 1347,09}{\pi}}$$

$$D = 91,91 \text{ Km}$$

$$A = \frac{\pi P^2}{9}$$

$$A = \pi x (20,000)^2$$

$$A = 78,53$$

$$Q = A \times V$$

$$Q = 9,05 \times 0,816$$

$$Q = 7,38$$

Obteniendo las características de la subcuenca del río Carrizal se procedió a realizar el Cuadro 3.1

CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL

Cuadro 3.1. Caracterización física de la subcuenca del río Carrizal

	Área de drenaje (km ²)	Tiempo de concentración (min)	CN	Impermeabilidad (%)	Coefficiente de escorrentía (mm)	Caudal (m ³ /seg)
2011	1347.04	544.8	45.03	53	0.43	7.53
2012	1347.04	544.8	45.03	53	0.43	26.707
2013	1347.04	544.8	45.03	53	0.43	13.254
2014	1347.04	544.8	45.03	53	0.43	4.117
2015	1347.04	544.8	45.03	53	0.43	5.282

FASE 3. PRONOSTICAR EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE LA SUBCUENCA RÍO CARRIZAL EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Para la ejecución de esta fase se desarrolló la siguiente actividad:

- **Actividad 6.-** Analizar la tendencia del comportamiento hídrico.

El comportamiento hídrico de la subcuenca del río Carrizal se analizó en la época seca y época lluviosa, a partir de los resultados obtenidos mediante el software HEC-HMS y de la extensión de HEC-RAS, la cual crea un archivo para importar datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río, secciones transversales, entre otros; teniendo en cuenta los caudales anuales y los promedios de caudales para estimar el comportamiento hídrico para el período 2011 al 2015 y la variación de caudal del período mencionado, a partir de los análisis de estos años para poder pronosticar mediante el método de Gumbel siendo muy útil para representar la distribución del máximo nivel de un río Carrizal a partir de los datos de niveles máximos durante 10 años.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En este capítulo se presentan y se analizan los resultados derivados del modelamiento de escurrimiento a través del software HEC-HMS de la subcuenca del río Carrizal, así como la calibración de información recopilada mediante la extensión del programa HEC-RAS y de la probabilidad estadística de Gumbel permitiendo determinar el comportamiento hidrológico para los años futuros.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la recopilación de la información.

4.1. OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA Y METEOROLÓGICA DE LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN EL ESCURRIMIENTO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL

De acuerdo a Tapia, J. (2012), indica que para el desarrollo de estos estudios y respaldada con una información hidrometeorológica se obtiene información de precipitaciones y caudales en tiempos reales, utilizándose esta misma metodología en la cual se buscó datos simples obteniendo resultados aceptable de una forma rápida y de buena calidad.

4.1.1. DATOS DE PRECIPITACIONES DEL SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL (2011 - 2015)

SAGARPA (2011), señala que para obtener los datos de meteorología se necesita datos de precipitación que incluye lluvia, llovizna. Realizándose la modelación hidrológica con datos provenientes del año 2011 al 2015 de la

subcuenca del río Carrizal, teniendo conexión con el INAMHI validando estos resultados de precipitaciones dadas por mes, con promedios y la sumatorias por año para obtener pérdidas de escurrimiento, infiltración del suelo de esta zona como se observa en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Se representa los datos de precipitaciones del 2011-2015 de la subcuenca del río Carrizal

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología														
Precipitación Total Mensual (mm)														
Series mensuales de datos meteorológicos														
Nombre: Espam MFL							Código:m 162							
Período: 2011-2015			Latitud: OG 39°50.9'S				Longitud: 80 G 9°22'W				Elevación: 39.00			
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
2011	101,7	98,3	54,4	210	1,9	10,4	9,3	0,5	0,1	1,2	0,7	37	535,2	43,7
2012	319,1	474	370	152	167	91,1	6,5	0	0	3,9	5,3	29	1.254	160
2013	268	163	371	111	16	3,3	1,2	0,5	0	4,2	1,1	23	929	136
2014	209,6	200	122	56,3	90,3	31,1	1,7	1,8	0,4	1,3	1	23	750,6	62,55
2015	108,3	190	146	175	122	65,4	64,1	2	0,4	7,8	2,7	100	984,2	93
Media	268	257	252	162	102	91	82,8	4,8	0,2	8	2	42	1.092	130
Mín.	101,7	98,3	54,4	56,3	1,9	10,4	1,2	0,5	0,1	1,2	0,7	23	-	0.144
Máx.	319,1	474	371	210	167	91,1	64,1	2	0,4	7,8	5,3	100	-	146.783

4.1.2. RECOPIACIÓN DE DATOS DEL VOLUMEN CAPTADO EN LA SENAGUA, ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA REPRESA.

Los datos considerados en el cuadro 4.2 corresponden a los años con registro de períodos 2011-2015, de los caudales medios mensuales, estos datos fueron obtenidos en el INAMHI de la ciudad Quito, para ser plasmado en el software HEC-HMS y el HEC-RAS.

Cuadro 4.2. Se representa los datos de caudal del 2011-2015 de la subcuenca del río Carrizal

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología														
Caudales Medios Anuales (m ³ /seg.)														
Series mensuales de datos hidrológicos														
Nombre: Río Carrizal- Calceta Código: H0229														
Período: 2011-2015			Latitud: OG 50'26''S			Longitud: 80 G 9'22''W			Elevación: 47.00					
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
2011	3.513	36.62 9	7.581	21.36 1	4.686	2.525	2.444	2.391	2.311	2.089	2.289	-	87.819	80
2012	3.392	68.62 4	146.78 3	34.18 7	28.27 8	7.314	11.00 6	7.328	5.617	2.870	2.626	2.463	320.48 8	26.707
2013	2.937	4.439	68.852	51.01 1	5.635	3.879	3.549	3.394	3.856	3.708	3.941	3.857	159.05 8	13.254
2014	4.666	5.399	5.314	3.024	2.859	4.289	5.227	3.486	3.592	3.738	3.779	4.033	49.409	4.117
2015	4.451	4.718	5.538	5.256	133.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Media	4	23.96 2	46.814	22.96 8	8.292	3.601	4.445	3.320	3.075	2.481	2.257	2.071	154.19 2	11.039
Min.	1.735	1.681	1.139	2.137	0.144	0.293	0.401	0.577	1318	2089. 0	1434	-	-	0.144
Máx.	19.36 4	68.62 4	146.78 3	79.68 1	40.12 3	22.68 1	14.73 3	29.05 7	27.58 5	38.72 4	13.97 5	17.39 5	-	146.78 3

4.1.3. RECOPIACIÓN DE DATOS CARTOGRÁFICOS Y GEOGRÁFICOS.

El autor Tapia, J. (2012), indicó que las características fisiográficas de una cuenca pueden ser expresadas a partir de ciertas medidas o parámetros que se consiguen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía del área de estudio, obteniéndose con esto datos para la delimitación de la subcuenca del río Carrizal.

Brugal, M. (2017), señala que tradicionalmente la delimitación de cuencas, se ha realizado mediante la interpretación de los mapas cartográficos, razón por la cual se elaboró el mapa de delimitación en donde se definió la zona de estudio, para ello, se creó un trazado, con el fin de ubicar la subcuenca del río Carrizal, en base a las coordenadas geográficas.

En la figura 4.1 se elaboró el mapa de delimitación de la subcuenca del río Carrizal, que según Pacheco-Vega, A. y Basurto, F. (2008) señalan que las cuencas hidrográficas son unidades territoriales que permiten acceder a una

dimensión amplia del ciclo del agua, partiendo de esto se obtuvo el mapa de delimitación.

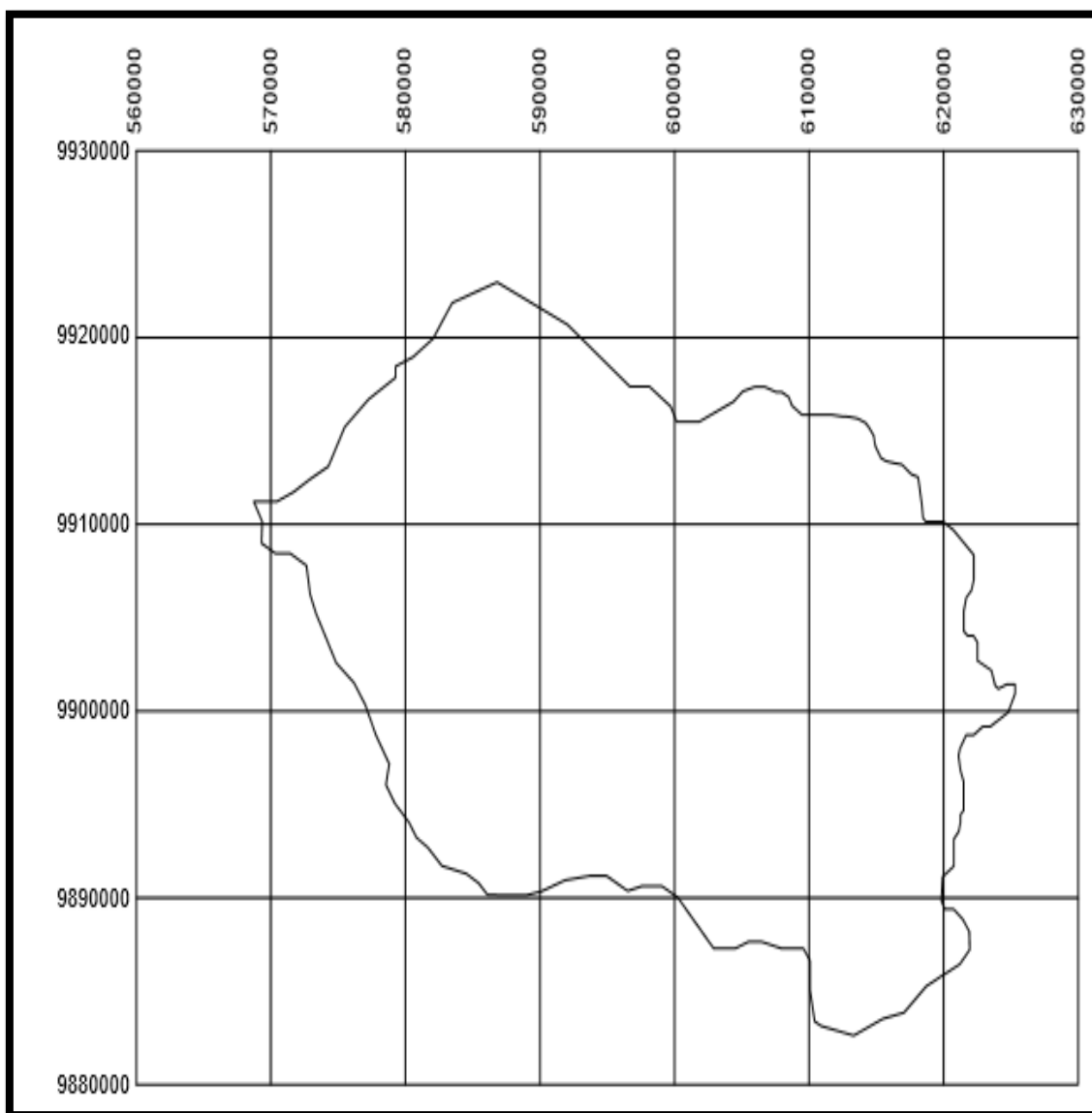


Figura 4.1. Mapa de la delimitación Geográfica de la Subcuenca río Carrizal

Morris, H. (2006) indica que la condición hidrológica describe el porcentaje de área cubierta según el uso del suelo, el tratamiento del suelo y su condición hidrológica para poder estimar el CN. En la figura 4.2 después de haberse delimitado la subcuenca, mediante AutoCAD se obtuvo las curvas de nivel representadas en la cartografía que sirvieron para identificar la subcuenca del

río Carrizal y sacar el número de curvas de la subcuenca y realizándose el cálculo para los parámetros fisiográficos que el software HEC-HMS, incluyó dentro del módulo.

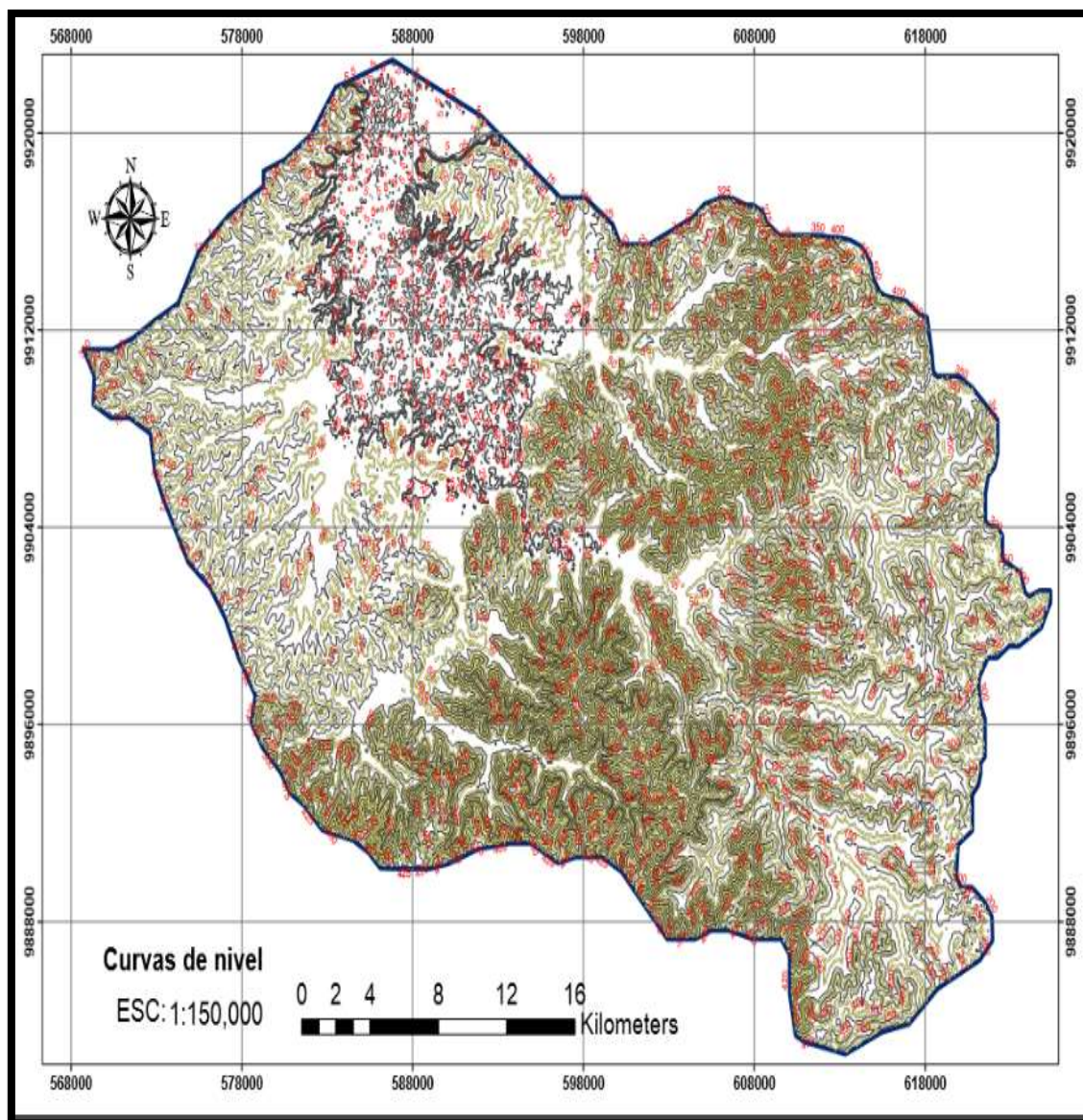


Figura 4.2. Cartografía de la Subcuenca del río Carrizal

ANÁLISIS:

Los datos de precipitaciones proporcionados por la estación meteorológica de la ESPAM MFL, permitió conocer las mínimas, máximas y medias de los periodos

del 2011 al 2015, conociendo cuáles fueron los meses que tuvieron mayores precipitaciones de cada año, así mismo los datos proporcionados por el INAMHI de la captación de caudal permitió conocer el comportamiento del flujo del río Carrizal al igual obteniendo mínimas, máximas y medias de cada año conociendo mensualmente el comportamiento de los periodos ingresados en el software los datos cartográficos y geográficos en escala de 1:150,000 permitió conocer la ubicación de la subcuenca a estudiar, por medio de estos mapas se hizo la correcta delimitación de la subcuenca en donde se obtuvieron datos de curvas de nivel que sirvieron para el respectivo cálculo que incluye los software de modelamiento.

4.2. CALCULAR A TRAVÉS DEL SOFTWARE HEC-HMS, EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO EN LA SUBCUENCA RÍO CARRIZAL.

Según Ortiz, E. (2015) indica el uso del software que el modelo HEC-HMS, es apropiado para la simulación y desarrollo de cualquier configuración de embalses o reservorios de estructuras de evacuación, en donde bajo este concepto se validó la modelación hidráulica de la subcuenca del río Carrizal.

4.2.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN ACERCA DEL MODELO DEL SOFTWARE HEC-HMS.

El HEC-HMS se usó para simular la respuesta hidrológica de la subcuenca del río Carrizal, en este se hizo corridas de precipitación de cinco años, con capacidad de tener la información de estado de la subcuenca en un punto de tiempo, basándose en la información de estado que se hizo en el primer objetivo. Generando tablas sumarias globales y de elemento, que incluyen la información

sobre el flujo máximo y el volumen total, la pérdida de infiltración, que registran en el hidrograma e hietograma. Finalmente, mediante el programa HEC-HMS se imprimió todos los gráficos y tablas.

El modelo utilizado contiene:

- **Descripción física de la cuenca**

Para la descripción física que pide el software se realizó una caracterización física de la subcuenca, cuyos cálculos fueron ingresados al software.

- **Descripción meteorológica**

Para la descripción meteorológica se ingresaron las precipitaciones diarias desde el año 2011 al 2015.

- **Especificaciones de control.**

Dentro de las especificaciones de control se incorporó la fecha de inicio de 1 de enero del 2011 hasta la fecha final el 31 de Diciembre del 2015 de las precipitaciones, con intervalos de 00:00 horas, las cuales el software las represento mediante hidrogramas e hietogramas.

4.2.2. APLICACIÓN DEL MODELO CON LOS DATOS OBTENIDOS EN LA SUBCUENCA DESDE EL 2011 HASTA EL 2015

Cuadro 4.3. Resultado de las precipitaciones del año 2011 al 2015

Sumatoria de los resultados por la corrida 1				
Proyecto: Subcuenca		Simulación: Corrida 1		
Comienzo de corrida: 01ene2011, 00:00		Modelo de cuenca: Modelo 1		
Final de corrida: 31dic2015, 00:00		Modelo meteorológico: meteorológico 1		
Cálculo de tiempo: 04feb2017, 17:01:46		Especificaciones de control: control 1		
Volumen de unidades: mm		Clasificación: Hidrológica		
Elemento hidrológico	Área de drenaje (km ²)	Pico de descarga (m ³ /s)	Tiempo de Pico	Volumen (mm)
Subcuenca	1.347	1.1	04 marzo 2013, 00:00	5130.95

El cuadro 4.3 es la sumatoria que arrojó el software en un lapso de 5 años fueron los siguientes; se puede observar que la subcuenca tiene un área de 1,347 km², el caudal fue 1.1 m³/s el día 4 de marzo de 2013 y el volumen de 5130,95 mm. Cabe recalcar que en este cuadro se aprecia el día con mayor precipitación de los 5 escenarios tomados a muestrear.

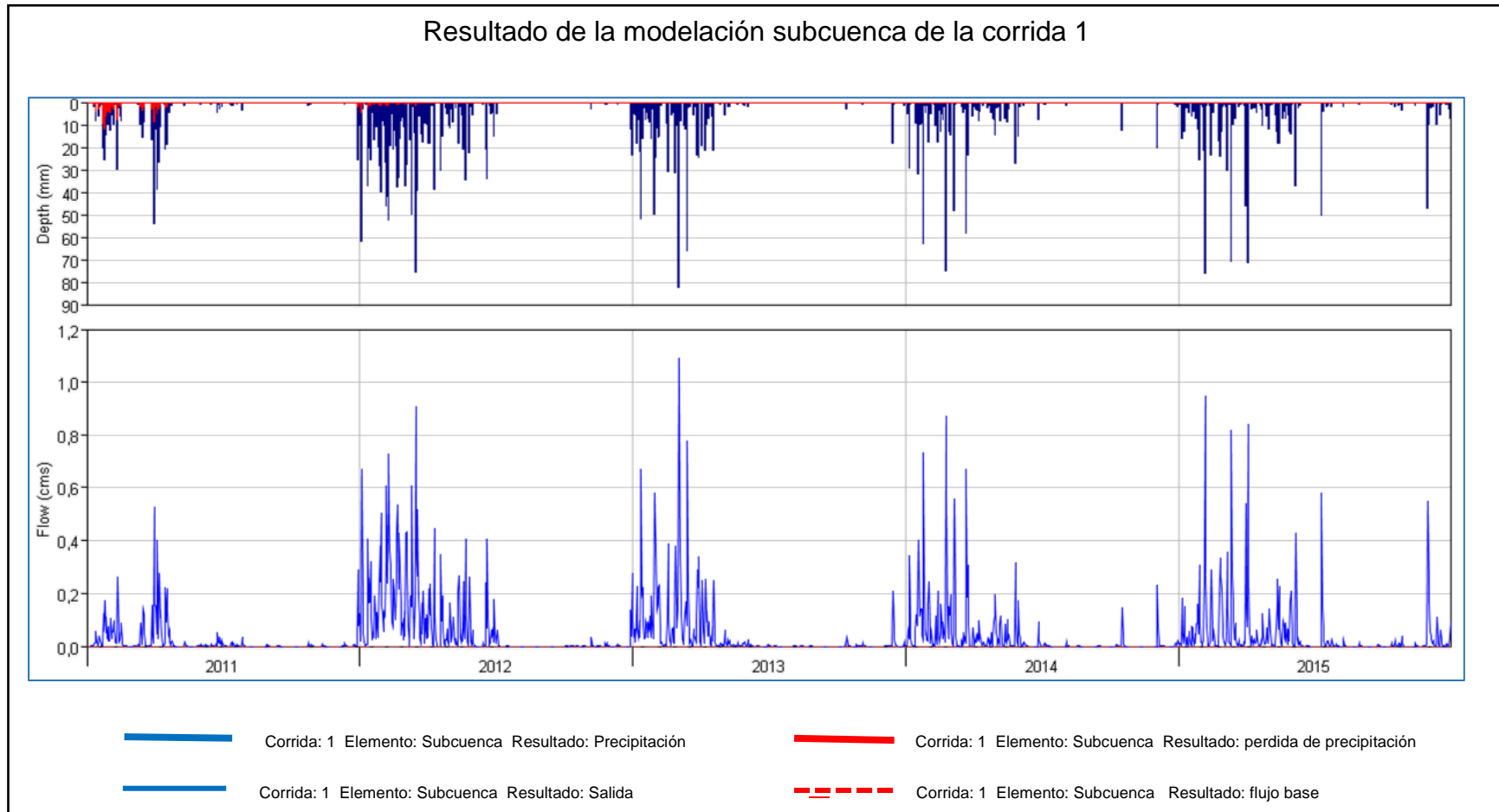


Gráfico 4.1. Hietograma e hidrograma de la subcuenca del río Carrizal del el año 2011 hasta el 2015

Pullupaxi, J. y Villareal, S. (2013) en los resultados de su tesis obtuvieron la utilización de estos hidrogramas le permitieron determinar la forma de crecidas (volúmenes de agua) y para el efecto se requiere disponer de los caudales pico.

En el Gráfico 4.1 el hietograma e hidrograma que arroja el software se puede apreciar la corrida de la muestra de 5 años, en el hietograma se observa las barras de color azul las cuales son las precipitaciones 2011-2015, las mayores precipitaciones diarias por mes, siendo estos los primeros meses de cada año y las de color rojo son las pérdidas de lluvia. Aparicio, F. (2011) indica que el escurrimiento es el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente, de acuerdo a este autor se puede apreciar la infiltración durante las precipitaciones diarias de cada año, tomando el año 2011 en donde fue la mayor pérdida de infiltración a consecuencia del tipo de suelo que se tiene en la subcuenca.

SAGARPA (2011) señaló que el índice de infiltración es característico de cada cuenca e independiente de la intensidad de la lluvia y se mide en mm/h. En los hidrograma tenemos la escorrentía de la corrida de los 5 años se observa el mayor de cada año, siendo este el año 2013 de 1,17 cm en el mes de marzo, a diferencia de los años siguientes el caudal base se siguió manteniendo, como en la salida.

Cuadro 4.4 Sumatoria de los resultados del 2011 al 2015 de la subcuenca del río Carrizal

Sumatoria de los resultados de la subcuenca río Carrizal	
Proyecto: Subcuenca	Simulación: Corrida 1
Comienzo de corrida: 01ene2011, 00:00	Modelo de cuenca: Modelo 1
Final de corrida: 31dic2015, 00:00	Modelo meteorológico: meteorológico 1
Cálculo de tiempo: 04feb2017, 17:01:46	Especificaciones de control: control 1
Volumen de unidades: mm	Clasificación: Hidrológica
Unidades de volumen: mm	
Resultados computarizados	
Descarga de pico: 1091.2 (m ³ /s)	Tiempo de descarga de pico: 04 marzo 2013
Volumen de precipitaciones: 4894.90 (mm)	Volumen del escurrimiento directo: 4723,61 (mm)
Pérdida de volumen: 166,98 (mm)	Volumen del flujo base: 0,00 (mm)
Exceso de volumen: 4728,62 (mm)	Descarga de volumen: 4723,61 (mm)

En el cuadro 4.4 los resultados de la sumatoria que obtuvimos fueron que el caudal máximo de los años ingresados del 2011 al 2015 fue de 1091,2 m³/s, el volumen de la precipitaciones de 4894,90 mm, se obtuvo una pérdida de volumen 166,98 mm, un exceso de volumen de 4728,62 mm, la fecha del mayor caudal fue el 4 de Marzo del 2013 dentro de los 5 años de muestra, volumen de la escorrentía directa de 5130.95 mm y el volumen de descarga que fue de 4723,61 mm.

4.2.3. MODELACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DEL AÑO 2012

Cuadro 4.5. Resultado de las precipitaciones de la subcuenca del río Carrizal año 2012

Sumatoria de los resultados por la corrida 1 2012				
Proyecto: Modelación 2012		Simulación: Corrida 1		
Comienzo de corrida: 01ene2012, 00:00		Modelo de cuenca: Modelo 1		
Final de corrida: 31dic2012, 00:00		Modelo meteorológico: meteorológico 1		
Cálculo de tiempo: 04feb2017, 17:21:23		Especificaciones de control: control 1		
Volumen de unidades: mm		Clasificación: Hidrológica		
Elemento hidrológico	Área de drenaje (km ²)	Pico de descarga (m ³ /s)	Tiempo de Pico	Volumen (mm)
Subcuenca	1.347	147,7	16marz 2012, 00:00	662575,30

El cuadro 4.5. representa lo datos de la mayor precipitación del año 2012 mediante el software HEC-HMS datos obtenidos en la estación meteorológica de la ESPAM correspondiente al año 2012 en el cual da resultado del volumen de 626575,30 mm teniendo la fecha de 16 de Marzo del 2012, fecha en la cual ocurrió la mayor precipitación evento que propició la inundación del Río Carrizal afectando a la ciudad de Calceta y sus alrededores, un caudal de 147.7 m³/s, el cual el nivel de precipitación a diferencia de los otros años es distinto y sobrepasa la pluma de la normalidad. En este mes es donde se produjeron inundaciones en toda la subcuenca media del río Carrizal.

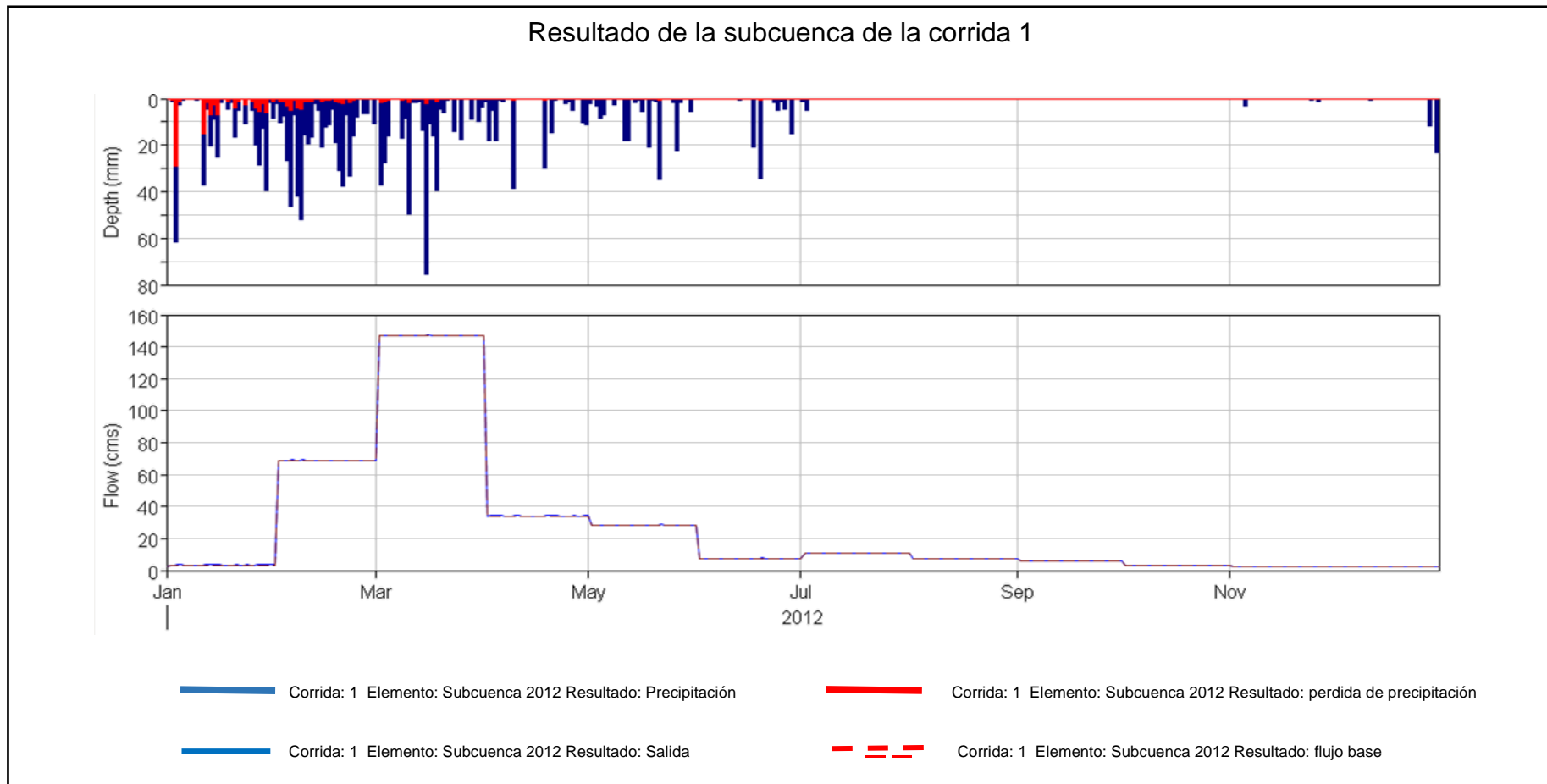


Gráfico 4.2. Histograma e hidrograma de la subcuenca del río Carrizal año 2012

En el gráfico 4.2. se puede apreciar el escenario año 2012, en el hietogramas se observa las barras de color azul son las precipitaciones que fueron desde el mes de Enero a Abril siendo el mes de marzo con el valor de 75 mm, este la mayor precipitación del año, las de color rojo son las pérdidas la infiltración que se produjo dependiendo el tipo de suelo, se puede apreciar la infiltración durante el mes de Enero hasta mediados de Febrero, siendo que la mayor pérdida de lluvia se registró el 10 de Enero con la mayor filtración de escurrimiento del año.

El hidrograma se observa el evento ocurrido en el año 2012, fue la mayor salida de caudal se registró en el mes de Marzo llegando a 150 cm de mayor flujo registrado en ese año, al igual que el caudal base.

Cuadro 4.6 Sumatoria de los resultados de la subcuenca del río Carrizal año 2012.

Sumatoria de los resultados de la subcuenca río Carrizal 2012	
Proyecto: Modelación 2012	Simulación: Corrida 1
Comienzo de corrida: 01ene2012, 00:00	Modelo de cuenca: Modelo 1
Final de corrida: 31dic2012, 00:00	Modelo meteorológico: meteorológico 1
Cálculo de tiempo: 04feb2017, 17:25:20	Especificaciones de control: control 1
Volumen de unidades: mm	Clasificación: Hidrológica
Unidades de volumen: mm	
Resultados computarizados	
Descarga de pico: 147,7(m ³ /s)	Tiempo de descarga de pico: 16 marzo 2012
Volumen de precipitaciones: 1628,70 (mm)	Volumen del escurrimiento directo: 1463,09 (mm)
Pérdida de volumen: 150,80 (mm)	Volumen del flujo base: 625112,21 (mm)
Exceso de volumen: 1477,90 (mm)	Descarga de volumen: 626575,30 (mm)

En el cuadro 4.6 da resultado de la sumatoria tenemos que: el caudal máximo de año 2012 fue de 147.7 m³/s, el volumen de la precipitaciones de 1628,70 mm, la pérdida de volumen 150,80 mm, el exceso de volumen de 1477,90 mm, Fecha del caudal máximo fue el 16 de Marzo del 2012, Volumen de la esorrentía directa de 1463,09 mm, según Suárez, J. y García, M. (2003) indican que el aumento de esorrentía reduce la recarga subterránea, bajando así la capa freática y empeorando las sequías, el volumen de caudal base y el volumen de descarga es de 626575,30 mm. Siendo este el año de mayor precipitación.

Aguilera, E. (2010) señaló que las lluvias muy intensas provocan crecidas en pequeñas cuencas, en tanto que en cuencas grandes se necesita lluvias de menor intensidad pero de mayor duración y cubrimiento grande.

4.2.4. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN ACERCA DEL MODELO DEL SOFTWARE HEC-RAS.

El HEC-RAS se lo utilizó para la modelación del caudal de la subcuenca del río Carrizal como un paquete integrado de programas de análisis hidráulicos el **cuál permitió observar los perfiles transversales del río desde el 2011 al 2015.**

Con este sistema se realizó cálculos de perfiles de superficies de agua de flujos estables e inestables. Dio como resultado como se comportaron los caudales de la subcuenca del río Carrizal. Para ingresar los datos al software HEC-RAS, se realizó una medición de caudal, se midió la profundidad y la velocidad para realizar los respectivos cálculos para el caudal, la información requirente para una correcta calibración de programa dando como resultados la modelación de inundaciones de los escenarios a presentarse.

4.2.5. MODELACIÓN DEL RÍO CARRIZAL CON EL SOFTWARE HEC-RAS

Morris, H. (2006), en su tesis Modelación hidráulica e hidrológica del río Guápiles para determinar la vulnerabilidad a inundaciones de la Universidad de Costa Rica, indicó que mediante la simulación hidráulica se busca conocer la posible respuesta del cauce principal frente a los caudales máximos obtenidos de la modelación, en el caso que se den inundaciones.

4.2.5.1. GRAFICOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RÍO CARRIZAL DEL AÑO 2011

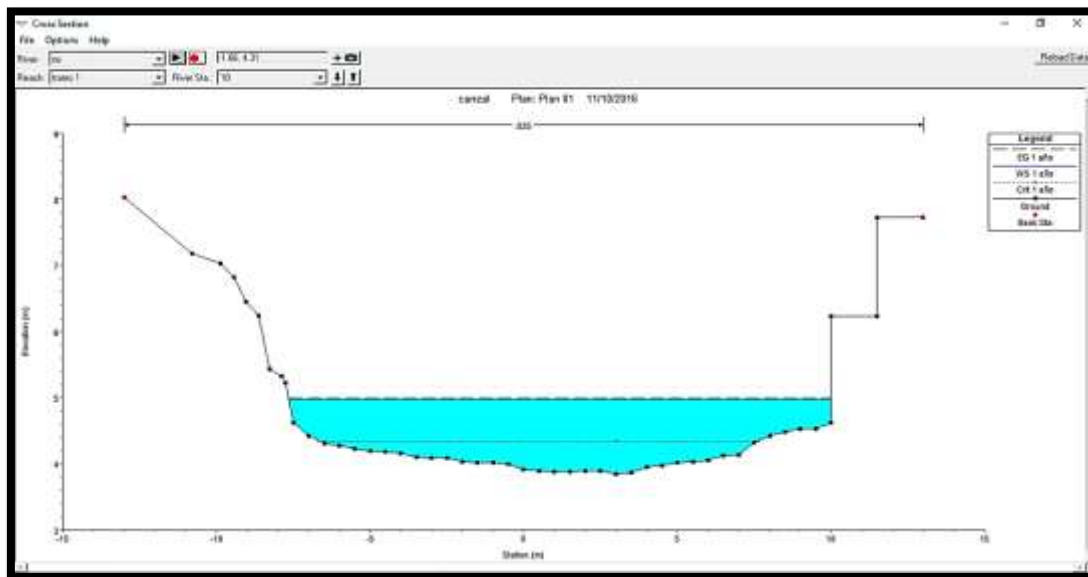


Gráfico 4.3 Sección transversal del río Carrizal 2011

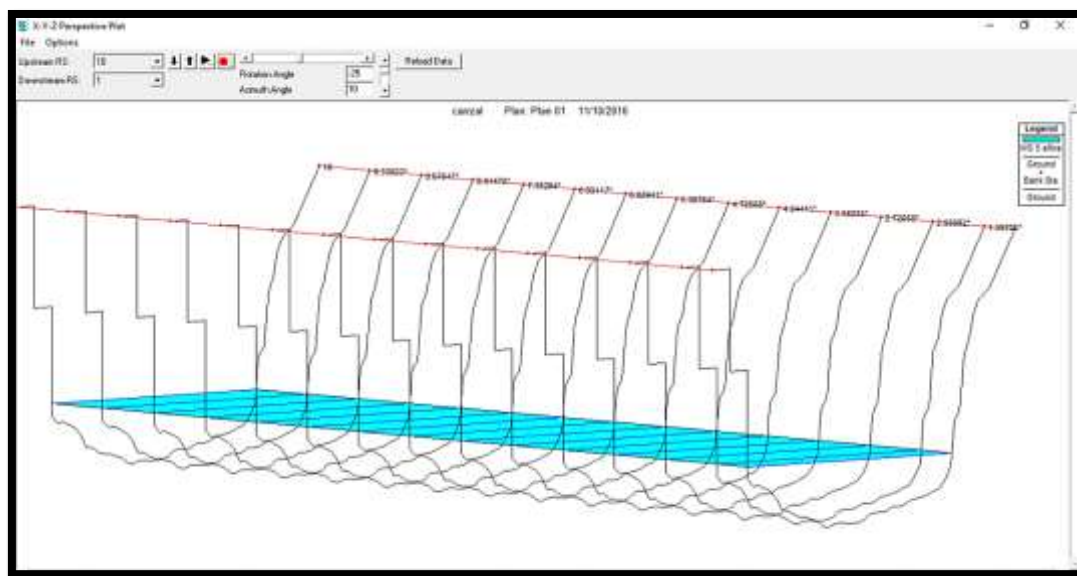


Gráfico 4.4. Perspectiva del perfil río Carrizal 2011

Carrillo, L. (2013), señaló que es de gran importancia conocer los perfiles transversales de ríos para un caudal determinado, dependerá de la forma del cauce, de la pendiente y de su naturaleza. El gráfico 4.3 se observa la variación de caudal del año 2011 tuvo una elevación de 5 metros más de lo normal, que

generalmente mantiene durante el año que es 4.2 metros, mostrando el gráfico 4.4 muestra la perspectiva dados cada 2 Km el perfil del río Carrizal.

4.2.5.2. GRÁFICOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RÍO CARRIZAL DEL AÑO 2012

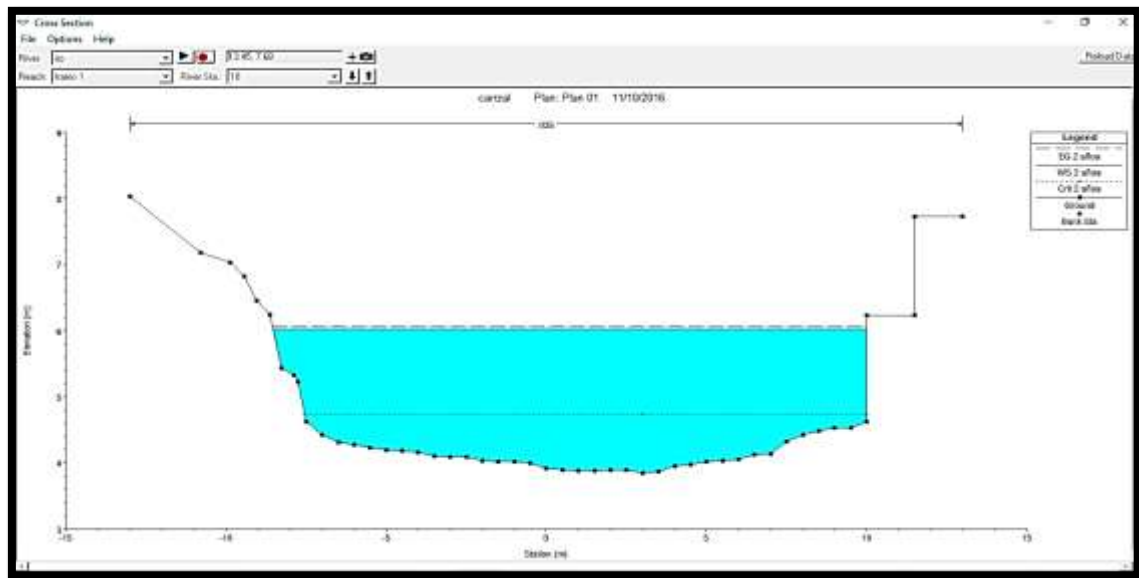


Gráfico 4.5 Sección transversal del río Carrizal 2012

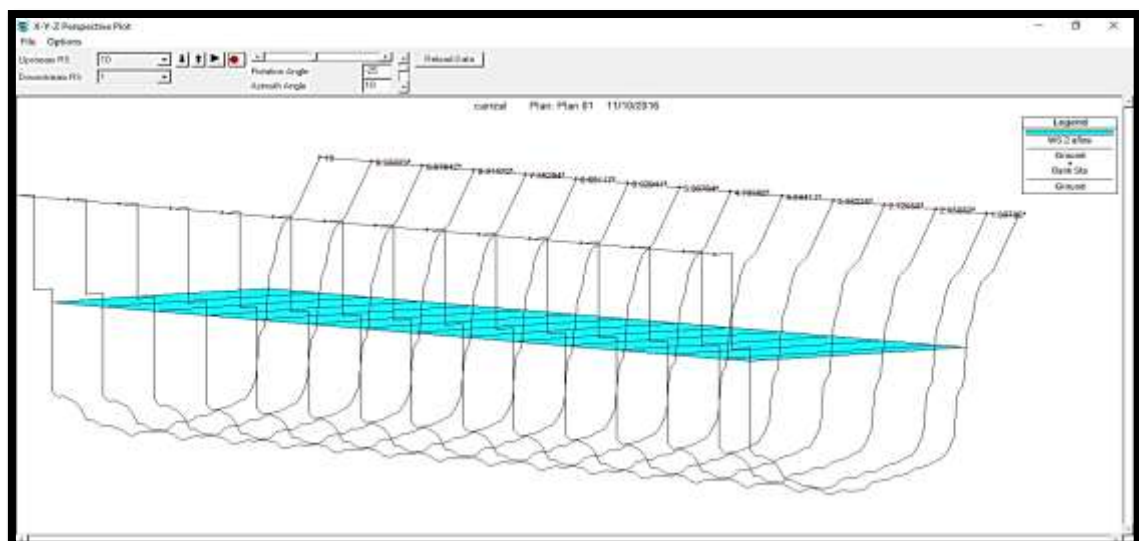


Gráfico 4.6. Perspectiva del perfil río Carrizal 2012

El gráfico 4.5 se observa la variación de caudal del año 2012 tuvo una elevación de 6,05 metros más de lo normal demostrando que el caudal aumentó a diferencia del año anterior, que generalmente fue de 4.74 metros que mantiene normalmente durante el año, el gráfico 4.6 muestra la perspectiva dados cada 2 Km el perfil del río Carrizal notablemente se aprecia el mayor caudal del año 2012.

4.2.5.3. GRÁFICOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RÍO CARRIZAL DEL AÑO 2013

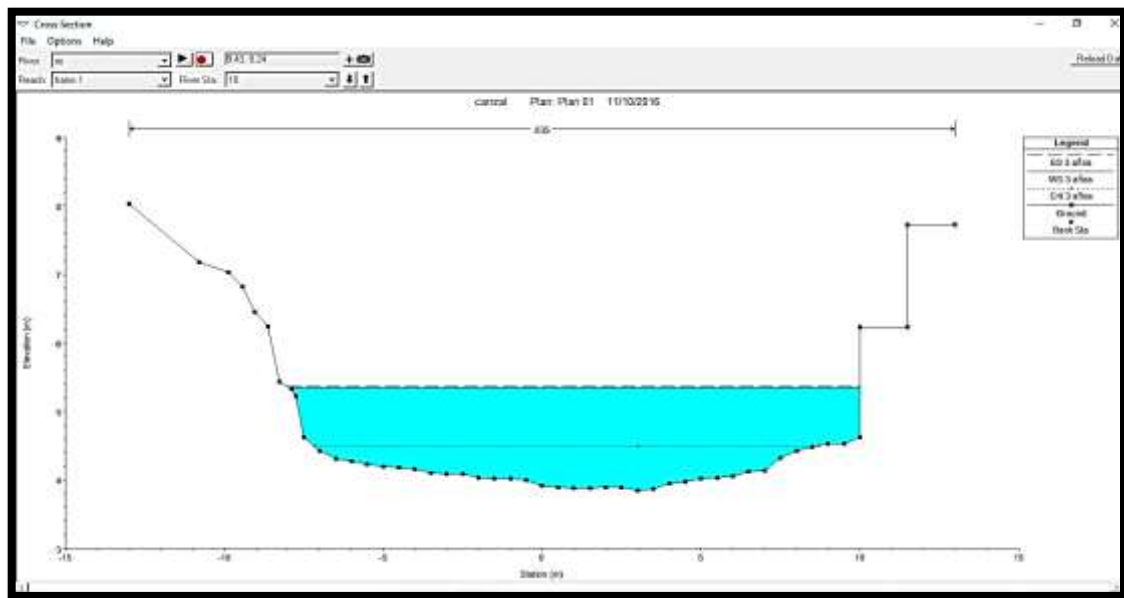


Gráfico 4.7. Sección transversal del río Carrizal 2013

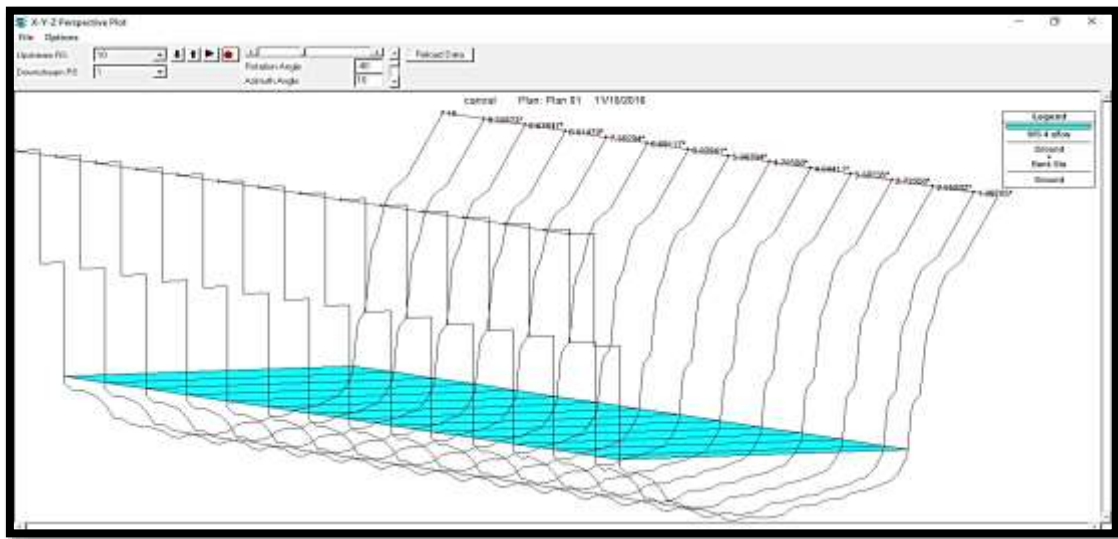


Gráfico 4.10. Perspectiva del perfil río Carrizal 2014

El gráfico 4.9. se observa la variación de caudal del año 2014 tuvo una elevación de 4,72 metros más de lo normal, que generalmente mantiene durante el año que es 4.23 metros mostrando que el caudal no tuvo mucha variación como en el año 2011, el gráfico 4.10 muestra la perspectiva dados cada 2 Km el perfil del río Carrizal.

4.2.5.5. GRÁFICOS DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL RÍO CARRIZAL DEL AÑO 2015

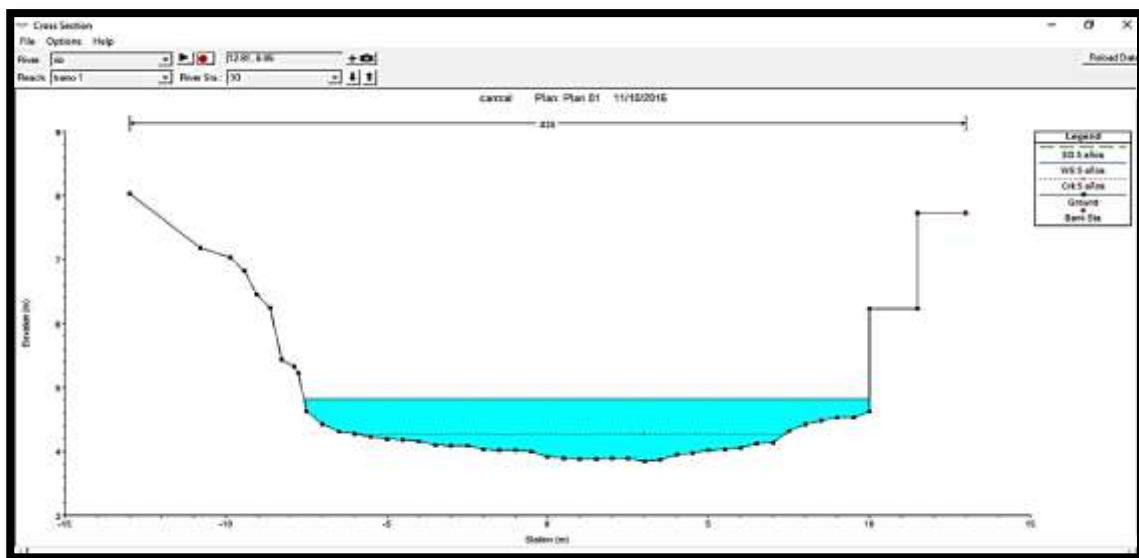


Gráfico 4.11 Sección transversal del río Carrizal 2015

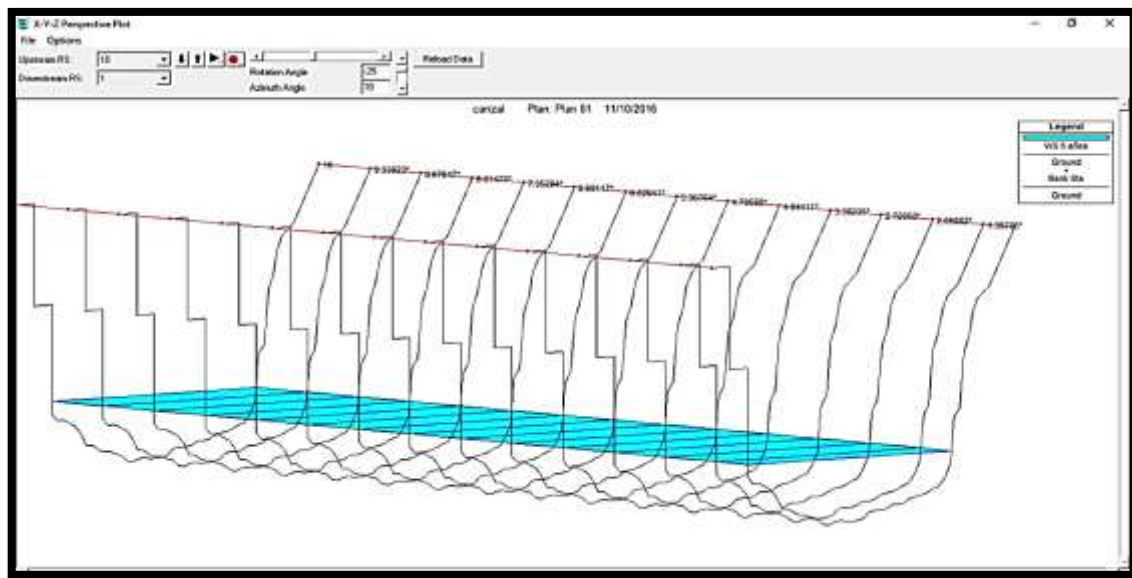


Gráfico 4.12. Perspectiva del perfil río Carrizal 2015

El gráfico 4.11 se observa la variación de caudal del año 2015 tuvo una elevación de 4,82 metros más de lo normal, generalmente mantiene durante el año que es 4.27 metros, mostrando el gráfico 4.12 muestra la perspectiva dados cada 2 Km el perfil del río Carrizal.

ANÁLISIS

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede determinar que el programa HEC-HMS permite simular eventos de crecientes asociados con un patrón de tormenta de diseño para un cierto período de retorno, siendo necesario someterlo a pruebas de calibración de los parámetros involucrados para que representen un grado de confiabilidad del comportamiento de la subcuenca basada en los registros históricos de precipitación y caudales. Por lo tanto, el modelamiento a través del software HEC-HMS consistió en calcular el componente de escurrimiento directo como una función del tiempo, producto de un evento de lluvia-escurrimiento de duración variable producida en las salidas de las subcuencas, realizando la simulación del HEC-HMS en el tipo de optimización que consiste en que los hidrogramas resultantes se comparan con

un registro histórico en un cierto punto de la subcuenca obteniendo como resultado que en el año 2012 se generó el mayor evento de creciente.

Además, se puede concluir que la aplicación del programa permite calibrar los parámetros asociados con las pérdidas por infiltración, el flujo base, el tránsito de caudales desde la subcuenca localiza aguas abajo del sitio de donde proviene el registro. En este punto el paquete HEC-HMS compara el hidrograma calculado y el hidrograma observado el cual dentro de la extensión HEC-RAS permitió modelar los perfiles transversales del río Carrizal, siendo como objetivo de esta comparación juzgar que tan bien el modelo simulado se ajusta al sistema hidrológico real.

4.2.6. PRONÓSTICO DEL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE LA SUBCUENCA RÍO CARRIZAL EN BASE A LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Pullupaxi, J. y Villareal, S. (2013), indica que los resultados demuestran que las series relativas de caudales máximos presentan la función de probabilidad acumulativa, para esto se realizó el cálculo a través de la distribución de Gumbel dando como resultados probabilidades del comportamiento hidrológico

Franquet, J. (2016), indica que la distribución de Gumbel es utilizada con buenos resultados para valores extremos independientes de variables meteorológicas y se ajusta bastante bien a los valores máximos de la precipitación en diferentes intervalos de tiempo.

Dados los resultados obtenidos del software HEC-HMS y con la extensión del HEC-RAS:

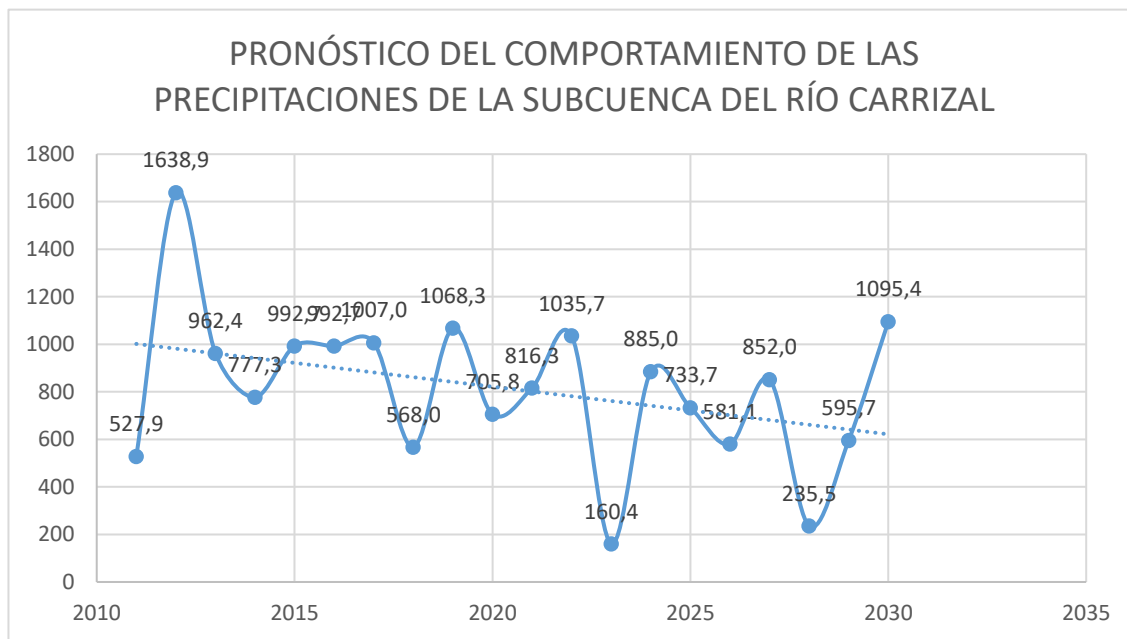


Gráfico 4.13. Pronóstico del comportamiento de las precipitaciones de la subcuenca del Río Carrizal

La gráfica 4.13 estima el comportamiento hídrico de los períodos del 2017 al 2030. En donde se pueden destacar los períodos 2010-2015. Unos de los años con mayor precipitación en la subcuenca del río Carrizal, fue en el 2012 con un volumen de 1638.9 mm. Rojas, R. (2009) indica que el análisis del HEC-HMS, las características hidrológicas de la cuenca permitió determinar las variables y parámetros que fueron utilizados en las diferentes metodologías hidrológicas que sirvió para análisis de la cuenca, determinando las potencialidades y problemas de la misma. Tomando en cuenta esto, se pronosticó que durante las décadas del 2015 al 2030, las precipitaciones estarán por debajo de los 770,3 mm, esto se debe a que es mucho más posible la ocurrencia de un evento extremo con caudales mayores se presente en un período mayor de tiempo que en uno menor, lo que posiblemente generarán otros episodios como por ejemplo inundaciones, ya que los picos tienden a subir como fue en el episodio del año 2012 y podrían sobrepasar la cota de inundación, según Aguilera, E. (2010) que una crecida es un aumento del caudal del agua, aumentando también el flujo medio en la cual podrían haber años secos como son el año 2023 y 2028

manteniéndose precipitaciones por debajo de 235 mm, siendo estos años los más secos en la subcuenca del río Carrizal.

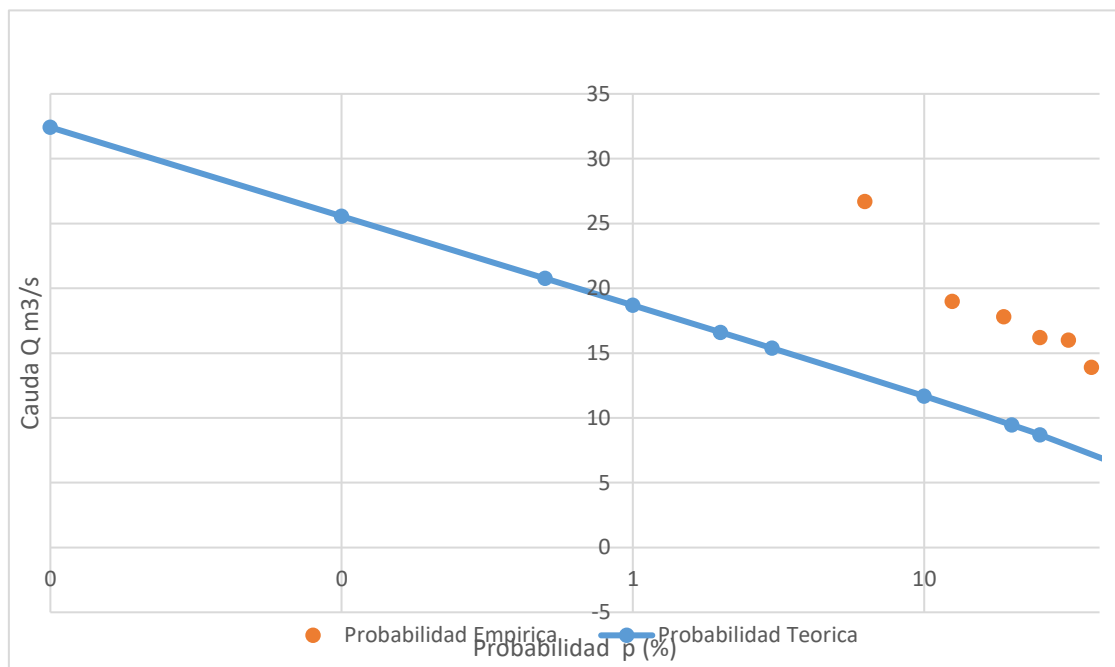


Gráfico 4.14. Pronóstico del comportamiento de los caudales en un tiempo de retardo de 10 años

Basándonos a Franquet, J. (2016), indica que la distribución de Gumbel proporciona resultados más conservadores para probabilidades de datos máximos anuales, en el gráfico 4.14 por medio de la distribución de Gumbel para distribución de crecidas de caudales, se observa que probablemente para los años desde el 2015 al 2030 el caudal se mantendría bajo como en los gráficos 4.1 y 4.2, en donde podrían haber años secos. La distribución mensual de caudales medios puede tener fluctuaciones apreciables en la medida que las variables meteorológicas tales como precipitación, temperatura, presenten comportamientos irregulares para estos períodos dependiendo de la época donde se generan mayores presencia de lluvia, como se puede apreciar en el gráfico 4.13 que probablemente para el año 2023 tienda a subir los picos o mantenerse a un caudal moderado igual que otros años. Aguilera, E. (2010) indicó que los caudales máximos de crecidas están condicionados por el aporte de las lluvias en el tiempo. La curva de la probabilidad empírica se ajusta a la

curva de la probabilidad teórica, recalcando que los años pueden variar ajustándose a la realidad.

ANÁLISIS

Se pronosticó que durante las décadas del 2015 al 2030, las precipitaciones estarán por debajo de los 770,3 mm, los valores de los caudales de diseño obtenidos con la simulación para períodos de retorno aportan resultados a riesgo de inundación, pero en escala menor a la registrada en el año 2012 que tuvo precipitaciones de 1638,9 mm de las planicies de inundación. Si es posible adaptar un modelo matemático al pronóstico lluvia-escorrentía para evaluar el comportamiento de la cuenca del río Carrizal, este modelo fue calibrado, validado y simulado, generando resultados aceptables de los procesos hidrológicos involucrados, destacándose su relativa facilidad de aplicación y poca cantidad de parámetros involucrados, además de la simplicidad conceptual de los mismos, dando como resultado el comportamiento hidrológico de la subcuenca de río Carrizal.

4.3. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELAMIENTO EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL

Según Tapia, J. (2012), indica que dentro de ejecución de modelización hidrológica de un área experimental en la cuenca del río Guayas en la producción de caudales y sedimentos, en la caracterización morfométrica se estableció que el agua escurre a través del canal del río Toachi principal en mayor tiempo, atenuando de esta manera el caudal de salida, favoreciendo la contención de eventos torrenciales extremos y minimizando el poder erosivo de la cuenca así mismo el análisis del comportamiento de la precipitación anual durante el período de observación de 1990-2010 (20 años) en las estaciones meteorológicas, las Pampas (1640 msnm) y Puerto Ila (260 msnm), utilizadas para caracterizar las

precipitaciones medias mensuales, definieron dos tendencias a lo largo del período de observación. Se precisaron dos épocas definidas durante el año, que representan un período lluvioso (húmedo) de diciembre a mayo y la otra un período de menor cantidad de lluvia (seco o estiaje) de junio a noviembre; Resultados que presentan similitud con los datos obtenidos en el modelamiento de los escenarios de la subcuenca del río Carrizal del 2011-2015 (5 años).

Por otra parte el comportamiento de la variación mensual de los caudales durante el período de observación del 2011-2015 de la subcuenca del río Carrizal se asemejan a los resultados identificados por Tapia, J. (2012) en donde los años 2003-2010 (7 años) identificó dos períodos uniformes en cuanto al volumen de agua registrado en el punto de aforo. Los mismos se expresa temporalmente de enero a junio registrando los máximos caudales y de julio a diciembre los caudales mínimos.

Además en la influencia de factores climáticos en la regionalización de precipitaciones máximas en la vertiente del lago Titicaca, desarrollada por Flores, E. y Flores, L. (2013), se puede observar como las distribuciones Log normal 3 parámetros y Log Gumbel son las que se ajustan mejor a las precipitaciones máximas de 24 horas para todas las estaciones meteorológicas de la vertiente del lago Titicaca, en general los resultados de esta investigación se correlacionan a la aplicación de Gumbel probabilidad estadísticas del comportamiento hidrológico de la subcuenca del río Carrizal.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se concluye que los datos de precipitaciones proporcionados por la estación meteorológica de la ESPAM MFL, permitió conocer la media que fue 416,15 mm las mínimas de 0,14 mm y las máximas 474 mm de las precipitaciones mensuales de los años 2011-2015 de la subcuenca del río Carrizal, igualmente los datos proporcionados por el INAMHI de la captación de caudal permitió conocer el comportamiento del flujo del río Carrizal obteniendo la media de 11.039 m³/s, la mínima de 0,144 m³/s y las máximas de 146,783 m³/s, para la elaboración de las cartográficas y geográficas en escala de 1:150,000 accedió a la ubicación de la zona a estudiar, por medio de estos mapas se delimitó la subcuenca en donde se obtuvo datos de curvas de nivel que fueron de 45,03 datos que el software necesitó. Se realizaron cálculos de las características físicas de la subcuenca Carrizal para ingresarlos al software HEC-HMS, dentro de la subcuenca realizando calicata, profundidad del río, velocidad y medición los cuales sirvieron para la realización de los cálculos, que los software necesitaron.
- Se determinó que el programa HEC-HMS permite simular eventos de crecientes asociados con un patrón de tormenta de diseño para un cierto período de retorno, los resultados de la modelación con el HEC-HMS con los 5 años de muestra, se observó en los hietogramas se observa las mayores precipitaciones de cada año y los mayores meses precipitados de enero a abril, arrojando como resultado que el año 2012 tuvo el mayor valor de 75 mm, en donde se registró el año con mayor caudal en la subcuenca del río Carrizal. En los hidrograma tenemos la escorrentía de la corrida de los 5 años se observó el mayor de cada año, siendo este el año 2013 de 1,17 cm en el mes de marzo en el año 2011. HEC-RAS permitió modelar los perfiles

transversales del río Carrizal, siendo como objetivo de esta comparación juzgar que tan bien el modelo simulado se ajusta al sistema hidrológico real.

- Así mismo se pudo apreciar la variación de caudales a través del software HEC-RAS, modelando los 5 años de muestra teniendo en cuenta que el año 2012 fue donde hubo el mayor volumen de caudal de 4.74 metros diferente al caudal que se mantiene durante el año, el cual sirvió para constatar los perfiles transversales del río Carrizal.
- A partir de los resultados que arrojó el software HEC-HMS se realizó la distribución probabilística a través de Gumbel el cual indicó el comportamiento hídrico de la subcuenca, se pronosticó que durante las décadas del 2015 al 2030, las precipitaciones estarán por debajo de los 770,3 mm, esto se debe a que es posible la ocurrencia de un evento extremo con caudales mayores se presente en un período mayor de tiempo que en uno menor, probablemente se generen inundaciones, ya que los picos tienden a subir como fue en el episodio del año 2012 y podrían sobrepasar la cota de inundación.
- Se concluye que el modelo matemático de Gumbel no fue acertado con el cálculo, ya que en la provincia de Manabí en los meses de Enero a Mayo ha tenido precipitaciones mayores a 130,3 mm causando estragos en varios Cantones de la provincia de Manabí, aumento de caudal, los registros de lluvia según la INAHMI y que las mayores precipitaciones se han dado en las provincias de la Sierra.

5.2. RECOMENDACIONES

- El uso de los software para la modelación de hidrológicos como el software HEC-HMS y HEC-RAS, que permite conocer el comportamiento hídrico de las subcuencas, representado por medio de histogramas e hidrogramas y los perfiles transversales del río Carrizal.
- El modelo conceptual para las subcuencas es suficiente para modelar cuencas escasez de información, homogeneidad de características físico-geográficas y climáticas y ausencia de objetivos internos de interés, es recomendable utilizar este tipo de metodologías en casos en los que hay ausencia de información real y se requiere conocer los volúmenes medios de agua en sitios específicos, siempre y cuando la información existente lo permita.
- A pesar que no se evidenciaron hallazgos de inundación bajo diferentes condiciones hidrológicas para los próximos años, se considera ante esto indispensable la necesidad de utilizar un sistema de alerta para el monitoreo de la cuenca, que permita observar los cambios en la morfología de la misma. Posteriormente, confirmar si realmente el origen de los desbordes que se ha presentado proviene de factores no hidrológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, E. G. (Noviembre de 2010). Análisis regional para las crecidas máximas de Honduras. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria e Hidráulica. Guatemala.
- Alvarez, L. (Septiembre de 2007). Determinación del comportamiento hidráulico e hidrológico en la cuenca del río Pensativo, en la zona de influencia en el puente Matazano. Guatemala.
- Aparicio, F. (2011). Fundamentos de Hidrología de Superficie (1 ed., Vol. 1). (LIMUSA, Ed.) Distrito Federal, México: Grupo Noriega Editores.
- Bastidas, C. (2011). Manual para el uso del modelo hidrológico HEC–HMS. Departamento Ingeniería Hidrometeorológica. (En línea) Consultado 28 de sep. 2016. Formato PDF. Disponible en: <http://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms-4.pdf>
- Brugal, M. (2017). Procedimiento para delimitar una cuenca hidrográfica o unidades Hidrográficas. (En línea). Recuperado el 15 de Febrero de 2017, Formato PDF. Disponible en: <http://es.slideshare.net/MIDABA/procedimiento-para-la-delimitacin-cuencas-hidrogrficas>
- Carrillo, L. R. (2013). Simulación de Lahares del volcán Cotopaxi en sus drenajes del lado norte con el uso del programa HEC-RAS. Revista ESPE(1), 1-11. (En línea) Consultado 16 de ago. 2016. Formato PDF. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6532/1/AC-CIV-ESPE-047084.pdf>
- Clavijo, H., & Peñaherrera, C. (Septiembre de 2013). Diseño de una red de estaciones meteorológicas e hidrológicas para prevención de crecidas e inundaciones, en las subcuencas de los ríos Chone, Portoviejo, Bulu Bulu y Chongón. Quito, Ecuador: Quito-EPN-2013.
- CONADE, CRM, & INERHI. (1991). Plan Integral de Desarrollo de los Recursos hídricos de la provincia de Manabí. Resumen Ejecutivo, Departamento de desarrollo integral y medio ambiente, Washington D.C. (En línea) Consultado 16 de ago. 2016. Formato PDF. Disponible en: <http://docplayer.es/18507547-Plan-integral-de-desarrollo-de-los-recursos-hidricos-de-la-provincia-de-manabi-resumen-ejecutivo.html>
- Cuervo, A. E. (01 de Febrero de 2012). Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos. Universidad Politécnica de Catalunya, 48-72. Barcelona, España.

- Domínguez M. R., Esquivel, G., Baldemar, G. A., & Mendoza, R. A. (2008). Manual del modelo pronóstico de escurrimiento, Serie del instituto de ingeniería,. Manual de uso, 100. México: UNAM.
- Duarte, M. (2016). Enfoque sistémico en la Investigación de Cuencas Hidrográficas. *Visión Científica* Visión del Futuro-Facultad de Ciencias Económicas, 5, 1-12. (En línea) Consultado 18 de ago. 2016. Formato PDF. Disponible en: http://revistacientifica.fce.unam.edu.ar/index.php?option=com_content&task=view&id=58&Itemid=30
- Flores, E., & Flores, L. (2013). Influencia de factores climáticos en la regionalización de precipitaciones máximas en la vertiente del Lago Titicaca. 49. Lima, Perú.
- Franquet, J. (2016). El caudal mínimo medioambiental del tramo inferior del río Ebro. Recuperado el 26 de Octubre de 2016, de Derecho virtual de derecho, economía y ciencias sociales: (En línea) Consultado 28 de sep. 2016. Formato PDF. Disponible en: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2009b/564/DISTRIBUCION%20TEORICA%20Y%20METODO%20DE%20GUMBEL.htm>
- García, A. (2013). Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos. Universidad de extremadura. Escuela de ingenierías industriales. Bodajoz, España.
- Gaspari, F., Sinisterra, G., & Marlats, R. (Mayo de 2007). Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana Argentina. *Revista de la Facultad Ciencia Agrarias UNCuyo*, XXXIX (1), 21-28.
- Gutiérrez, A. (13 de Diciembre de 2010). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manízales. *Revista DYNA*, Facultad de Minas., 78(165), 58-71. Recuperado el Diciembre de 2016
- INEC. (2010). Instituto Nacional de Estadística y Censos. Estadísticas Sociodemográficas. (En línea) Consultado 16 de feb.. 2017. Formato PDF. Disponible en: <http://anda.inec.gob.ec/anda/index.php/catalog/270> Obtenido de
- Jhonny, J. (2008). Escurrimientos superficiales. Academia Edu. Obtenido de https://www.academia.edu/8135725/ESCURRIMIENTOS_SUPERFICIALES

- Kennedy, D. (2015). Para qué se utilizan las estaciones meteorológicas? (E. Pereira, Editor) (En línea) Consultado 16 de ago. 2016. Formato PDF. Disponible en: http://www.ehowenespanol.com/utilizan-estaciones-meteorologicas-hechos_324117/
- Lados, J., Angel de Miguel, M., Martínez, V., & Garcia, R. (2009). El Ciclo Hidrológico: Experiencias prácticas para su comprensión. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17(1), 71-78.
- Llerena, C. (2003). Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua, conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú. Lima, Perú, Perú: FAO.
- Márquez, G. (2008). Ecosistemas estratégicos y otros estudios de ecología ambiental". Colombia: Fondo FEN Columbia, 1996.
- Martínez, J. (Junio de 2013). Manejo y Calibración de un modelo hidrológico de parámetros distribuidos y su aplicación para la estimación de eventos de diseño, en la Cuenca del Río Armería. Distrito Federal de México., México.
- Martínez, M. (2010). Determinación del volumen de escurrimiento medio anual en la cuenca "El Batán" por medio del método SCS. Tesis de Masterado, Querétaro.
- Mediero, L. (2007). Pronóstico probabilístico de caudales de avenidas mediante redes Bayesinas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido. Madrid, España.
- Mendoza, M., Bocco, G., Bravo, M., Siabe, C., & Ortiz, M. (2002). Investigaciones Geográficas- Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revisión de sus componentes, niveles de integración e implicaciones en la estimación de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas. Investigaciones Geográficas., 36-58.
- Miranda, L. (2008). Dinámica del uso del suelo y su efecto en el escurrimiento superficial de la cuenca del Río Grande, Tlalchap, Guerrero. Institución de enseñanza e investigación en Ciencias Agrícolas., 1-88. Texcoco, Montecillo, México.
- Morris, H. (Julio de 2006). Modelación hidráulica e hidrológica del río Guápiles para determinar la vulnerabilidad a inundaciones en un tramo comprendido entre los poblados Guápiles y La Rita. Facultad de Costa Rica, 56. Costa Rica. (En línea) Recuperado el 13 de Enero| de 2017. Formato PDF. Disponible en: <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/16654>

- Ordoñez, J. (2011). Cuenca Hidrográfica (Vol. I). (Z. Goicochea, Ed.) Lima, Perú: Foro Peruana para el agua-GWP Perú.
- Ortiz, E. (2015). Definición de las reglas de operación hidráulica del embalse La Esperanza. Escuela Superior Politécnica. Quito, Ecuador.
- Pacheco-Vega, A., & Basurto, F. (2008). Instituciones en el saneamiento de aguas, reglas formales e informales en el concejo de la Cuenca Lerma-Chapala. México.
- Pérez, A. J., Maderey, L., Pereyra, D., & Filobello, U. A. (2012). Estimación de la creciente de diseño utilizando el hidrograma unitario instantáneo: el caso de la cuenca río Tecolutla, México. *Investigaciones Geográficas* (79), 20-38.
- Pérez, G. (2015). Modelación hidrológica continua para fines de pronóstico de avenidas en ríos. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua., 131. Jiutepec-Moreno, México.
- Pullupaxi, J. C., & Villareal, S. R. (2013). Incertidumbre en la modelación de cuencas y la propagación de crecidas en cauces caso de estudio: cuencas hidrográficas en los ríos Toachi y Pilatón. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Rodríguez, Y., Marrero de León, N., & Gill Urrutia, L. (2010). Modelo lluvia-escurrimiento para la cuenca del río Reno. *Revista Ciencias de Técnicas Agropecuarias*, 19(37), 31-37. (En línea) Recuperado el 28 de Nov de 2016. Formato PDF. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542010000200006
- Rojas, R. (Abril de 2009). Hidrología aplicada para el manejo de Cuencas. Universidad de los Andes, Facultad Ciencias Forestales y Ambientales., 6-22.
- SAGARPA. (2011). Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas. Manual, Subsecretaría de desarrollo rural, México. (En línea) Consultado el 13 de Enero de 2017. Formato PDF. Disponible en http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/2012/Documents/FI_CHAS%20TECNICAS%20E%20INSTRUCTIVOS%20NAVA/INSTRUCTIVO_HIDROLOG%C3%8DA.pdf
- San Nicolás, E. (Noviembre de 2002). Manejo de cuencas hidrográficas y protección de fuentes de agua. Educación ambiental con enfoque en manejo de cuencas y prevención de desastres., 6-27. Nicaragua: CATIE

- SEMARNAT. (2013). Cuencas hidrográficas, para su manejo y perspectivas para su gestión. México.
- SENAGUA. (2009). "Problemática y Conflictos sobre los Recursos Hídricos por efectos del cambio Climático". Registro Oficial No. 346 de 27 de mayo de 2008, Quito.
- SENPLADES. (2013). (Secretaría Nacional de Planificación), Evaluación del Plan Nacional del Buen Vivir. Recuperado el 1 de Septiembre de 2015, de <http://www.planificacion.gob.ec/biblioteca/>
- Suárez, J., & García, M. (2003). Gestión avanzada del ciclo del agua en entornos urbanos sostenibles. (Vol. 1). (A. Rey, Ed.) Coruña, España: Deputación da Coruña =Deputación de A Coruña.
- Tapia, J. C. (2012). Modelación hidrológica de un área experimental en la cuenca del Río Guayas en las producciones de caudales y sedimentos. Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales., 65. La Plata, Argentina.

ANEXOS

ANEXO 1



MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD DEL RÍO CARRIZAL

ANEXO 2



VARIACIÓN DE VELOCIDAD DEL RÍO CARRIZAL

ANEXO 3



REALIZACIÓN DE CALICATA EN EL RÍO CARRIZAL

ANEXO 4



REALIZACIÓN DE CALICATA EN EL RÍO CARRIZAL

ANEXO 5**REALIZACIÓN DE CALICATA EN EL RÍO CARRIZAL**

ANEXO 6

CALIBRACIÓN DEL SOFTWARE HEC-HMS

Se procedió a descargar el programa en la biblioteca de software para la simulación hidráulica se instaló el software HEC-HMS 4.0 en la PC, realizada la instalación se procedió con la calibración, se ingresó al software, pasos que se realizaron:

5. Se creó el Proyecto Nuevo: File > New Project (Figura 4.3)

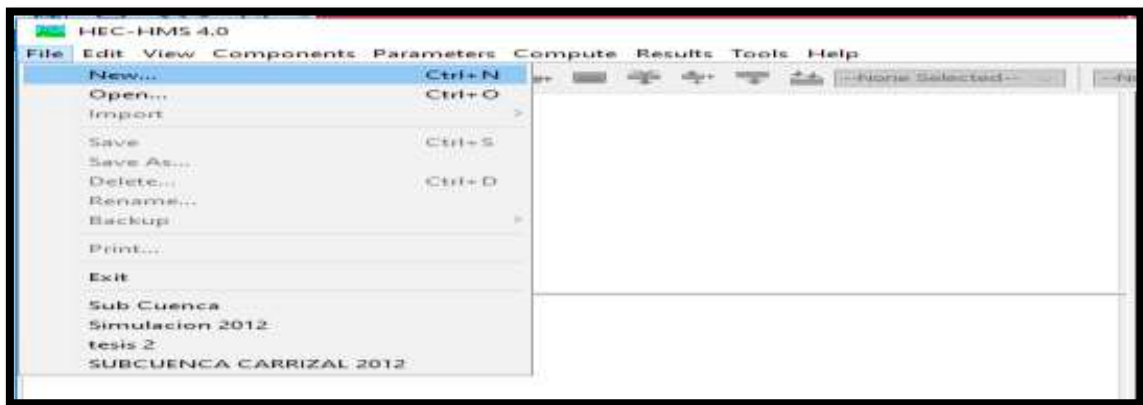


FIGURA 4.3

6. El resultado de este primer paso aparece un formulario (Figura 4.4), se ingresaron los datos de la modelación para poder proseguir con la ración del software.

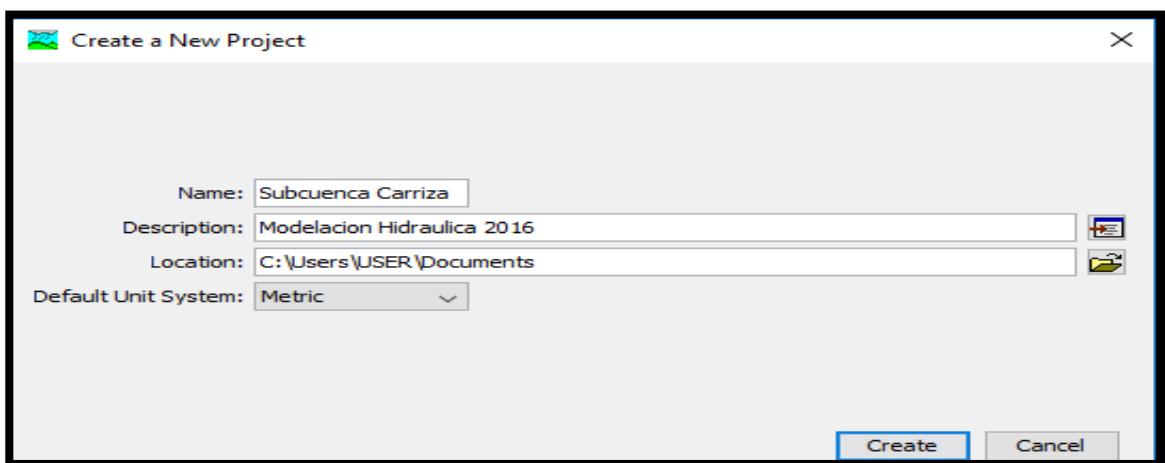


FIGURA 4.4

7. Una vez que se creó, el proyecto se abrió automáticamente se trabajó en él. En ese momento se cambió los atributos del proyecto para que el programa tenga las opciones con las que se trabajó habitualmente. Para ello: Tool > Project Options (Figura 4.5.) En el caso del estudio realizado se ha aplicado el método de pérdidas del SCS sin evapotranspiración.

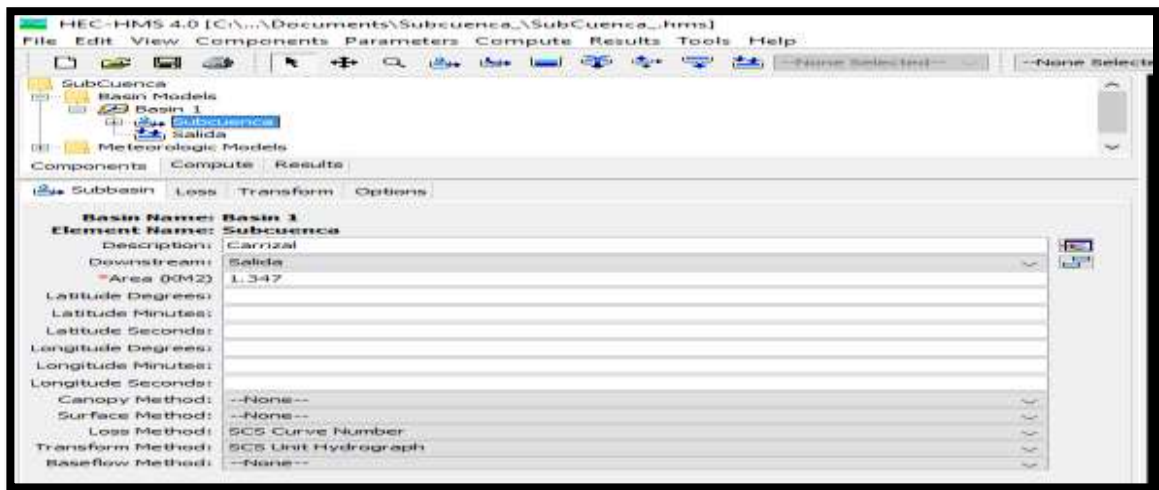


Figura 4.5

Se hizo doble clic en el elemento y apareció un formulario en donde ubicamos el nombre de salida, una vez realizado esto se hizo la conexión de la subcuenca aguas abajo con la salida como se observa en la (FIGURA 4.6)

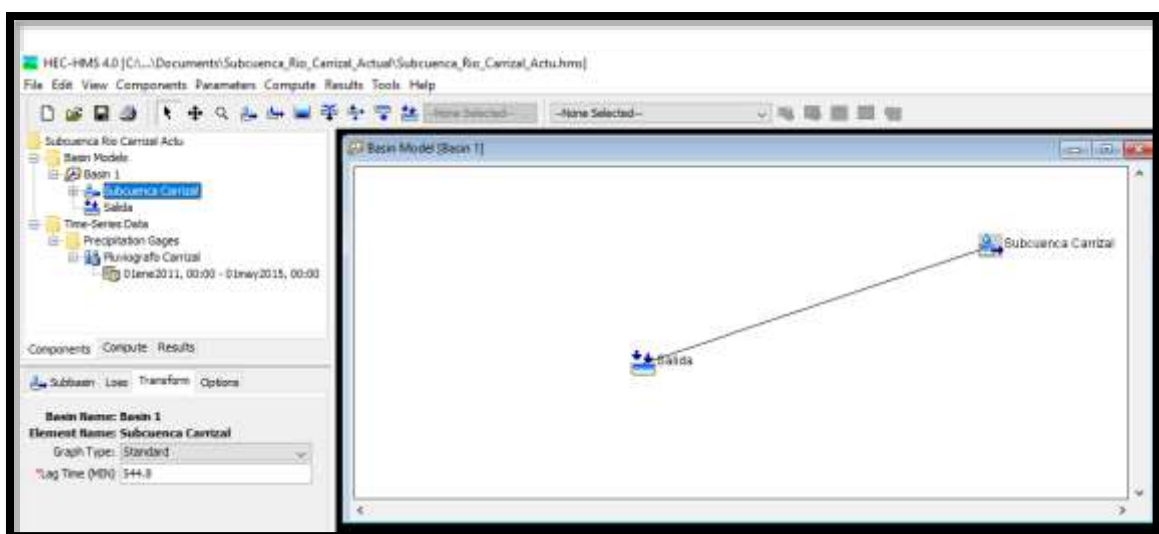


FIGURA 4.6

8. Meteorologic Model

Una vez realizado el modelo de la subcuenca (Basin Model) se dotó el programa del modelo meteorológico que incluye las precipitaciones diarias del 1 Enero del 2011 al 31 de Diciembre 2016 como se aprecia en la (FIGURA 4.7.)

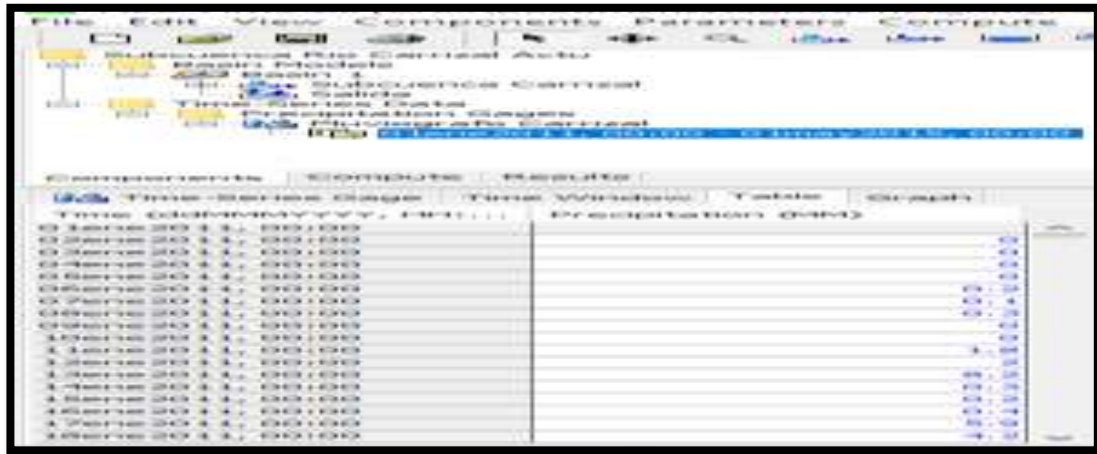


Figura 4.7.

9. Control Specifications

Por último, se definió las especificaciones de cálculo donde se determinó la cantidad de puntos de los hidrogramas, El HEC-HMS dio opción al usuario de definir las especificaciones. Una vez realizando esto dentro del control de especificaciones determinamos la fecha de inicio y el final de lluvia en este caso fue el 1 de enero del 2011 y su fecha final el 31 de diciembre del 2015 como se observa en la Figura 4.8.



Figura 4.8.

El software HEC-HMS resultó ser el más propicio para el modelado de lluvia-escurrimiento, generando hidrograma de crecidas y hietogramas, partiendo de la caracterización física de la subcuenca, ingresando los datos físicos y meteorológicos.

CALIBRACIÓN DEL SOFTWARE HEC-RAS

Se instaló el software HEC-RAS 4.1.0 en la PC, realizada la instalación se procedió con la calibración, se ingresó al software, pasos que se realizaron:

1. Iniciar un nuevo proyecto

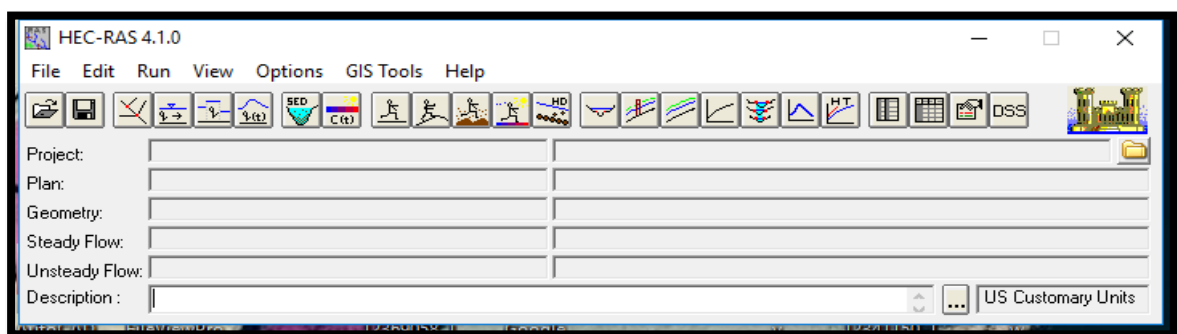


FIGURA 4.9

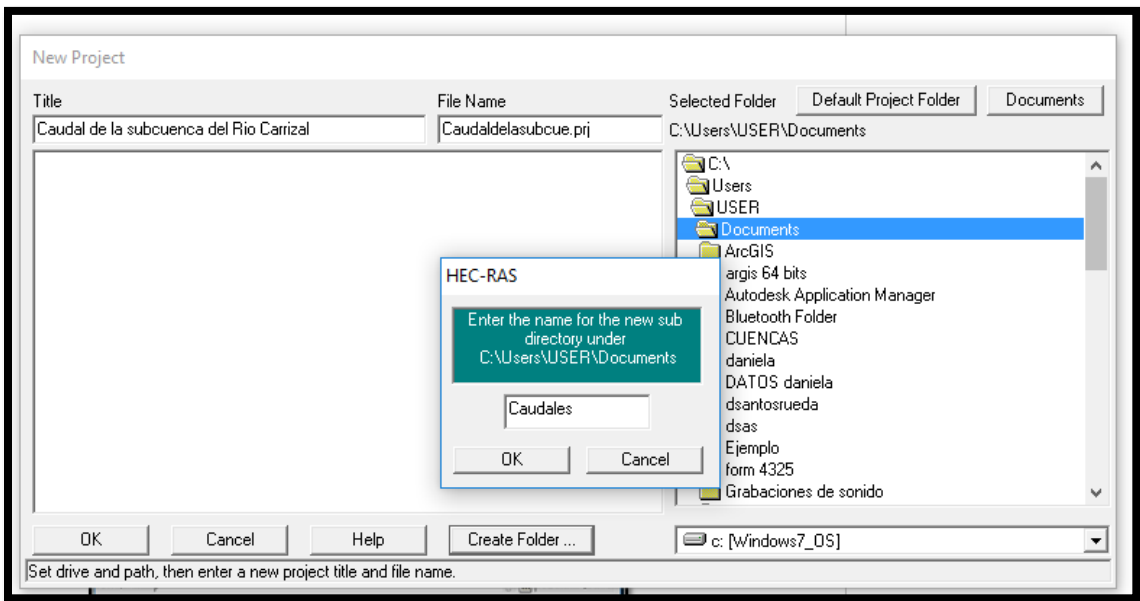


FIGURA 4.10

Luego que se creó el proyecto se hizo doble click en la opción Enter Geometric Data, se dibujó el tramo del río, y en la opción Cross Section se hizo click y se ingresó las secciones transversales del río y cálculos geométricos que se realizaron para la medición del río como se puede ervar en la FIGURA 4.11

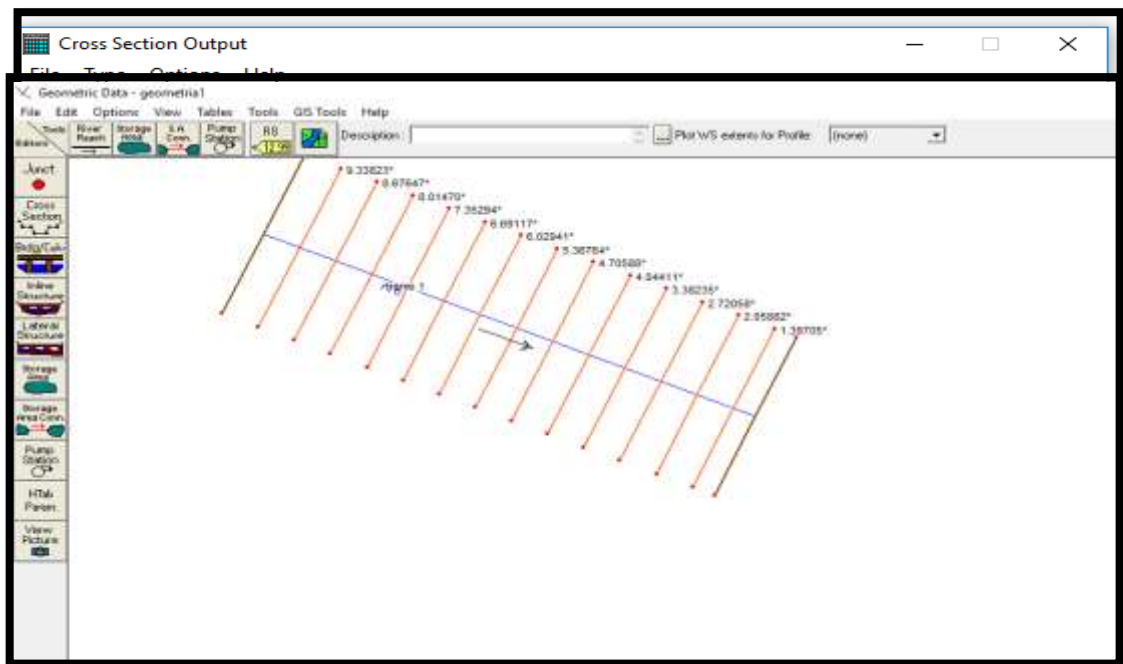


FIGURA 4.11

Una vez que se realizó todos los pasos para los perfiles transversales de los 5 años de la subcuenca del río Carrizal se procedió a realizar los análisis de los Gráficos transversales en el modelamiento de caudal en el HEC-RAS.

- Se ingresó los perfiles de caudales, se hizo clic en la opción Steady Flow Data, se ingresa en número de caudales que fue 5, para hacer el modelado de caudales. Una vez ingresados de estos se guardaron y se hizo la simulación del flujo permanente

The screenshot shows a window titled "Profile Output Table - Standard Table 1" with a menu bar (File, Options, Std. Tables, Locations, Help) and a toolbar (Reload Data). The table displays data for "HEC-RAS Plan: Plan 01 River: rio Reach: tramo 1 Profile: 5 años". The table has 10 columns: Reach, River Sta, Profile, Q Total (m3/s), Min Ch El (m), W.S. Elev (m), Crit W.S. (m), E.G. Elev (m), E.G. Slope (m/m), and Vel Ch (m/s). The data shows a constant flow of 5.28 m3/s across 16 reaches, with varying water surface elevations and channel bed elevations.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Ch (m/s)
tramo 1	10	5 años	5.28	3.85	4.81	4.27	4.82	0.000400	0.
tramo 1	9.33823*	5 años	5.28	3.85	4.81		4.82	0.000400	0.
tramo 1	8.67647*	5 años	5.28	3.84	4.81		4.82	0.000400	0.
tramo 1	8.01470*	5 años	5.28	3.84	4.81		4.82	0.000400	0.
tramo 1	7.35294*	5 años	5.28	3.84	4.81		4.82	0.000400	0.
tramo 1	6.69117*	5 años	5.28	3.84	4.80		4.81	0.000400	0.
tramo 1	6.02941*	5 años	5.28	3.83	4.80		4.81	0.000400	0.
tramo 1	5.36764*	5 años	5.28	3.83	4.80		4.81	0.000400	0.
tramo 1	4.70588*	5 años	5.28	3.83	4.80		4.81	0.000400	0.
tramo 1	4.04411*	5 años	5.28	3.83	4.80		4.81	0.000400	0.
tramo 1	3.38235*	5 años	5.28	3.83	4.79		4.80	0.000400	0.
tramo 1	2.72058*	5 años	5.28	3.82	4.79		4.80	0.000400	0.
tramo 1	2.05882*	5 años	5.28	3.82	4.79		4.80	0.000400	0.
tramo 1	1.39705*	5 años	5.28	3.82	4.79		4.80	0.000400	0.
tramo 1	1	5 años	5.28	3.82	4.79	4.25	4.80	0.000400	0.

Total flow in cross section.

FIGURA 4.13

Una vez que se realizó todos los pasos para los perfiles transversales de los 5 años de la subcuenca del río Carrizal se procedió a realizar los análisis de los Gráficos transversales en el modelamiento de caudal en el HEC-RAS.

El software HEC-RAS, analizó los flujos de agua del río Carrizal, se ingresaron los datos al programa en el cual se obtuvieron varios resultados, modelando el perfil transversal de la subcuenca del río Carrizal