



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA CIVIL - HIDRAULICA

**ACTUALIZACIÓN DE FACTORES DE REGIONALIZACIÓN DE LA
CUENCA TEAPA Y APLICACIÓN EN MPE Y HEC-HMS**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

LUIS MIGUEL ESCAMILLA ISLAS

TUTORES PRINCIPALES:

DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ
INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA
INSTITUTO DE INGENIERIA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, JULIO 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Echávez Aldape Gabriel

Secretario: Dr. Domínguez Mora Ramón

1^{er}. Vocal: Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana

2^{do}. Vocal: Dr. Silva Casarín Rodolfo

3^{er}. Suplente: Dr. Pozos Estrada Óscar

TUTORES DE TESIS

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

Dr. Ramón Domínguez Mora

FIRMA

FIRMA

Ciudad Universitaria, CDMX, México



AGRADECIMIENTOS

A mi madre María Angélica Islas Durán, por todo su amor y cariño, por siempre estar ahí para mí y apoyarme incondicionalmente en mis decisiones.

A mis hermanas Karina y Zanya por procurarme, darme su cariño, apoyo y consejo siempre.

A mi padre José Luis Escamilla Cervantes por su apoyo, confianza, consejo y guía.

A María José Barrera por acompañarme en esta etapa y en los momentos en que el camino no parecía claro y ser testigo de mi esfuerzo para alcanzar esta meta.

A mis tutores de tesis la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez y al Dr. Ramón Domínguez Mora por su tiempo, dedicación para guiarme en este camino y por los conocimientos brindados para poder realizar este trabajo además de poder aprender de su gran experiencia.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por concederme un entorno de aprendizaje que me permitió crecer y desarrollarme académica y personalmente.

Al Dr. Diego Pedro Acuña y a la Ing. María Magdalena Espinoza Jaramillo por sus enseñanzas durante mis primeros años labores dentro de la CONAGUA y brindarme las facilidades para continuar con mi desarrollo académico.

Al M. en I. Eduardo Juan Diego por su tiempo, paciencia y compartirme algunos de sus conocimientos para realizar este trabajo.

A mí mismo por creer en mí, trabajar en mí, no rendirme ante los obstáculos y siempre tener esa resiliencia y espíritu de seguir intentando hasta lograr las cosas.



DEDICATORIA

A mis padres José Luis y María Angélica por su amor, eterno apoyo y siempre
creer en mí.

A mis hermanas Karina y Zanya por su cariño y ser mis ejemplos a seguir.

A mi yo de ocho años.

A mis amigos del Politécnico.



Índice

Índice de Figuras.	7
Índice de Tablas.....	9
Resumen.....	10
Abstract	11
Introducción	12
Objetivos	13
Objetivos generales.....	13
Objetivos particulares.	13
1. Antecedentes	15
2. Metodología	17
Periodo de retorno.....	17
Estadísticos muestrales de una serie.	17
Funciones de distribución de probabilidad.....	18
Función Gumbel	18
Función Doble Gumbel.....	20
Características Fisiográficas de una cuenca	21
Clasificación de cuencas.....	21
Pendiente del cauce principal.....	22
Tiempo de concentración.....	22
Componentes de un hidrograma.....	22
Numero de Esguerrimiento. del Soil Conservation Service (CN).....	24
Qgis.....	25
HEC-HMS y su funcionamiento.....	26
MPE y su funcionamiento	28
Parámetros de pérdidas.....	31
Factor de Escala de retención Potencial (fs).....	31
Factor de Olvido (fx).....	31
Parámetros de Forma.....	31
Tiempo de Concentración (Tc).....	31
Coeficiente de Almacenamiento (Ca).....	32
Factores de Regionalización	33



Factor de Reducción por Área.....	36
Gasto ecológico.....	37
3. Aplicación.....	38
Zona de Estudio.....	38
Factores de regionalización.....	39
Hietogramas.....	40
Modelación con HEC-HMS.....	42
Modelación con MPE.....	48
5. Resultados.....	60
Mapa de las medias históricas.....	69
Hietogramas.....	70
Características fisiográficas de la cuenca.....	75
Estimación del gasto base.....	79
Hidrogramas.....	82
5. Conclusiones.....	93
Referencias.....	95
Anexos.....	97
Anexo A Hietogramas lado sur de la cuenca.....	97
Hietogramas lado sur de la cuenca.....	98
Anexo B.....	100
Hidrogramas HEC-HMS.....	100
Anexo c.....	104
Hidrogramas MPE.....	104



Índice de Figuras.

Figura 1 Hidrograma aislado (modificada de Aparicio, 1997).....	24
Figura 2 Numero de curva (Aparicio, 1997).....	25
Figura 3 Pantalla principal de Qgis.....	26
Figura 4 Pantalla principal del Programa MPE.....	28
Figura 5 Modelo de escurrimiento directo conceptual Método de Clark para parámetros distribuidos. (Domínguez et al 2008)	30
Figura 6 Mapa de factores de convectividad (Baeza, 2007).....	34
Figura 7 Distribución de las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales en la República Mexicana (Domínguez, R. et al. 2017)	36
Figura 8 Zonas que cuentan con determinación del Factor de Reducción por Área (Domínguez, R. et al. 2017)	37
Figura 9 Ubicación de la Cuenca Teapa. Elaboración propia.....	38
Figura 10 Componentes para el modelo nombre la cuenca	42
Figura 11 Ventana donde se escribe el nombre la cuenca	42
Figura 12 Localización de botón Subbasin Creation Tool	42
Figura 13 Vista de la localización de la cuenca con la salida agregada	43
Figura 14 Campos llenados de la componente Basin Model Manager	43
Figura 15 Campos llenados de la componente Time-Serie Gate	44
Figura 16 Campos llenados de la componente Meteorologic Model Manager.....	45
Figura 17 Localización del botón Specified Hyetograph y elección de hietograma.	45
Figura 18 Campos llenados de la componente Control Specifications	45
Figura 19 Pasos a seguir para iniciar la creación de la simulación.....	46
Figura 20 Selección de datos para creación de la simulación.....	47
Figura 21 Localización de botón Compute all elements.	47
Figura 22 Simulaciones corridas mostradas en la barra izquierda.	48
Figura 23 Archivo txt. Con datos de celdas de la cuenca Figura 24 Teapa Archivo txt. Con datos de precipitación.	49
Figura 25 Archivo txt con la información de escurrimiento.....	49
Figura 26 Estaciones usadas para la calibración.	50
Figura 27 Ventana de Información de entrada con fechas introducidas.....	50
Figura 28 Ventana de Archivos de entrada con los archivos de celdas y lluvias seleccionadas.	51
Figura 29 Ventana de Precipitación media con datos calculados por el programa.	51
Figura 30 Hietograma generado por el programa	52
Figura 31 Ventana de Escurrimiento Observado con datos de fecha y hora final introducida.....	53
Figura 32 Ventana de parámetros de calibración con datos por default	53
Figura 33 Primer hidrograma arrojado por el programa con parámetros de perdida por default	54
Figura 34 Ventana con tabla resumen con parámetros de perdida por default.	55
Figura 35 Ventana de parámetros de calibración con datos de parámetros de perdida ajustados.....	55
Figura 36 Hidrograma obtenido a partir de los nuevos parámetros de calibración.....	56
Figura 37 Ventana de tabla resumen con los nuevos parámetros de calibración.	56
Figura 38 Ventana de información de entrada con fecha y hora inicial y final para la modelación de las lluvias con periodos de retorno.	57
Figura 39 Ventana de Archivos de entrada con los archivos de celdas y lluvias seleccionadas.	57
Figura 40 Ventana de Precipitación media con datos calculados por el programa.	58
Figura 41 Hietograma generado por el programa.	58



Figura 42 Ventana de Escurrimiento Observado con datos de fecha y hora final introducida.....	59
Figura 43 Ventana de parámetros de calibración con datos de parámetros de perdida ajustados.....	59
Figura 44 Ubicación de las 16 estaciones meteorológicas para la cuenca Teapa.....	61
Figura 45 Función de distribución de Gumbel ajustada a los máximos anuales normalizados.....	66
Figura 46 Función de distribución Doble Gumbel con $P=0.8$ ajustada a los máximos anuales normalizados..	67
Figura 47 Función de distribución Doble Gumbel con $P=0.985$ ajustada a los máximos anuales normalizados	67
Figura 48 Mapa de las medias históricas de las hp anuales máximas.....	70
Figura 49 Hietograma con periodo de retorno de 2 años.....	72
Figura 50 Hietograma con periodo de retorno de 50 años.....	73
Figura 51 Hietograma con periodo de retorno de 500 años.....	73
Figura 52 Hietograma con periodo de retorno de 5000 años.....	74
Figura 53 Hietograma con periodo de retorno de 10000 años.....	74
Figura 54 Centroide, punto norte y sur donde se calcularon los Hietogramas.....	75
Figura 55 Tipo de suelo en la cuenca Teapa.....	76
Figura 56 Permeabilidad del suelo de la cuenca Teapa.....	77
Figura 57 Uso de suelo de la cuenca Teapa.....	77
Figura 58 Selección de N (Aparicio 1997).....	78
Figura 59 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de dos años.....	82
Figura 60 Resumen de resultados del hidrograma de Tr dos años.....	82
Figura 61 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cincuenta años.....	83
Figura 62 Resumen de resultados del hidrograma de Tr cincuenta años.....	83
Figura 63 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de quinientos años.....	84
Figura 64 Resumen de resultados del hidrograma de Tr quinientos años.....	84
Figura 65 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cinco mil años.....	85
Figura 66 Resumen de resultados del hidrograma de Tr cinco mil años.....	85
Figura 67 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de diez mil años.....	86
Figura 68 Resumen de resultados del hidrograma de Tr diez mil años.....	86
Figura 69 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de dos años.....	87
Figura 70 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de dos años.....	88
Figura 71 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cincuenta años.....	89
Figura 72 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cincuenta años.....	89
Figura 73 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de quinientos años.....	90
Figura 74 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de quinientos años.....	90
Figura 75 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cinco mil años.....	91
Figura 76 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cinco mil años.....	91
Figura 77 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de diez mil años.....	92
Figura 78 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de diez mil años.....	92



Índice de Tablas.

Tabla 1 Funciones de probabilidad que se analizan en el programa Ax (Modificado de Jiménez 1997).....	21
Tabla 2 Métodos hidrológicos que se pueden usar en HEC-HMS. (Adaptada de Arias, 2015)	27
Tabla 3 Relación $K=PdTP17$ / modificada en función de R y la duración d. (Modificada de Luna, 2013).....	35
Tabla 4 Ecuaciones logarítmicas para el FRA en diferentes zonas de la República Mexicana (Domínguez, R. et al. 2017).....	41
Tabla 5 Localización de las estaciones meteorológicas usadas para la cuenca Teapa.	60
Tabla 6 Registro de las 16 estaciones con los 654 datos de precipitación máxima diaria media anual.	62
Tabla 7 Estadísticos muestrales del registro completo de las 16 estaciones.....	63
Tabla 8 Datos normalizados del registro completo de las 16 estaciones.	63
Tabla 9 Estadísticos muestrales de los datos normalizados del registro completo de las 16 estaciones.	64
Tabla 10 Serie de los 654 datos normalizados ordenados de mayor a menor. Parte 1.....	64
Tabla 11 Serie de los 654 datos normalizados ordenados de mayor a menor. Parte 2.....	65
Tabla 12 Factores obtenidos por la aplicación de las funciones de distribución.	68
Tabla 13 Comparación de factores actuales respecto a los últimos obtenidos.	68
Tabla 14 Lista de las 16 estaciones con su precipitación diaria máxima anual.....	69
Tabla 15 Factores utilizados para la creación del hietograma con periodo de retorno de 2 años.	71
Tabla 16 Valores resultantes de operación con factores para cálculo de hietograma.....	71
Tabla 17 Características fisiográficas de la cuenca Teapa.	75
Tabla 18 Asignación de N para cada tipo de Suelo.	79
Tabla 19 Promedios mensuales de gasto de la estación 30032	80
Tabla 20 Gasto ecológico mensual.	81
Tabla 21 Comparación de Gasto máximo que se obtuvieron.	93



Resumen.

Este trabajo engloba el conjunto de técnicas estadísticas establecidas para la obtención de Factores de Regionalización de la zona de la cuenca Teapa, que se caracteriza por estar ubicada entre los límites de los estados de Chiapas y Tabasco, en México. Esto con el fin de llevar a cabo su actualización respecto a los factores ya existentes, considerando que los nuevos datos de precipitación reportados en años recientes por las estaciones meteorológicas de la zona son suficientes para realizar esta actualización, esto ayudará a la mejora de la calidad de datos de los hietogramas que se obtienen a partir de estos factores y de los hidrogramas calculados con un modelo lluvia escurrimiento ; debido a que en la zona son abundantes las lluvias, es de relevancia tener un mayor control e información sobre posibles excedentes y que éstos puedan ser aprovechados de la mejor manera y/o disminuir la posibilidad de una inundación que afecte a las poblaciones de la zona.

Con estos factores de regionalización obtenidos y con ayuda de factores de reducción por área se estimaron diferentes hietogramas los cuales son base para obtener hidrogramas de una cuenca.

Es innegable el avance que han tenido las herramientas computacionales las cuales permiten estimar diferentes datos como las características de una cuenca, los hidrogramas y el tiempo en el que se producirán, por ejemplo, los hietogramas ayudan a estimar el gasto que escurrirá por una cuenca producto de una o varias tormentas.

Para este estudio se utilizaron programas que usan los SIG (Sistemas de Información Geográfica) con la finalidad de obtener las características fisiográficas de la cuenca, como su área, longitud del cauce, pendiente del cauce principal, pendiente de la cuenca y su número de escurrimiento el cual es quizás uno de los atributos más importantes para definir los hidrogramas de una cuenca. Los hidrogramas fueron obtenidos con el programa MPE (Modelo de Pronostico de Escurrimiento) y el programa de sistema de modelado hidrológico (HEC-HMS, por sus siglas en inglés) los cuales fueron desarrollados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de América, ambos de uso libre, respectivamente. Los resultados obtenidos fueron comparados para analizar sus ventajas y la manera en que se puedan aprovechar mejor. En general para la cuenca Teapa, con el programa HEC-HMS se observaron mayores valores de los gastos de pico para los periodos de retorno ensayados, respecto a lo obtenido con el programa MPE.



Abstract

This work includes the set of statistical techniques established to produce the necessary parameters to obtain Regionalization Factors for the Teapa basin, that is characterized by being located between the limits of the states of Chiapas and Tabasco, in Mexico. This in order to carry out the update with respect to the existing factors, it consider that the new precipitation data provided in recent years by the meteorological stations in the area are sufficient to carry out this update, it will help to continue improving the quality of data, hyetographs and hydrographs that are obtained from these factors, the previous one in consideration of the fact that in the zone the rains are abundant so having more control and information about possible surpluses and that these can be used in the best way or avoid the possibility of a flood that affects cities of the area.

In turn, these new Regionalization Factors obtained and with Reduction Factors by Area, different hyetographs were estimated, which are the base for obtaining hydrographs of a basin.

The progress that computational tools have had is undeniable, which allow us to estimate different data such as the characteristics of a basin, hydrographs and the time in which they will be produced, for example, hydrographs allow us to estimate the water amount that will flow through a basin product of one or more storms

For this project, programs that use GIS (Geographic Information Systems) were used in order to obtain the physiographic characteristics of the basin, such as its area, length of the channel, slope of the main channel, slope of the basin and its runoff number, which is perhaps one of the most important attributes to define the hydrographs of a basin. The hydrographs created were made with the MPE 4 program and the HEC-HMS program, which were developed by the Engineering Institute of UNAM and by the US Army Corps of Engineers, respectively. The results obtained were compared to analyze their advantages and the way in which they can be better used. In general, for the Teapa basin, with the HEC-HMS program, higher peaks flow values were observed for the return periods tested, compared to peaks flow values that was obtained with the MPE program.



Introducción

El agua se constituye como un elemento básico para la vida, el funcionamiento y sustentabilidad de nuestro entorno, al ser un elemento finito resulta imperante hacer buen uso de él. México por ser un país tan vasto en extensión y por su posición geográfica en el globo se tienen grandes desigualdades en cuanto al agua que se tienen en diferentes zonas, donde en el sureste el vital líquido abunda por las torrenciales tormentas, mientras que en el norte donde predomina el desierto y las precipitaciones son escasas a lo largo del año. Este es solo uno de los motivos por el cual resulta conveniente gestionar y administrar este recurso. (Conagua, 2018)

Son varios los organismos en el país que se encargan de monitorear la actividad meteorológica a través de miles de estaciones meteorológicas a lo largo del país, esta es una tarea ardua por lo que muchas veces resulta difícil obtener datos concisos y robustos sobre las precipitaciones que caen en diferentes cuencas del país. A partir de estos datos se puede realizar todo tipo de estimaciones que permiten tomar decisiones para gestionar su uso, pero cuando en una cuenca no existen los datos suficientes es necesario utilizar datos de alguna cuenca cercana para y así obtener datos hidrológicos certeros del sitio original, una de estas técnicas es llamada Regionalización. (Domínguez et al, 2016)

Esta técnica es usada en nuestro país y cuenta con diferentes parámetros que se pueden usar en diferentes zonas, sin embargo, resulta conveniente cada cierto tiempo actualizar dichos parámetros con nuevos datos para así tener mejores resultados que nos ayuden a tener mejores estimadores y valores hidrológicos. Igualmente realizar esta actualización y comparación de factores nos permitirá tener una mejor percepción del tiempo que debería pasar para realizar esta actividad con otras zonas del país.

A la par que avanza el tiempo también lo hacen los programas que usan los SIG's. y otros programas, de uso libre, para facilitar cálculos hidrológicos, algunos de estos nos ayudan a obtener los hidrogramas por lo cual resulta conveniente comparar su uso y conocer su alcance, ventajas y desventajas frente a otras similares para así tener un mayor provecho de ellas. Donde de igual manera se describirán los aspectos, detalles y requisitos que tienen estos programas para su correcto funcionamiento.



Objetivos

Objetivos generales

Actualizar los factores de regionalización asociados a diferentes periodos de retorno para el sitio de la cuenca Teapa, haciendo uso de los más recientes datos climatológicos disponibles en las estaciones meteorológicas de la zona, con la finalidad de estimar diferentes volúmenes de escurrimiento correspondientes a distintas tormentas.

Crear hidrogramas respecto a diferentes periodos de retorno con los programas de uso libre MPE y HEC-HMS para comparar y analizar sus ventajas para tener un mayor provecho de ellas.

Objetivos particulares.

Determinar los nuevos factores de regionalización de la cuenca Teapa y comparar con los anteriores a fin de constatar el cambio que se ha tenido con los nuevos datos de años recientes.

Aplicar los factores de regionalización obtenidos para obtener diferentes hietogramas correspondientes distintos periodos de retorno, así como la aplicación de FRA.

Obtener características fisiográficas de la cuenca Teapa, así como su número de escurrimiento correspondiente por su tipo de suelo y cobertura vegetal.

Aplicar los datos de hietogramas obtenidos y características fisiográficas a los programas MPE y HEC-HMS para obtener hidrogramas producidos por tormentas con diferentes periodos de retorno y así analizar resultados y concluir las ventajas que se tienen uno respecto al otro.

En el Capítulo 1 Antecedentes. – Se describen y destacan algunos de los estudios en temas de regionalización, análisis regional de frecuencias, análisis de gastos y uso de programas para estimar escurrimientos que han realizado distintos autores a nivel nacional e internacional

En el Capítulo 2 Metodología- Se enuncian las diferentes fórmulas y procedimientos estadísticos que son utilizados para distintos cálculos que son necesarios para hacer el cálculo para la Regionalización. De igual manera se describen el tipo de cuencas y algunos de los parámetros que sirven para caracterizar una cuenca. También se detallan las herramientas de cómputo utilizadas para el desarrollo de este estudio.

En el Capítulo 3 Aplicación y Resultados. - Se explica los procedimientos que se siguieron para realizar los cálculos y obtener los factores de regionalización y los



hietogramas asociados a diferentes periodos de retorno. Igualmente se muestra procedimiento que se realiza para modelar en los programas HEC-HMS y MPE para obtener los hidrogramas. También se muestran los factores regionales calculados, así como los distintos hietogramas obtenidos. De igual modo, se presentan los resultados de las modelaciones hechas.

En el Capítulo 4 Conclusiones. Se exponen las conjeturas a las que se llegaron luego de cumplir con los objetivos de este trabajo.



1. Antecedentes

En este apartado se describirán los estudios más relevantes sobre el tema ya que algunos son piedra angular para la elaboración de este trabajo como es el caso de un estudio sobre regionalización de la precipitación realizado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM en el 2016 (Domínguez et al, 2016) que se describe más adelante.

En una búsqueda por atacar el problema de la falta de registro de datos hidrométricos en diferentes cuencas se han elaborado muchos estudios sobre el análisis regional de frecuencias. La regionalización hidrológica se utiliza para transferir información de cuencas aforadas a las no aforadas. Sin embargo, para obtener resultados confiables, las cuencas involucradas deben tener un comportamiento hidrológico semejante. (Álvarez, Hotait y Sustaita 2011) Con el tiempo han aparecido distintos métodos como la técnica de momento L (Escalante y Reyes, 2005), así como el método de Dalrymple, y análisis de cuantiles y cálculo de fractiles (Dalrymple, 1960). También se han propuesto el uso de distribución general de valores extremos para el análisis de precipitaciones extremas para distintas duraciones (Rossi, Fiorentino, & Versace, 1984).

En México destacan estudios como el Procedimiento para obtener curvas I-d-Tr a partir de registros pluviométricos. (Campos-Aranda y Gómez de Luna 1990). También se han elaborado mapas de factores de regionalización en la república mexicana (Mendoza, 2001); la regionalización de precipitaciones con funciones bivariadas y máxima entropía (Escalante-Sandoval & Domínguez, 2001).

De misma manera se han presentado criterios para la identificación de regiones homogéneas (Escalante y Reyes 2002); estimación regional de factores de conectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia (Baeza 2007).

El Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó un modelo lluvia-escorrentamiento para el pronóstico en tiempo real de las avenidas de las cuencas de los ríos de la sierra: Pichucalco, Teapa, Puyacantengo, Tapijulapa (Domínguez et al, 2009) donde además de analizar fisiográficamente estas cuencas se concluyó que era necesario seguir calibrando los parámetros de los modelos para poder tener los parámetros definitivos que permitan demostrar de una mejor manera la relación entre lluvia y escorrentamiento de estas cuencas.

En el año 2016 el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Domínguez et al, 2016) realizó el estudio denominado “Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por



inundaciones fluviales en todas las cuencas de la República Mexicana” donde el propósito principal era definir las herramientas para determinar gastos de diseño correspondientes a diferentes periodos de retorno. Es en el tomo II “Análisis estadístico regional de las precipitaciones máximas anuales registradas en más de 2.000 estaciones pluviométricas” de dicho estudio, donde se menciona que se trabajaron los datos correspondientes a 2381 estaciones que cumplían con distintos requisitos como que las estaciones usadas deberían tener al menos 20 años de operación y que dicha información estuviera completa para al menos esa misma cantidad de años. También se indica que para tormentas menores a un día se retomaron los resultados obtenidos por Baeza y Mendoza, quienes obtuvieron datos pertenecientes a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de estaciones meteorológicas y de la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Cada vez el uso de modelos de regionalización de lluvia-escorrentía es más usado y empleado para predecir el caudal de una cuenca no aforadas, donde se hace énfasis en la importancia de los procesos de calibración en los modelos utilizados (Song et al, 2019) enuncian los potenciales y las limitaciones de la regionalización haciendo uso de un modelo de tanque como ejemplo.

La regionalización de lluvias ha servido en otros países para poder revelar regímenes de lluvias homogéneos. (El Alaoui El Fels et al. 2021) En Marruecos se utilizaron datos de estaciones 47 años de duración del centro- oeste de ese país donde su análisis mostro tres regímenes de lluvia homogéneos consistentes con las características topográficas.

Hay algunos trabajos como el de Pierluigi (Claps et al. 2022) donde se identifican los problemas que hay en la disponibilidad de datos y donde además muestra las diferencias entre enfoques tradicionales con el objetivo de dar un guía para la construcción de modelos regionales basados en conjuntos de datos actualizados, haciendo consideraciones sobre cómo aplicarlos a modelos con métodos adaptados a la práctica, basados a su vez en un estudio en el noreste de Italia.

En temas de cálculo de gastos y avenidas existen diversos métodos para analizarlos, en cuanto al análisis para determinar gastos ecológicos para agregarlos a estimaciones de hidrogramas es ampliamente usado el método Tennant o Método de Montana, realizado por Tennant (1976) y por la Us Fish and Wildlife Service (USFWS), este método considera diferentes porcentajes del promedio anual del caudal máximo para determinar el gasto ecológico según las condiciones del río y de su estacionalidad, las categorías recomendadas para caudales son cuatro que van desde 10 % del promedio medio anual denominada “condición mínima” hasta 60 -100% como “rango óptimo” . En México se han llevado a cabo modificaciones



al método de Tennant para zonas tropicales, donde las variaciones climatológicas trimestrales anuales para tratar de reproducir las variaciones de caudal natural durante el año fueron consideradas, (García et al. 1999).

2. Metodología

Antes de comenzar con la descripción del proceso con el que se elaboró este proyecto se mencionaran las ecuaciones, formulas y términos matemáticos que se usaron en este estudio.

Periodo de retorno

En términos sencillos el periodo de retorno es el número de años en que, en promedio, se presenta un evento, como una tormenta o una avenida. Cuando se tienen datos de precipitaciones máximas anuales y se quiere aplicar algún método estadístico para extrapolar dichos datos a periodos de retorno mayores a lo que se tienen registro es necesario aplicar un valor de “T”, expresado en años, a cada dato registrado, por lo que se usa la siguiente ecuación para asignar periodos de retorno a una serie de datos. (Aparicio 1997). Existen varias ecuaciones que nos permiten calcular el periodo de retorno, la más aplicada es la de Weibull (1939). Para usar este método se deben ordenar en forma descendente los registros de todas las precipitaciones de la estación que se quiere estudiar, a cada dato se le indica un número de orden m , que va desde 1 hasta un valor n . La ecuación que se usa es la siguiente.

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde m es el número de orden en una lista de mayor a menor de los datos y n es el número de datos.

Estadísticos muestrales de una serie.

Son aquellos que nos permiten tener un panorama característico de una serie de datos.

Los estadísticos muestrales más comunes y tomados como base para este estudio se indican a continuación. (Escalante y Reyes, 2002)

La media:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ec. 2}$$



Donde:

x_i dato medido en el tiempo t_i , $i=1,2, \dots,n$

n número de datos de la serie

Varianza

$$S^2 = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \quad \text{Ec. 3}$$

Desviación estándar.

$$S = \sqrt{S^2} \quad \text{Ec. 4}$$

Coficiente de variación.

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} \quad \text{Ec. 5}$$

[Funciones de distribución de probabilidad.](#)

Según Chow (1994) Una función de probabilidad es aquella función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Con el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística en la muestra puede concentrar en forma compacta la función y en sus parámetros asociados.

Para mostrar el comportamiento de la población de las variables analizadas en este estudio se tomaron en cuenta las siguientes funciones de distribución.

[Función Gumbel](#)

Esta función es comúnmente usada porque generalmente se ajusta a valores máximos. (Escalante y Reyes, 2002)

Función de distribución

$$F(x) = e^{-\left(\frac{x-v}{a}\right)} \quad \text{Ec. 6}$$



Función de densidad de probabilidad

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[\frac{x-v}{\alpha}\right]} e^{-e^{-\left(\frac{x-v}{\alpha}\right)}} \quad -\infty < x < \infty, \alpha > 0 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

v: parametro de ubicación

α: parámetro de escala

La variable reducida Gumbel es:

$$y_i = \frac{x_i - v}{\alpha} \quad \text{Ec. 8}$$

Estimadores por momentos

$$\hat{v} = \bar{x} - 0.45S \quad \text{Ec. 9}$$

$$\hat{\alpha} = 0.78S \quad \text{Ec. 10}$$

Estimadores por máxima verosimilitud

Considerando la variable reducida

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i} \quad \text{Ec. 11}$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i} \quad \text{Ec. 12}$$

El criterio de convergencia es:

$$\frac{P}{\hat{\alpha}} \approx 0, -\frac{R}{\hat{\alpha}} \approx 0 \quad \text{Ec. 13}$$



Incrementos:

$$\partial v_i = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_i}{n} \quad \text{Ec. 14}$$

$$\partial \alpha_i = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_i}{n} \quad \text{Ec. 15}$$

Nuevos valores:

$$\hat{v}_{j+1} = \hat{v}_j + \partial v_j \quad \text{Ec. 16}$$

$$\hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j + \partial \alpha_j \quad \text{Ec. 17}$$

Función Doble Gumbel.

Esta función está basada en la Gumbel, a diferencia que esta se adapta a cuando en una serie de datos se tienen dos poblaciones que son diferentes entre sí (González, 1970), lo que la hace “ideal” para ser aplicada a serie de valores máximos producidos en zonas donde puede haber precipitaciones o gastos generados por ciclones o lluvias de invierno también llamadas “equipatas”.

Su función de distribución está dada por la siguiente expresión (Aparicio, 1997):

$$F(x) = p * (e^{-e^{-y_1}}) + (1 - p) * (e^{-e^{-y_2}}) \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

$$y_1 = \alpha_1 * (x - \beta_1) \quad \text{Ec. 20}$$

$$y_2 = \alpha_2 * (x - \beta_2) \quad \text{Ec. 21}$$

Para llevar acabo los ajustes de distribución por Gumbel y Doble Gumbel se hizo uso del programa Ax (Jiménez, 1997) el cual tiene la siguiente notación. (Tabla 1)



Tabla 1 Funciones de probabilidad que se analizan en el programa Ax (Modificado de Jiménez 1997)

Nombre	Función	Parámetros
Gumbel	$F(x) = e^{-e^{-t}}$ donde: $t = \alpha(x - \beta)$	α : parámetro de forma β : parámetro de escala
Doble Gumbel	$F(x) = p(e^{-e^{-\alpha_1(x - \beta_1)}}) +$ $+ (1 - p)(e^{-e^{-\alpha_2(x - \beta_2)}})$	$\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$ y P

Características Fisiográficas de una cuenca

Una **cuenca** es una zona de la superficie terrestre en donde las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia el mismo punto de salida. (Aparicio, 1997).

Parteaguas. Es una línea imaginaria formada, por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa a la cuenca de cuencas vecinas.

Clasificación de cuencas.

Las cuencas se pueden clasificar por su tamaño o por el punto de salida que tienen.

Por su salida: Las cuencas pueden ser: *exorreicas* cuando el punto de salida se encuentra en los límites de la misma cuenca y descarga en otra corriente o en el mar; o *endorreica* cuando el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago.

Por su tamaño: Dependiendo de su área, recordando que, el área es la superficie en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas:

- Muy pequeña: menores a 25 km².
- Pequeñas: son las que tienen un área entre 25 km² y 250 km².
- Intermedia – pequeña: tienen un área entre 250 km² y 500 km².
- Intermedia – grande: éstas tienen un área entre 500 km² y 2500 km²
- Grande: éstas tienen un área entre 2500 km² y 5000 km²
- Muy grande: éstas tienen un área mayor a 5000 km²

La corriente principal de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma, hay que recalcar que esta definición solo aplica para cuenca exorreicas.



Pendiente del cauce principal.

Es la pendiente promedio que tiene el cauce principal de la cuenca. Es posible obtenerla mediante la siguiente ecuación

$$S = \frac{H}{L} \quad \text{Ec. 22}$$

Donde:

H; es la diferencia de elevaciones entre los puntos en perfil del cauce principal, en m.

L; distancia entre los puntos de mayor y menor elevación, en m.

S; pendiente media del cauce principal, adimensional.

Tiempo de concentración.

Es el tiempo que requiere una gota de agua para viajar desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca al punto de salida. Se puede estimar mediante la ecuación de Kirpich (1940, en Aparicio 1997).

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

t_c ; tiempo de concentración, en horas.

L; longitud del cauce principal, en m.

S; pendiente del cauce principal, adimensional.

Componentes de un hidrograma.

La forma de un hidrograma es generada por las características de la cuenca y de la tormenta que se presente, como es su duración e intensidad, sin embargo, es posible distinguir las partes de cada hidrograma (Figura 1). (Aparicio, 1997)

A: punto de levantamiento. En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta, durante la misma o incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después de que cesó de llover, dependiendo de varios factores, entre los que se pueden mencionar el tamaño de la cuenca, su sistema de drenaje y suelo, la intensidad y duración de la lluvia.

B: Pico. Es el gasto máximo que se produce por la tormenta. Con frecuencia es el punto más importante de un hidrograma para fines de diseño.

C: Punto de inflexión. En este punto es aproximadamente cuando termina el flujo sobre el terreno, y, de aquí en adelante, lo que queda de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo



D: Final del escurrimiento directo. De este punto en adelante el escurrimiento es sólo de origen subterráneo. Normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión, aunque pocas veces se distingue de manera fácil.

t_p : tiempo de pico. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma. Se puede estimar con la siguiente ecuación. Donde d_e es la duración en exceso.

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad \text{Ec. 24}$$

d_e es la duración en exceso en horas, esta a su vez es igual a $d_e = 2\sqrt{tc}$ para cuenca grandes o $d_e = tc$ para cuencas chicas

t_b : Tiempo base. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo. Es entonces el tiempo que dura el escurrimiento directo. Se puede estimar con la siguiente ecuación. (Mockus, en Aparicio 1997)

$$t_b = 2.67t_p \quad \text{Ec. 25}$$

t_r : Tiempo de retraso o rezago: Tiempo que transcurre del centro de masa de la precipitación al pico del hidrograma. Se puede estimar con la siguiente ecuación.

$$t_r = 0.6tc \quad \text{Ec. 26}$$

Rama ascendente. Es la parte del hidrograma que va desde el punto de levantamiento hasta el pico.

Rama descendente o curva de recesión. Es la parte del hidrograma que va desde el pico hasta el final del escurrimiento directo. Tomada a partir del punto de inflexión, es una curva de vaciado de la cuenca, lluvia, etc.

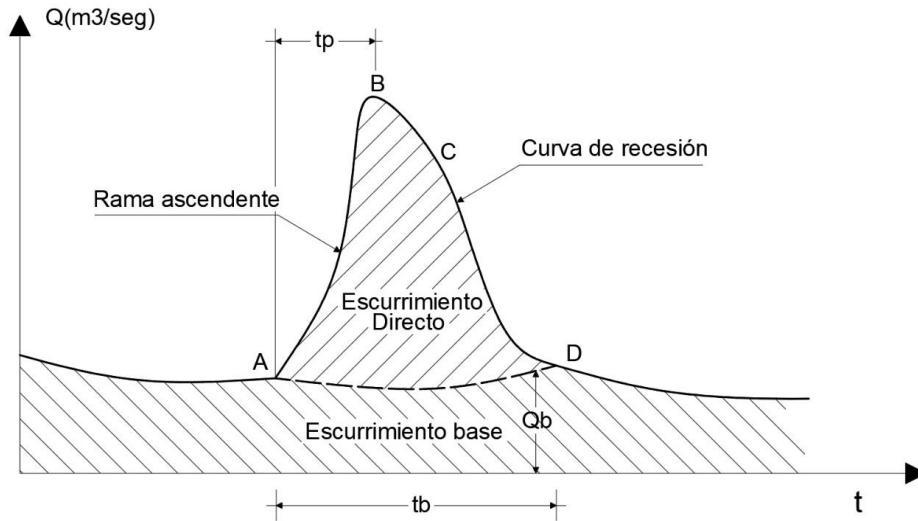


Figura 1 Hidrograma aislado (modificada de Aparicio, 1997)

Numero de E scorrimiento. del Soil Conservation Service (CN)

Este método ayuda a estimar la lluvia efectiva P_e que está relacionada con el tipo de suelo y su cobertura vegetal.

La altura de lluvia total P se relaciona con la altura de lluvia efectiva P_e mediante las curvas mostradas en la figura 2.

Estas curvas se pueden expresar algebraicamente mediante la ecuación (Aparicio 1997).

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{N} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \quad \text{Ec. 27}$$

De igual manera N se puede calcular con la siguiente ec.

$$N = \frac{2540}{25.4 + 5P + 10P_e - 5\sqrt{P_e(4P_e + 5P)}} \quad \text{Ec. 28}$$

Para las dos expresiones anteriores, tanto P como P_e deben estar en centímetros.

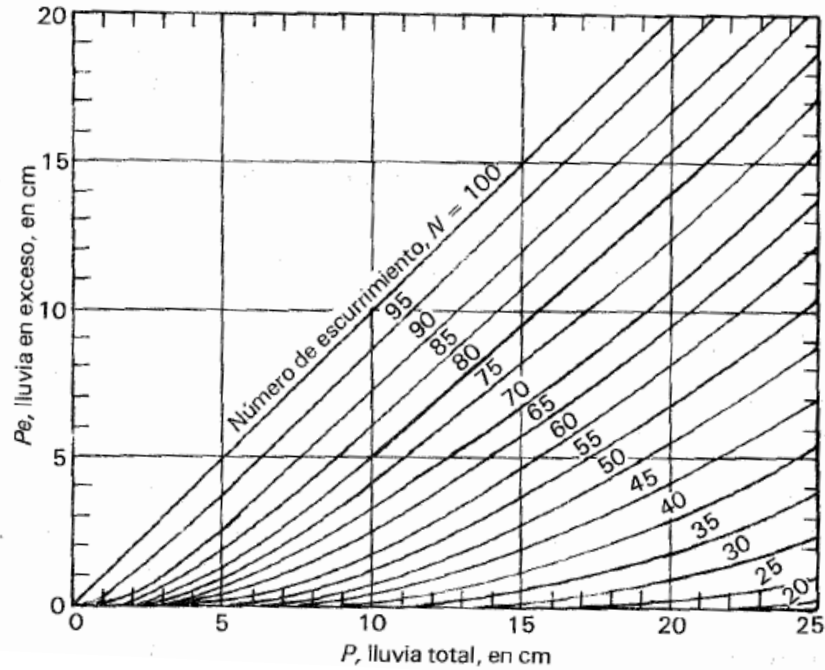


Figura 2 Numero de curva (Aparicio, 1997)

Qgis

Es un Sistema de información geográfica que admite varios formatos tanto ráster como vectoriales, este programa nos permite visualizar, analizar, modificar y crear diferentes tipos de mapas que resultan convenientes para tener una mejor perspectiva a la hora de correr diferentes modelos en otros programas. En la Figura 3 se puede ver la figura del programa Qgis cuando se abre, la versión que se utilizó fue la 3.10 A Coruña, la cual se encuentra disponible en <https://www.qgis.org/es/site/> (Qgis,2022).

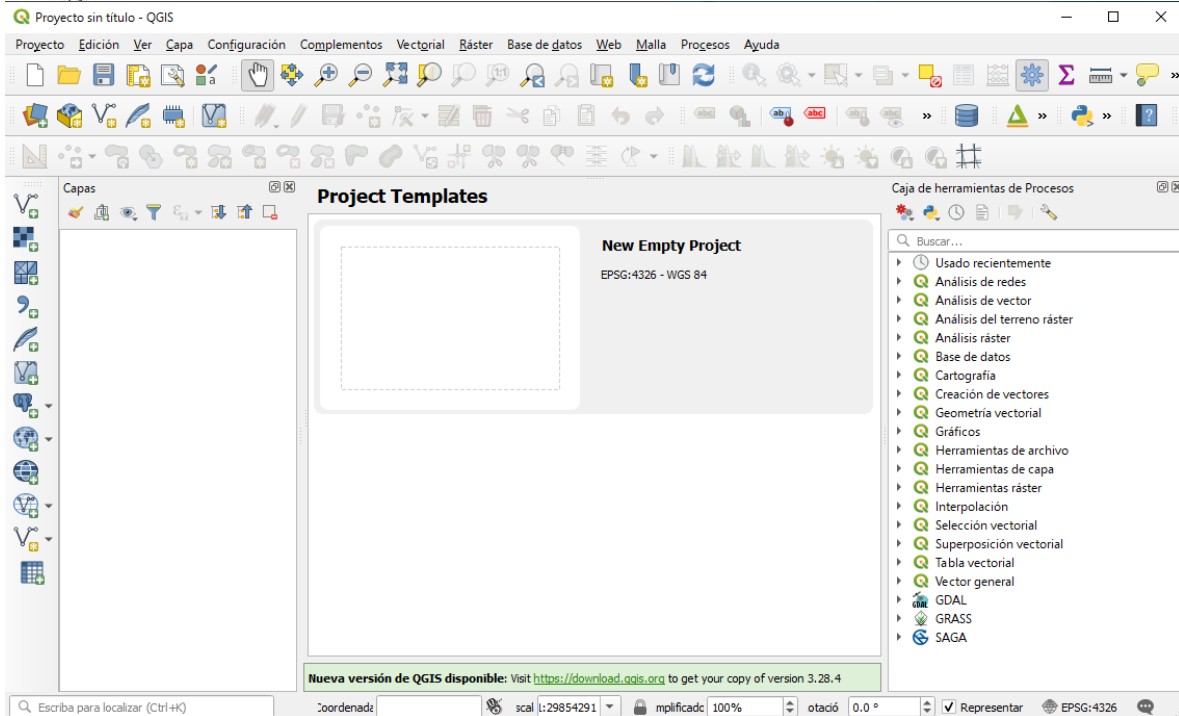


Figura 3 Pantalla principal de Qgis

HEC-HMS y su funcionamiento.

El sistema de modelado hidrológico HEC-HMS es un software diseñado por el U.S. Army Corps of Engineers, el cual puede simular procesos hidrológicos completos en cuencas dentríticas (HEC-HMS, 2022), este programa toma en cuenta procesos tradicionales de análisis hidrológico, como hidrogramas de diferentes tipos tomando en cuenta parámetros y características fisiográficas de la cuenca de estudio. Existen diversos ejemplos de aplicación de este programa en la literatura entre ellos destacan la guía de aplicaciones del HEC-HMS para cuencas cubanas (Arias 2015) donde se muestran ejemplos prácticos para hacer modelaciones de distintos tipos. Los diferentes métodos hidrológicos que se pueden utilizar para crear modelos en HEC-HMS se presentan en la Tabla 2.



Tabla 2 Métodos hidrológicos que se pueden usar en HEC-HMS. (Adaptada de Arias, 2015)

Pérdidas	Transformación lluvia neta en escurrimiento	Flujo Base	Tránsito avenidas por el cauce
Deficil y tasa constante (DC) Inicial y tasa constante Exponencial Número de Cuerva CN SCS Green y Ampt Consideracion de la humedad del suelo (SMA) DC por celdas CN SCS por celdas SMA por celdas	Onda cinetica ModClark HU SCS HU Snyder HU especificado por el usuario Hidrograma en S del usuario Hidrograma Unitario (HU) de Clark	Recesión restringida Recesión Constante mensual Depósito lineal	Modelo Lag Puls modificado Muskingum Muskingum-Cunge Straddle Stagger Onda Cinematica

Para construir el modelo hidráulico primero hay que tener los elementos de la cuenca necesarios tales como su área, longitud del cauce principal, pendiente del cauce principal, pendiente de la cuenca, tiempo de concentración y tiempo de retardo, gastos y características de la precipitación, todos estos elementos deben presentarse en el espacio de trabajo con ayuda de los componentes del programa los cuales son los siguientes.

- Basin Model Manager: En este componente se ingresan datos como el área, el número de curva, el tiempo de retardo y el gasto ecológico, además de poder ingresar un mapa de la cuenca que debe estar en formato shape, el cual puede ser creado con ayuda del programa Qgis. En este mismo componente se eligen los métodos con el que se desea hacer la modelación en cuanto a las perdidas y el flujo base.
- Times Series Data: Este componente sirve para colocar la fecha y hora en la que se suscitara la tormenta a modelar, también es en este componente donde se colocan los datos de lluvia, así como el intervalo de tiempo en el que se darán.
- Meterologic Models: Componente en el cual especificamos en que forma el modelo adoptará la precipitación y la cuenca a la que lo aplicará. En este apartado se determina qué hietograma usar y a qué cuenca cuando se llegue a requerir hacer un modelo más complejo.
- Control Specifications: Este componente permite definir la fecha y hora en la que queremos que hidrograma inicie y termine, así como el intervalo de tiempo en el que queremos que arroje los resultados.

Una vez que se introducen todos estos datos, se corre el programa y se obtiene el hidrograma.



MPE y su funcionamiento

El programa Modelo de Pronóstico de Esguerrimiento (MPE) fue desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, Domínguez et al. (2008); su uso se ajusta el tipo de información que hay en nuestro país en relación a cantidad y calidad de datos, esto para obtener hidrogramas de esguerrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos tomando en cuenta la evapotranspiración que hay entre una tormenta y la otra. Además, este programa toma en cuenta el tipo y uso del suelo que hay en la cuenca, la cual con ayuda de Sistema de Información Geográfica es dividida en celdas cuadradas en las que se integra información específica. La Figura 4 ilustra la pantalla principal de este programa.

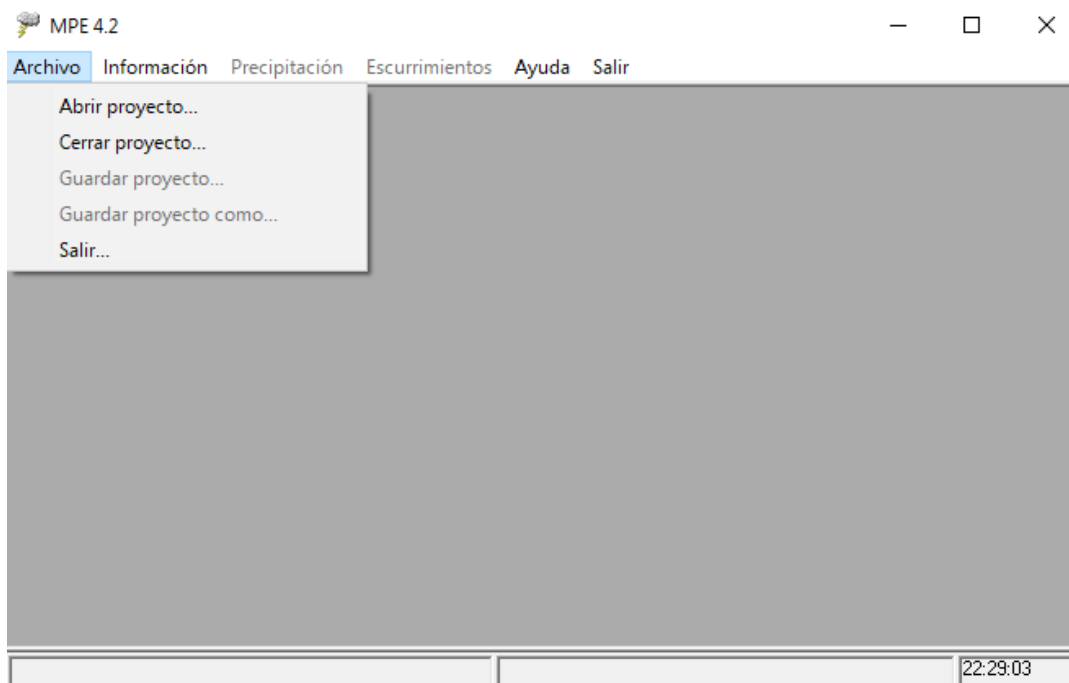


Figura 4 Pantalla principal del Programa MPE

Para el modelo, la precipitación distribuida se obtiene a partir de la interpolación de los datos de la red de estaciones pluviográficas de la zona, usando el método de Shepard, Engeln (1996)

Para obtener el esguerrimiento el programa MPE utiliza el Número de Curva del SCS (Soil Conserve Service) del Servicio de Conservación de Recursos naturales de EE.UU., este método es utilizado para estimar la precipitación efectiva en función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y condiciones de humedad.



El programa MPE (Domínguez, et al, 2008) considera un factor de olvido el cual es multiplicado por la precipitación para obtener la precipitación acumulada, lo anterior para tomar en consideración el secado que tiene el suelo luego de presentarse una lluvia.

Al usar el factor de olvido, se calcula una precipitación acumulada “neta”

$$P_{an} = P_n + P_{n-1} f_x + P_{n-2} f_x^2 + \dots + P_1 f_x^{n-1} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde:

P_{an} : Precipitación acumulada neta en el intervalo de tiempo n, cm

P_n : Precipitación en el intervalo de tiempo n, cm

f_x : Factor de olvido, menor que 1

Cuando se quieren modelar varios días se recomienda:

Para menos evapotranspiración (mayor escurrimiento), aumentar el valor de f_x Para más evapotranspiración (menos escurrimiento), disminuir el valor de f_x

En cualquier caso, $0 \leq f_x \leq 1$

La precipitación acumulada neta se sustituye por la acumulada total P en la ecuación del método de Número de Curva:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}; I_a \leq P, 0 \quad \text{Ec. 30}$$

Donde;

P: Precipitación acumulada total, cm

I_a : Retención (infiltración) inicial, cm

S: Retención (infiltración) potencial máximo, cm

P_e : precipitación efectiva acumulada, cm

$$S = \frac{2540 - (25.4 \times CN)}{CN} \quad \text{Ec. 31}$$



CN: Numero de curva

Para obtener la transferencia del escurrimiento se utiliza el método de Clark Modificado, Méndez (2005) que consiste en trasladar el escurrimiento que ocurre en cada celda hasta la salida de la cuenca después de ocurrido un tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda hasta la salida. (Figura 5).

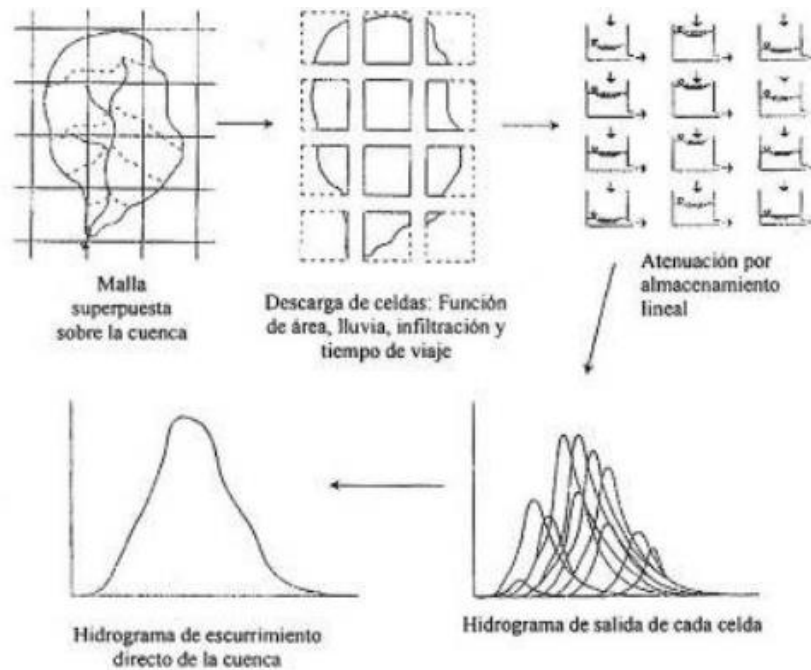


Figura 5 Modelo de escurrimiento directo conceptual Método de Clark para parámetros distribuidos. (Domínguez et al 2008)

En este método es necesario tres elementos para la determinación del hidrograma a la salida de la cuenca, el histograma tiempo-área, el tiempo de concentración T_c , y el coeficiente de atenuación por almacenamiento K . El histograma representa el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en la salida de la cuenca. Los tiempos de viaje se estiman con una velocidad de viaje constante, determinada a partir de la relación que existe entre la distancia del punto más alejada de la salida de la cuenca y el tiempo de concentración. Al dividir el área de la cuenca en zonas de igual tiempo (isócronas), al relacionar estas isócronas con el intervalo de tiempo se obtiene el histograma tiempo-área de la cuenca.

Para utilizar el modelo es necesario calibrar los parámetros I_a , S y f_x de la cuenca (llamados parámetros de pérdidas) y los parámetros T_c y k (llamados parámetros de forma), se comparan los resultados obtenidos de la simulación con datos observados.



Parámetros de pérdidas. Intervienen en la producción del escurrimiento

- Factor de Escala de pérdida Inicial (λ). En el método de Número de Curva, relaciona la infiltración Inicial con la Infiltración potencial máxima. El valor de λ debe estar entre 0 y 1, para aplicaciones prácticas se recomienda iniciar la calibración con un valor $\lambda=0.2$

$$I_a = \lambda S \quad \text{Ec. 32}$$

$$0 < \lambda < 1$$

Donde:

I_a : Infiltración inicial, cm

S : Retención potencial máxima, cm

Factor de Escala de retención Potencial (f_s). Varía o modifica la retención potencial del suelo y, por lo tanto, el valor del número de curva.

$$S = S * F_s \quad \text{Ec. 33}$$

menos permeable (mayor escurrimiento), al disminuir el valor de f_s
más permeable (menor escurrimiento), al aumentar el valor de f_s

Factor de Olvido (f_x). Este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración que se presentan durante el intervalo de tiempo de una tormenta a otra. Se recomienda cuando se quieren modelar varios días.

$$0 < f_x \leq 1$$

menos evapotranspiración (mayor escurrimiento), al aumentar el valor de f_x
más evapotranspiración (menos escurrimiento), al disminuir el valor de f_x

Parámetros de Forma. Intervienen en el traslado del escurrimiento. Le dan la forma al hidrograma:

Tiempo de Concentración (T_c). Es el tiempo que requiere una gota de agua para viajar desde el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca al punto de salida. (ver ec. 23)



Coeficiente de Almacenamiento (Ca). Tiempo de retraso provocado por el efecto del almacenamiento natural. Para una primera aproximación:

$$Ca = 0.6 Tc \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

Ca= Coeficiente de Almacenamiento

Tc: Tiempo de concentración en hrs

Como se mencionó anteriormente el programa MPE realiza la interpolación usando el método de Shepard el cual consiste en calcular el promedio pesado de los datos registrados en N sitios próximos al punto de interpolación, utilizando como peso el inverso de la distancia del punto a interpolar a los demás puntos o sitios

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N w_j(x, y) h p_j \quad \text{Ec. 35}$$

Donde:

$\phi(x, y)$: Precipitación interpolada en el punto (x,y)

N: número de estaciones de lluvia

Wj: Factor de peso en la estación j

Hpj: Lluvia en la estación j.

Para el cálculo del factor de peso $w_j(x, y)$, se utilizan solamente los puntos (x_j, y_j) de un círculo de radio R alrededor del punto (x, y) . A este procedimiento se le llama método local de Shepard, donde w se determina con los parámetros de Franke-Little (Domínguez,2008):

$$\xi_j(x, y) = \begin{cases} 1 - \frac{r_j(x, y)}{R} & \text{para } 0 < r_j(x, y) < R \\ 0 & \text{para } r_j(x, y) \geq R \end{cases} \quad \text{Ec. 36}$$

La ecuación para determinar el factor de peso resulta:

$$w_j(x, y) = \frac{\xi_j^\mu(x, y)}{\sum_{i=0}^N \xi_i^\mu(x, y)} \quad \text{Ec. 37}$$

Donde R distancia máxima a considerar para hacer la interpolación,



$r_j(x, y)$ distancia desde el punto (x, y) a la estación j ; $w_j(x, y)$ factor de peso en la estación j .

Factores de Regionalización

El análisis de los datos de lluvia máxima anual de 24 horas de Domínguez, 2017 incluyó una depuración; se eliminaron aquellos que eran anómalos o poco lógicos generalmente al ser muy altos o muy bajos con respecto a los valores de otras estaciones cercanas, y tomando como punto de referencia la media de los datos (eliminando aquellos que fueran tres o cuatro veces más grandes que la media).

Después se definieron 66 regiones homogéneas las cuales fueron definidas tomando en cuenta diferentes parámetros como las precipitaciones máximas anuales y el relieve de las diferentes zonas.

Para el inicio del análisis por región se agruparon todos los valores máximos anuales de precipitación diaria de las estaciones de esa región y luego realizaron una normalización de los mismos datos dividiéndolos entre su media, luego a cada grupo de datos normalizados se le aplicaron funciones de distribución seleccionando las de mejor ajuste, como la Gumbel y la Doble Gumbel, de los cuales se logró obtener factores regionales asociados a diferentes periodos de retorno.

Para obtener la lluvia de diseño de 24 horas, es necesario multiplicar el factor regional de un periodo de retorno en específico por la media de las precipitaciones máximas anuales registradas en el sitio de análisis y posteriormente se utilizan el factor de convectividad de Baeza, 2007 (Figura 6) para obtener la precipitación acumulada en una hora y para desglosar los datos de precipitación acumulada de duraciones intermedias se usan las relaciones del tipo Chen modificadas por Luna, 2013, mostrados en la Tabla 3, lo que permite obtener hietogramas detallados con duraciones de hasta 24 hrs. Hasta esta etapa se tendría una sobreestimación de la precipitación de diseño ya que no se estaría considerada la distribución de la lluvia en el área en que sucede. Por este motivo es necesario utilizar Factores de Reducción de Área que nos ajusten los valores obtenidos.

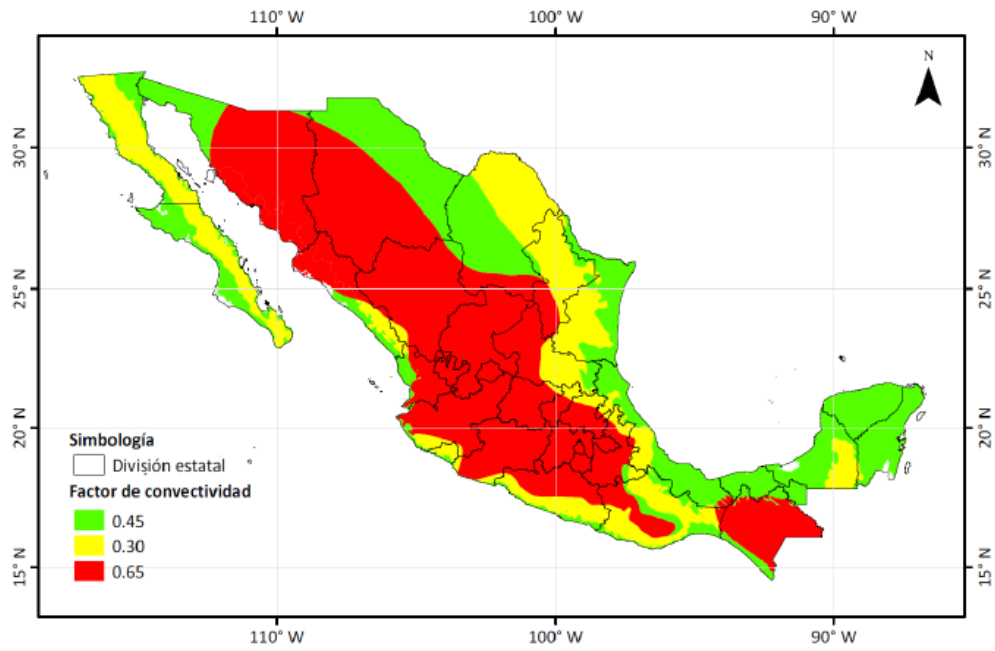


Figura 6 Mapa de factores de conectividad (Baeza, 2007)



Tabla 3 Relación $K=PdT^{1/T}$ modificada en función de R y la duración d. (Modificada de Luna, 2013)

d [min]	d [hrs]	K en función de d y el factor de convectividad $R = P_r^T / P_{24}^T$								
		R=0,10	R=0,20	R=0,30	R=0,40	R=0,45	R=0,50	R=0,60	R=0,65	
10	0.17	0.293	0.390	0.432	0.454	0.462	0.469	0.481	0.487	
15	0.25	0.380	0.485	0.536	0.565	0.575	0.584	0.600	0.608	
30	0.50	0.612	0.699	0.745	0.773	0.783	0.793	0.809	0.816	
60	1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	
120	2.00	1.646	1.424	1.317	1.250	1.225	1.203	1.166	1.151	
150	2.50	1.934	1.595	1.435	1.337	1.300	1.268	1.215	1.193	
180	3.00	2.207	1.750	1.538	1.410	1.363	1.322	1.254	1.226	
210	3.50	2.468	1.892	1.631	1.475	1.417	1.367	1.286	1.253	
240	4.00	2.719	2.024	1.715	1.532	1.465	1.407	1.314	1.275	
270	4.50	2.961	2.148	1.793	1.584	1.508	1.443	1.337	1.294	
300	5.00	3.196	2.266	1.865	1.631	1.547	1.475	1.358	1.311	
330	5.50	3.425	2.378	1.933	1.675	1.583	1.504	1.377	1.326	
360	6.00	3.649	2.485	1.997	1.716	1.616	1.531	1.395	1.339	
390	6.50	3.867	2.587	2.057	1.755	1.647	1.556	1.410	1.351	
420	7.00	4.081	2.686	2.115	1.791	1.676	1.579	1.425	1.362	
450	7.50	4.291	2.781	2.170	1.825	1.704	1.601	1.438	1.373	
480	8.00	4.497	2.874	2.223	1.858	1.730	1.621	1.451	1.382	
510	8.50	4.700	2.963	2.273	1.889	1.754	1.641	1.463	1.391	
540	9.00	4.899	3.050	2.322	1.919	1.778	1.659	1.474	1.399	
570	9.50	5.096	3.134	2.369	1.947	1.800	1.677	1.484	1.407	
600	10.00	5.289	3.216	2.414	1.975	1.822	1.694	1.494	1.415	
630	10.50	5.480	3.297	2.458	2.001	1.842	1.710	1.504	1.422	
660	11.00	5.669	3.375	2.501	2.026	1.862	1.725	1.513	1.429	
690	11.50	5.855	3.452	2.542	2.051	1.881	1.740	1.522	1.435	
720	12.00	6.039	3.527	2.582	2.074	1.900	1.754	1.530	1.441	
750	12.50	6.221	3.600	2.622	2.097	1.918	1.768	1.538	1.447	
780	13.00	6.401	3.672	2.660	2.120	1.935	1.781	1.545	1.452	
810	13.50	6.580	3.743	2.697	2.141	1.952	1.794	1.553	1.458	
840	14.00	6.758	3.812	2.734	2.162	1.968	1.807	1.560	1.463	
870	14.50	6.931	3.880	2.769	2.183	1.984	1.819	1.567	1.468	
900	15.00	7.104	3.947	2.804	2.203	1.999	1.831	1.573	1.473	
930	15.50	7.275	4.013	2.838	2.222	2.014	1.842	1.580	1.477	
960	16.00	7.445	4.078	2.872	2.241	2.029	1.853	1.586	1.482	
990	16.50	7.614	4.142	2.904	2.260	2.043	1.864	1.592	1.486	
1020	17.00	7.781	4.205	2.936	2.278	2.057	1.875	1.598	1.490	
1050	17.50	7.947	4.266	2.968	2.296	2.070	1.885	1.604	1.495	
1080	18.00	8.112	4.328	2.999	2.313	2.084	1.895	1.609	1.499	
1110	18.50	8.275	4.388	3.029	2.330	2.096	1.905	1.615	1.502	
1140	19.00	8.437	4.447	3.059	2.347	2.109	1.914	1.620	1.506	
1170	19.50	8.598	4.506	3.088	2.363	2.122	1.924	1.625	1.510	
1200	20.00	8.758	4.564	3.117	2.379	2.134	1.933	1.630	1.513	
1230	20.50	8.917	4.621	3.146	2.395	2.146	1.942	1.635	1.517	
1260	21.00	9.075	4.678	3.174	2.411	2.157	1.951	1.640	1.520	
1290	21.50	9.232	4.734	3.201	2.426	2.169	1.959	1.645	1.524	
1320	22.00	9.388	4.789	3.228	2.441	2.180	1.968	1.649	1.527	
1350	22.50	9.542	4.843	3.255	2.455	2.191	1.976	1.654	1.530	
1380	23.00	9.696	4.897	3.282	2.470	2.202	1.984	1.658	1.533	
1410	23.50	9.849	4.951	3.308	2.484	2.213	1.992	1.662	1.536	
1440	24.00	10.001	5.004	3.333	2.498	2.223	2.000	1.667	1.539	

En la Figura 7 se observar la distribución espacial de las medidas de precipitación diaria máximas anuales para el territorio mexicano.

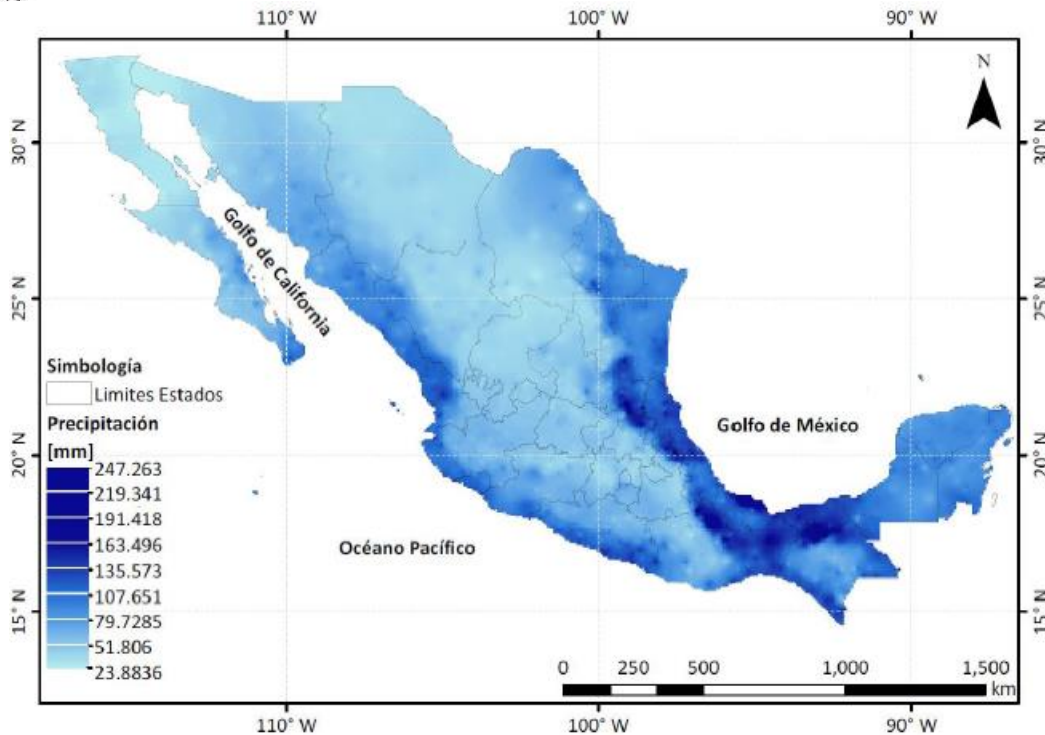


Figura 7 Distribución de las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales en la República Mexicana (Domínguez, R. et al. 2017)

Factor de Reducción por Área

En el estudio de Domínguez, 2016, se menciona que para la aplicación de modelos Lluvia – Esguerrimiento es necesario conocer la tormenta de diseño presentada en la cuenca, asociada a los diferentes periodos de retorno. Así mismo nos dice que el FRA es el coeficiente utilizado para convertir precipitaciones puntuales con una cierta duración y periodo de retorno a precipitaciones areales de la misma duración y periodo de retorno para una zona en específico.

Este factor define la magnitud de la altura de lluvia como una función del área donde ocurre, esta precipitación se obtiene al aplicar el FRA con la siguiente expresión:

$$P_a = FRA \times P_p \quad \text{Ec. 38}$$

Donde P_a es la precipitación de la zona en mm para la duración de estudio, también el factor de reducción por área está en función de la duración, la lluvia, área de interés y periodo de retorno, y P_p es la precipitación media en mm de los valores puntuales para el área y duración de interés.

Existen diferentes estudios en los cuales se ha realizado el cálculo del FRA en diferentes zonas de la república mexicana, en la Figura 8 se muestran las zonas



estudiadas. Estos factores permiten estimar la lluvia media en una cuenca a partir del mapa de precipitación media máxima anual presentado en la figura 5.

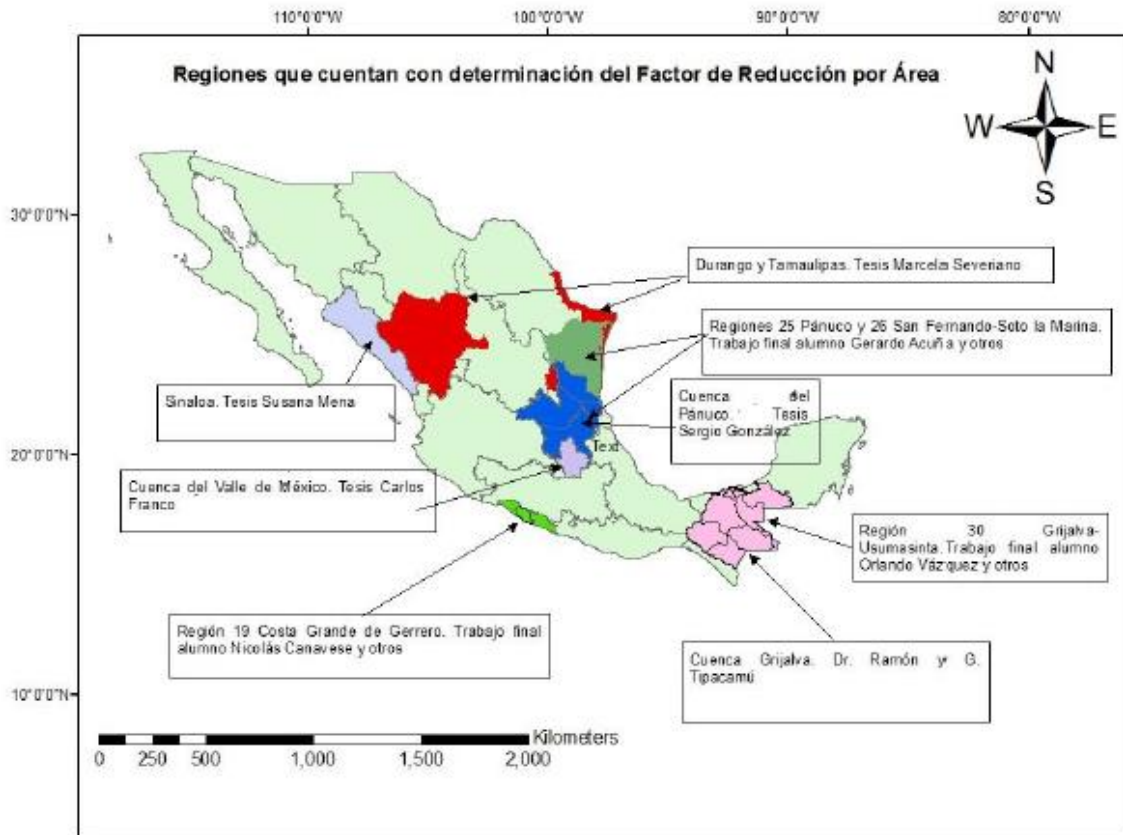


Figura 8 Zonas que cuentan con determinación del Factor de Reducción por Área (Domínguez, R. et al. 2017)

Gasto ecológico.

Dentro de la literatura se pueden encontrar varias definiciones de lo que es el gasto ecológico o también llamado caudales ambientales. El gasto ecológico se define como el agua que corre en un ecosistema fluvial o el caudal que se libera dentro de él con el propósito específico de manejar la condición del ecosistema (Dyson et al, 2003). Para obtenerlo es necesario hacer un análisis de los gastos máximos mensuales de todos los años de registro haciendo uso de *Método de Tennant modificado para México y aplicado al cálculo de los caudales ecológicos en el río Santiago* (García et al. 1999). Donde una vez teniendo los promedios mensuales de todos los años de registro solo es necesario escoger el porcentaje que mejor se adapte a las condiciones de la cuenca y multiplicarlo por el promedio mensual que corresponda a la fecha de la tormenta que se desea simular, para este caso se



escogió un porcentaje de 60% ya que se considera que al ser una zona tropical la cuenca es susceptible a tener una cantidad considerable de días con lluvia al año.

3. Aplicación

Zona de Estudio

La cueca Teapa se encuentra en el sureste de México entre los límites del estado de Tabasco y Chiapas teniendo la mayoría de su proporción en este último (ver Figura 9). Por su geografía cercana a la costa del golfo de México la cuenca cuenta con un clima húmedo y caluroso la mayor parte del año teniendo una temperatura media de 27.8° C, siendo la máxima media mensual en junio de 43° a 45° C y la mínima en diciembre de 18° a 21° C. La zona se encuentra dentro de una región en la que las lluvias son abundantes teniendo precipitación de 4000 mm al año con un promedio mensual de 588 mm en el mes de octubre y un mínimo mensual de 132 mm en abril.

tiene un área de 420.56 km² y su cauce principal tiene una longitud de 56 km, en su punto más alto tiene una altitud de 1856 m.s.n.m. y en su punto más bajo tiene 39 m.s.n.m. La zona está dentro de la región hidrológica Grijalva-Usumacinta, dentro de la cuenca Grijalva-Villahermosa.

Cuenca Teapa entre los limites del estado de Chiapas y Tabasco.

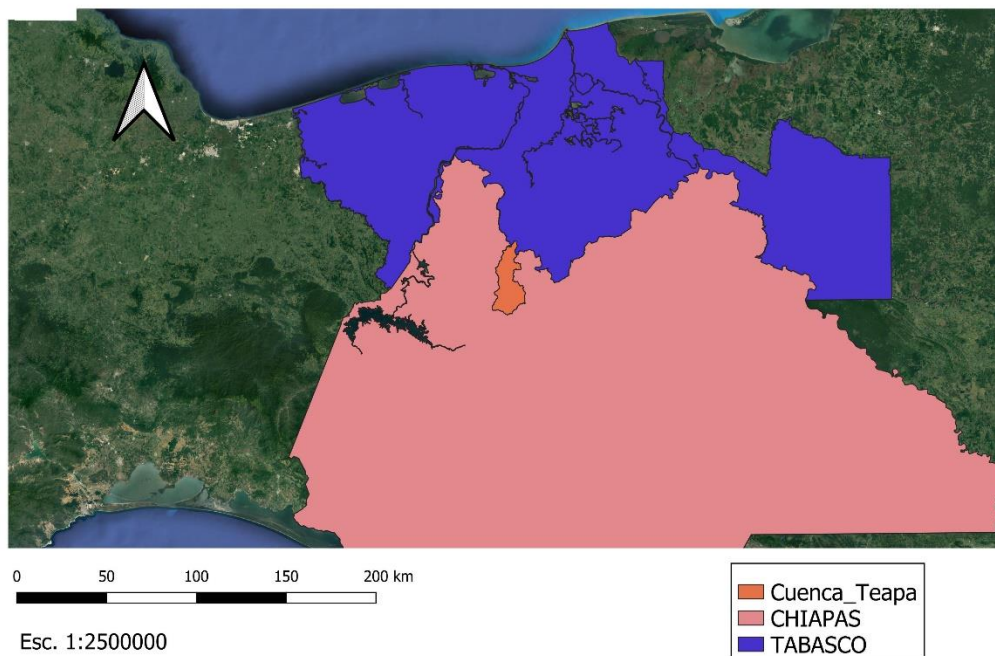


Figura 9 Ubicación de la Cuenca Teapa. Elaboración propia



Factores de regionalización

Para comenzar con el proyecto, se contemplaron y se analizaron los datos de 16 estaciones meteorológicas (Ver Figura 44) ubicadas en la cuenca Teapa y sus alrededores. Estos datos fueron obtenidos de los registros de las estaciones pertenecientes al Sistema Meteorológico Nacional.

En anteriores proyectos realizados por investigadores del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se había analizado que los datos de estas estaciones tuvieran por lo menos 20 años de registro. Para este trabajo se añadieron los datos más recientes arrojados en los últimos años por estas estaciones, el último estudio realizado comprendía datos hasta el año 2014, en este trabajo se añadieron los datos correspondientes hasta el año 2018, de igual manera se consultó la base de datos del SMN para revisar si se había añadido datos de años pasados que antes no hubieran estado disponibles.

Los datos específicos que se obtuvieron son las precipitaciones diarias máximas anuales de cada estación, de esos datos a cada estación se determinaron su media, desviación estándar, coeficiente de variación, el valor máximo y mínimo.

Una vez contemplados estos valores se realizó una depuración, la cual consistía en eliminar aquellos datos que fueran poco creíbles tomando en cuenta los datos de las demás estaciones donde el parámetro definitivo para eliminarlas fueron aquellas que tuvieran un valor superior a 3 veces la media de la estación.

En la estación 7033 se detectó una lluvia máxima diaria anual de 360 mm, este registro pertenece al 4 de abril de 1990, al detectarse que era un valor alto comparado con los demás se revisaron los datos de las estaciones cercanas para ver si también habían registrado datos similares en la misma fecha, al revisar se detectó que las demás estaciones no registraron datos similares e incluso unas no tuvieron lluvias para ese día, ante esto se tomó la decisión de desestimar ese dato y utilizar el segundo mayor para ese mismo año.

La misma situación sucedió en la estación 7217 que registró una lluvia máxima diaria anual de 350.88 en el día 28 de septiembre de 2010, se hizo el mismo procedimiento que en la estación 7033 y se sustituyó por el segundo mayor para ese mismo año. Al eliminar y sustituir estos nuevos datos se volvió a calcular los estadísticos antes mencionados.

A continuación, se procedió a normalizar todos los valores de cada estación, esta normalización se llevó a cabo dividiendo cada dato entre su media. Una manera para verificar que esta normalización se haya llevado de manera correcta es



corroborar que cada media de las estaciones sea igual uno, si es así, la normalización fue correcta.

El siguiente paso fue que de todos los datos normalizados de cada estación se juntaran en un solo grupo ordenándolos de mayor a menor. El total de datos registrados fue 654.

Este bloque de datos se ajustó a dos funciones de probabilidad. Las funciones usadas fueron Gumbel y Doble Gumbel. Se decidió utilizar estas funciones ya que la zona al ser cercana a la costa es susceptible de recibir tormentas producto de ciclones y huracanes, provocando que los datos sean sucesibles a que se ajuste mejor a estas distribuciones. Al aplicar estas funciones también se obtuvo su error estándar.

Se usó la función que tuvo el menor error que fue la función doble Gumbel, de ahí resultaron los factores que deben ser usados para tener el valor de precipitación de cada periodo de retorno. Este factor debe ser multiplicado por el valor de la precipitación media del punto del área que se está estudiado. Para tener el valor de la precipitación media se elaboró un Mapa de las medias de las precipitaciones diarias anuales máximas. Para elaborar este mapa se utiliza el valor de la media de las lluvias diarias máximas anuales de cada estación usada. Con ayuda del programa Qgis se coloca sobre el mapa la coordenada de cada estación y se le asigna el valor de la media, y el programa crea las isolíneas según el método indicado, para este trabajo se usó el método IDW, teniendo el mapa completo se ubica el sitio de estudio, para este caso se seleccionó el centro de gravedad de la cuenca, y se leyó el valor de la isoyeta que pasa sobre ese punto.

Antes de obtener los hietogramas es necesario obtener el Factor de Reducción de Área correspondiente a la zona en la que se tiene ubicada la cuenca. Esta se obtiene de la ecuación de la zona RH30.

Hietogramas

Para obtener los hietogramas se multiplicó el valor obtenido del mapa de isoyetas por uno de los nuevos factores de regionalización calculados para así tener la precipitación de 24 horas asociada al periodo de retorno seleccionado, una vez obtenido este dato se multiplica por el FRA obtenido previamente para así tener la precipitación de 24 horas corregida (Tabla 3). Esta precipitación corregida es multiplicada por el factor de convectividad de la zona (ver mapa de Baeza, Figura 6), para obtener la lluvia de diseño acumulada en 1 hora. Este valor fue multiplicado por factores respecto a una hora con diferentes periodos de tiempo, para el trabajo se usan incrementos de tiempo de 30 min hasta llegar a 4 horas de duración.



Tabla 4 Ecuaciones logarítmicas para el FRA en diferentes zonas de la República Mexicana (Domínguez, R. et al. 2017)

Zona	Ecuación	R ²
RH 19	$-0.044 \cdot \ln(A) + 1.0291$	0.916
RH 25	$-0.033 \cdot \ln(A) + 1.0172$	0.956
RH 26	$-0.048 \cdot \ln(A) + 0.9587$	0.895
RH 30	$-0.048 \cdot \ln(A) + 0.9755$	0.910
Cuenca Río Panuco	$-0.039 \cdot \ln(A) + 1.0567$	0.933
Cuenca del Valle de México	$-0.052 \cdot \ln(A) + 0.9782$	0.915
Durango	$-0.045 \cdot \ln(A) + 0.9808$	0.908
Sinaloa	$-0.033 \cdot \ln(A) + 1.0039$	0.827
Sonora	$-0.033 \cdot \ln(A) + 1.0039$	0.929
Tamaulipas	$-0.037 \cdot \ln(A) + 1.0131$	0.916

*A en km²

A estos valores se le calculó su incremento con respecto a su anterior para luego ser acomodados por el método de bloques alternos y finalmente tener los hietogramas. Cabe mencionar que esto puede llegar a aplicarse a tormentas con mayores duraciones hasta llegar a 24 horas.

Para tener los hidrogramas correspondientes a estos hietogramas con ayuda de los programas HEC-HMS Y MPE es necesario conocer algunas de las características fisiográficas de la cuenca, tales como, su área, longitud del cauce principal, pendiente del cauce principal, pendiente de la cuenca, tiempo de concentración y tiempo de retardo y su número de escurrimiento. Estos valores fueron calculados con ayuda del programa de uso libre Qgis,

El número de escurrimiento de la cuenca fue calculado conforme al tipo de suelo y a su cobertura vegetal, donde se asignó un número a cada tipo de suelo según la cobertura que le correspondiera, y este número fue multiplicado por el porcentaje de área que representaba del total de la cuenca. Estos valores fueron sumados para así obtener el Numero de escurrimiento de la cuenca.

De igual manera es necesario conocer el gasto ecológico el cual es determinado usando el método Tennant para zonas tropicales de México, utilizando los gastos promedios mensuales de los años que se tienen registro. A partir de estos resultados se utiliza el 60 % de ese gasto de cada mes para determinar así el gasto ecológico.

Tenido los elementos y datos completos se comienza a llenar los diferentes campos de los programas.



Modelación con HEC-HMS

El primer programa a utilizar será el HEC-HMS, para comenzar se selecciona la pestaña Components, y se da clic en Basin Model Manager. (Ver Figura 10) se desplegará una ventana donde se elige la opción “new”, se agrega el nombre de la cuenca. (Ver Figura 11). Posteriormente se agrega el archivo shape de la cuenca dando clic en la pestaña VIEW y se agrega con la opción Map layers.

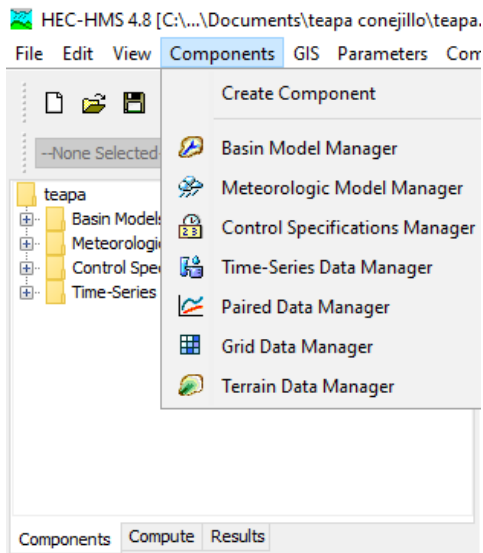


Figura 10 Componentes para el modelo

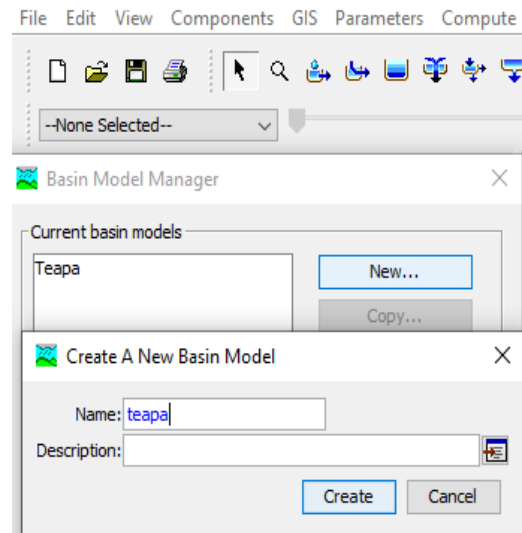


Figura 11 Ventana donde se escribe el nombre la cuenca

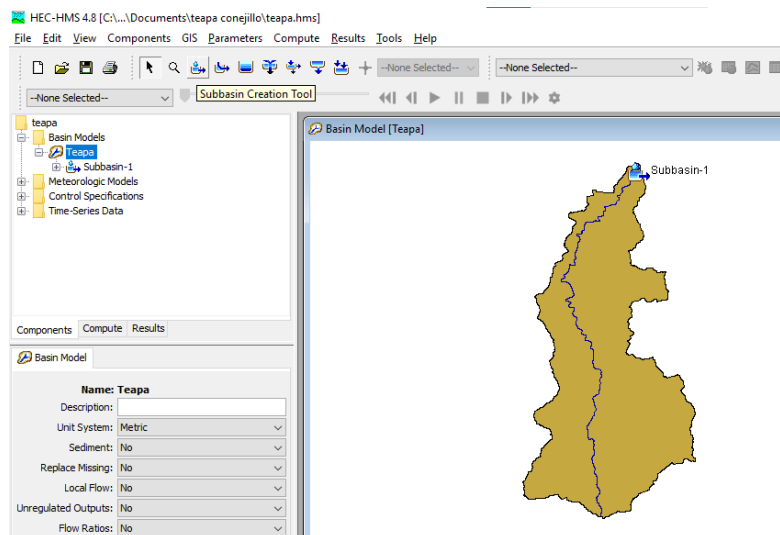


Figura 12 Localización de botón Subbasin Creation Tool

En la barra de herramientas se agrega la salida de la cuenca con ayuda del botón subbasin creation tool (Ver Figura 12) que a continuación nos permitirá agregar los datos de la cuenca y elegir los métodos de cálculo deseado.

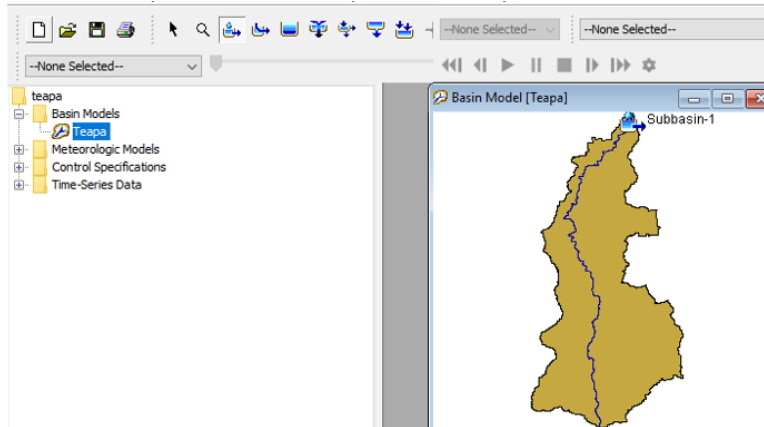


Figura 13 Vista de la localización de la cuenca con la salida agregada

Una vez añadida la salida de la cuenca en la pestaña de Subbasin (Figura 13) se agrega el área de la cuenca. Además, para nuestro caso se utilizará los métodos “SCS Curve Number”, “SCS Unit Hydrograph” y Constant Monthly para Loss Method, Transform Method y Baseflow Method respectivamente. En la pestaña de Loss se agrega el número de curva, en la pestaña Transform se agrega el tiempo de retardo el cual es el 60% del tiempo de concentración de la cuenca, para la pestaña Baseflow se añaden los gastos ecológicos obtenidos. (Ver Figura 14)

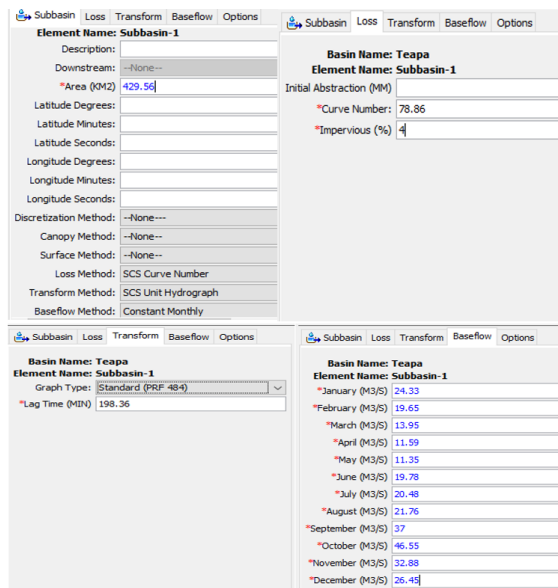


Figura 14 Campos llenados de la componente Basin Model Manager

Se continúa con el siguiente componente que es Time-Serie Gate donde se seleccionara la fecha y hora en la que inicia la tormenta, así como su intervalos, para nuestro caso serán intervalos de 30 min ya que los hietogramas creado tienen



ese mismo intervalo, de igual manera se escoge que la tormenta inicie el 18 de septiembre a medio día del 2021 y termine el mismo día a las 16:00 hrs, en la pestaña de Table agregamos los datos del hietograma mientras que en la pestaña Graph podemos observar la gráfica del hietograma que ha introducido. (Ver Figura 15)

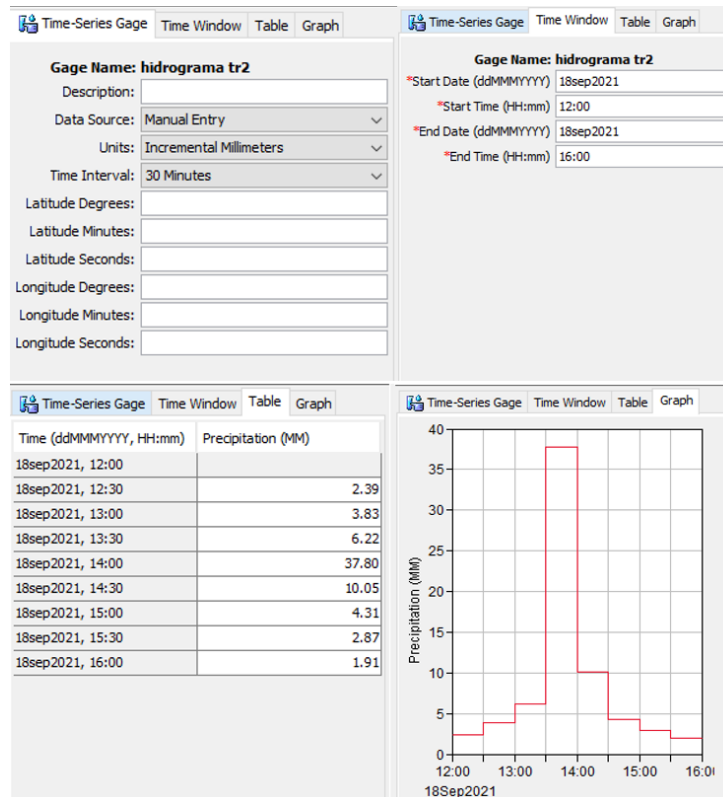


Figura 15 Campos llenados de la componente Time-Serie Gate

El siguiente componente es Meteorologic Model Manager, lo principal es establecer de qué manera el modelo tomará los datos de precipitación, para este caso se escoge la opción "Specified Hyetograph" de esta manera el modelo tomará el hietograma que cargamos en el componente pasado. En la pestaña "Basin" debemos seleccionar que Sí incluya la cuenca que se trabaja. (Ver Figura 16). En la barra lateral se selecciona Specified Hyetograph para que aparezca una nueva pestaña en la que se escoger el hietograma que utilizara el modelo, como se están trabajando varios hietogramas para diferentes periodos de retornos es importante asegurarse que se está escogiendo el histograma correcto. (Ver figura 17)

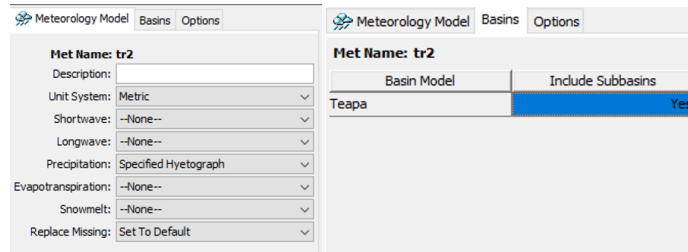


Figura 16 Campos llenados de la componente Meteorologic Model Manager.

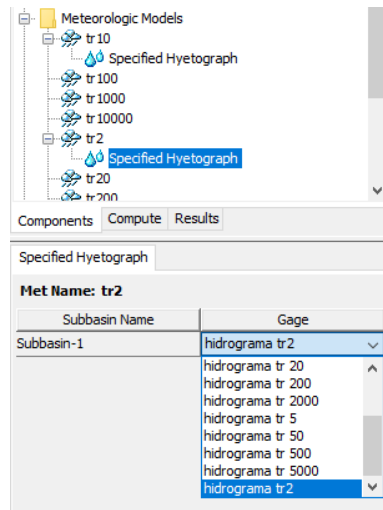


Figura 17 Localización del botón Specified Hyetograph y elección de hietograma.

El último componente que debemos seleccionar es “Control especifications” donde daremos los límites de fecha y hora para el hidrograma tanto para su inicio como para su final, los cuales deben ser mayores que las horas establecidas para el hietograma (Ver Figura 18).

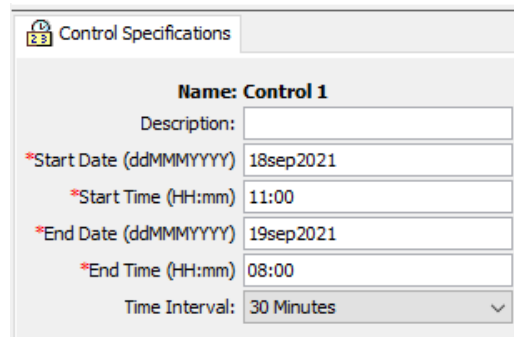


Figura 18 Campos llenados de la componente Control Specifications

Una vez introducidos los 4 componentes necesarios para hacer la simulación solo hace falta correr el programa; para esto en la parte superior se hace click en la pestaña compute donde se desplegará un menú en el cual se selecciona la opción



Create compute, se desplegará otro menú donde se elige Simulation Run. (Ver figura 19)

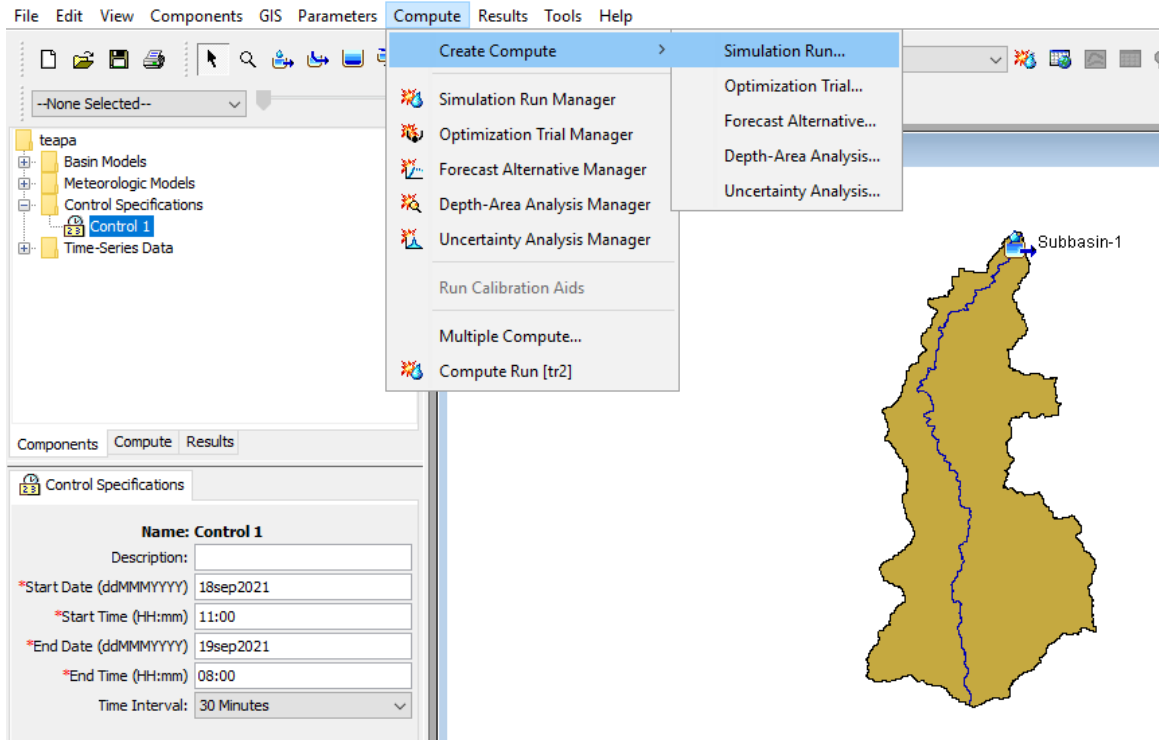


Figura 19 Pasos a seguir para iniciar la creación de la simulación.

Aparecerá una ventana donde debe indicarse el nombre de la simulación, el siguiente paso es seleccionar la cuenca sobre la que trabajará el modelo, en nuestro caso solo habrá una opción de cuenca. El tercer paso es escoger alguno de los modelos meteorológicos que se introdujeron en este caso la tormenta asociada a un periodo de retorno de 2 años (Ver Figura 20).

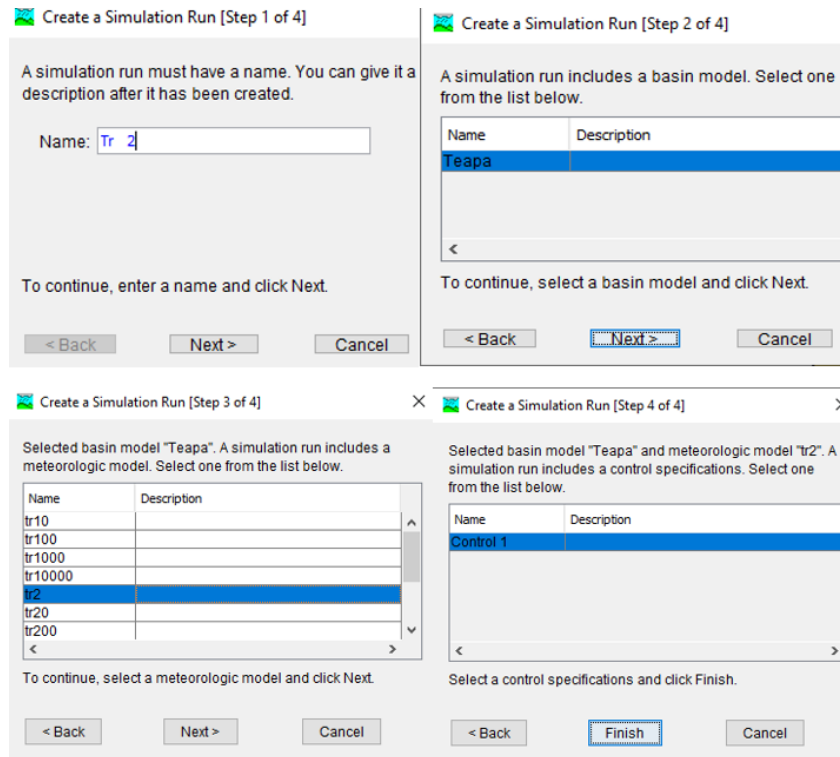


Figura 20 Selección de datos para creación de la simulación.

Una vez establecido las necesidades del modelo solo hace falta correrlo. Para esto se debe hacer clic en el botón Compute All Elements (Ver Figura 21).

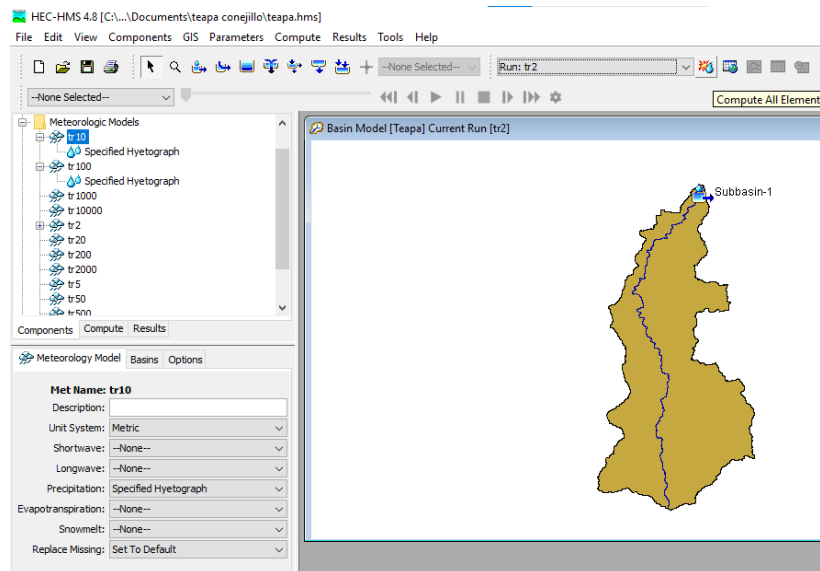


Figura 21 Localización de botón Compute all elements.

Se hace clic la pestaña results y ahí veremos los resultados obtenidos (Ver figura 22).

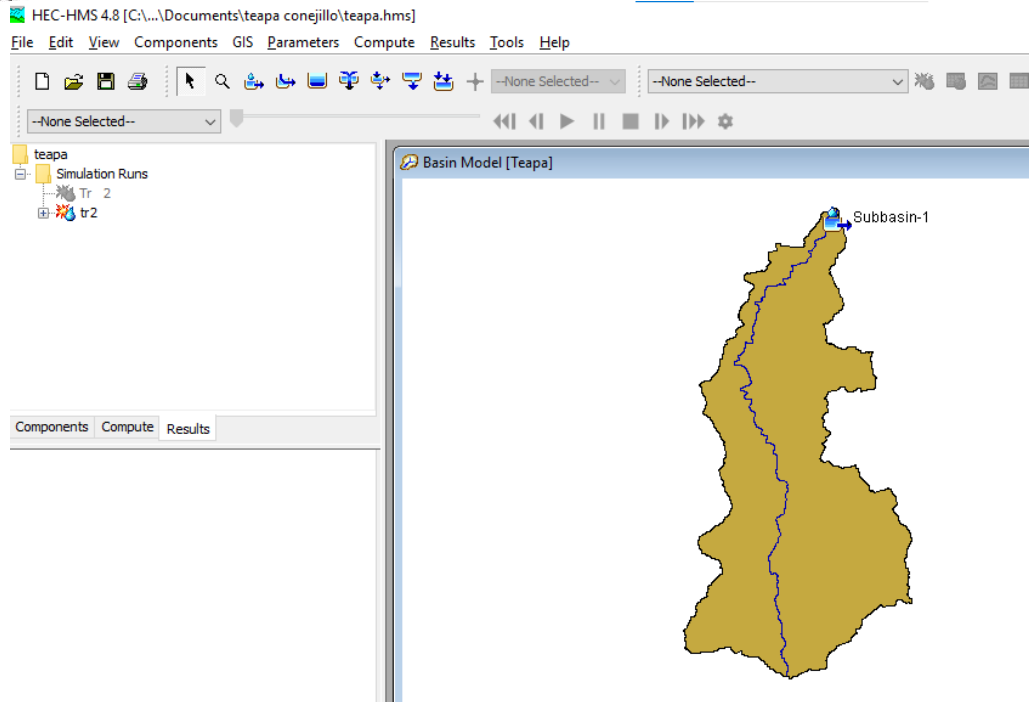


Figura 22 Simulaciones corridas mostradas en la barra izquierda.

Este proceso se repitió para hacer modelaciones para tener tormentas asociadas a 2,5,10,20,50,100,200,500,1000,2000,5000 y 10000 años.

Modelación con MPE

Para comenzar la modelación en el programa MPE es necesario contar con tres archivos en formato txt. con la siguiente información.

- Archivo de celdas: Este archivo contiene la información por celdas que componen la cuenca, y la información que tienen son las coordenadas SHG (Standard Hydrologic Grid) X,Y, del centro de la celda, la longitud del viaje, Área y Número de curva. (Figura 23).
- Archivo de lluvias: Este archivo deberá contener el registro de las estaciones pluviograficas con un intervalo de tiempo y su ubicación con coordenadas UTM (X,Y). (Figura 24).
- Archivo de escurrimiento: El archivo deberá contener el registro de escurrimiento medido total, directo y base, que corresponda al mismo intervalo de tiempo de archivo de lluvias. (Figura 25).



MOD_TEAPA: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
shg_x	shg_y	area	FLOWLENGHT	NC
500.0237853	1900.023268	0.76	57.76	66
500.9270165	1900.202535	0.39	58.1	77
502.1502187	1900.364054	0.05	58.32	77
502.5502531	1900.364083	0.01	58.61	74
498.2151904	1901.075655	0.43	56.93	64
499.0109404	1900.927964	0.97	56.35	84
500.0001196	1900.914054	1	56.78	80
501.0001196	1900.914054	1	57.94	79
502.0001196	1900.914054	1	57.8	79
502.800038	1900.914054	0.6	59.41	79
492.2357687	1902.349756	0.07	57.66	75
493.0223383	1902.319591	0.18	56.62	77
493.8787094	1902.328325	0.14	56.38	77
495.3374477	1902.301559	0.08	55.38	76
496.085001	1902.171	0.43	57.81	76
497.0217461	1902.039704	0.74	56.71	73
498.0046602	1901.918594	0.99	56.33	80
499.0001196	1901.914054	1	55.41	83
500.0001196	1901.914054	1	55.27	80
501.0001196	1901.914054	1	56.21	82
502.0001196	1901.914054	1	57.27	82
502.955702	1901.953964	0.89	58.79	76
503.6584182	1902.239071	0.12	57.41	73

Línea 1, columna 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

tormeta: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda				
X	Y	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00
10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00
04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00
07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00
10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00
04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00
07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00
10:00	11:00	12:00	13:00					
570034.543	1856041.789	0.0	0.0	0.0	2.0	1.4		
1.0	0.0	0.0	0.0	0.8	1.6	0.4	0.8	0.6
0.2	0.4	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Línea 1, columna 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Figura 23 Archivo txt. Con datos de celdas de la cuenca Figura 24 Teapa Archivo txt. Con datos de precipitación.

gasto: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
horas	Qttotal	Qdirecto	Qbase	
09:00	26	26	0	
10:00	25	25	0	
11:00	25	25	0	
12:00	25	25	0	
13:00	25	25	0	
14:00	24	24	0	
15:00	25	25	0	
16:00	26	26	0	
17:00	26	26	0	
18:00	26	26	0	
19:00	27	27	0	
20:00	28	28	0	
21:00	26	26	0	
22:00	26	26	0	
23:00	26	26	0	
00:00	26	26	0	
01:00	26	26	0	
02:00	26	26	0	
03:00	26	26	0	
04:00	25	25	0	
05:00	25	25	0	
06:00	25	25	0	
07:00	89	89	0	
08:00	195	195	0	
09:00	152	152	0	

Línea 1, columna 1 100% Windows (CRLF) UTF-8

Figura 25 Archivo txt con la información de escurrimiento.

Para tener los hidrogramas correspondientes a los periodos de retorno primero se realizó una calibración con un registro de lluvia de 6 estaciones climatológicas que



se encuentran cercanas a la cuenca Teapa (Figura 26) y con un registro de una estación hidrométrica del río Teapa. Esto con la finalidad de tener mejores parámetros de pérdida (Factor de escala de pérdida inicial, factor de retención potencial, factor de olvido).

Estaciones usadas para calibración de modelo

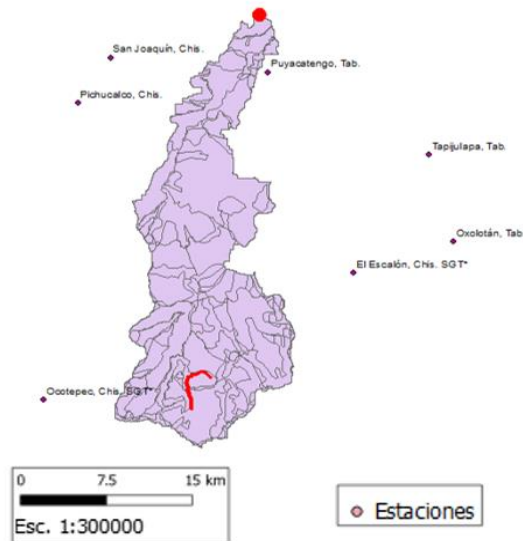


Figura 26 Estaciones usadas para la calibración.

Al abrir el programa MPE, en dando clic en la pestaña Información y luego en Información de Entrada, se abrirá una ventana donde se introducirá la fecha y hora de inicio y fin de los registros de tormenta, para este primer modelamiento para la calibración será de 29 de octubre del 2020 a las 9:00 hrs hasta el 8 de noviembre del 2020 a las 13:00 hrs con un intervalo de tiempo de 60 minutos (Figura 27).

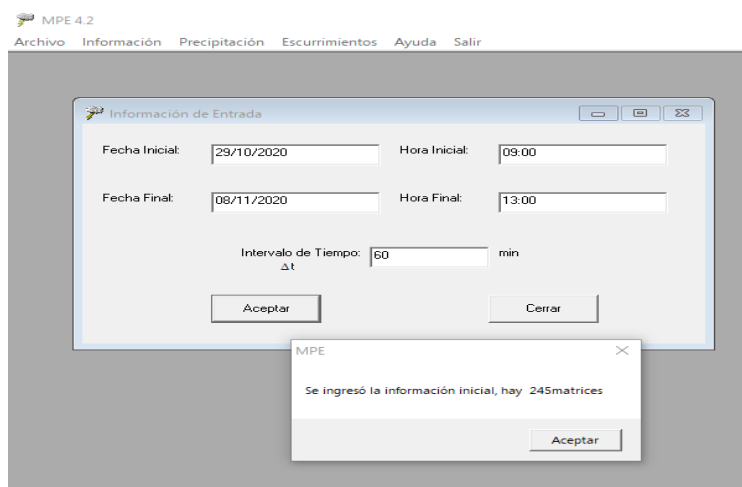


Figura 27 Ventana de Información de entrada con fechas introducidas.



Al dar clic en aceptar se desplegará otra ventana donde se deberán seleccionar los archivos de celdas y de precipitación. (Figura 28)

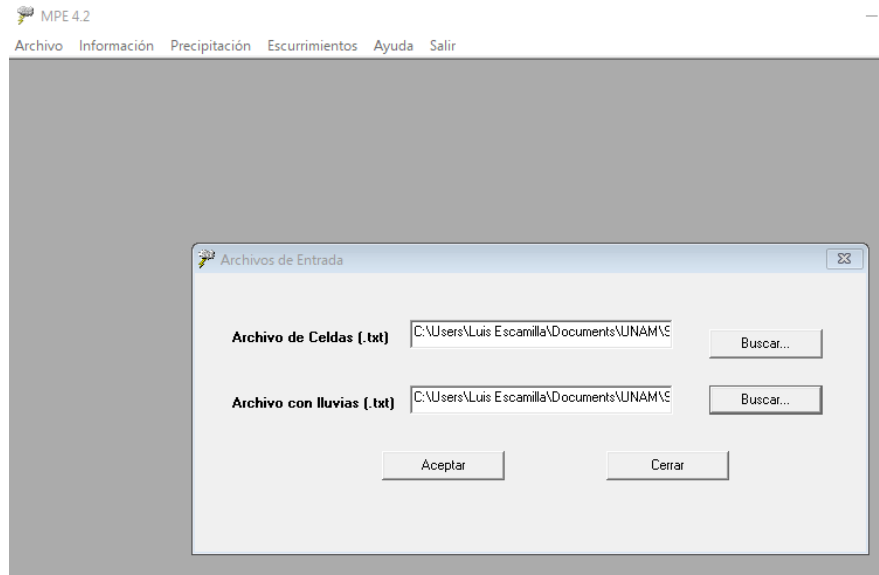


Figura 28 Ventana de Archivos de entrada con los archivos de celdas y lluvias seleccionadas.

Posteriormente se dará clic en la pestaña Precipitación, y en Precipitación Media, se abrirá una nueva ventana y se da click en el botón Calcular, esto hará que programa calcule el área de la cuenca y la precipitación media de la tormenta introducida. (figura 29)

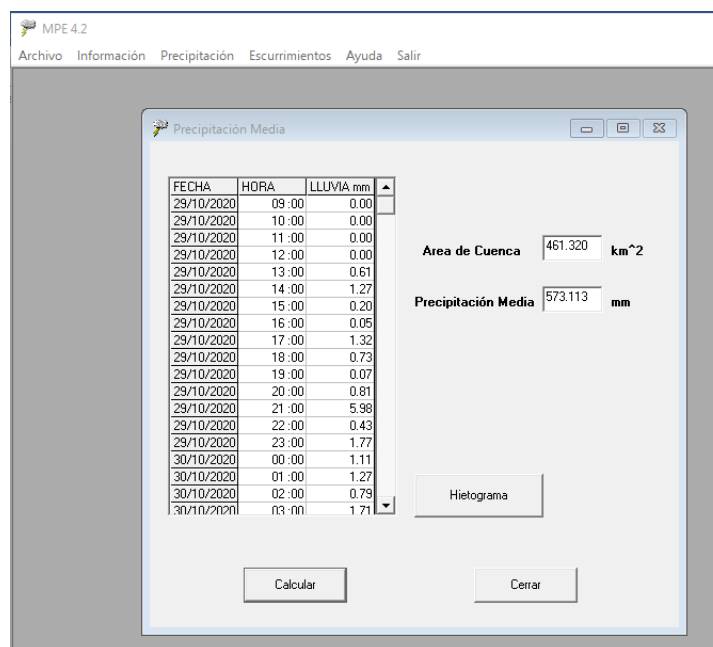


Figura 29 Ventana de Precipitación media con datos calculados por el programa.



MPE 4.2
Archivo Información Precipitación Ecurrimientos Ayuda Salir

Ecurrimiento Observado

Observaciones:
(sin comas)

Fecha de inicio: 29/10/2020 Fecha de final: 09/11/2020
Hora de Inicio: 09:00 Hora final: 23:00
Intervalo de Tiempo: 60 min

Ingresar Datos Ingresar Tabla

Hora	Q Total (m ³ /s)	Q Directo (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)
09:00	26	26	0
10:00	25	25	0
11:00	25	25	0
12:00	25	25	0
13:00	25	25	0
14:00	24	24	0
15:00	25	25	0
16:00	26	26	0
17:00	26	26	0
18:00	26	26	0
19:00	27	27	0
20:00	28	28	0

Aceptar Limpiar Cerrar

Figura 31 Ventana de Ecurrimiento Observado con datos de fecha y hora final introducida.

Nuevamente se selecciona la pestaña escurrimiento y se pulsa la opción Hidrograma, se abrirá una ventana donde se deben introducir los parámetros de forma que corresponden a los tiempos de concentración y al coeficiente de almacenamiento, para los parámetros de pérdidas deberán dejarse los valores que aparecen primero, estos valores serán modificados posteriormente (Figura 32).

MPE 4.2
Archivo Información Precipitación Ecurrimientos Ayuda Salir

PARAMETROS DE CALIBRACIÓN

PARAMETROS DE PERDIDAS

Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)
Factor de Escala de Retención Potencial
Factor de olvido

PARAMETROS DE FORMA

Tiempo de concentración (hr):
 $T_c > \Delta t$
Coeficiente de Almacenamiento (hr):
 $C_a > \Delta t/2$

ESCURRIMIENTO BASE

Ecurrimiento Constante m³/s

Método de Recesión

$Gasto\ Inicial$ m³/s
 $Cte\ de\ Recesión$
 $Gasto\ Final$ m³/s

Sin Ecurrimiento Base

Hidrograma Restaurar Cerrar

Figura 32 Ventana de parámetros de calibración con datos por default



Una vez introducidos los datos de presiona el botón Hidrograma y en automático se abrirá una ventana con el hidrograma, como se observa en la Figura 33.

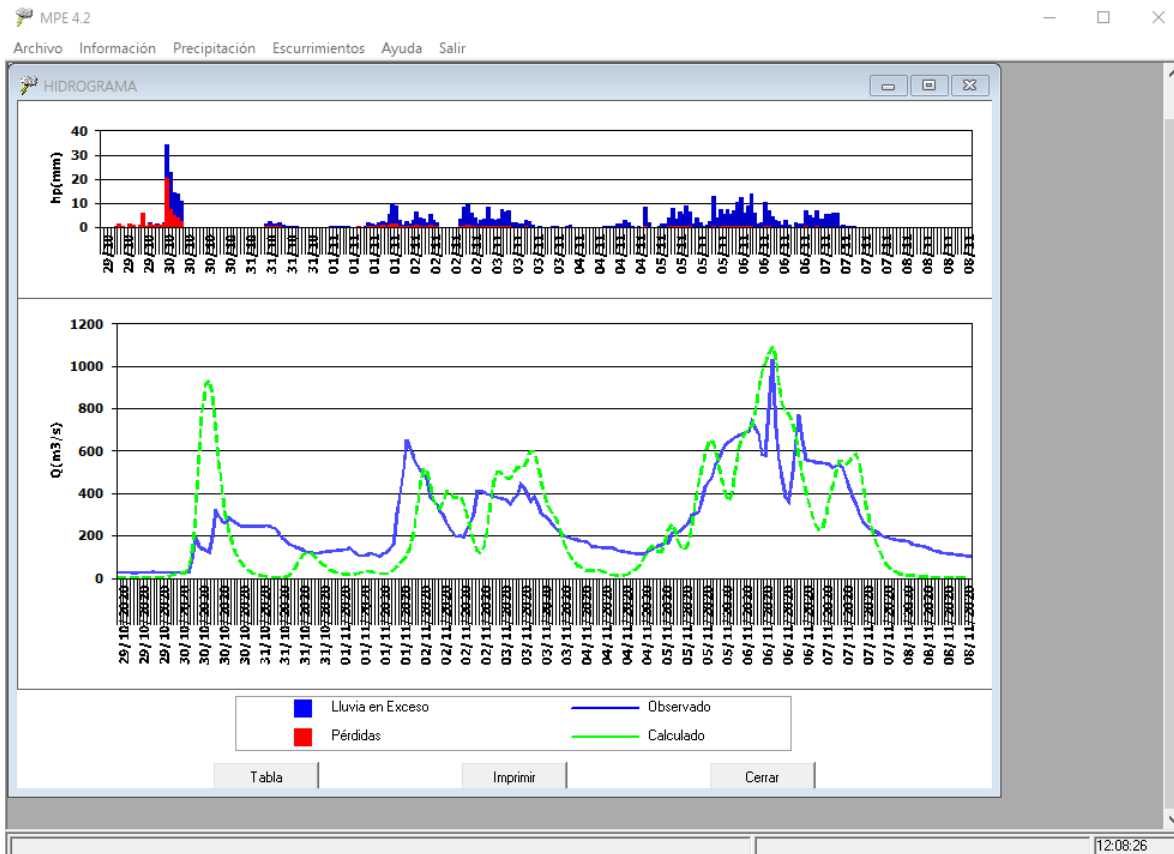


Figura 33 Primer hidrograma arrojado por el programa con parámetros de perdida por default

Se hace clic en la pestaña Ecurrimiento, y se selecciona la opción Tabla Resumen, se abrirá una tabla con datos de la lluvia, así como del volumen escurrido tanto del calculado como del medido. (Figura 34).



Observaciones:
(sin comas)

Lluvia		
Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	573.113	mm
Pérdidas	87.022	mm
Lluvia en Exceso	486.091	mm

Volumen Escurrido			
	Observado	Calculado	
Total	255830.400	224243.649	Mm3
Directo	255830.400	224243.649	Mm3
Base	0.000	0.000	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	1030.000	1094.217	m ³ /s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Figura 34 Ventana con tabla resumen con parámetros de perdida por default.

Como se puede observar el hidrograma calculado se encuentra un poco desfasado de las mediciones observadas a las mediciones calculadas, por lo que ahora se modifican los parámetros de perdidas hasta que se observe que las mediciones en la gráfica son más parecidas y los valores de la tabla resumen sean semejantes. En la Figura 35 se muestran los factores encontrados que ajustan mejor los datos y que serán los que se usen para la modelación las lluvias asociadas a diferentes periodos de retorno.

MPE 4.2
Archivo Información Precipitación Escurrimientos Ayuda Salir

PARAMETROS DE CALIBRACION

PARAMETROS DE PERDIDAS	
Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ)	1
Factor de Escala de Retención Potencial	.8
Factor de olvido	1

PARAMETROS DE FORMA	
Tiempo de concentración (hr): $T_c > \Delta t$	5.50
Coefficiente de Almacenamiento (hr): $C_a > \Delta t/2$	3.30

ESCURRIMIENTO BASE	
<input checked="" type="radio"/> Escurrimiento Constante	0 m ³ /s
<input type="radio"/> Método de Recesión	Gasto Inicial: 0 m ³ /s Cte de Recesión: 0 Gasto Final: 0 m ³ /s
<input type="radio"/> Sin Escurrimiento Base	

Hidrograma Restaurar Cerrar

Figura 35 Ventana de parámetros de calibración con datos de parámetros de perdida ajustados.



En las Figuras 36 y 37 se puede ver que los datos calculados son más parecidos a los observados.

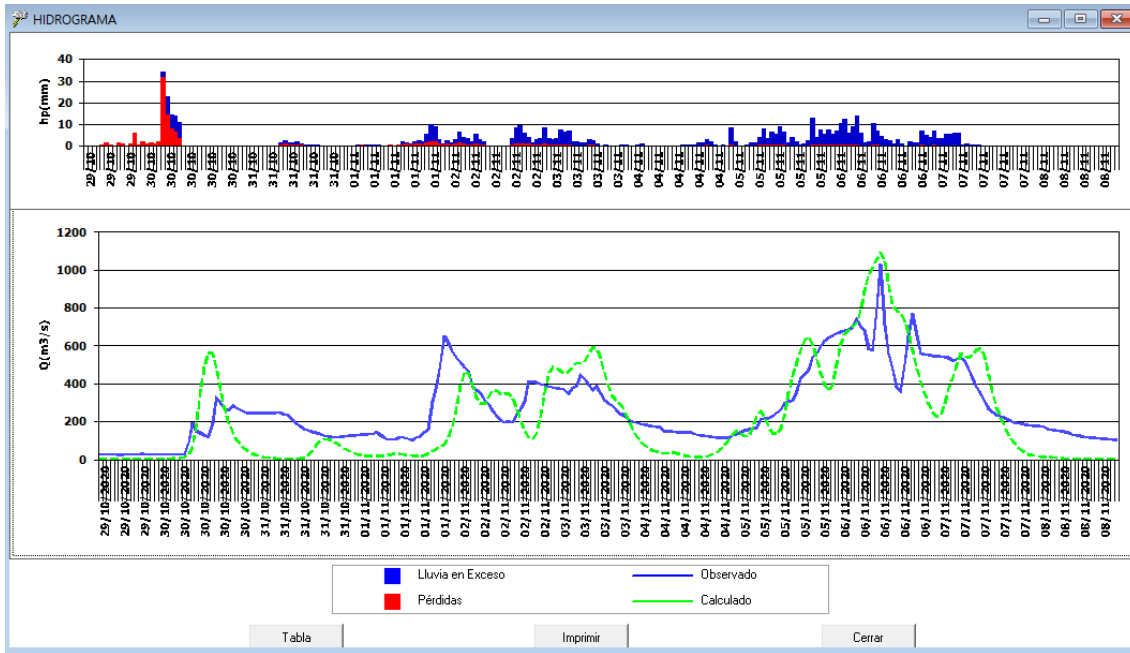


Figura 36 Hidrograma obtenido a partir de los nuevos parámetros de calibración.

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia

Area de cuenca km²

Lluvia media mm

Pérdidas mm

Lluvia en Exceso mm

Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	<input type="text" value="255830.400"/>	<input type="text" value="207143.573"/>	Mm3
Directo	<input type="text" value="255830.400"/>	<input type="text" value="207143.573"/>	Mm3
Base	<input type="text" value="0.000"/>	<input type="text" value="0.000"/>	Mm3

	Observado	Calculado	
Q máximo	<input type="text" value="1030.000"/>	<input type="text" value="1092.109"/>	m3/s

Figura 37 Ventana de tabla resumen con los nuevos parámetros de calibración.



Para la obtención de los hidrogramas con diferentes periodos de retorno se usaron los hietogramas calculados y tomando un gasto base de $37 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponden al mes de septiembre, la fecha del evento será la misma que se introdujo en el programa HEC-HMS, 18 de septiembre 2021.

Se realiza el proceso anterior ahora con los nuevos datos de precipitación, escurrimiento y fechas, este proceso puede verse en las Figuras 38 a 43.

MPE 4.2

Archivo Información Precipitación Escurremientos Ayuda Salir

Información de Entrada

Fecha Inicial: 18/09/2021 Hora Inicial: 12:00

Fecha Final: 18/09/2021 Hora Final: 16:00

Intervalo de Tiempo: 30 min
 Δt

Aceptar Cerrar

Figura 38 Ventana de información de entrada con fecha y hora inicial y final para la modelación de las lluvias con periodos de retorno.

MPE 4.2

Archivo Información Precipitación Escurremientos Ayuda Salir

Archivos de Entrada

Archivo de Celdas (.txt) C:\Users\Luis Escamilla\Documents\UNAM\ Buscar...

Archivo con lluvias (.txt) C:\Users\Luis Escamilla\Documents\UNAM\ Buscar...

Aceptar Cerrar

Figura 39 Ventana de Archivos de entrada con los archivos de celdas y lluvias seleccionadas.

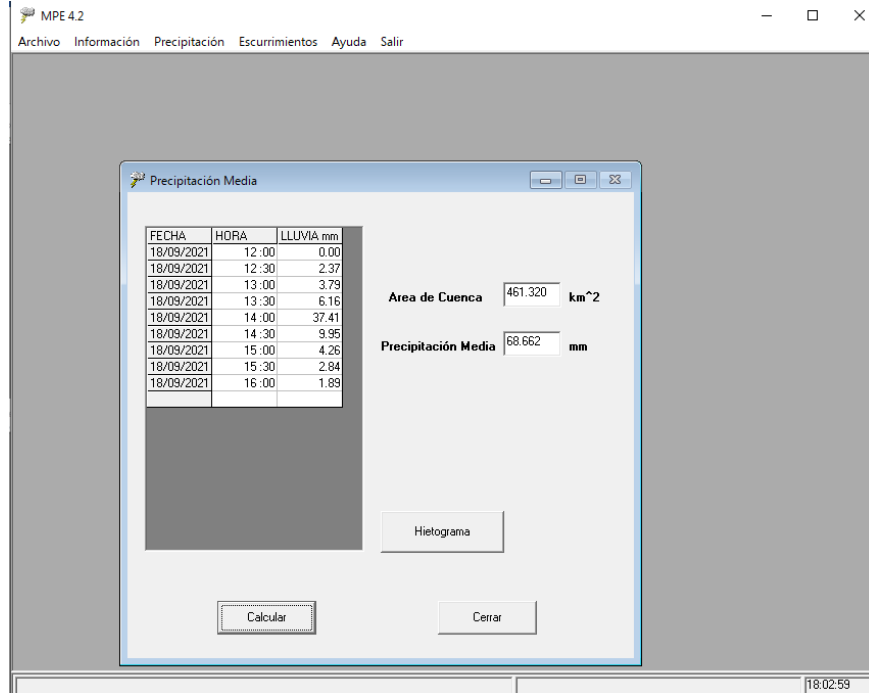


Figura 40 Ventana de Precipitación media con datos calculados por el programa.

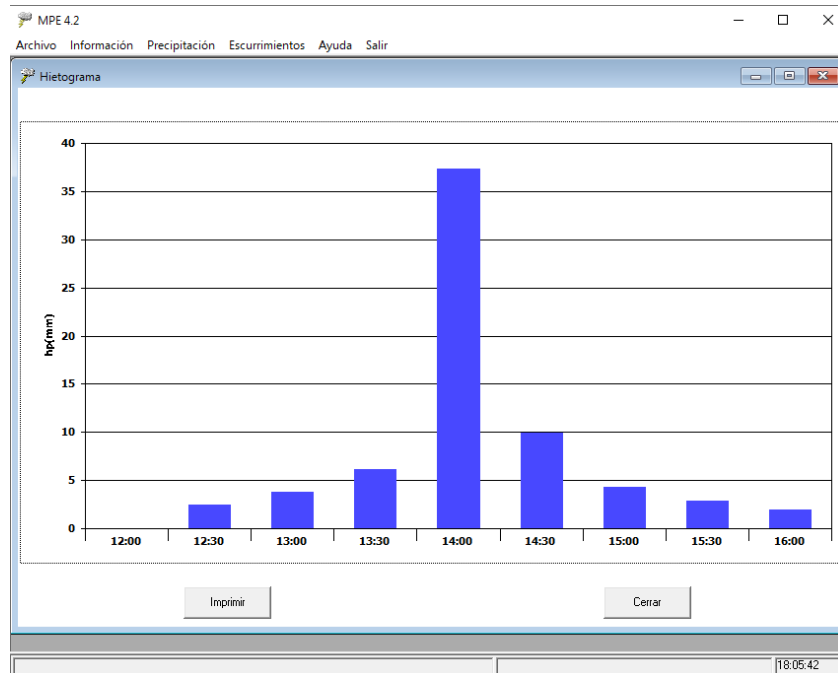


Figura 41 Hietograma generado por el programa.

MPE 4.2 Archivo Información Precipitación Ecurrimientos Ayuda Salir

Ecurrimiento Observado

Observaciones:

Fecha de inicio: 18/09/2021 Fecha de final: 19/09/2021

Hora de Inicio: 12:00 Hora final: 11:00

Intervalo de Tiempo: 30 min

Hora	Q Total (m ³ /s)	Q Directo (m ³ /s)	Flujo Base (m ³ /s)
12:00	37	0	37
12:30	37	0	37
13:00	37	0	37
13:30	37	0	37
14:00	37	0	37
14:30	37	0	37
15:00	37	0	37
15:30	37	0	37
16:00	37	0	37
16:30	37	0	37
17:00	37	0	37
17:30	37	0	37

18:16:02

Figura 42 Ventana de Ecurrimiento Observado con datos de fecha y hora final introducida.

PARAMETROS DE CALIBRACIÓN

PARAMETROS DE PERDIDAS

Factor de Escala de Pérdida Inicial (λ):

Factor de Escala de Retención Potencial:

Factor de olvido:

PARAMETROS DE FORMA

Tiempo de concentración (hr):
 $T_c > \Delta t$

Coficiente de Almacenamiento (hr):
 $C_a > \Delta t/2$

ESCURRIMIENTO BASE

Ecurrimiento Constante m³/s

Método de Recesión

m³/s
 Gasto Inicial

 Cte de Recesión
 m³/s
 Gasto Final

Sin Ecurrimiento Base

Figura 43 Ventana de parámetros de calibración con datos de parámetros de perdida ajustados.



5. Resultados

A continuación, se muestra una tabla con las 16 estaciones (mismas estaciones que se utilizaron en el estudio de Domínguez et al, 2016) junto con los 654 datos usados para llevar a cabo la actualización. Estas estaciones se encuentran en los estados de Chiapas y de Tabasco. En la Tabla 5 se muestra el listado de las estaciones usadas con sus coordenadas. A su vez se detalla un mapa con la ubicación de las estaciones. (Figura 44).

Tabla 5 Localización de las estaciones meteorológicas usadas para la cuenca Teapa.

Numero	N. de Clave	Nombre de la estación	Latitud N	Longitud W
1	7005	Aljandro, Huitiupan	17° 17' 00"	92° 41' 00"
2	7015	Bochil, Bochil	16° 59' 11"	92° 53' 29"
3	7027	Copainala, Copainala	17° 05' 00"	93° 13' 00"
4	7033	Chenalho, Chenalho	16° 54' 00"	92° 36' 00"
5	7125	Oxchuc, Oxchuc	16° 47' 11"	92° 20' 34"
6	7128	Pichucalco (Smn)	17° 31' 00"	93° 07' 00"
7	7147	San Joaquin, Pichucalco	17° 33' 30"	93° 06' 30"
8	7149	San Pedro Chenalho	16° 53' 37"	92° 37' 32"
9	7160	Simojovel De A. (Dge)	17° 08' 24"	92° 42' 51"
10	7167	Tapilula, Tapilula	17° 14' 55"	93° 00' 48"
11	7195	Sabanilla, Sabanilla	17° 17' 09"	92° 33' 10"
12	7198	Simojovel De A. (Smn)	17° 08' 00"	92° 43' 00"
13	7207	Larrainzar, Larrainzar	16° 53' 13"	92° 42' 56"
14	7217	Solosuchiapan	17° 25' 42"	93° 01' 43"
15	7355	Union Zaragoza, Jitotol	17° 04' 54"	92° 51' 04"
16	7360	Luis Espinoza, Tecpatan	17° 08' 54"	93° 25' 25"

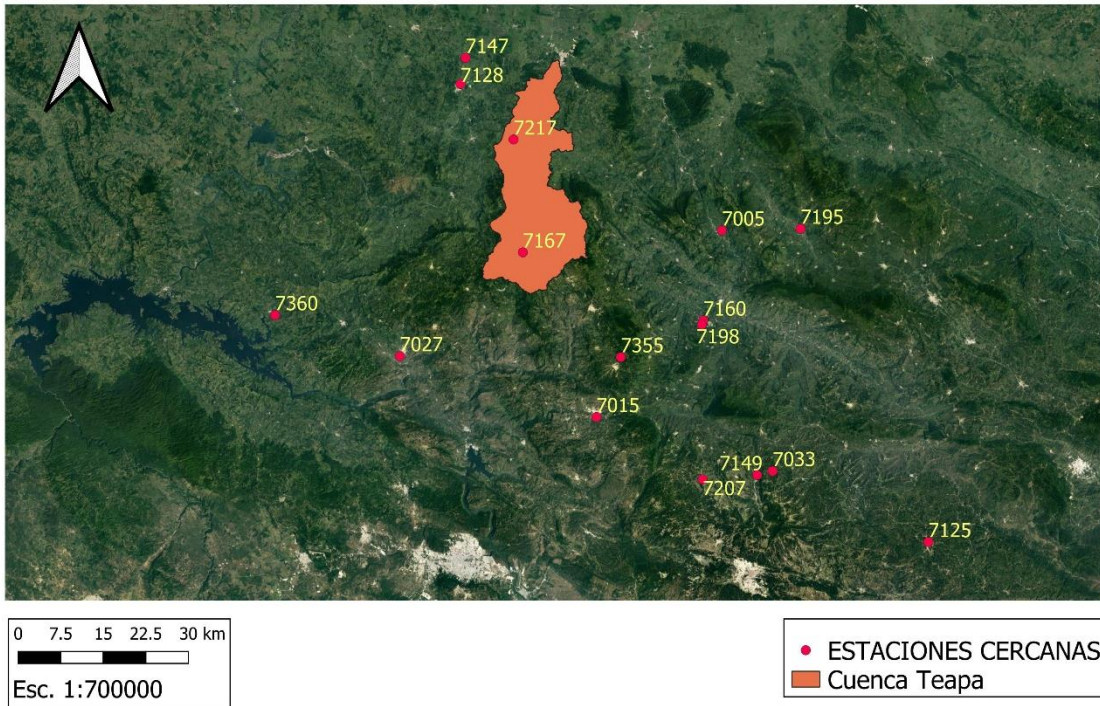


Figura 44 Ubicación de las 16 estaciones meteorológicas para la cuenca Teapa.

Se colocaron los nuevos datos de años reciente y algunos de años pasados que antes no se encontraban disponibles (Ver Tabla 6). A los datos de cada estación se le calcularon la media, desviación estándar, coeficiente de variación, valor mínimo y valor máximo. (Ver Tabla 7). De este mismo registro se procedió a normalizar los datos dividiendo cada uno entre su media y a obtener sus estadísticos (Ver Tabla 8 y 9).



Tabla 6 Registro de las 16 estaciones con los 654 datos de precipitación máxima diaria media anual.

Año/Est.	7005	7015	7027	7033	7125	7128	7147	7149	7160	7167	7195	7198	7207	7217	7355	7360	Años	Promedio
	Almádrigo, Huitiupán	Bochil, Bochil	Copainalá, Copainalá	Chenalho, Chenalho	Oxchuc, Oxchuc	Pichucalco (Smm)	San Joaquín, Pichucalco	San Pedro Chenalho	Simojovel De A. (Dge)	Tapilula, Tapilula	Sabanilla, Sabanilla	Simojovel De A. (Smm)	Larrainzar, Larrainzar	Solosuchiap an	Union Zaragoza, Jitotol	Luis Espinoza, Tecpatán		
1927						90.3						46					2	68.15
1928						56.5						145					2	100.75
1929						93.5						60					2	76.75
1930												40.5					1	40.5
1931						140											1	140
1932																		
1933						91											1	91
1934						72											1	72
1935						98.5											1	98.5
1936						77											1	77
1937						85.5											1	85.5
1938																		
1939						48.5											1	48.5
1940						80.9	40										2	60.45
1941						80	65										2	72.5
1942							86										2	73
1943																	1	90.5
1944						80.5											2	59.1
1945						35.5	47	82									5	78.1
1946						25	49										4	72.45
1947						60	29	51									5	85.2
1948						86	80	36	50								4	100.725
1949							80	57.1									4	93.65
1950						62.5	100	50									5	86.24
1951						72.7	202	60									5	128.8
1952						82.1		100									4	106.95
1953						43.6		75									4	76.275
1954						60	42	70									5	66.96
1955						48	124	64									5	104.72
1956						53.5	60	71.5									5	109.56
1957						54.5	45	80									5	78.06
1958						57.5	60	60									5	107.12
1959						47	80	84									5	110.3
1960						145	60	220									5	126.6
1961						93	75	100									6	114.1
1962						64	36	60									6	98.26
1963						51	106	50									6	102.95
1964						69	55	245.8									5	146.94
1965						68	71.5	65									7	95.82857143
1966						60	78.5	30	100								8	93.5
1967						159	65.5	62.5	247								9	164.3444444
1968						64	79.5	52	107								9	106.6333333
1969						80.8	56.5										10	86.7
1970						117	77										10	112.15
1971						65.5	73.5										8	88.875
1972						78	60										10	104.92
1973						100	127.5										12	139.6333333
1974						130	36										12	141.55
1975						121	36										12	121.1833333
1976						68	70										11	88.27272727
1977						57	60										12	96.85
1978						85	50										12	118.0916667
1979						70.5	28										12	101.0416667
1980						83.5	40										10	97.48
1981						72	59										11	87.52727273
1982						57	73										12	119.7916667
1983						63	58										13	106.6923077
1984						96	87										12	87.125
1985						51.8	96										11	90.60909091
1986						113.6	37										10	111.48
1987						106.9	25.5										12	113.825
1988						77.2	53										13	110.7784615
1989						95.5	80										10	85.09
1990						63	89.9										11	98.82727273
1991						60.3	60										10	92.5
1992						98.8	58										10	118.49
1993						95.3	45.6										10	76.65
1994						51.1	58.9										10	74.74
1995						67.7											9	92.85555556
1996						42.4											9	97.71111111
1997						23.4											9	92.78888889
1998						60.8											9	71.62222222
1999						80.5											10	97.45
2000						65.2											10	121.84
2001						58.4											9	89.08888889
2002						81.4											10	110.68
2003						49.5											9	110.9444444
2004						56.4											10	115.1
2005						52.5											10	97.26
2006						89.9											9	122.4333333
2007						100.2											10	150.83
2008						72.5											10	131.74
2009						62.4											9	117.8222222
2010						84.3											9	183.6666667
2011						87.8											9	126.9444444
2012						107.5											9	125
2013						81.5											10	123.27
2014						55.2											10	113.51
2015						52.2											9	110.1777778
2016						50.8											8	99.2125
2017						88											7	115.9571429
2018																	2	60.1



Tabla 7 Estadísticos muestrales del registro completo de las 16 estaciones.

Año/Est.	7005	7015	7027	7033	7125	7128	7147	7149	7160	7167	7195	7198	7207	7217	7355	7360
	Almádro, Huittipan	Bochil, Bochil	Copainala, Copainala	Chenalho, Chenalho	Oxchuc, Oxchuc	Pichucalco (Smm)	San Joaquín, Pichucalco	San Pedro Chenalho	Simojovel De A. (Dge)	Tapilula, Tapilula	Sabanilla, Sabanilla	Simojovel De A. (Smm)	Larrainzar, Larrainzar	Solosuchiapan	Unión Zaragoza, Jitotol	Luis Espinoza, Tecpatan
Media	84.52	65.18	76.77	77.80	66.88	182.03	176.46	65.85	93.85	144.09	101.74	75.16	68.38	236.50	71.85	150.36
Desv. Est	25.82	22.10	35.55	40.00	16.73	53.37	49.19	19.29	35.43	64.12	39.36	29.70	25.86	59.84	28.75	58.04
Coef. Var.	0.31	0.34	0.46	0.51	0.25	0.29	0.28	0.29	0.38	0.44	0.39	0.40	0.38	0.25	0.40	0.39
Máx	159.00	145.00	202.00	247.00	119.00	290.50	314.20	124.00	209.00	333.20	220.00	145.00	149.50	330.40	183.00	304.40
Mín	51.10	23.40	29.00	38.50	43.50	80.00	94.50	40.00	35.60	62.30	32.00	37.30	35.00	105.00	30.00	60.10
Máx/media	1.88	2.22	2.63	3.17	1.78	1.60	1.78	1.88	2.23	2.31	2.16	1.93	2.19	1.40	2.55	2.02
No años	30	73	30	47	46	38	45	40	50	44	30	33	42	34	35	37

Tabla 8 Datos normalizados del registro completo de las 16 estaciones.

Serie Normalizada																		
Año/Est.	7005	7015	7027	7033	7125	7128	7147	7149	7160	7167	7195	7198	7207	7217	7355	7360	Años	Promedio
	Almádro, Huittipan	Bochil, Bochil	Copainala, Copainala	Chenalho, Chenalho	Oxchuc, Oxchuc	Pichucalco (Smm)	San Joaquín, Pichucalco	San Pedro Chenalho	Simojovel De A. (Dge)	Tapilula, Tapilula	Sabanilla, Sabanilla	Simojovel De A. (Smm)	Larrainzar, Larrainzar	Solosuchiapan	Unión Zaragoza, Jitotol	Luis Espinoza, Tecpatan		
1927			1.176									0.612					2	0.894
1928			0.736									1.929					2	1.333
1929			1.218									0.798					2	1.008
1930												0.539					1	0.539
1931			1.824														1	1.824
1932																		
1933			1.185														1	1.185
1934			0.938														1	0.938
1935			1.283														1	1.283
1936			1.003														1	1.003
1937			1.114														1	1.114
1938																		
1939			0.632														1	0.632
1940			1.054	0.514													2	0.784
1941			1.042	0.835													2	0.939
1942				1.105								0.798					2	0.952
1943												1.204					1	1.204
1944		1.235										0.502					2	0.868
1945		0.545	0.612	1.054		0.923						0.772					5	0.781
1946		0.384		0.630		0.981						0.496					4	0.623
1947		0.921	0.378	0.656		1.228						0.832					5	0.803
1948		1.319		0.670		0.989						1.128					4	1.027
1949			1.042	0.734		1.005						0.725					4	0.877
1950		0.959	1.303	0.643		0.882						0.774					5	0.912
1951		1.115	2.631	0.771		1.296						0.977					5	1.358
1952		1.260		1.285		0.900						1.036					4	1.120
1953		0.669		0.964		0.808						0.526					4	0.742
1954		0.921	0.547	0.900		0.497						0.962					5	0.765
1955		0.736	1.615	0.823		1.247						0.806					5	1.046
1956		0.821	0.782	0.919		1.596						0.962					5	1.016
1957		0.836	0.586	1.038		0.865						0.710					5	0.805
1958		0.882	0.782	0.771		1.572						0.957					5	0.993
1959		0.721	1.042	1.080		1.294						1.397					5	1.107
1960		2.225	0.782	2.828		0.700						1.071					5	1.521
1961		1.427	0.977	1.285		1.003						1.597					5	1.258
1962		0.982	0.469	0.771		1.395	0.670					0.762					6	0.842
1963		0.782	1.368	0.643		1.030	0.882					0.913					6	0.986
1964		1.059		0.707		1.350	1.286					1.835					5	1.247
1965	0.805	1.097		0.835		1.060	0.803			0.556		0.685					7	0.834
1966	0.710	1.204	0.391	1.285		0.585	0.946			0.670		1.457					8	0.906
1967	1.881	1.005	0.814	3.175		1.308	1.664	1.321		1.360		1.736					9	1.585
1968	0.757	1.220	0.677	1.375		0.794	1.259	0.721		0.972		1.370					9	1.016
1969	0.956	0.867		1.228	0.920	0.683	0.737	0.888	0.547	1.092		0.683					10	0.860
1970	1.384	1.181		1.125	1.166	0.928	0.924	1.329	1.152	0.871		1.449					10	1.151
1971	0.775	1.128		1.163	1.166	0.926	1.374	0.623	0.597								8	0.969
1972	0.923	0.921		0.495	1.002	1.288	1.067	0.843	0.745	0.837	1.347						10	0.947
1973	1.183	1.956		0.893	0.897	0.700	1.166	1.055	0.911	2.221	1.617		1.389	1.061			12	1.254
1974	1.538	0.552		1.283	0.912	1.264	1.305	1.516	0.852	1.395	1.305		1.712	1.187			12	1.235
1975	1.432	0.552		1.050	1.196	0.948	0.675	1.241	1.044	0.854	1.435		1.436	1.255			12	1.093
1976	0.805	1.074		0.546	0.659	0.724	0.645	0.751	0.632	0.983	0.983		0.984	0.725			11	0.775
1977	0.674	0.921		0.630	1.051	0.439	1.021	0.949	0.852	0.878	0.909		0.698	1.085			12	0.842
1978	1.006	0.767		0.550	1.196	0.632	1.210	1.388	0.858	1.175	1.177		0.646	1.376			12	0.999
1979	0.834	0.430		0.771	1.002	0.731	1.074	0.911	0.709	1.548	1.038		0.518	0.736			12	0.858
1980	0.988	0.614		0.632	0.763		1.408	1.043	0.852		0.939		0.708	0.888			10	0.883
1981	0.852	0.905		0.622	0.837	0.892	0.859	0.735	0.746	0.786		0.894	0.651				11	0.798
1982	0.674	1.120		0.634		1.286	1.209	0.749	0.852	0.590		0.512	1.364	1.392	1.091		12	0.956
1983	0.745	0.890		1.281	0.778	1.318	0.536	1.514	0.698	0.789		2.186	1.000	1.016	0.500		13	1.019
1984	1.136	1.335		0.902	0.830		0.649	1.066	0.911		0.973		0.892	0.712	0.835	0.519	12	0.897
1985	0.613	1.473			0.897		1.781	0.773	0.629	0.315		1.385	0.444	1.016	0.400	11	0.884	
1986	1.344	0.568		0.964	0.897		0.840	0.987	0.906			0.879	0.891		1.729	10	1.001	
1987	1.265	0.391		1.064	0.680		0.721	1.257	1.747	1.378		0.983	0.587	1.392	1.506	12	1.081	
1988	0.913	0.813		0.951	0.718		1.303	0.945	1.161	0.450	0.988	0.664	1.184	0.974	1.503	13	0.967	
1989	1.130	1.227			0.942		0.731	1.043	0.746		0.983	0.727		0.974	0.831	10	0.933	
1990	1.064	0.967		1.928			0.833	1.447	0.495	0.825	1.750		0.763	0.561	0.705	11	1.031	
1991	0.713	0.921			0.755		0.816	0.891	1.284	1.116	0.786			0.977	0.798	10	0.906	
1992	1.169	0.890			0.650		0.888	1.444	2.313	1.027		0.844		1.116	1.430	10	1.177	
1993	1.127	0.700			0.703		0.863	1.044	0.496	0.639		0.639		0.668	1.301	10	0.818	
1994	0.605	0.904			0.792		0.699	1.598	0.500	1.081		0.521		1.115	0.603	10	0.842	
1995		1.039			1.323		1.033	1.918	0.697	0.921		0.860		0.838	0.787	9	1.046	
1996		0.651			1.533		0.729	1.385	1.287	0.973		0.964		0.977	0.904	9	1.045	
1997		0.359			0.927		0.835	1.012	1.280	2.162		0.768		0.821	0.557	9	0.969	
1998		0.933			0.897		0.638	1.199	0.432	0.598		0.841		0.445	1.042	9	0.781	
1999		1.235			0.972		0.942	1.065	0.584	0.865		0.955	0.859	0.418	1.306	10	0.920	
2000		1.000			1.196		1.040	0.863	0.930	0.472		0.945	1.354	0.731	2.024	10	1.056	
2001		0.896			0.849		0.867	0.987	1.428	0.881								



Tabla 9 Estadísticos muestrales de los datos normalizados del registro completo de las 16 estaciones.

	7005	7015	7027	7033	7125	7128	7147	7149	7160	7167	7195	7198	7207	7217	7355	7360
	Almandro, Huitiupán	Bochil, Bochil	Copainala, Copainala	Chenalho, Chenalho	Oxchuc, Oxchuc	Pichucalco (Smm)	San Joaquín, Pichucalco	San Pedro Chenalho	Simojovel De A. (Dge)	Tapilula, Tapilula	Sabanilla, Sabanilla	Simojovel De A. (Smm)	Larrainzar, Larrainzar	Solosuchiapan	Unión Zaragoza, Jitotol	Luis Espinoza, Tecpatán
Media	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Desv. Est	0.31	0.34	0.46	0.51	0.25	0.29	0.28	0.29	0.38	0.44	0.39	0.40	0.38	0.25	0.40	0.39
Coef.Var.	0.31	0.34	0.46	0.51	0.25	0.29	0.28	0.29	0.38	0.44	0.39	0.40	0.38	0.25	0.40	0.39
Máx	1.88	2.22	2.63	3.17	1.78	1.60	1.78	1.88	2.23	2.31	2.16	1.93	2.19	1.40	2.55	2.02
Min	0.60	0.36	0.38	0.49	0.65	0.44	0.54	0.61	0.38	0.43	0.31	0.50	0.51	0.44	0.42	0.40
Máx/media	1.881	2.225	2.631	3.175	1.779	1.596	1.781	1.883	2.227	2.313	2.162	1.929	2.186	1.397	2.547	2.024
K de Hershfield	2.884	3.612	3.523	4.230	3.116	2.032	2.800	3.014	3.250	2.950	3.004	2.351	3.136	1.569	3.866	2.654
No años	30	73	30	47	46	38	45	40	50	44	30	33	42	34	35	37

A partir de este registro normalizado se hizo una única serie continua de los 654 valores, ordenándolos de mayor a menor. (Ver Tabla 10 y 11).

Tabla 10 Serie de los 654 datos normalizados ordenados de mayor a menor. Parte 1

m	No ordenado	Ordenado (Medido)	m	No ordenado	Ordenado (Medido)	m	No ordenado	Ordenado (Medido)	m	No ordenado	Ordenado (Medido)	m	No ordenado	Ordenado (Medido)
1	0.805	3.175	67	0.905	1.408	133	0.677	1.264	199	0.942	1.097	265	0.670	1.004
2	0.710	2.828	68	1.120	1.397	134	0.514	1.260	200	0.755	1.095	266	0.882	1.004
3	1.881	2.631	69	0.890	1.397	135	0.835	1.259	201	0.650	1.095	267	1.286	1.003
4	0.757	2.547	70	1.335	1.395	136	1.105	1.257	202	0.703	1.093	268	0.803	1.003
5	0.956	2.313	71	1.473	1.395	137	1.054	1.255	203	0.792	1.092	269	0.946	1.002
6	1.384	2.227	72	0.568	1.392	138	0.630	1.254	204	1.323	1.092	270	1.664	1.002
7	0.775	2.225	73	0.391	1.392	139	0.656	1.252	205	1.533	1.091	271	1.259	1.002
8	0.923	2.221	74	0.813	1.389	140	0.670	1.250	206	0.927	1.087	272	0.737	1.002
9	1.183	2.186	75	1.227	1.388	141	0.734	1.249	207	0.897	1.085	273	0.924	1.000
10	1.538	2.162	76	0.967	1.385	142	0.643	1.247	208	0.972	1.081	274	1.067	1.000
11	1.432	2.126	77	0.921	1.385	143	0.771	1.241	209	1.196	1.081	275	1.166	0.992
12	0.805	2.024	78	0.890	1.384	144	1.285	1.235	210	0.849	1.080	276	1.305	0.990
13	0.674	1.956	79	0.700	1.379	145	0.964	1.235	211	0.728	1.076	277	0.675	0.989
14	1.006	1.929	80	0.904	1.378	146	0.900	1.228	212	1.006	1.074	278	0.724	0.988
15	0.834	1.928	81	1.039	1.376	147	0.823	1.228	213	0.979	1.074	279	1.021	0.988
16	0.988	1.918	82	0.651	1.375	148	0.919	1.227	214	1.020	1.072	280	1.210	0.987
17	0.852	1.883	83	0.359	1.374	149	1.028	1.220	215	1.144	1.071	281	1.074	0.987
18	0.674	1.881	84	0.933	1.372	150	0.771	1.218	216	0.942	1.067	282	1.408	0.984
19	0.745	1.835	85	1.235	1.370	151	1.080	1.211	217	1.308	1.067	283	0.859	0.983
20	1.136	1.824	86	1.000	1.368	152	2.828	1.210	218	0.957	1.066	284	1.209	0.983
21	0.613	1.781	87	0.896	1.367	153	1.285	1.209	219	1.779	1.065	285	0.536	0.983
22	1.344	1.779	88	1.249	1.364	154	0.771	1.209	220	1.450	1.064	286	0.649	0.982
23	1.265	1.750	89	0.759	1.360	155	0.643	1.204	221	0.760	1.064	287	1.781	0.981
24	0.913	1.747	90	0.865	1.354	156	0.707	1.204	222	1.092	1.061	288	0.840	0.979
25	1.130	1.740	91	0.805	1.353	157	0.835	1.199	223	0.912	1.060	289	0.721	0.977
26	1.064	1.736	92	1.379	1.350	158	1.285	1.196	224	0.812	1.059	290	1.303	0.977
27	0.713	1.736	93	1.537	1.350	159	3.175	1.196	225	1.038	1.057	291	0.731	0.977
28	1.169	1.729	94	1.112	1.347	160	1.375	1.196	226	1.625	1.055	292	0.833	0.977
29	1.127	1.712	95	0.957	1.347	161	1.228	1.187	227	0.923	1.054	293	0.816	0.974
30	0.605	1.708	96	1.293	1.344	162	1.125	1.185	228	0.981	1.054	294	0.867	0.974
31	1.235	1.673	97	1.347	1.343	163	1.163	1.184	229	1.228	1.051	295	1.099	0.974
32	0.545	1.664	98	1.649	1.339	164	0.495	1.183	230	0.989	1.050	296	0.777	0.974
33	0.384	1.649	99	1.250	1.339	165	0.893	1.183	231	1.005	1.044	297	0.941	0.973
34	0.921	1.640	100	1.316	1.335	166	1.283	1.181	232	0.882	1.044	298	0.799	0.973
35	1.319	1.626	101	0.847	1.329	167	1.050	1.177	233	1.296	1.043	299	0.763	0.973
36	0.959	1.625	102	0.779	1.327	168	0.546	1.176	234	0.900	1.043	300	1.072	0.972
37	1.115	1.617	103	1.350	1.323	169	0.630	1.175	235	0.808	1.042	301	1.183	0.972
38	1.260	1.615	104	1.176	1.321	170	0.550	1.170	236	0.497	1.042	302	0.891	0.967
39	0.669	1.598	105	0.736	1.319	171	0.771	1.169	237	1.247	1.042	303	1.339	0.967
40	0.921	1.597	106	1.218	1.318	172	0.632	1.166	238	1.596	1.042	304	1.009	0.964
41	0.736	1.596	107	1.824	1.316	173	0.622	1.166	239	0.865	1.040	305	1.367	0.964
42	0.821	1.583	108	1.185	1.308	174	0.634	1.166	240	1.572	1.039	306	1.339	0.964
43	0.836	1.572	109	0.938	1.308	175	1.281	1.166	241	1.294	1.038	307	0.785	0.963
44	0.882	1.548	110	1.283	1.306	176	0.902	1.163	242	0.700	1.038	308	0.963	0.962
45	0.721	1.538	111	1.003	1.305	177	0.964	1.161	243	1.003	1.036	309	0.707	0.962
46	2.225	1.537	112	1.114	1.305	178	1.064	1.159	244	1.395	1.033	310	1.321	0.959
47	1.427	1.533	113	0.632	1.303	179	0.951	1.152	245	1.030	1.030	311	0.721	0.957
48	0.982	1.516	114	1.054	1.303	180	1.928	1.144	246	1.350	1.028	312	0.888	0.957
49	0.782	1.514	115	1.042	1.301	181	0.920	1.136	247	1.060	1.028	313	1.329	0.957
50	1.059	1.506	116	0.612	1.296	182	1.166	1.130	248	0.585	1.028	314	1.374	0.956
51	1.097	1.503	117	0.378	1.294	183	1.166	1.128	249	1.308	1.027	315	0.843	0.955
52	1.204	1.499	118	1.042	1.293	184	1.002	1.128	250	0.794	1.024	316	1.055	0.951
53	1.005	1.479	119	1.303	1.288	185	0.897	1.127	251	0.683	1.021	317	1.516	0.949
54	1.220	1.473	120	2.631	1.287	186	0.912	1.125	252	0.928	1.020	318	1.241	0.949
55	0.867	1.457	121	0.547	1.286	187	1.196	1.120	253	0.926	1.016	319	0.645	0.948
56	1.181	1.450	122	1.615	1.286	188	1.051	1.119	254	1.288	1.016	320	0.949	0.946
57	1.128	1.449	123	0.782	1.285	189	1.196	1.116	255	0.700	1.016	321	1.388	0.945
58	0.921	1.447	124	0.586	1.285	190	1.002	1.116	256	1.264	1.015	322	0.911	0.945
59	1.956	1.444	125	0.782	1.285	191	0.763	1.115	257	0.948	1.014	323	1.043	0.945
60	0.552	1.436	126	1.042	1.284	192	0.837	1.115	258	0.659	1.013	324	0.735	0.942
61	0.552	1.435	127	0.782	1.283	193	0.778	1.114	259	0.439	1.012	325	0.749	0.942
62	1.074	1.432	128	0.977	1.283	194	0.830	1.113	260	0.632	1.009	326	1.514	0.942
63	0.921	1.430	129	0.469	1.281	195	0.897	1.112	261	0.731	1.006	327	1.066	0.941
64	0.767	1.428	130	1.368	1.280	196	0.897	1.110	262	0.892	1.006	328	0.773	0.939
65	0.430	1.427	131	0.391	1.268	197	0.680	1.105	263	1.286	1.005	329	0.987	0.938
66	0.614	1.420	132	0.814	1.265	198	0.718	1.099	264	1.318	1.005	330	1.257	0.933



Tabla 11 Serie de los 654 datos normalizados ordenados de mayor a menor. Parte 2

m	NO ordenado	Ordenado o(Medido)	m	NO ordenado	Ordenado o(Medido)	m	NO ordenado	Ordenado o(Medido)	m	NO ordenado	Ordenado o(Medido)	m	NO ordenado	Ordenado o(Medido)
331	0.945	0.931	397	0.572	0.867	463	0.639	0.794	529	0.964	0.708	595	0.838	0.603
332	1.043	0.930	398	0.615	0.867	464	1.081	0.792	530	0.768	0.707	596	0.977	0.598
333	1.447	0.930	399	0.379	0.865	465	0.921	0.791	531	0.841	0.707	597	0.821	0.597
334	0.891	0.928	400	0.556	0.865	466	0.973	0.789	532	0.955	0.705	598	0.445	0.590
335	0.888	0.927	401	0.670	0.865	467	2.162	0.787	533	0.945	0.703	599	0.418	0.587
336	0.863	0.926	402	1.360	0.863	468	0.598	0.786	534	1.353	0.700	600	0.731	0.587
337	0.699	0.924	403	0.972	0.863	469	0.865	0.786	535	0.834	0.700	601	0.839	0.586
338	1.033	0.923	404	1.092	0.863	470	0.472	0.785	536	0.834	0.700	602	0.907	0.585
339	0.729	0.923	405	0.871	0.860	471	0.727	0.782	537	0.915	0.700	603	0.557	0.584
340	0.835	0.922	406	0.597	0.859	472	0.657	0.782	538	1.024	0.699	604	0.949	0.573
341	0.638	0.921	407	0.837	0.859	473	1.170	0.782	539	1.095	0.699	605	0.974	0.572
342	0.942	0.921	408	2.221	0.858	474	0.612	0.782	540	1.626	0.698	606	0.835	0.571
343	1.040	0.921	409	1.395	0.854	475	1.929	0.779	541	1.028	0.698	607	1.673	0.568
344	0.987	0.921	410	0.854	0.852	476	0.798	0.778	542	1.076	0.697	608	0.906	0.563
345	0.638	0.921	411	0.632	0.852	477	0.539	0.777	543	2.126	0.696	609	0.863	0.561
346	0.607	0.921	412	0.878	0.852	478	0.798	0.775	544	0.967	0.694	610	2.547	0.557
347	0.699	0.920	413	1.175	0.852	479	1.204	0.774	545	1.095	0.693	611	0.974	0.557
348	1.883	0.919	414	1.548	0.852	480	0.502	0.773	546	0.905	0.685	612	0.835	0.556
349	0.887	0.915	415	1.378	0.849	481	0.772	0.772	547	0.992	0.683	613	1.740	0.552
350	0.547	0.913	416	0.450	0.847	482	0.496	0.771	548	0.819	0.683	614	0.696	0.552
351	1.152	0.913	417	0.825	0.844	483	0.832	0.771	549	1.061	0.680	615	1.113	0.550
352	0.623	0.912	418	1.116	0.843	484	1.128	0.771	550	1.187	0.678	616	0.905	0.547
353	0.745	0.912	419	2.313	0.841	485	0.725	0.771	551	1.255	0.677	617	1.420	0.547
354	0.911	0.911	420	0.496	0.840	486	0.774	0.770	552	0.725	0.675	618	1.091	0.546
355	0.852	0.911	421	0.500	0.839	487	0.977	0.768	553	1.085	0.674	619	0.500	0.545
356	1.044	0.911	422	0.697	0.838	488	1.036	0.767	554	1.376	0.674	620	0.519	0.539
357	0.751	0.909	423	1.287	0.837	489	0.526	0.763	555	0.736	0.670	621	0.400	0.536
358	0.852	0.907	424	1.280	0.837	490	0.962	0.763	556	0.888	0.670	622	1.729	0.530
359	0.858	0.906	425	0.432	0.836	491	0.806	0.763	557	0.651	0.670	623	1.506	0.529
360	0.709	0.906	426	0.584	0.835	492	0.962	0.762	558	1.364	0.669	624	1.503	0.526
361	0.852	0.905	427	0.930	0.835	493	0.710	0.760	559	1.000	0.668	625	0.831	0.521
362	0.746	0.905	428	0.881	0.835	494	0.957	0.759	560	0.712	0.664	626	0.705	0.519
363	0.852	0.905	429	0.530	0.835	495	1.397	0.757	561	0.444	0.659	627	0.798	0.518
364	0.698	0.904	430	0.659	0.835	496	1.071	0.755	562	0.891	0.659	628	1.430	0.514
365	0.911	0.904	431	0.529	0.835	497	1.597	0.751	563	0.587	0.657	629	1.301	0.512
366	0.629	0.902	432	1.479	0.834	498	0.762	0.749	564	1.184	0.656	630	0.603	0.502
367	0.906	0.900	433	1.583	0.834	499	0.913	0.746	565	0.859	0.651	631	0.787	0.500
368	1.747	0.900	434	1.014	0.834	500	1.835	0.746	566	1.354	0.651	632	0.904	0.500
369	1.161	0.897	435	0.945	0.833	501	0.685	0.745	567	1.057	0.650	633	0.557	0.497
370	0.746	0.897	436	1.736	0.833	502	1.457	0.745	568	1.372	0.649	634	1.042	0.496
371	0.495	0.897	437	0.833	0.833	503	1.736	0.737	569	1.159	0.646	635	1.306	0.496
372	1.284	0.897	438	1.004	0.832	504	1.370	0.736	570	1.268	0.645	636	2.024	0.495
373	1.444	0.896	439	0.573	0.831	505	0.683	0.736	571	0.869	0.645	637	0.717	0.495
374	1.044	0.894	440	1.499	0.830	506	1.449	0.736	572	0.693	0.643	638	0.931	0.472
375	1.598	0.893	441	0.811	0.825	507	1.389	0.735	573	1.397	0.643	639	1.015	0.469
376	1.918	0.892	442	0.812	0.823	508	1.712	0.734	574	1.004	0.639	640	1.640	0.450
377	1.385	0.892	443	1.166	0.821	509	1.436	0.731	575	1.211	0.639	641	0.587	0.445
378	1.012	0.892	444	1.347	0.821	510	0.984	0.731	576	0.973	0.638	642	1.093	0.444
379	1.199	0.891	445	1.617	0.819	511	0.698	0.731	577	0.833	0.638	643	1.327	0.439
380	1.065	0.891	446	1.305	0.816	512	0.646	0.729	578	1.209	0.634	644	1.013	0.432
381	0.863	0.891	447	1.435	0.815	513	0.518	0.728	579	1.002	0.632	645	1.087	0.430
382	1.428	0.890	448	0.983	0.814	514	0.708	0.727	580	0.930	0.632	646	1.252	0.418
383	1.081	0.890	449	0.909	0.813	515	0.894	0.727	581	0.892	0.632	647	1.254	0.400
384	1.002	0.888	450	1.177	0.812	516	0.512	0.725	582	0.770	0.632	648	0.990	0.391
385	0.815	0.888	451	1.038	0.812	517	2.186	0.725	583	1.392	0.630	649	1.028	0.391
386	0.645	0.888	452	0.939	0.811	518	0.892	0.724	584	1.016	0.630	650	0.571	0.384
387	0.884	0.887	453	0.786	0.808	519	1.385	0.721	585	0.835	0.629	651	1.016	0.379
388	2.227	0.884	454	0.590	0.806	520	0.879	0.721	586	1.016	0.623	652	0.678	0.378
389	1.343	0.882	455	0.789	0.805	521	0.983	0.721	587	1.392	0.622	653	0.700	0.359
390	1.110	0.882	456	0.973	0.805	522	0.664	0.718	588	0.974	0.615	654	0.563	0.315
391	1.708	0.882	457	0.315	0.805	523	0.727	0.717	589	0.974	0.614			
392	1.119	0.881	458	0.988	0.803	524	0.763	0.713	590	0.561	0.613			
393	1.067	0.879	459	0.983	0.799	525	0.844	0.712	591	0.977	0.612			
394	0.694	0.878	460	1.750	0.798	526	0.639	0.710	592	1.116	0.612			
395	0.791	0.871	461	0.786	0.798	527	0.521	0.710	593	0.668	0.607			
396	0.922	0.869	462	1.027	0.798	528	0.860	0.709	594	1.115	0.605			



A estos valores se les ajustaron las funciones de probabilidad de Gumbel y Doble Gumbel en el fin de observar cuál de las funciones se ajustaba mejor a los datos normalizados, estos ajustes fueron realizados con ayuda del programa Ax (Jiménez, 1997)

En el caso de la función Gumbel (Figura 45) se observó que se ajustaba a los valores iniciales, pero a medida que se incrementaban la recta no se ajustaba a ellos, esto puede deberse a que estos valores extremos correspondan a algún evento extraordinario.

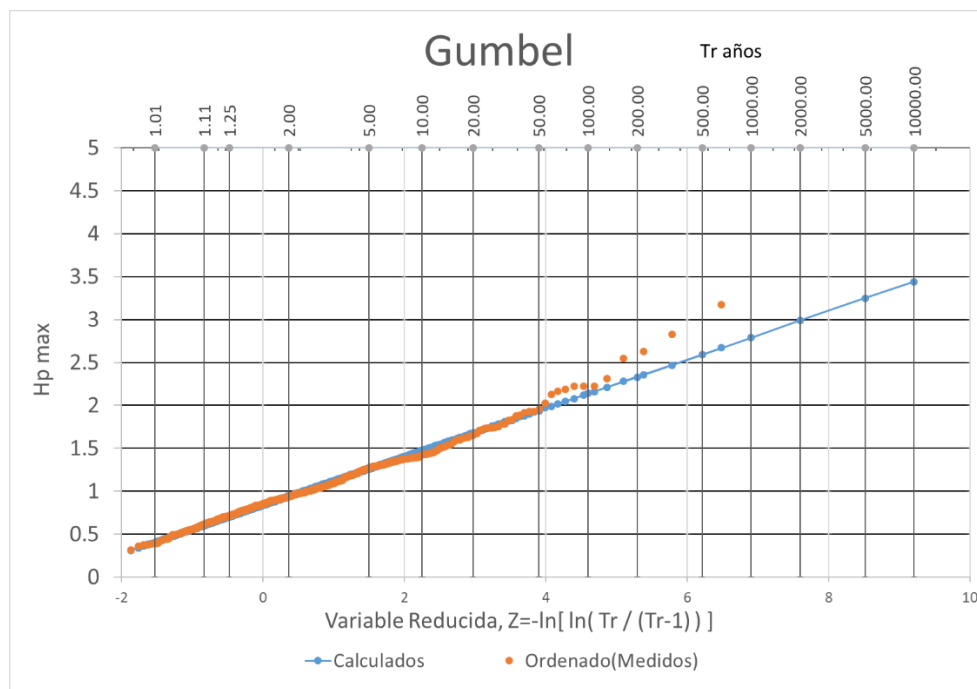


Figura 45 Función de distribución de Gumbel ajustada a los máximos anuales normalizados.

La distribución Doble Gumbel también se ajustó a la primera sección de la recta (Figura 46) pero a diferencia de la primera, aquí se ajustó más los valores extremos formando una ligera pendiente adaptándose mejor a los valores más grandes. Esta función fue calculada tomando una $P = .8$ lo que representa que un 80% de los datos pertenece a una sola población.

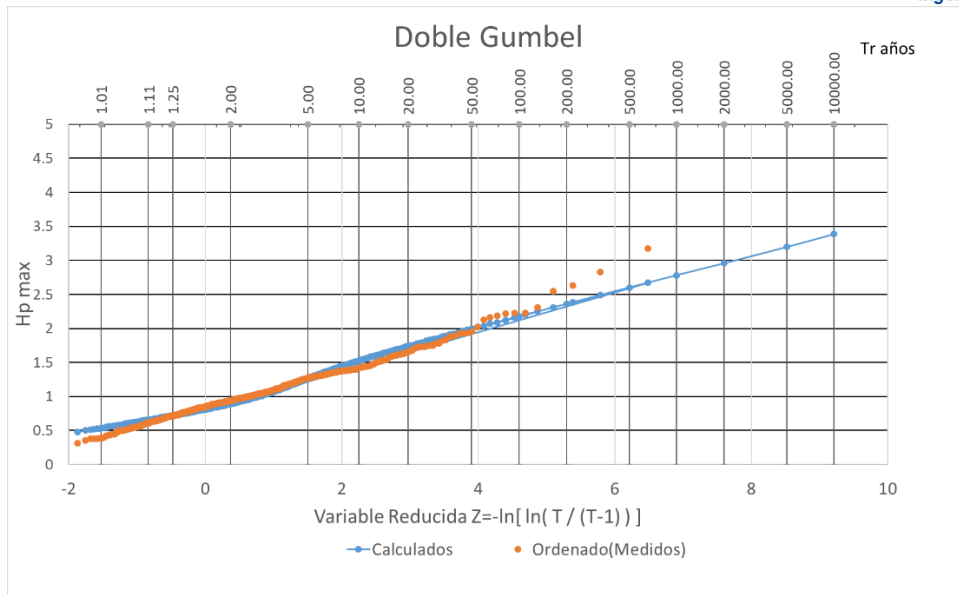


Figura 46 Función de distribución Doble Gumbel con $P=0.8$ ajustada a los máximos anuales normalizados.

Se realizaron varias pruebas con la función Doble Gumbel cambiando el valor de la P para lograr un mejor ajuste (Ver Figura 47). Hasta que se llegó a utilizar una $P=.985$ con la que se tuvo un ajuste muy cercano a los datos medidos.

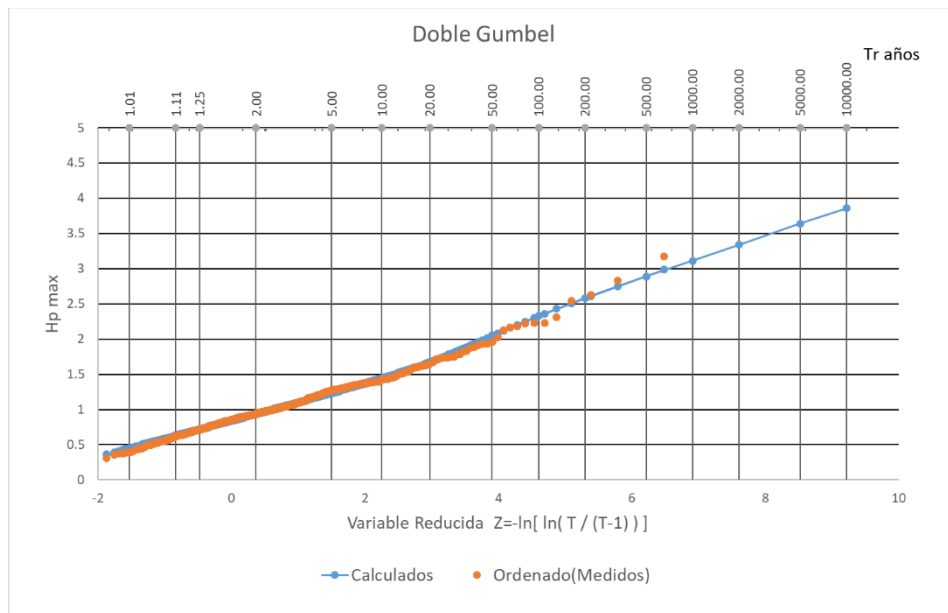


Figura 47 Función de distribución Doble Gumbel con $P=0.985$ ajustada a los máximos anuales normalizados



De estos ajustes se obtuvieron los factores por periodo de retorno (ver Tabla 12) donde se concluye que el mejor ajuste se tuvo como la Doble Gumbel, con una $P=0.985$

Tabla 12 Factores obtenidos por la aplicación de las funciones de distribución.

Gumbel	(momentos)	Doble Gumbel (P.8)	(momentos)	Doble Gumbel (P .985)	(momentos)
10000	3.44	10000	3.39	10000	3.86
5000	3.25	5000	3.2	5000	3.64
2000	2.99	2000	2.96	2000	3.34
1000	2.79	1000	2.78	1000	3.11
500	2.59	500	2.6	500	2.89
200	2.33	200	2.36	200	2.58
100	2.14	100	2.18	100	2.33
50	1.94	50	1.99	50	2.05
20	1.68	20	1.74	20	1.67
10	1.47	10	1.53	10	1.44
5	1.26	5	1.26	5	1.23
2	0.94	2	0.89	2	0.94
EE=	0.037	EE=	0.058	EE=	0.023

Los últimos factores que se tenían para la cuenca Teapa son mayores que los ahora obtenidos (Ver Tabla 13) puede haber varios motivos para que suceda esto, una de las principales razones es que en los años más recientes las lluvias máximas anuales no han sido tan grandes en comparación a las de años pasados llegando incluso a que algunas sean menores a la media que se tiene registrada.

Tabla 13 Comparación de factores actuales respecto a los últimos obtenidos.

Doble Gumbel (P .985)	(momentos)	DG CENAPRED Tomo II
10000	3.86	4.36
5000	3.64	4.06
2000	3.34	3.69
1000	3.11	3.4
500	2.89	3.11
200	2.58	2.74
100	2.33	2.45
50	2.05	2.16
20	1.67	1.77
10	1.44	1.48
5	1.23	1.23
2	0.94	0.91



Mapa de las medias históricas.

Después de analizar los datos de las 16 estaciones y teniendo la media de las lluvias diarias máximas anuales de cada estación se realizó el mapa de isoyetas de la cuenca Teapa.

En la Tabla 14 se muestra el listado de las estaciones junto con su media de las precipitaciones máximas anuales (hpmax).

Tabla 14 Lista de las 16 estaciones con su precipitación diaria máxima anual.

Numero	N. de Clave	Nombre de la estación	Laltitud N	Longitud W	hp max mm
1	7005	Aljandro, Huitiupan	17° 17' 00"	92° 41' 00"	84.52
2	7015	Bochil, Bochil	16° 59' 11"	92° 53' 29"	65.18
3	7027	Copainala, Copainala	17° 05' 00"	93° 13' 00"	76.77
4	7033	Chenalho, Chenalho	16° 54' 00"	92° 36' 00"	82.27
5	7125	Oxchuc, Oxchuc	16° 47' 11"	92° 20' 34"	66.88
6	7128	Pichucalco (Smn)	17° 31' 00"	93° 07' 00"	182.03
7	7147	San Joaquin, Pichucalco	17° 33' 30"	93° 06' 30"	176.46
8	7149	San Pedro Chenalho	16° 53' 37"	92° 37' 32"	65.85
9	7160	Simojovel De A. (Dge)	17° 08' 24"	92° 42' 51"	93.85
10	7167	Tapilula, Tapilula	17° 14' 55"	93° 00' 48"	148.18
11	7195	Sabanilla, Sabanilla	17° 17' 09"	92° 33' 10"	101.74
12	7198	Simojovel De A. (Smn)	17° 08' 00"	92° 43' 00"	75.16
13	7207	Larrainzar, Larrainzar	16° 53' 13"	92° 42' 56"	68.38
14	7217	Solosuchiapan	17° 25' 42"	93° 01' 43"	238.40
15	7355	Union Zaragoza, Jitotol	17° 04' 54"	92° 51' 04"	71.85
16	7360	Luis Espinoza, Tecpatan	17° 08' 54"	93° 25' 25"	150.36

El mapa de las medias de las hp anuales máximas históricas se realizó con el programa Qgis que es un Sistema de Información Geográfica de uso libre, los datos fueron cargados al programa donde se genera un archivo de tipo ráster en cual se aplica el método del inverso de la distancia al cuadrado (IDW).

Ya con el archivo raster se pueden generar las isoyetas (Ver Figura 48), las cuales unen los puntos de igual altura de precipitación media, para este caso las líneas están separadas cada 10 mm.

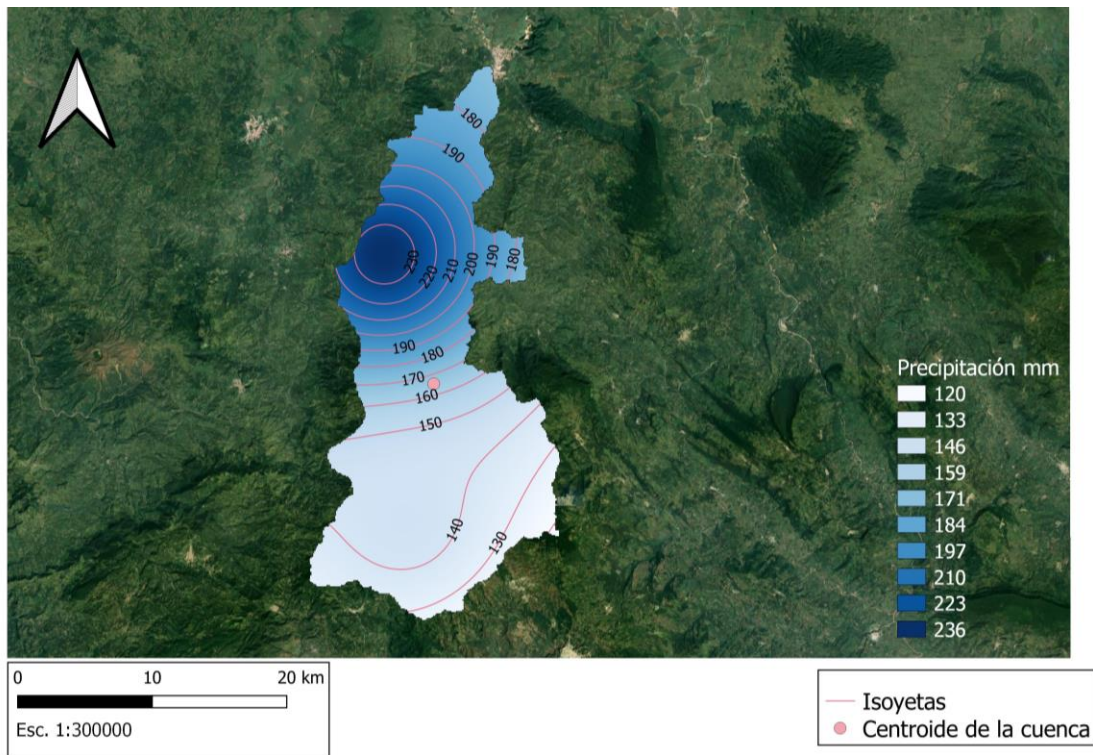


Figura 48 Mapa de las medias históricas de las hp anuales máximas.

El mapa anterior en comparación con el mapa de Distribución de las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales en la República Mexicana (ver figura 7) del estudio realizado para el CENAPRED (Domínguez, R et al. 2017) se tienen valores de precipitación muy similares para la misma zona donde se tienen valores entre 247.26 mm como máximo y 135.57 mm como mínimo, mientras que el mapa de las medias de la cuenca Teapa (Figura 48) se encuentran entre 236 mm y 120 mm.

Hietogramas.

Para la elaboración del histograma se usaron los factores obtenidos por el ajuste de la función doble Gumbel con un $P = 0.985$. Como h_p media histórica en mm se tomó el valor de 168.5 que corresponde a la precipitación del centroide de la cueca haciendo uso del mapa de las medias históricas de las h_p anuales máximas creado, (Figura 48). Este valor fue multiplicado por el factor que corresponde a un periodo de retorno de 2 años para así tener la precipitación asociada a 2 años. Este nuevo valor se multiplica por el FRA obtenido previamente para así tener la precipitación



de 24 horas corregida asociado a 2 años. Este resultado ahora se multiplica por el factor de convectividad de la zona el cual es de 0.45 y así se obtiene la precipitación asociada una hora de duración. Posteriormente este resultado es multiplicado por diferentes factores con respecto a una hora (Ver Tabla 3) con duraciones de 30 min de diferencia, para este caso se aplicó desde 30 minutos hasta 240 minutos, cabe recalcar que este proceso puede hacerse para modelar tormentas con duraciones de hasta 24 horas.

En la Tabla 15 se encuentran factores y precipitaciones resultado de las operaciones y procesos descritos el párrafo anterior.

Tabla 15 Factores utilizados para la creación del hietograma con periodo de retorno de 2 años.

FRA	0.69
Hp media anual mm	165.00
Factor de regionalizacion Teapa Tr 2 años	0.94
Precipitación de 24 hrs asociada a Tr 2 años (mm)	155.10
Precipitación de 24 hrs asociada a Tr 2 años (mm) corregida	106.32
Factor de convectividad de la zona	0.45
precipitación en 1 h mm	47.84

Teniendo los nuevos valores de precipitación asociada a diferentes duraciones se determina su incremento respecto al anterior, estos incrementos son acomodados usando el método de bloques alternos (Tabla 16). De esta columna se toman los valores para crear el hietograma (Figura 49).

Tabla 16 Valores resultantes de operación con factores para cálculo de hietograma

Duración minutos	Factor respecto a una hora	Precipitación acumulada mm	Incremento mm	Valores ordenados mm
30	0.79	37.80	37.80	2.39
60	1	47.84	10.05	3.83
90	1.13	54.06	6.22	6.22
120	1.22	58.37	4.31	37.80
150	1.3	62.20	3.83	10.05
180	1.35	64.59	2.39	4.31
210	1.41	67.46	2.87	2.87
240	1.45	69.37	1.91	1.91

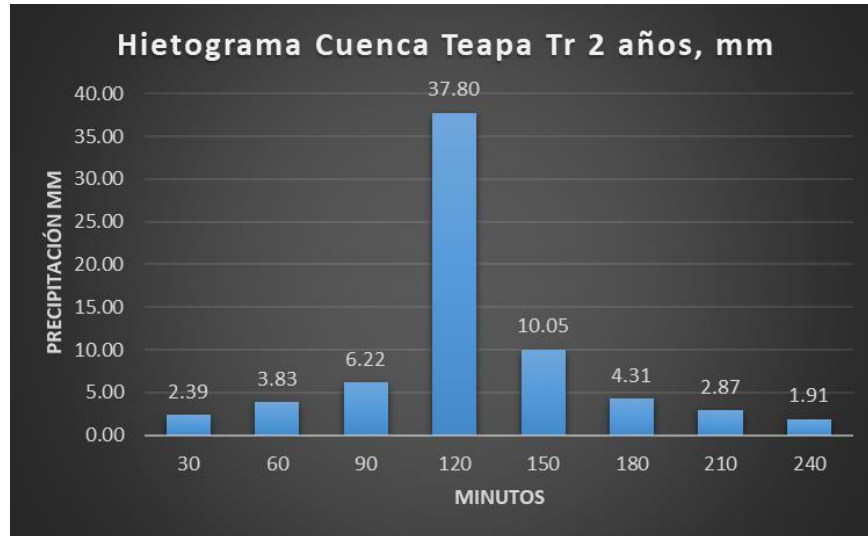


Figura 49 Hietograma con periodo de retorno de 2 años

Este proceso se repite si se desea conocer los hietogramas para otros periodos de retorno; solo se cambia el uso del factor regional por el que este asociado con el periodo que se desea conocer, estos pueden ser periodos de 2,5,10,20,50,100,200,500,1000,2000,5000 y 10000 años. En las siguientes gráficas se muestran algunos de los hietogramas obtenidos (Figuras 50 - 53).

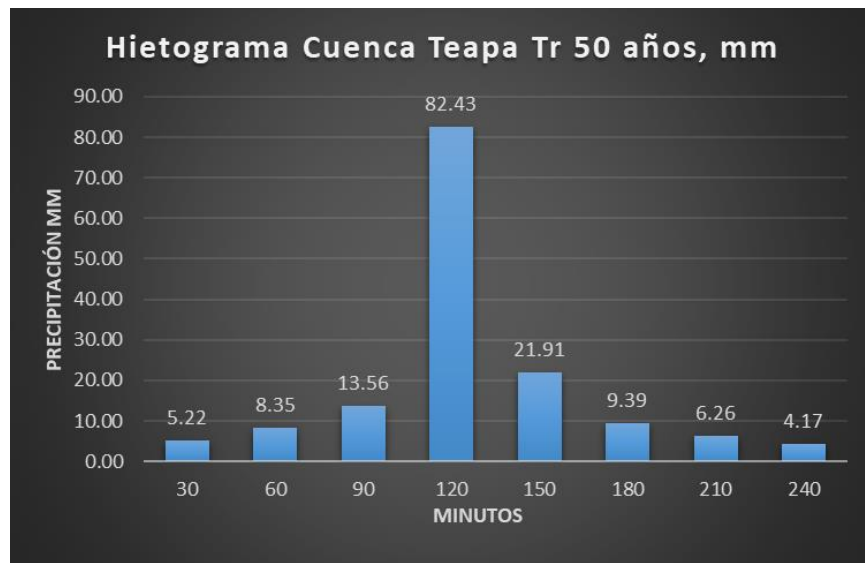


Figura 50 Hietograma con periodo de retorno de 50 años.

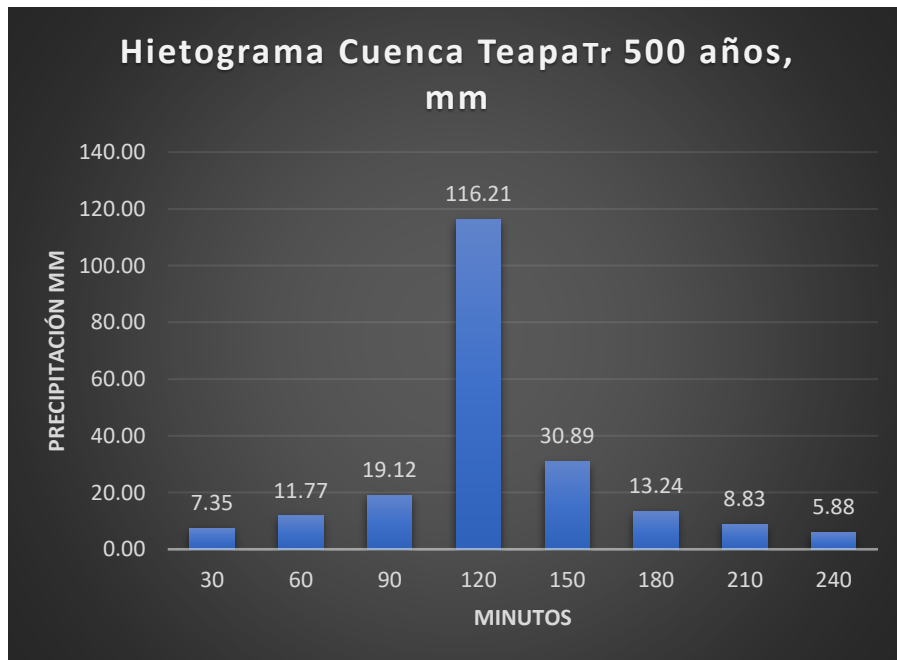


Figura 51 Hietograma con periodo de retorno de 500 años.

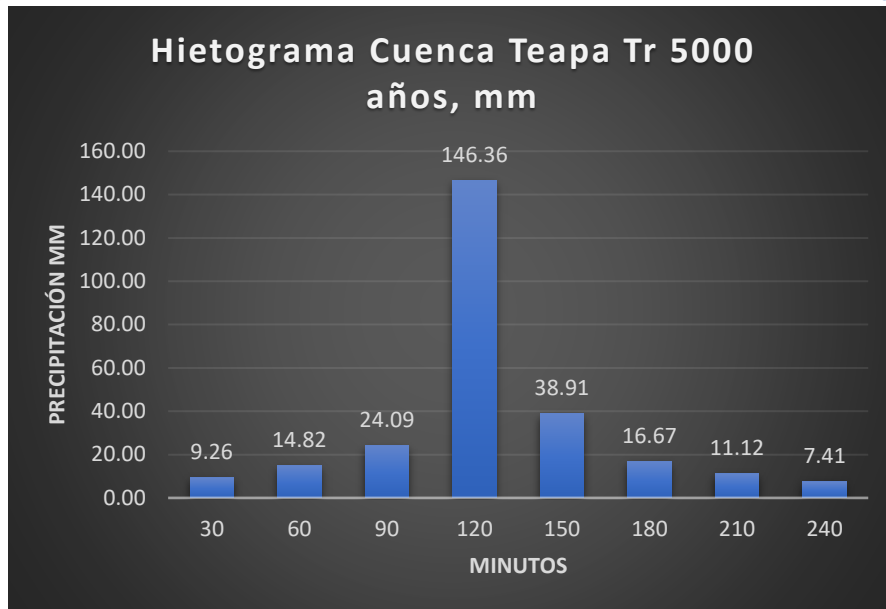


Figura 52 Hietograma con periodo de retorno de 5000 años.

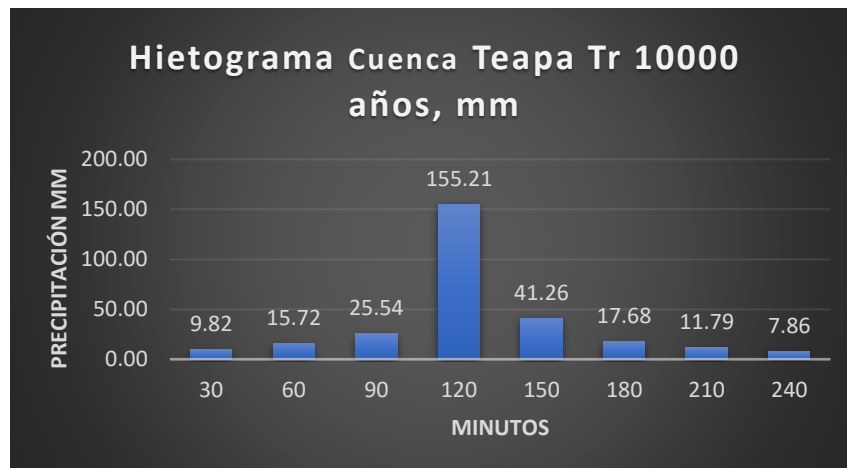


Figura 53 Hietograma con periodo de retorno de 10000 años.

Además de haber calculado los hietogramas anteriores, también se calcularon hietogramas con una precipitación de 190 mm y 140 mm (valores al norte y al sur de la cuenca del mapa medias históricas de los hp anuales máximas) para periodos de retorno de 2,5,10,20,50,100,200,500,1000,2000,5000 y 10000 años, puesto que el modelo MPE necesita datos de al menos tres hietogramas para poder hacer los cálculos, estos hietogramas se encuentran en el anexo A.

Centroide, punto norte y sur de la cuenca

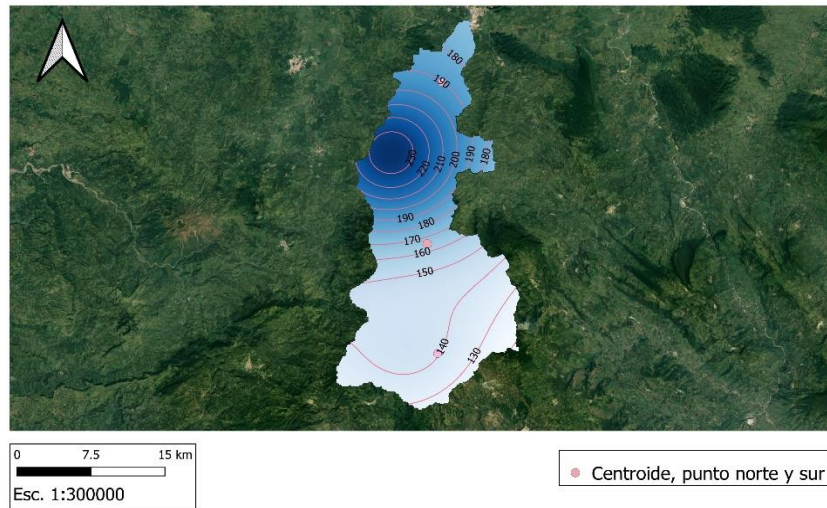


Figura 54 Centroide, punto norte y sur donde se calcularon los Hietogramas.

Características fisiográficas de la cuenca

Algunas características de la cuenca como su área, longitud del cauce principal, pendiente del cauce principal, pendiente de la cuenca, tiempo de concentración (Kirpich) y tiempo de retardo (Ver Tabla 17) fueron obtenidos con el uso del programa Qgis con apoyo de un archivo shape que es cargado en el mismo programa, a su vez se hizo uso de metadatos y archivos shape de la red hídrica y de curvas de nivel de la zona los cuales fueron descargados de la página del INEGI.

Tabla 17 Características fisiográficas de la cuenca Teapa.

Teapa	
Area	420.56 km ²
Longitud rio principal	56 km
desnivel	1814 m
Duración efectiva (de)	4
N	78.86
Tiempo de concentración (Tc)	5.51 hrs
Tiempo de rezago (Tr)	3.306 hrs
Tiempo de concentración (Tc)	330.6 min
Tiempo de rezago (Tr)	198.36 min
Tiempo Pico (tp)	5.31 hrs
Tiempo Base (Tb)	14.17 hrs
scauena	0.36 %
scauce	0.032



Para el cálculo del número de escurrimiento fue necesario descargar un archivo shape con datos de edafología y cobertura vegetal del país, para luego tomar los datos y características que solo estuvieran dentro de los límites de la cuenca. A continuación, se muestran los mapas de la cuenca Teapa con tipo de suelo (Ver Figura 55), su cobertura vegetal (Ver figura 56) y su permeabilidad según el tipo de suelo (Ver figura 57).

TIPO DE SUELO CUENCA TEAPA

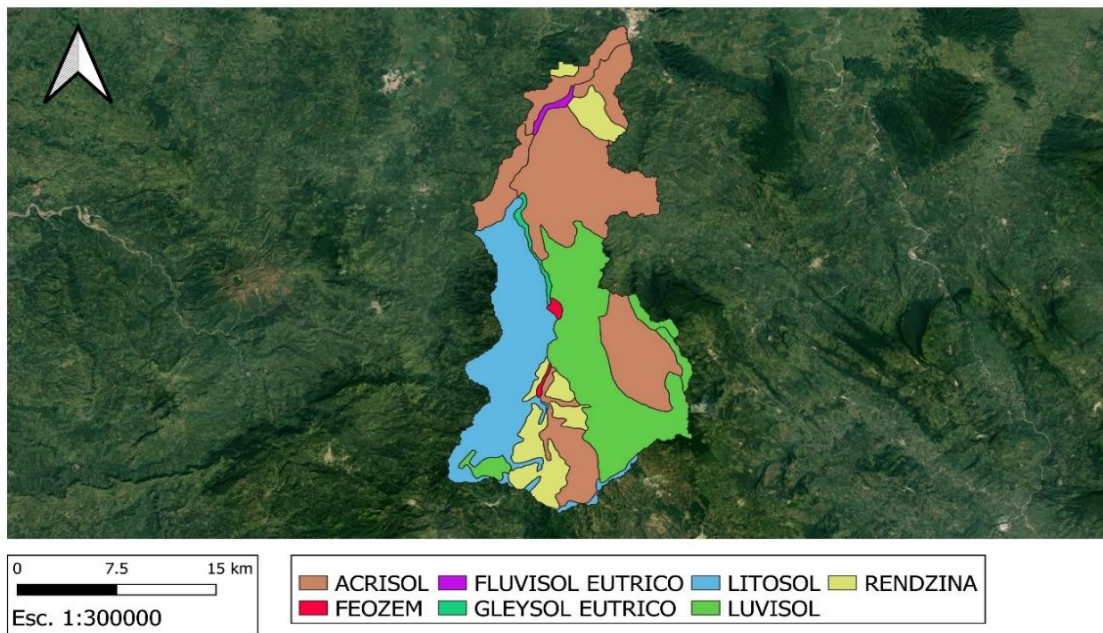


Figura 55 Tipo de suelo en la cuenca Teapa.

USO DE SUELO CUENCA TEAPA

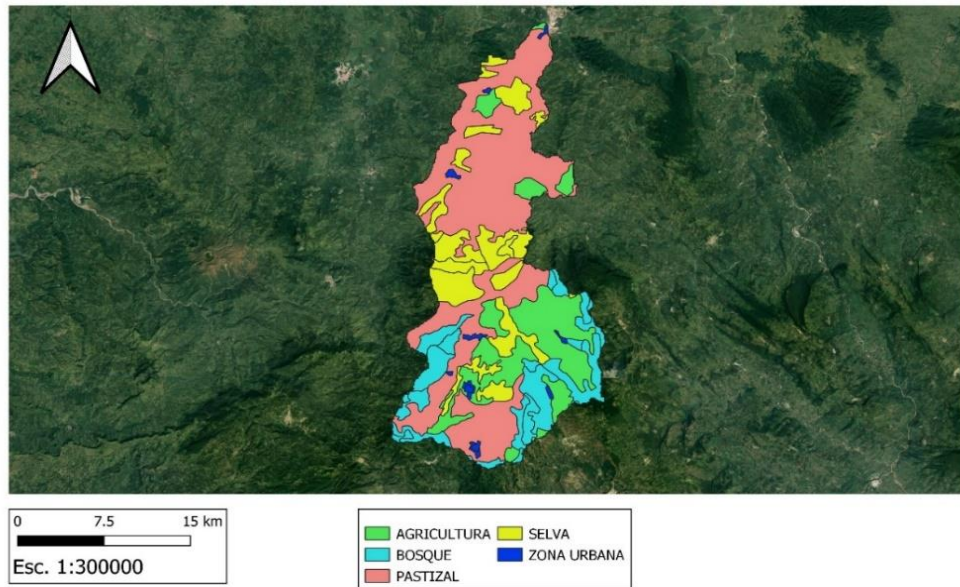


Figura 56 Permeabilidad del suelo de la cuenca Teapa.

PERMEABILIDAD DEL SUELO CUENCA TEAPA

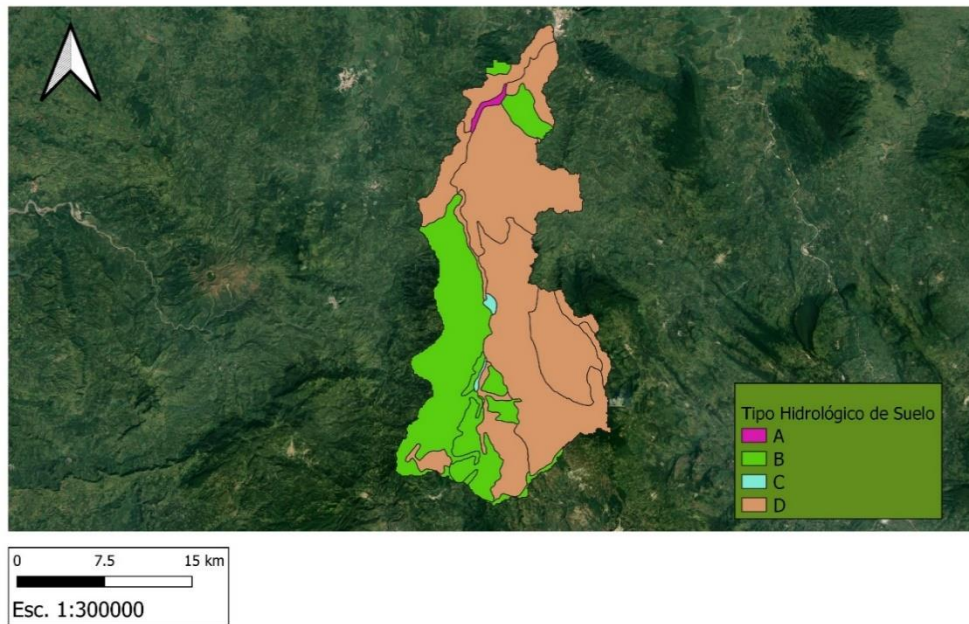


Figura 57 Uso de suelo de la cuenca Teapa.

Como se observa en la (Figura 56) el tipo de suelo predominante es el tipo B y D lo que a grandes rasgos nos indica que la cuenca es más de un tipo impermeable. Lo que provoca que los escurrimientos por las lluvias sean mayores.



Se calculó el porcentaje de área del total de la cuenca según su tipo de suelo y cobertura vegetal (Ver Tabla 18), a estos porcentajes de suelo se les asignó un Numero de escurrimiento según sus características (Figura 58), este número fue puesto según las recomendaciones del libro Fundamentos de Hidrología de Superficie de Aparicio (Aparicio, 1997).

Uso de la tierra y cobertura	Tratamiento del suelo	Pendiente del terreno, en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Sin cultivo Cultivos en surco	Surcos rectos	—	77	86	91	94
	Surcos rectos	> 1	72	81	88	91
	Surcos rectos	< 1	67	78	85	89
	Contorneo	> 1	70	79	84	88
	Contorneo	< 1	65	75	82	86
	Terrazas	> 1	66	74	80	82
Cereales	Terrazas	< 1	62	71	78	81
	Surcos rectos	> 1	65	76	84	88
	Surcos rectos	< 1	63	75	83	87
	Contorneo	> 1	63	74	82	85
	Contorneo	< 1	61	73	81	84
	Terrazas	> 1	61	72	79	82
Leguminosas o praderas con rotación	Terrazas	> 1	59	70	78	81
	Surcos rectos	> 1	66	77	85	89
	Surcos rectos	< 1	58	72	81	85
	Contorneo	> 1	64	75	83	85
	Contorneo	< 1	55	69	78	83
Pastizales	Terrazas	> 1	63	73	80	83
	Terrazas	< 1	51	67	76	80
	-----	> 1	68	79	86	89
	-----	< 1	39	61	74	80
Pradera permanente	Contorneo	> 1	47	67	81	88
	Contorneo	< 1	6	35	70	79
Bosques naturales	-----	< 1	30	58	71	78
	Muy ralo	-----	56	75	86	91
	Ralo	-----	46	68	78	84
	Normal	-----	36	60	70	77
	Espeso	-----	26	52	62	69
Camino	Muy espeso	-----	15	44	54	61
	De terracería	-----	72	82	87	89
	Con superficie dura	-----	74	84	90	92

Figura 58 Selección de N (Aparicio 1997)

Al asignar el número de escurrimiento a cada porcentaje esto se multiplican entre sí, los resultados se suman para obtener el número de escurrimiento de la cuenca, para la cuenca Teapa se obtuvo un número de escurrimiento de 78.86 (Tabla 18).



Tabla 18 Asignación de N para cada tipo de Suelo.

Cuenca de Teapa					
Tipo de suelo	Uso de suelo	Area KM2	% Area	N	%área *N
A	Agricultura	0.693	0.1647	77	0.13
	Patizal	1.297	0.3085	68	0.21
	Selva	0.228	0.0542	15	0.01
	Zona Urbana	0.065	0.0155	74	0.01
B	Agricultura	12.423	2.9539	86	2.54
	Bosque	24.711	5.8756	60	3.53
	Patizal	56.293	13.3853	79	10.57
	Selva	38.101	9.0595	44	3.99
	Zona Urbana	2.735	0.6504	84	0.55
C	Agricultura	0.217	0.0516	91	0.05
	Patizal	1.532	0.3642	86	0.31
	Selva	0.087	0.0206	54	0.01
	Zona Urbana	0.119	0.0282	90	0.03
D	Agricultura	66.048	15.7046	94	14.76
	Bosque	38.810	9.2281	77	7.11
	Patizal	138.206	32.8622	89	29.25
	Selva	36.826	8.7564	61	5.34
	Zona Urbana	2.172	0.5164	92	0.48
		420.561	100	Σ=	78.86

Contado con los elementos necesario para realizar el modelamiento en los programas MPE 4 y HEC-HMS se procede a cargar la información y estimar los hidrogramas.

Estimación del gasto base.

Para tener un hidrograma con mayor información se recabó la información de la estación hidrométrica Teapa con clave 30032 que está a la salida de la cuenca Teapa. Cuenta con 56 años de registros, aunque con algunos años en los que no se aforó siendo 36 años el periodo más grande de registro continuo. Fueron calculados los promedios de gasto diario mensuales y anuales (Tabla 19). Por el método escogido se utilizaron los promedios mensuales.



Tabla 19 Promedios mensuales de gasto de la estación 30032

Año	Gasto M3/s												Promedio anual
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
1951	32.02	39.76	51.27	9.95	26.31	66.51	68.18	41.88	91.70	58.05	208.20	47.50	61.60
1952	15.72	19.97	9.05	50.36	8.34	26.15	41.20	22.42	65.36	217.17	30.80	91.68	50.09
1953	14.33	17.88	9.17	5.17	8.13	24.54	17.65	15.40	88.79	66.74	131.03	64.72	38.54
1954	34.16	34.93	72.87	22.52	38.75	57.78	76.22	42.03	135.78	60.90	43.05	36.77	54.70
1955	13.97	50.99	24.38	8.53	4.81	10.58	50.87	43.68	75.31	197.22	37.62	33.01	46.01
1956	11.90	8.22	26.12	5.15	54.18	66.63	30.24	26.66	94.53	96.54	69.72	39.53	44.15
1957	40.96	15.97	10.08	8.56	8.40	15.24	21.07	31.84	97.92	50.80	44.21	85.76	36.00
1958	49.89	15.22	14.28	8.43	22.60	113.91	55.49	29.88	46.78	78.33	74.82	91.68	50.28
1959	69.40	17.33	43.48	75.09	17.05	29.29	26.13	24.41	16.61	52.65	125.63	53.55	45.95
1960	46.33	24.73	22.69	21.63	14.88	32.08	61.35	41.45	74.20	49.09	43.12	39.51	39.30
1961	65.09	35.91	27.41	18.70	25.73	26.39	39.35	40.18	38.01	118.18	52.19	16.59	42.12
1962	46.37	14.33	13.25	45.51	12.68	12.58	21.83	25.77	57.02	72.58	21.66	14.17	29.89
1963	41.68	50.31	37.60	12.28	8.28	8.31	27.96	37.63	74.32	44.55	59.24	48.01	37.40
1964	53.25	27.76	20.80	53.46	27.92	71.46	62.10	36.58	50.46	56.63	27.82	66.18	46.25
1965	30.52	74.06	40.59	23.74	17.88	20.43	36.98	32.86	40.16	105.88	38.02	61.02	43.40
1966	52.48	37.59	40.14	26.21	17.51	57.03	42.09	26.96	47.70	69.35	45.81	40.79	41.98
1967	75.79	38.63	25.92	13.94	17.72	28.73	20.69	19.21	62.66	138.23	39.87	34.42	43.09
1968	56.52	50.71	32.34	21.26	12.50	21.11	29.61	29.25	70.35	72.19	37.58	48.92	40.17
1969	55.06	20.27	16.40	19.69	13.76	32.86	47.55	55.78	89.76	62.49	104.07	38.69	46.41
1970	38.93	41.81	17.77	13.06	45.55	48.22	67.33	60.05	84.88	117.39	89.68	23.35	54.05
1971	18.78	15.44	48.12	19.51	10.34	16.07	26.65	45.46	37.74	33.22	38.72	14.99	27.17
1972	37.77	32.39	13.61	8.95	8.38	25.55	34.76	46.86	47.69	46.49	37.91	101.78	36.94
1973	38.69	45.73	18.42	15.31	31.43	39.48	28.28	159.53	56.17	126.27	61.42	64.69	57.36
1974	15.93	72.07	18.08	53.99	12.79	43.21	44.62	22.24	120.25	97.58	58.25	37.07	49.28
1975	42.31	18.75	18.31	7.25	6.10	12.29	15.13	20.14	80.86	123.16	98.92	20.35	38.67
1976	77.20	43.95	15.78	13.23	22.49	31.67	44.09	40.97	56.98	83.70	97.84	80.21	50.72
1977	30.39	26.96	28.28	15.92	9.70	35.56	21.05	42.03	16.95	41.67	78.78	72.98	35.07
1978	54.69	30.78	41.94	12.57	17.47	32.70	56.77	38.42	53.00	93.47	46.45	66.56	45.62
1979	52.90	23.81	14.48	7.57	12.33	48.98	39.14	45.80	134.62	60.28	77.69	97.68	51.32
1980	27.02	55.75	41.14	26.22	15.92	50.83	38.03	33.61	64.82	94.28	103.79	39.90	49.11
1981	16.02	91.79	51.33	16.99	31.69	55.88	57.75	57.81	73.23	59.26	33.78	35.49	48.10
1982	29.64	44.22	25.62	14.48	18.18	26.04	22.37	26.49	86.57	64.39	54.54	49.26	38.36
1983	52.32	14.41	9.92	8.73	6.47	23.55	27.46	29.83	62.20	48.85	30.28	53.80	30.78
1984	43.81	24.69	15.82	7.52	34.21	37.26	45.11	46.93	98.00	51.80	28.34	28.29	38.51
1985	49.21	35.51	18.66	37.44	11.11	24.02	41.43	40.57	51.02	48.56	22.92	56.73	36.47
1986	82.60	18.55	26.62	9.69	42.85	36.87	23.18	20.34	17.63	36.70	50.93	42.22	34.20
1988	53.62	63.67	29.33	28.55	8.28	33.27	25.26	71.43	40.88	87.45	47.16	37.01	43.79
1989	32.13	33.76	21.78	21.11	18.26	31.90	30.25	30.18	100.88	93.61	46.27	64.59	43.74
1992	63.08	28.19	6.24	0.68	0.97	15.82	3.10	21.52	67.17	87.89	46.27	24.18	30.42
1993	22.27	21.57	14.20	5.97	7.69	55.33	30.17	53.54	48.93	109.07	48.32	32.51	37.57
1994	61.69	45.02	30.70	26.24	9.24	8.26	10.26	21.55	40.20	62.84	11.78	9.95	28.08
1995	26.04	30.45	20.37	7.09	9.48	61.97	49.26	53.84	67.16	101.97	23.90	46.48	41.61
1997	26.86	56.08	14.02	12.33	8.92	13.90	30.39	22.36	40.03	72.02	42.51	34.36	30.99
1998	17.97	12.88	5.06	3.68	1.50	3.12	28.46	28.60	27.41	66.98	40.69	28.89	22.22
1999	24.38	33.53	14.63	22.54	6.07	26.93	36.02	30.14	76.10	110.85	50.99	27.94	38.32
2001	20.23	43.29	9.16	17.08	19.23	8.78	5.35	26.44	44.80	65.88	28.66	35.59	26.93
2003	13.80	4.55	9.03	21.32	8.51	31.25	29.81	23.29	29.62	57.35	89.19	46.84	30.46
2004	55.93	36.65	13.11	16.49	32.88	25.73	19.77	14.20	39.33	31.77	33.42	27.92	28.89
2005	6.70	5.85	5.47	7.84	5.25	24.45	23.68	34.65	33.70	24.78	20.09	47.04	20.06
2006	64.85	40.97	18.33	6.44	11.51	50.09	35.61	20.28	36.80	83.20	43.00	46.34	38.14
2007	72.08	29.14	16.30	4.76	2.05	3.77	3.55	27.24	36.46	176.69	31.25	6.51	34.36
2008	34.74	29.52	46.68	37.17	34.51	45.20	33.95	29.62	103.13	51.05	19.31	10.25	39.52
2009	14.78	16.39	15.53	16.15	18.94	28.88	18.26	24.68	33.10	20.20	58.92	20.17	23.78
2011	27.76	47.42	0.00	11.62	9.87	19.82	56.22	50.90	66.60	108.57	29.93	21.42	37.49
2012	30.44	18.68	22.95	18.98	39.55	23.52	21.11	30.87	29.08	22.54	5.69	19.90	23.68
2013	44.74	19.02	16.07	11.67	14.01	23.08	30.35	36.91	53.95	37.26	60.18	74.58	35.26
2014	83.80	18.68	34.58	65.01	116.96	34.42	15.34	14.24	39.54	55.22	44.54	12.84	44.80
Promedio Mensual	40.55	32.75	23.25	19.32	18.91	32.97	34.14	36.27	61.67	77.58	53.80	44.09	39.63

Posteriormente se calcula el 60% del promedio mensual para así determinar el gasto ecológico el cual fungirá como gasto base para nuestros hidrogramas. Los gastos se muestran en la (Tabla 20).



Tabla 20 Gasto ecológico mensual.

	Caudal Medio Mensual m ³ /S	Qecologico elegido (60%) m ³ /S
Enero	40.55	24.33
Febrero	32.75	19.65
Marzo	23.25	13.95
Abril	19.32	11.59
Mayo	18.91	11.35
Junio	32.97	19.78
Julio	34.14	20.48
Agosto	36.27	21.76
Septiembre	61.67	37.00
Octubre	77.58	46.55
Noviembre	53.80	32.28
Diciembre	44.09	26.45
Promedio EMA	39.61	23.77



Hidrogramas.

Con el programa HEC-HMS se realizaron varios modelos empleando toda la información obtenida. Para el caso de una tormenta con un periodo de retorno de 2 años se tuvieron los siguientes resultados (Figura 59).

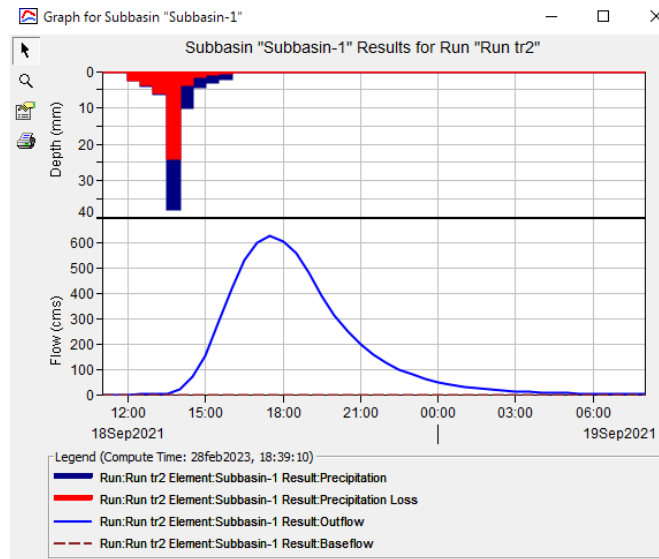


Figura 59 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de dos años.

Del hidrograma (figura 59) podemos apreciar que la duración total que tuvo el efecto de la tormenta sobre la cuenca, considerando que la tormenta comienza a medio día, pasaron casi 18 horas para que desaparecieran sus efectos. De igual modo podemos apreciar que el tiempo base es de aproximadamente 14 horas, dato muy similar al obtenido por la ec. 25 que fue de 14.71 horas. También se observa que el Tp es el hidrograma es de 4:30 hrs similar a las 5:30 hrs calculadas con la ec. 24.

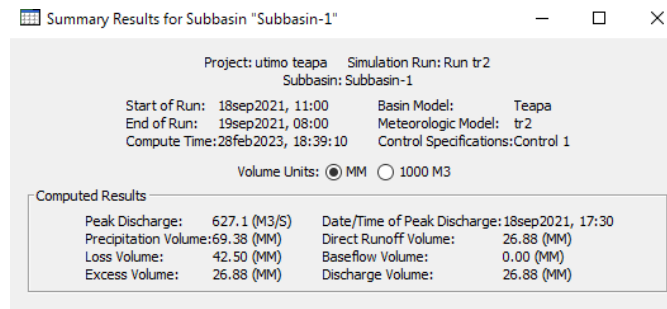


Figura 60 Resumen de resultados del hidrograma de Tr dos años.

El modelo nos dice que en el momento pico el gasto de descarga es de 627.1 m³/s.

Se obtuvieron los modelos para periodos de retornos de 2,5,10,20,50,100,200,500,1000,2000,5000 y 10000 años. En las Figuras 61 a 68 se



muestran algunos de los hidrogramas obtenidos. El resto de los resultados pueden encontrarse en el anexo B.

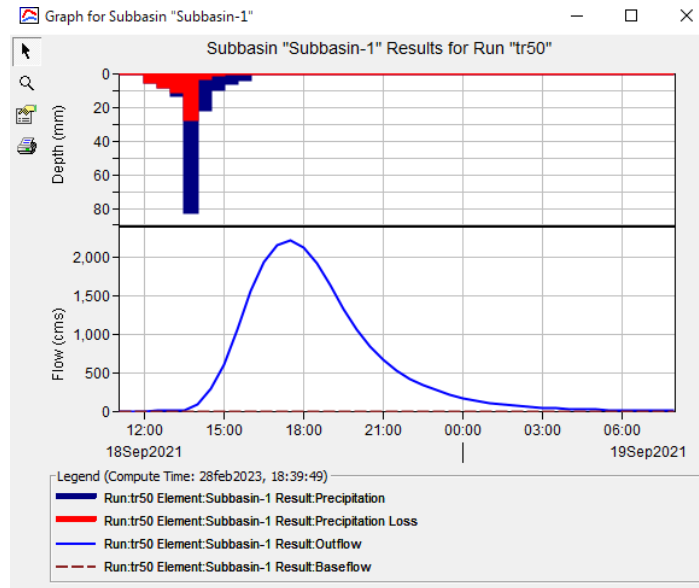


Figura 61 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cincuenta años.

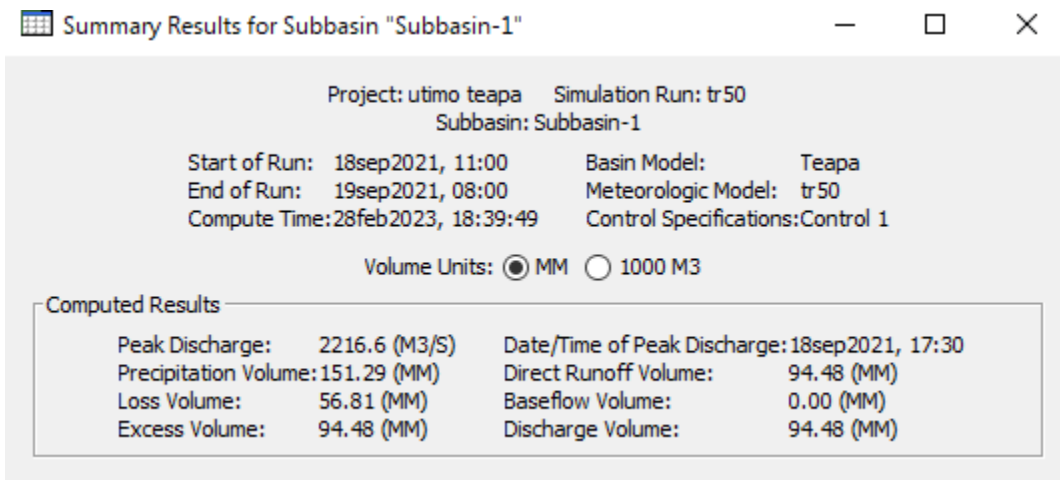


Figura 62 Resumen de resultados del hidrograma de Tr cincuenta años.

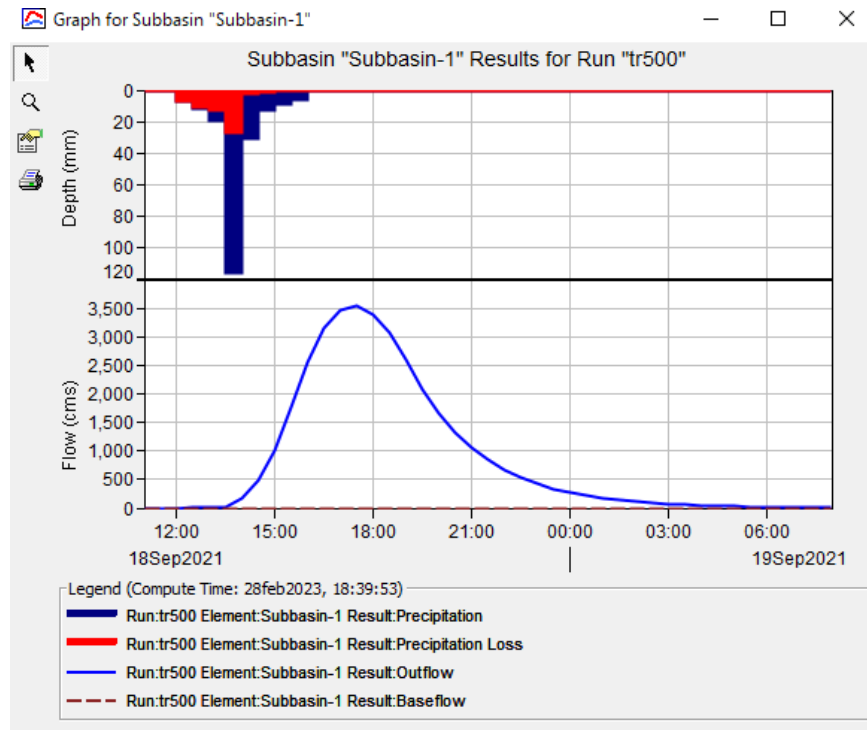


Figura 63 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de quinientos años.

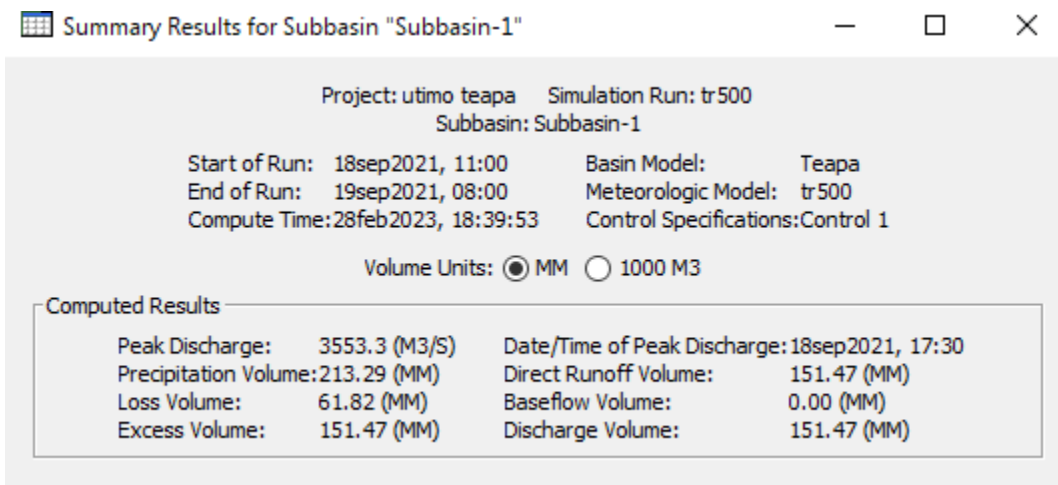


Figura 64 Resumen de resultados del hidrograma de Tr quinientos años.

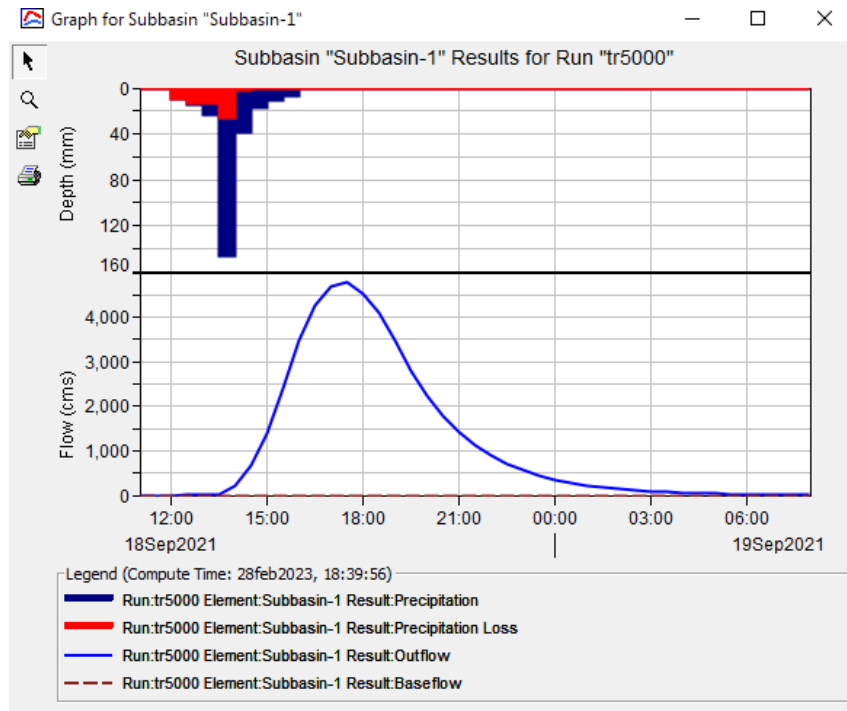


Figura 65 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cinco mil años.

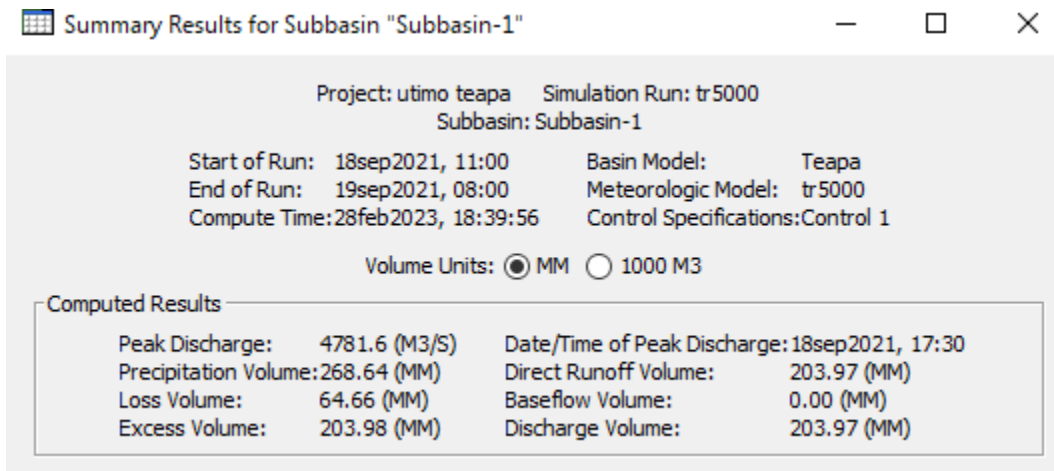


Figura 66 Resumen de resultados del hidrograma de Tr cinco mil años.

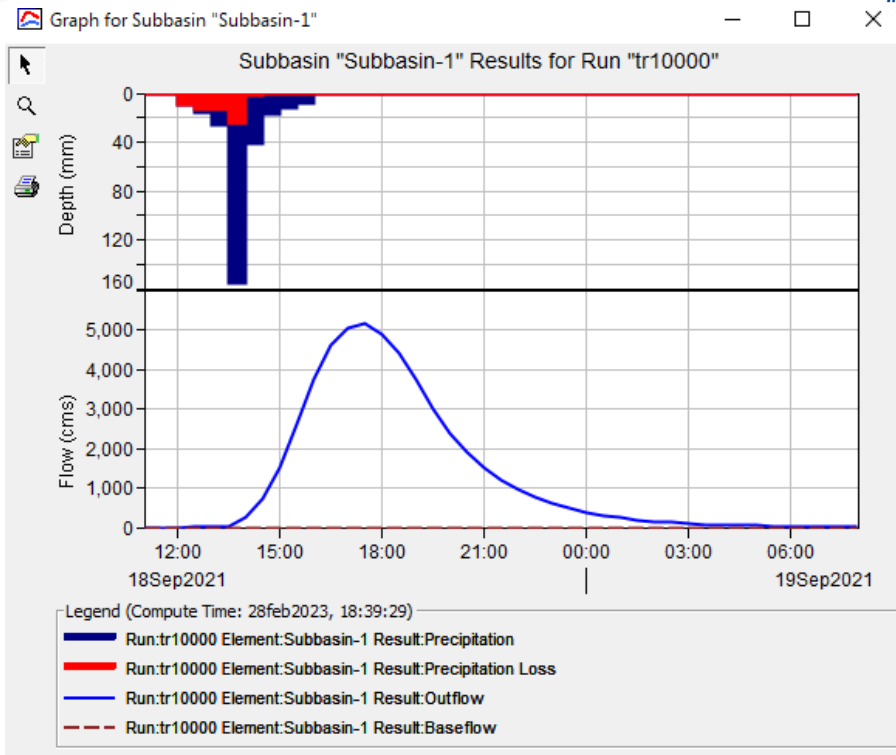


Figura 67 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de diez mil años.

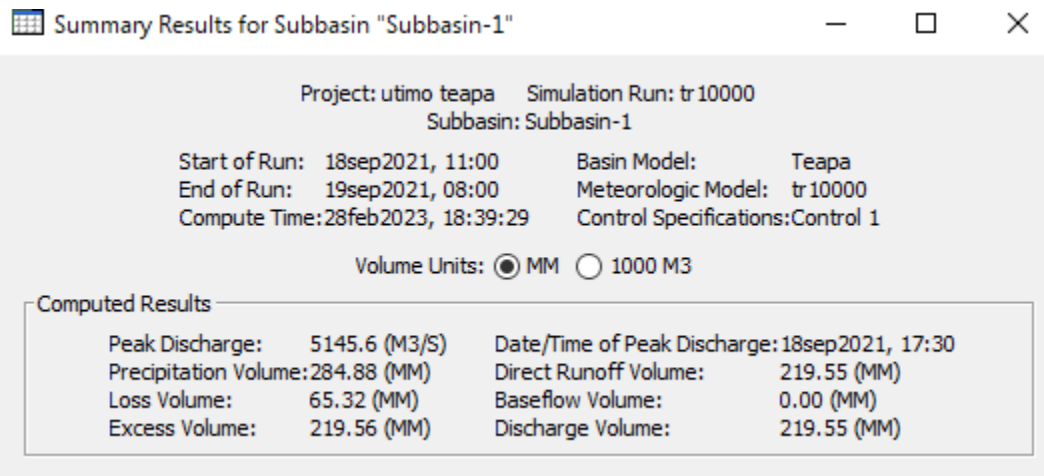


Figura 68 Resumen de resultados del hidrograma de Tr diez mil años.



Con el programa MPE se realizaron modelaciones para obtener los hidrogramas asociados a diferentes periodos de retorno. Para el caso de una tormenta con un periodo de retorno de 2 años se tuvieron los siguientes resultados. (Figura 69).

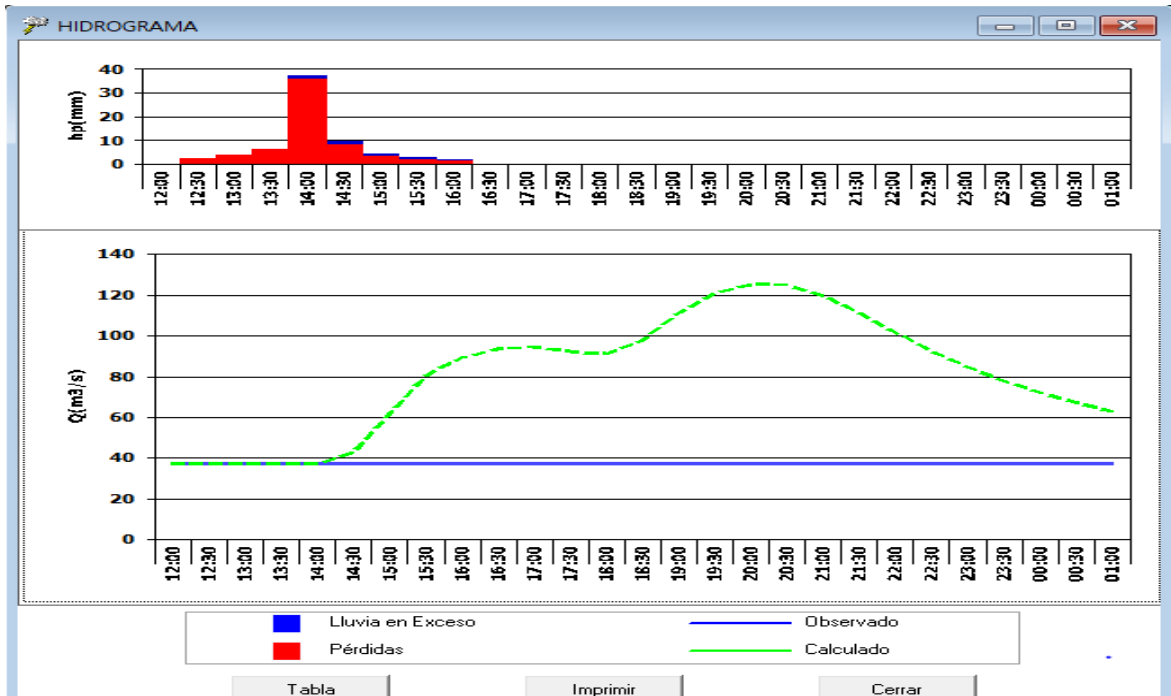


Figura 69 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de dos años.

Del hidrograma (Figura 69) podemos apreciar la duración total que tuvo el efecto de la tormenta sobre la cuenca, considerando que la tormenta comienza a medio día, pasaron casi 20 horas para que desaparecieran sus efectos. De igual modo podemos apreciar que el tiempo base es de aproximadamente 13 horas, dato muy similar al obtenido por la ec. 25 que fue de 14.71 horas. También se observa que el T_p es el hidrograma es de 6:30 hrs similar a las 5:30 hrs calculadas con la ec. 24.

TABLA RESUMEN

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia

Área de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	68.662	mm
Pérdidas	63.342	mm
Lluvia en Exceso	5.320	mm

Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	3130.200	4252.442	Mm3
Directo	0.000	2454.242	Mm3
Base	3130.200	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Q _{máximo}	37.000	125.391	m3/s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Figura 70 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de dos años.

El modelo nos dice que en el momento pico el volumen de descarga es de 125.391 m³/s.

Se obtuvieron los modelos para periodos de retornos de 2,5,10,20,50,100,200,500,1000,2000,5000 y 10000 años. En las siguientes figuras se muestran algunos de los hidrogramas obtenidos (Figuras 71 a 78), el resto puede encontrarse en el Anexo C.

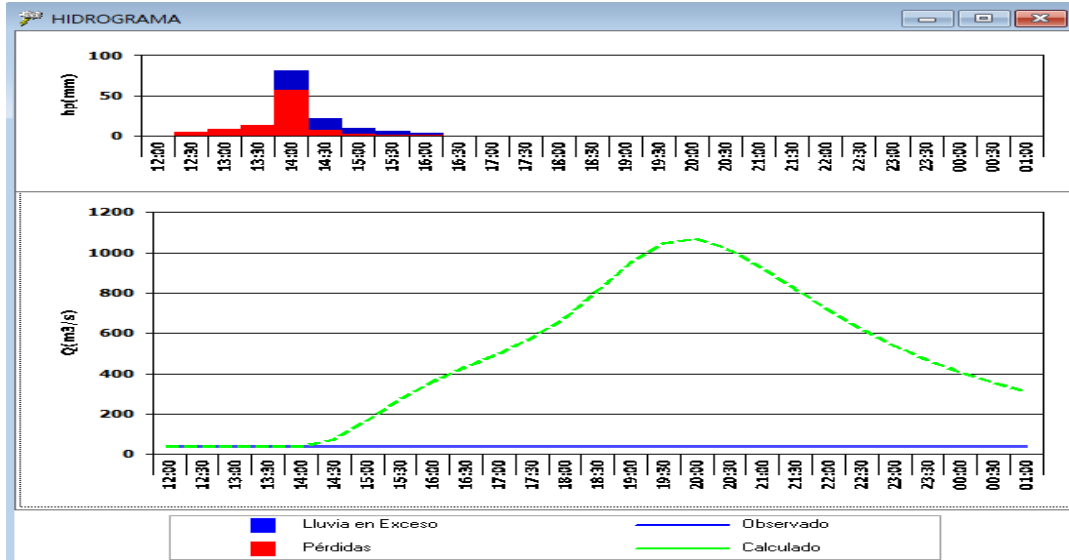


Figura 71 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cincuenta años.

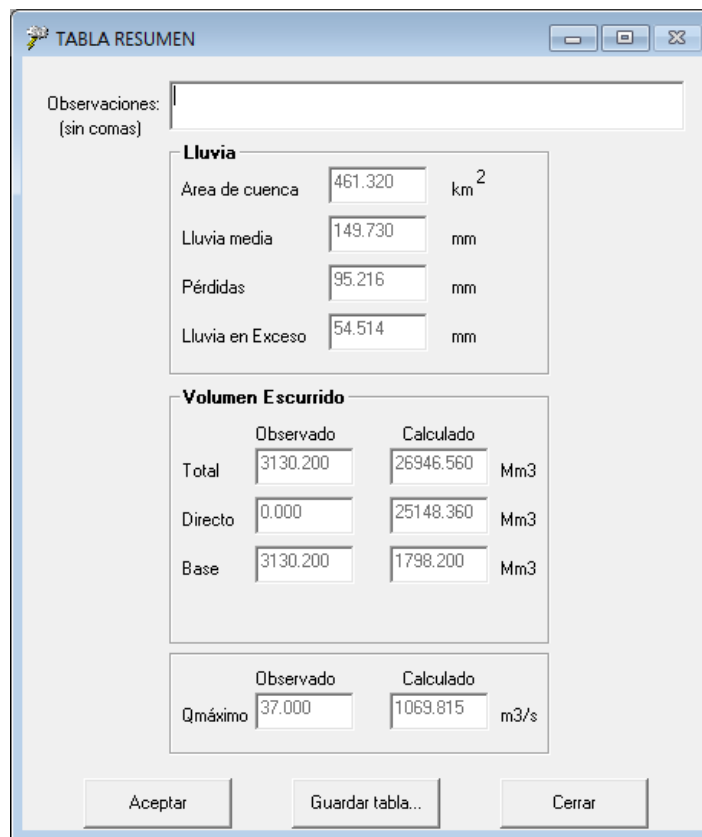


Figura 72 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cincuenta años.

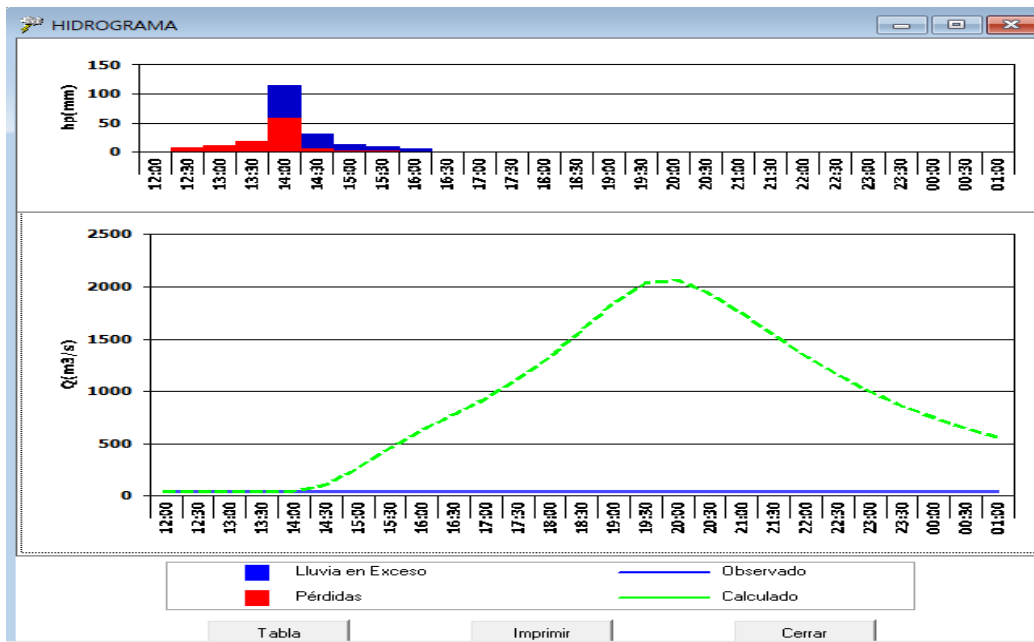


Figura 73 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de quinientos años.

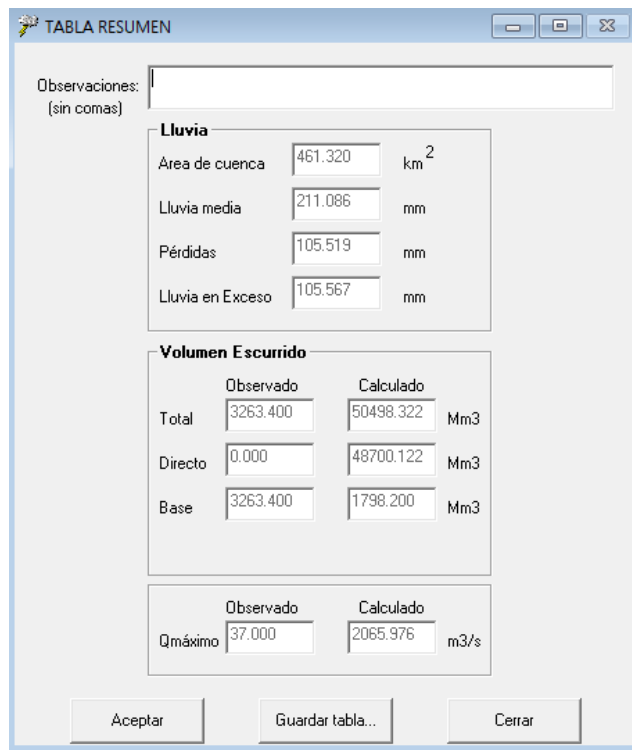


Figura 74 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de quinientos años.

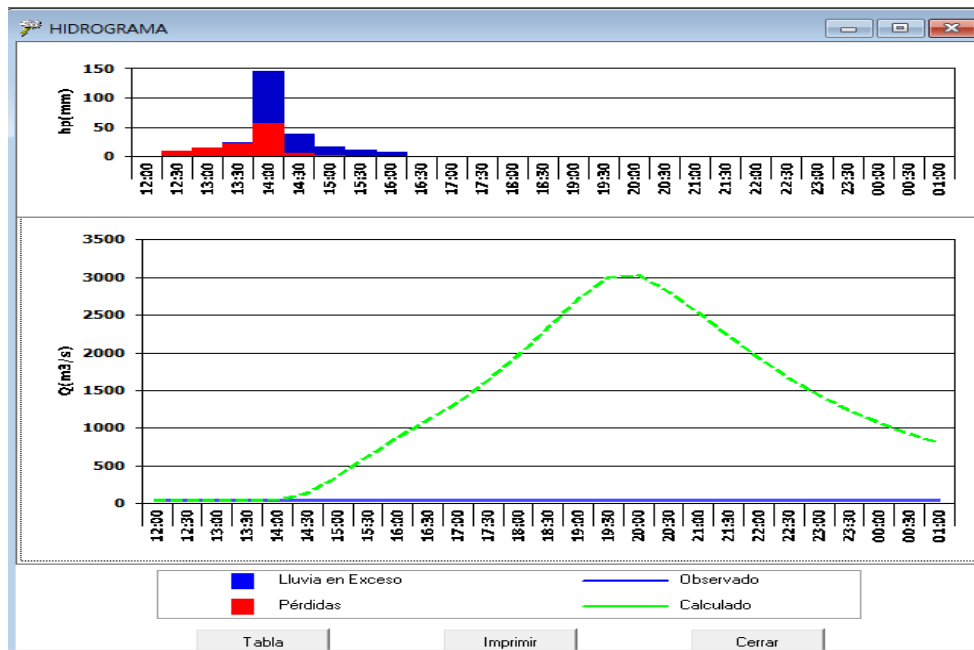


Figura 75 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de cinco mil años.

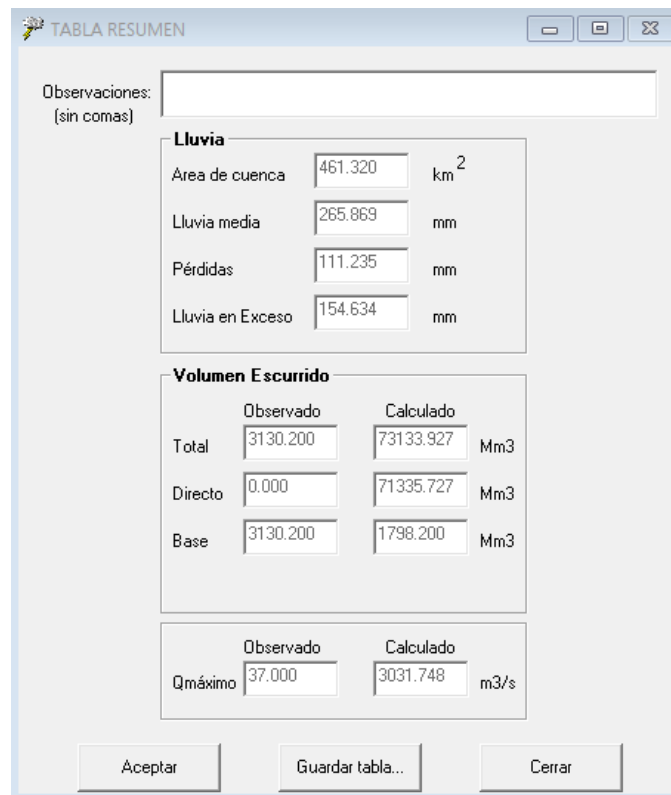


Figura 76 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cinco mil años.

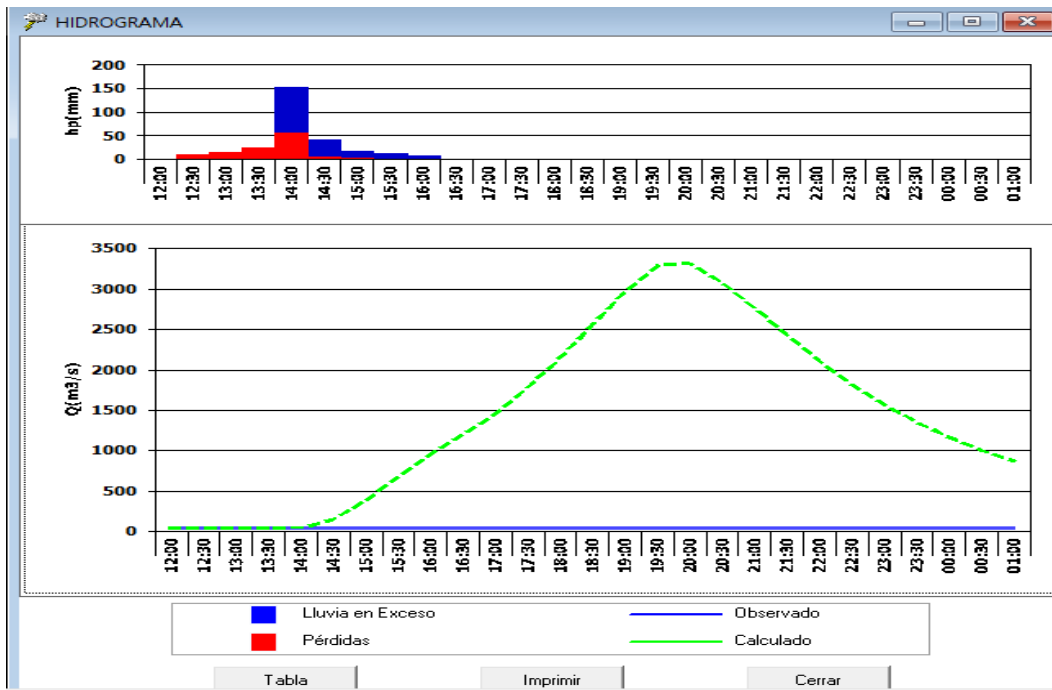


Figura 77 Hidrograma correspondiente a un periodo de retorno de diez mil años.

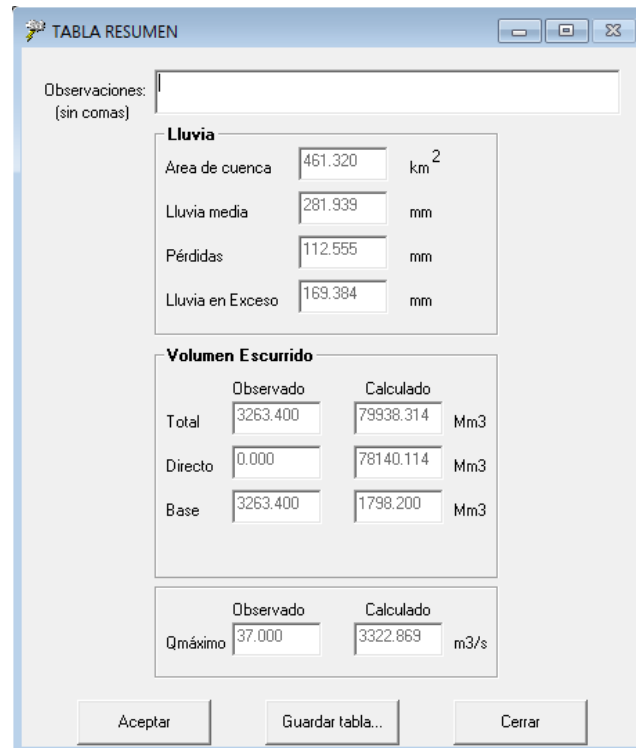


Figura 78 Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de diez mil años.



La Tabla 21 presenta la comparación de los Q máximos obtenidos con ambos programas. Para ambos programas se utilizó un gasto base de 37 m³/s.

Tabla 21 Comparación de Gasto máximo que se obtuvieron.

Tr años	Qmax m3/s	
	HEC-HMS	MPE
2	627.1	125.39
5	1006	290.35
10	1300.8	458.25
20	1637.8	672.08
50	2216.6	1069.81
100	2655.5	1387.38
200	3053.7	1684.29
500	3553.3	2065.97
1000	3911	2344.11
2000	4287.6	2639.77
5000	4781.6	3031.74
10000	5145.6	3322.86

5. Conclusiones

De los factores de regionalización se obtuvo una diferencia notable en comparación a la del estudio de 2017 para el sitio analizado, debido a los nuevos datos agregados en los últimos años; la diferencia entre los periodos de retorno de 10000 a 1000 años oscilan entre un 12 y 8 %, para los periodos de 1000 a 2 años se tiene una variación de 8 a 3 %, por lo que se concluye que la actualización fue conveniente y se da la recomendación de que se realice una actualización de la cuenca cada cinco años ya que es un periodo de tiempo en el que nuevos datos agregados ya representan una diferencia significativa y que presentan una variación.

Un motivo por el cual también cambian los factores de regionalización son el cambio climático, causante de que las tormentas no lleguen con la misma frecuencia o intensidad y en incluso tiempo, lo que también incide en que existan cambios en el tipo de cobertura del suelo o vegetación. Debido a esta situación también puede llegar a que cambie la permeabilidad de la cuenca. Esta aseveración sobre el cambio climático se puede verificar en el caso de estaciones con periodos de registro mayores que los revisados en este estudio.

Sobre el uso del programa HEC-HMS resalta la variedad de métodos que tiene para modelar diferentes tipos tormentas, su manejo es sencillo, existen varias herramientas digitales con las que se pueden calcular los parámetros necesarios para hacer la modelación. El no tener una forma de calibración adaptada (a la



disponibilidad de datos hidrotopograficos y climatológicos del país puede llevar a resultados distintos al proceso de lluvia-escorrimento existente en el sitio de estudio

El programa MPE resulta ser un programa sencillo de utilizar, aunque es necesario tener un cierto nivel de conocimiento de otros programas como Qgis o ArcGis para el manejo y elaboración de los archivos txt. que son necesarios para su aplicación, como en el caso del archivo de celdas. Además de que puede ser complicado contar con un registro de escurrimiento con el cual calibrar el modelo y tener mejores parámetros de forma. Sin embargo, son necesarias estas características para tener hidrogramas con calidad y más acercados a la realidad.

De los resultados de los gastos máximos calculados por ambos programas es notorio como el programa HEC-HMS estima valores mucho más altos en todos los periodos de retorno, un motivo de la variación de resultados es el método utilizado, mientras que el MPE se usa el método de Shepard, para HEC-HMS se utilizó el método del Hidrograma Unitario.



Referencias.

- Álvarez-Olguín, G., & Hotait-Salas, N., & Sustaita-Rivera, F. (2011). Identificación de regiones hidrológicas homogéneas mediante análisis multivariado. Ingeniería. Investigación y Tecnología, XII (3),277-284 ISSN: 1405-7743
- Abdelhafid El Alaoui El Fels; Mohamed El Mehdi Saidi; Assma Bouijji; Mounia Benrhanem. Rainfall regionalization and variability of extreme precipitation using artificial neural networks: a case study from western central Morocco. Journal of Water and Climate Change (2021) <https://iwaponline.com/jwcc/article/12/4/1107/73613/Rainfall-regionalization-and-variability-of>
- Aparicio, F. (1997). "Fundamentos de Hidrología de superficie", Editorial Limusa, México
- Arias, P. P. (2015) "Guía de Aplicaciones del HEC.HMS en cuencas cubanas. Ejemplos prácticos." Instituto Superior Politécnico, Cuba.
- Baeza, R. C. (2007). Estimación Regional de Factores de Convectividad para el Cálculo de las Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia Tesis Maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería. UNAM, México.
- Campos-Aranda, D.F., Gómez de Luna, R. (1990). Procedimiento para obtener curvas I-d-Tr a partir de registros pluviométricos. Ingeniería hidráulica en México. Agosto de 1990.
- Conagua (2018). "Atlas del Agua en México" México
- Dalrymple, T. (1960). Flood Frequency Analysis. Manual of Hydrology: Part 3. Flood Flow Techniques. Methods and Practices of the Geological Survey. US Government Printing Office, Washington.
- Domínguez, R. et al. (2008) "Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento" UNAM, México.
- Domínguez, R. et al. (2009) "Elaboración de un modelo lluvia-escurrimiento para el pronóstico en tiempo real de las avenidas en las cuencas del río de la sierra: Pichucalco, Teapa, Puyacantengo, Tapijulapa." Instituto de Ingeniería, México.
- Domínguez, R. et al. (2017). "Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana. Tomo II. Análisis estadístico regional de las precipitaciones máximas anuales registradas en más de 2000 estaciones pluviométricas". CENAPRED, México.
- Dyson, M, G. Bergkamp y J. Scanlon, J. (2003) "Flow" Editorial UICN, UK.

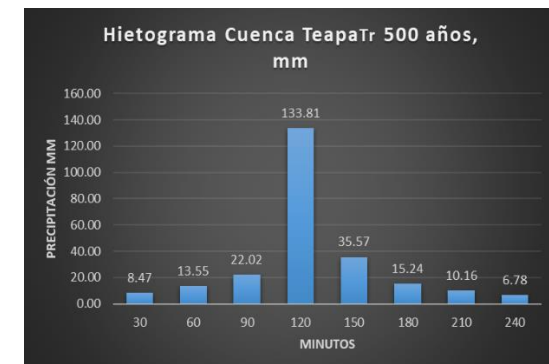
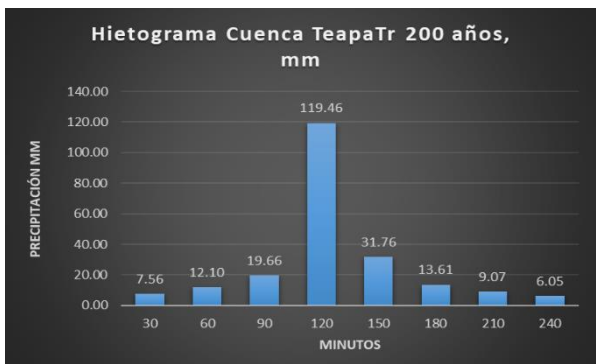
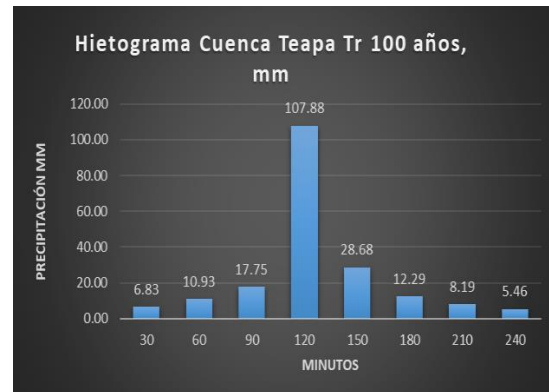
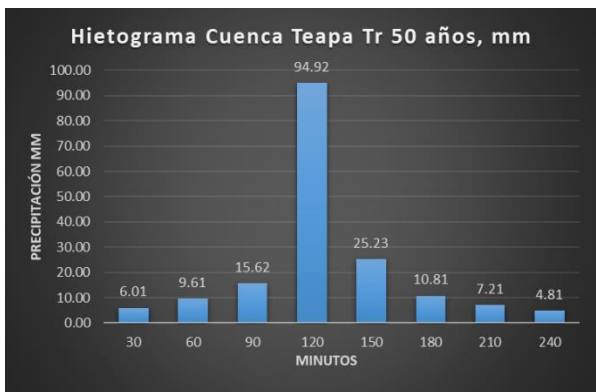
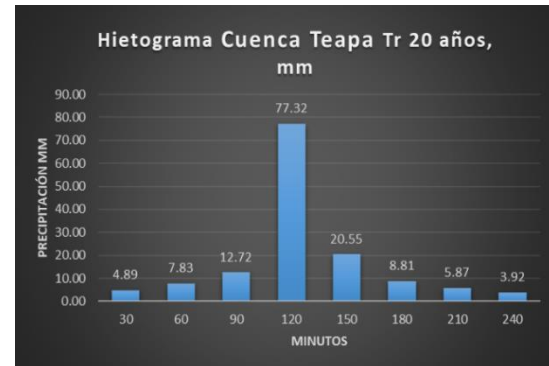
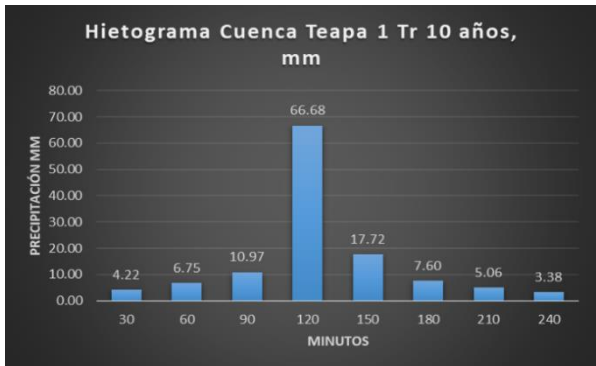
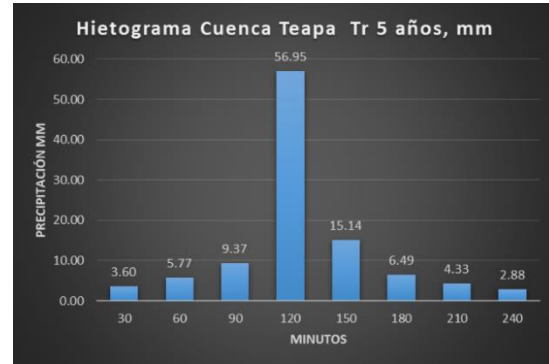
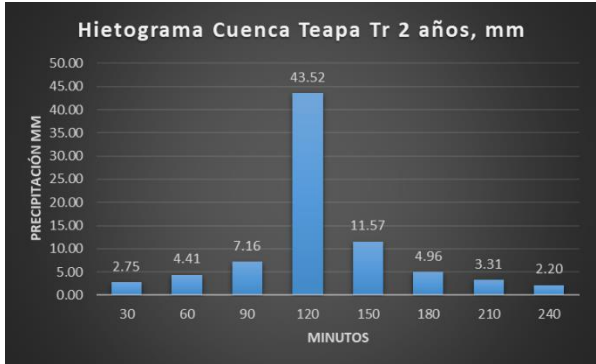


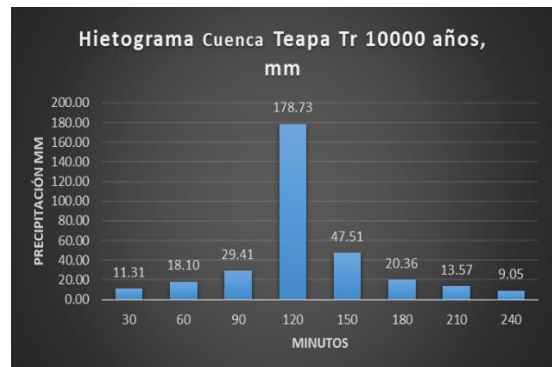
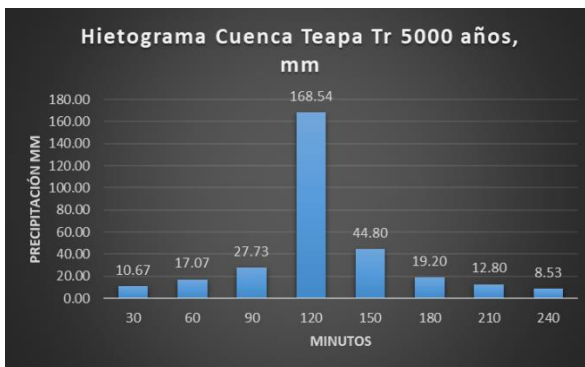
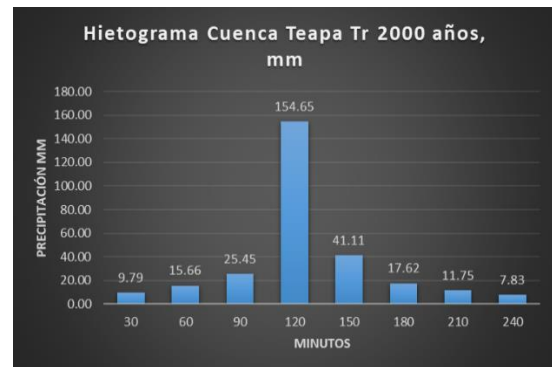
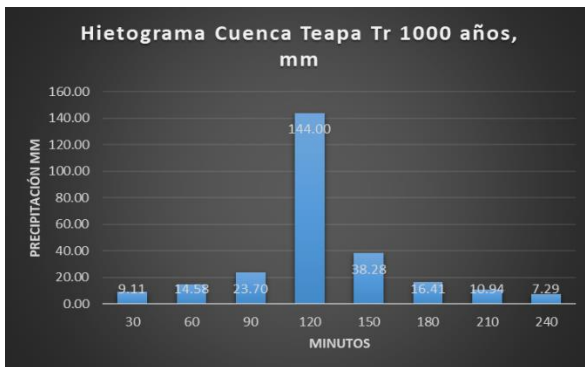
- Escalante Sandoval, Carlos A.; Domínguez Esquivel, José Y. Análisis regionales de precipitación con base en una distribución bivariada ajustada por máxima entropía. Ingeniería Hidráulica en México, 2001.
- Escalante y Reyes, (2002) “Técnicas Estadísticas en Hidrología”. UNAM, México
- García-Rodríguez, E.; R. González-Villela, P. Martínez-Austria, J. Athala-Molano y G. Paz-Soldán. (1999) *Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudal de reserva ecológicos en México*. CNA-IMTA. México.
- González Villareal, F. J. Contribución al análisis de frecuencias de valores extremos de los gastos máximos en un río” Publ. 277. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 1970.
- HEC.HMS (2022) <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- INEGI (2021). <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrologia/>
- Jimenez Espinoza, Martin.; Domínguez Mora, Ramón.; Martin Cruz, Miguel. (1997) “Manual de operación de los programas Ax.exe y Carachid.exe” CENAPRED, México.
- Kirpich, Z.P, Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineering, 1940.
- Mendoza, G. M. (2001). Factores de Regionalización de Lluvias Máximas en la República Mexicana. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Mockus, Victor. Use of storm and watershed characteristics in syntetic unit hidrograph analysis and application. US Soil Conservation Service, 1957.
- Pierluigi Claps, Daniele Ganora, Paola Mazzoglio, Chapter 11 - Rainfall regionalization techniques, Editor(s): Renato Morbidelli, Rainfall, Elsevier, 2022, Pages 327-350, ISBN 9780128225448, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822544-8.00013-5>
- Rossi, Fiorentino, M., & Versace, P. (1984). Two-Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis.
- Song, J.-H., Her, Y., Suh, K., Kang, M.-S., & Kim, H. (2019). Regionalization of a Rainfall-Runoff Model: Limitations and Potentials. *Water*, 11(11), 2257. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w11112257>
- Tennant, D.L. 1976 Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources.
- Weibull, W. 1939 A statistical theory of the strength of materials. Royal Technical University, Stockholm.



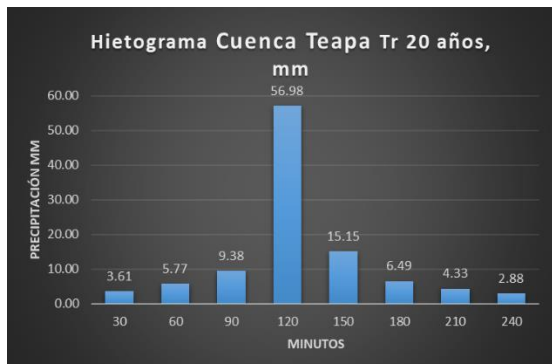
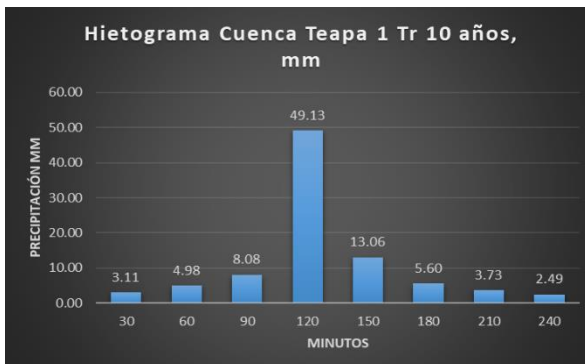
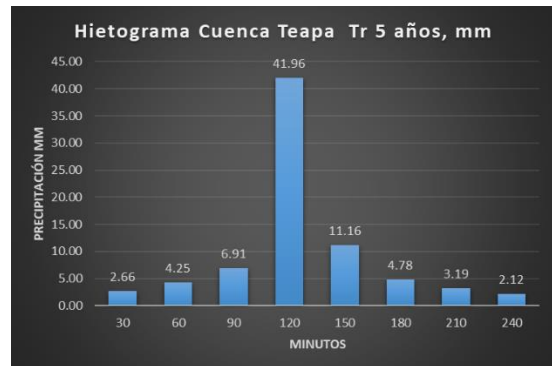
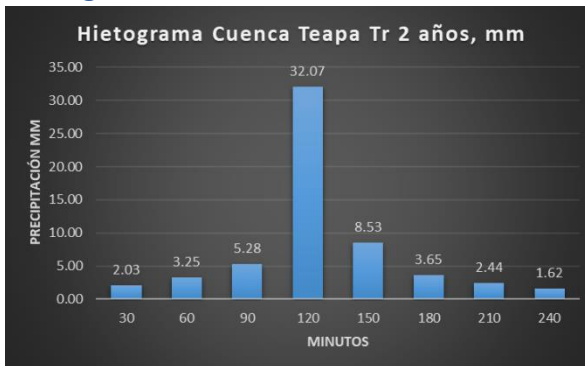
Anexos

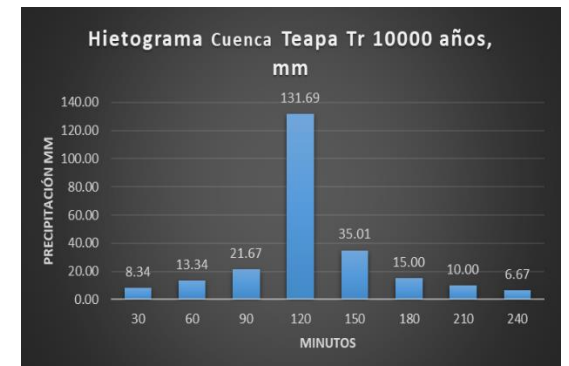
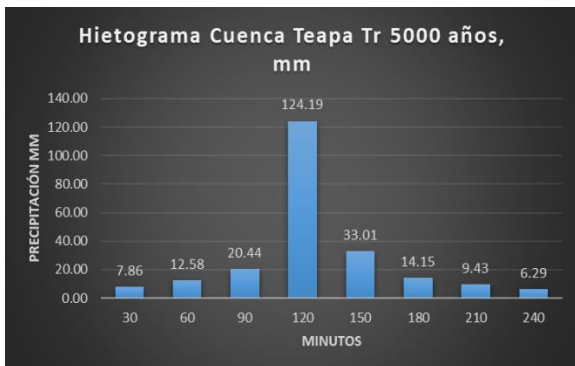
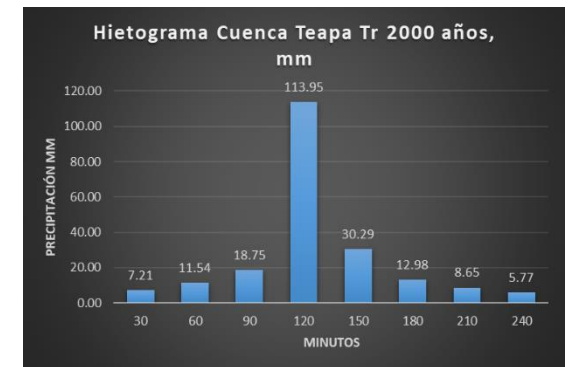
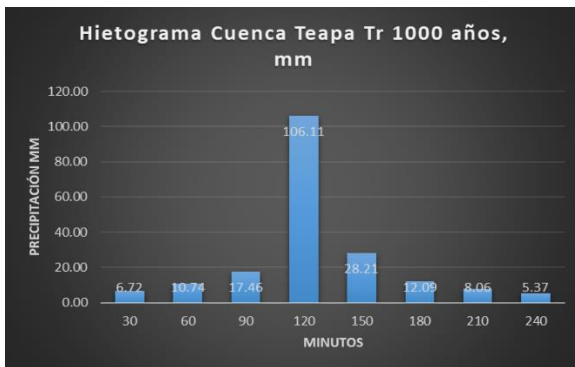
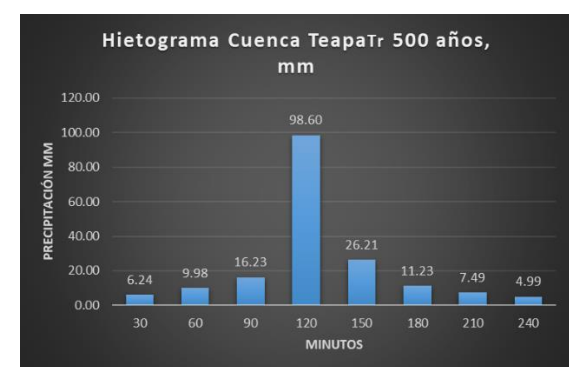
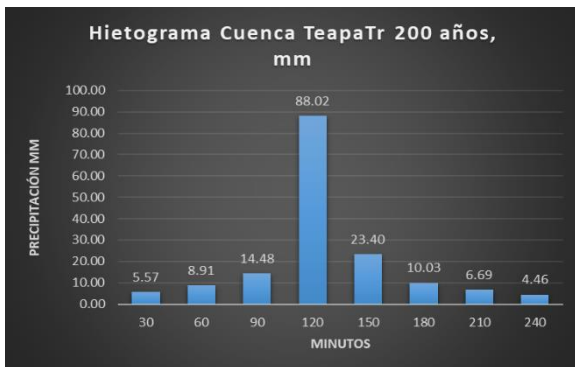
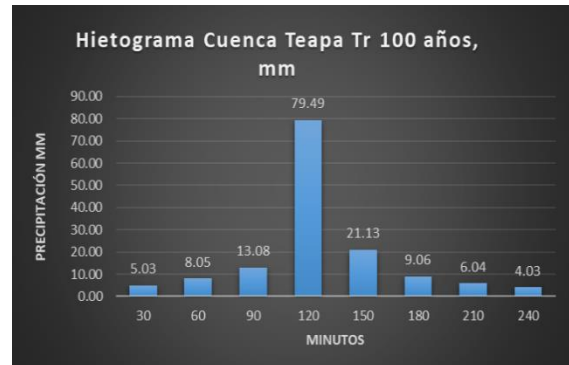
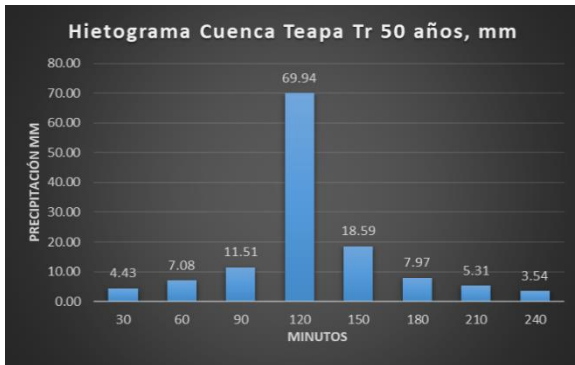
Anexo A Hietogramas lado sur de la cuenca





Hietogramas lado sur de la cuenca

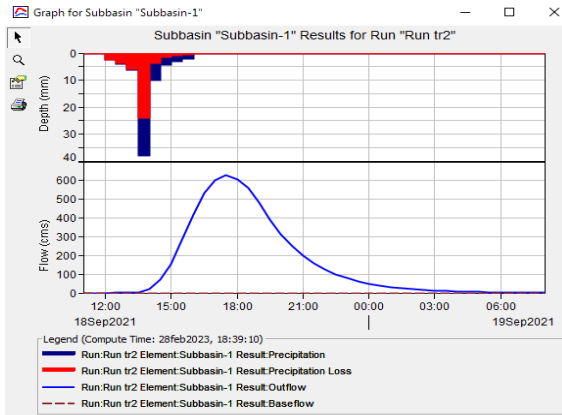




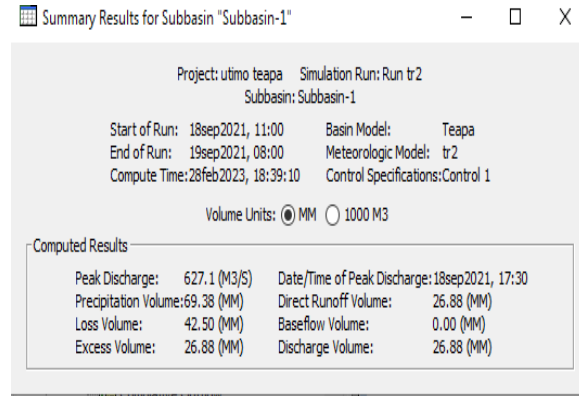


Anexo B

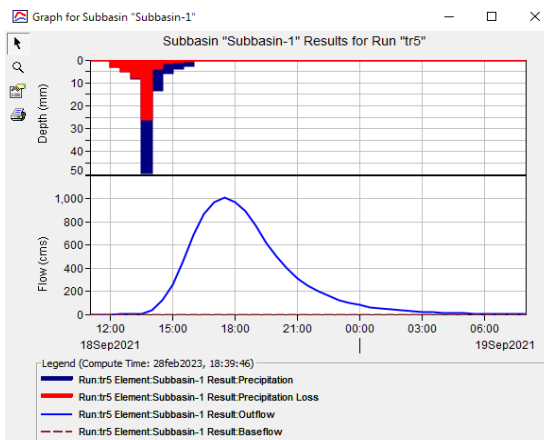
Hidrogramas HEC-HMS



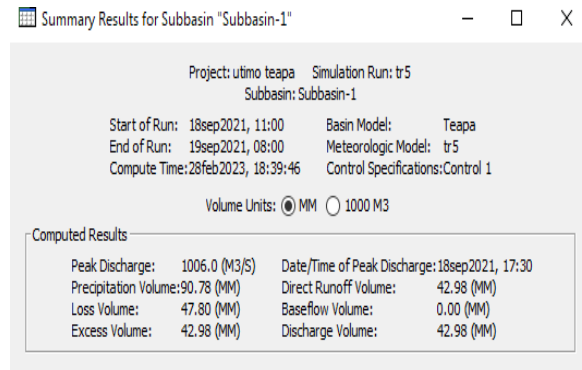
Hidrograma con periodo de retorno de dos años.



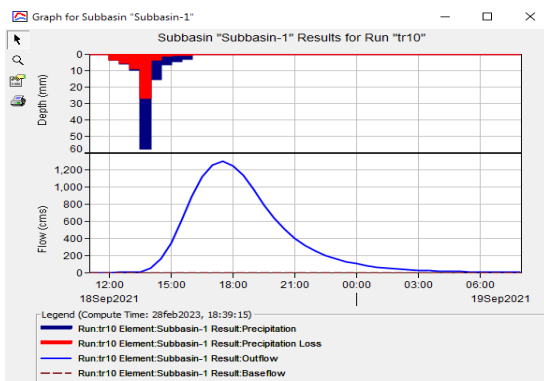
Resumen de resultados del hidrograma de Tr dos años.



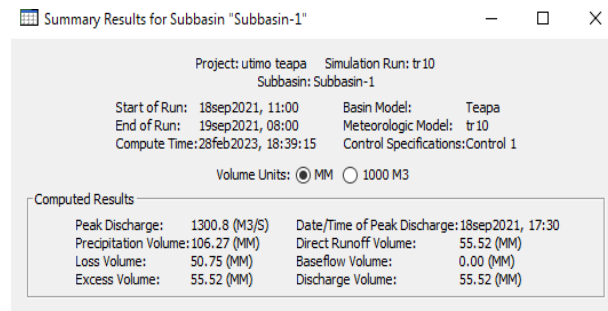
Hidrograma con periodo de retorno de cinco años.



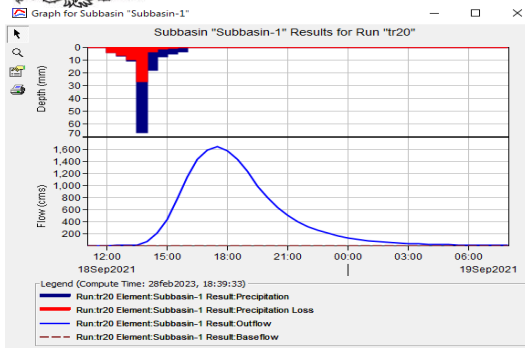
Resumen de resultados del hidrograma de Tr cinco años.



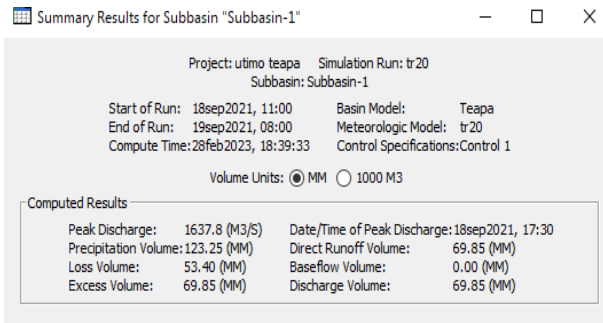
Hidrograma con periodo de retorno de diez años.



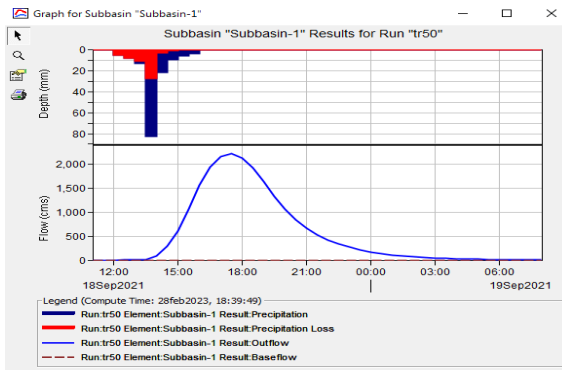
Resumen de resultados del hidrograma de Tr diez años.



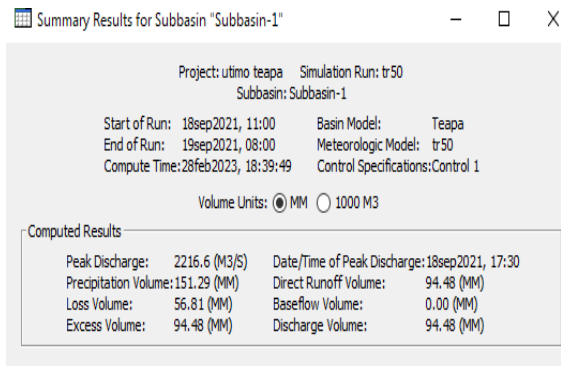
Hidrograma con periodo de retorno de veinte años.



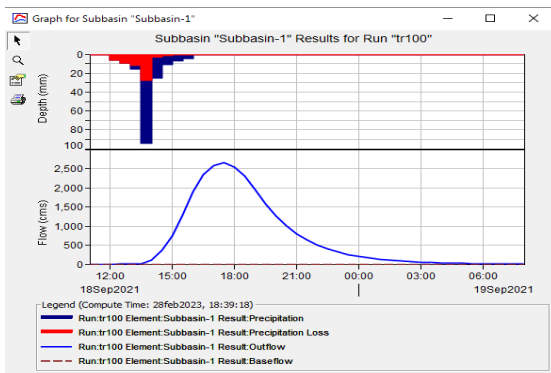
Resumen de resultados del hidrograma de Tr veinte años



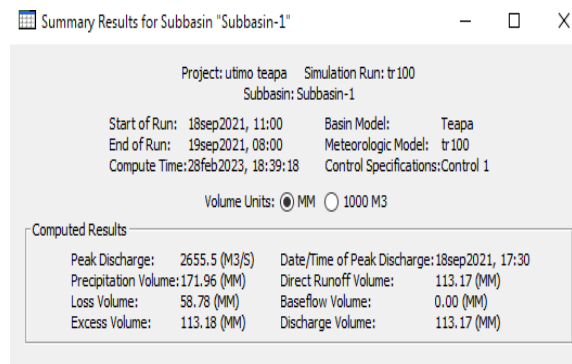
Hidrograma con periodo de retorno de cincuenta años.



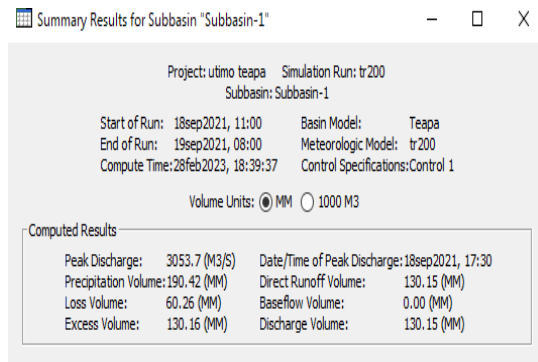
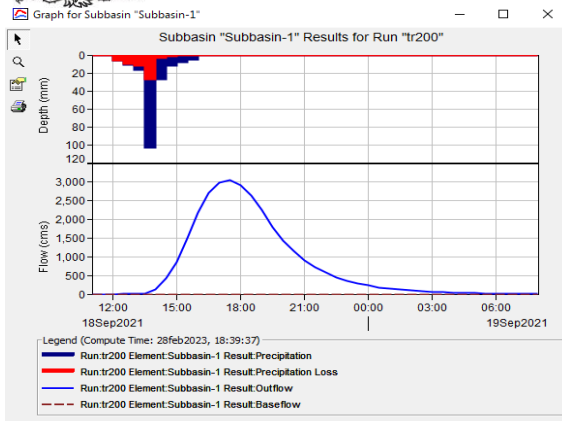
Resumen de resultados del hidrograma de Tr cincuenta años



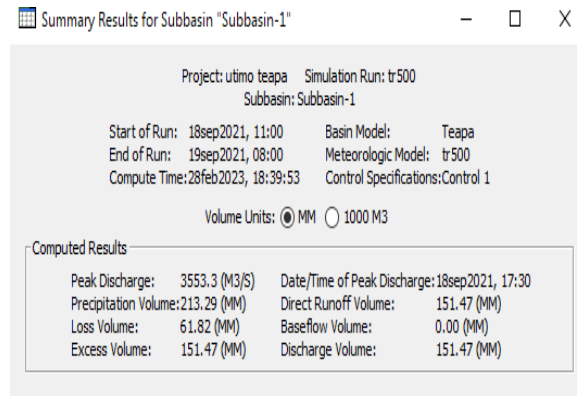
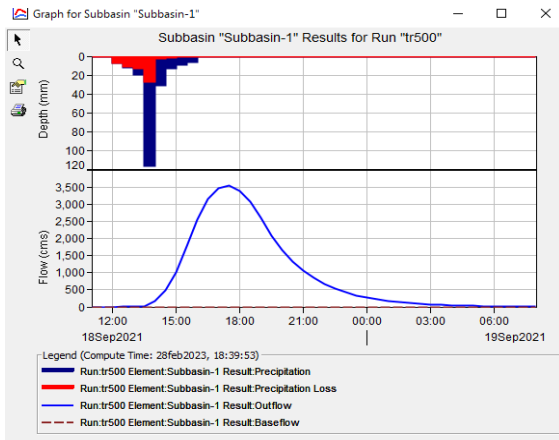
Hidrograma con periodo de retorno de cien años.



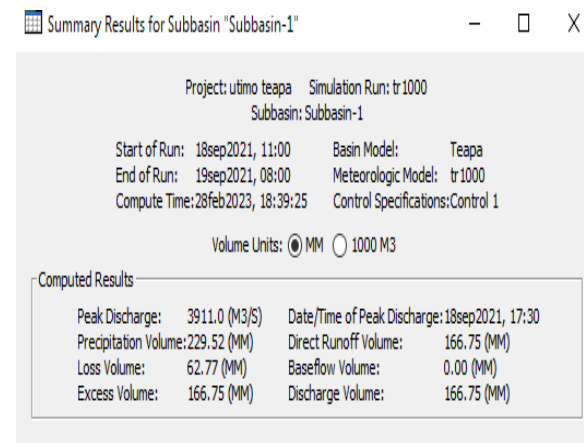
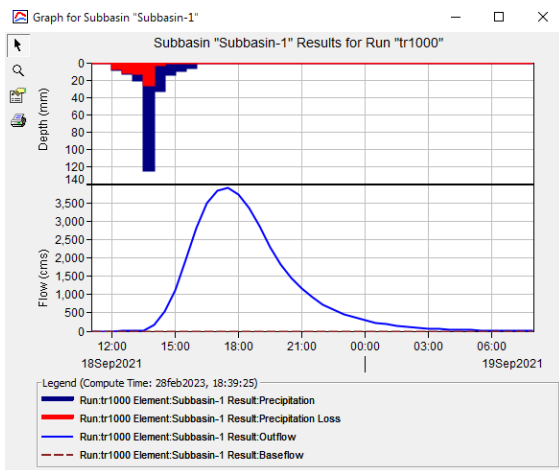
Resumen de resultados del hidrograma de Tr cien años.



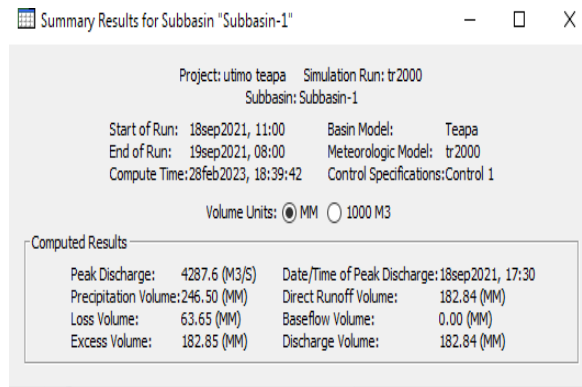
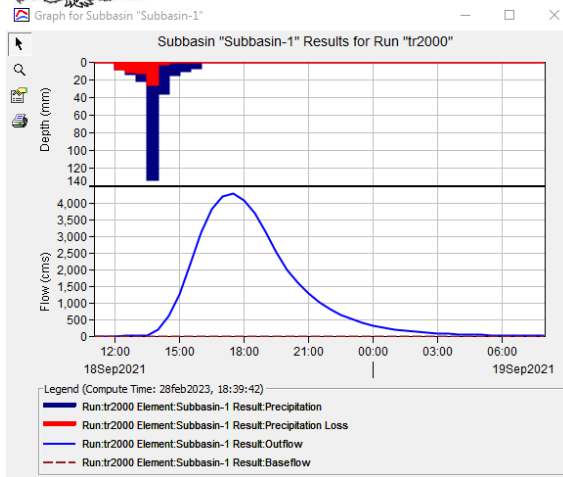
Hydrograma con periodo de retorno de doscientos años. Resumen de resultados del hidrograma de Tr doscientos años.



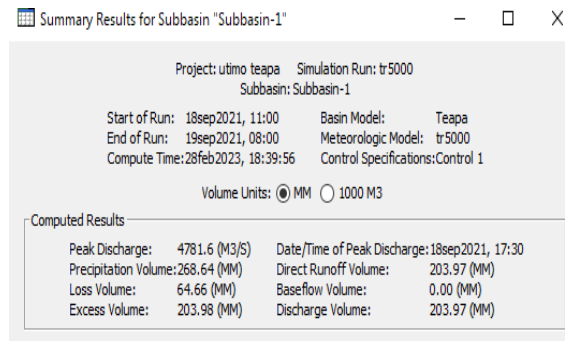
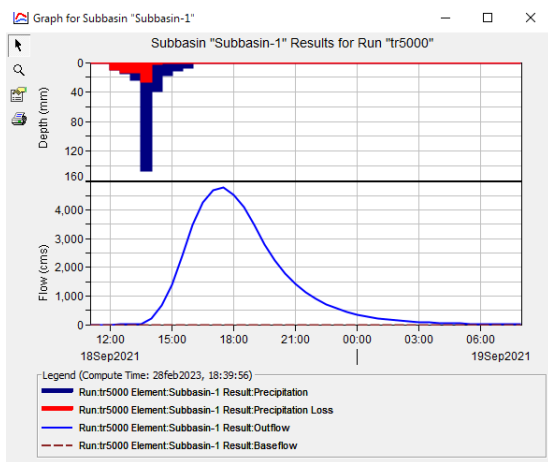
Hydrograma con periodo de retorno de quinientos años. Resumen de resultados del hidrograma de Tr quinientos años



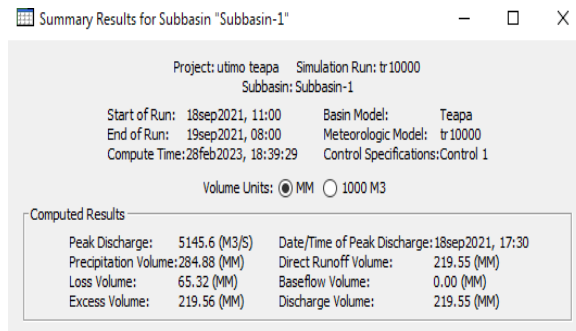
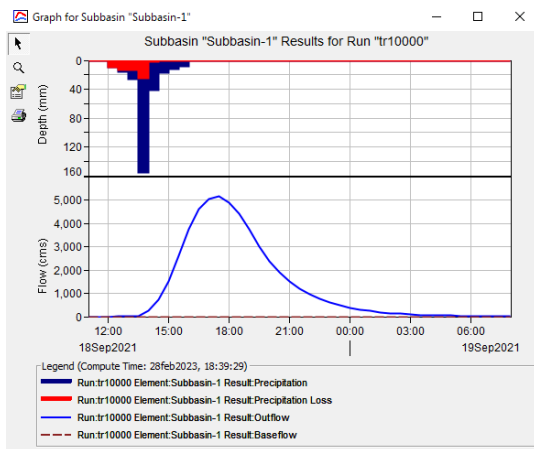
Hydrograma con periodo de retorno de mil años. Resumen de resultados del hidrograma de Tr mil años.



Hidrograma con periodo de retorno de dos mil años. Resumen de resultados del hidrograma de Tr dos mil años.



Hidrograma con periodo de retorno de cinco mil años. Resumen de resultados del hidrograma de Tr cinco mil años.

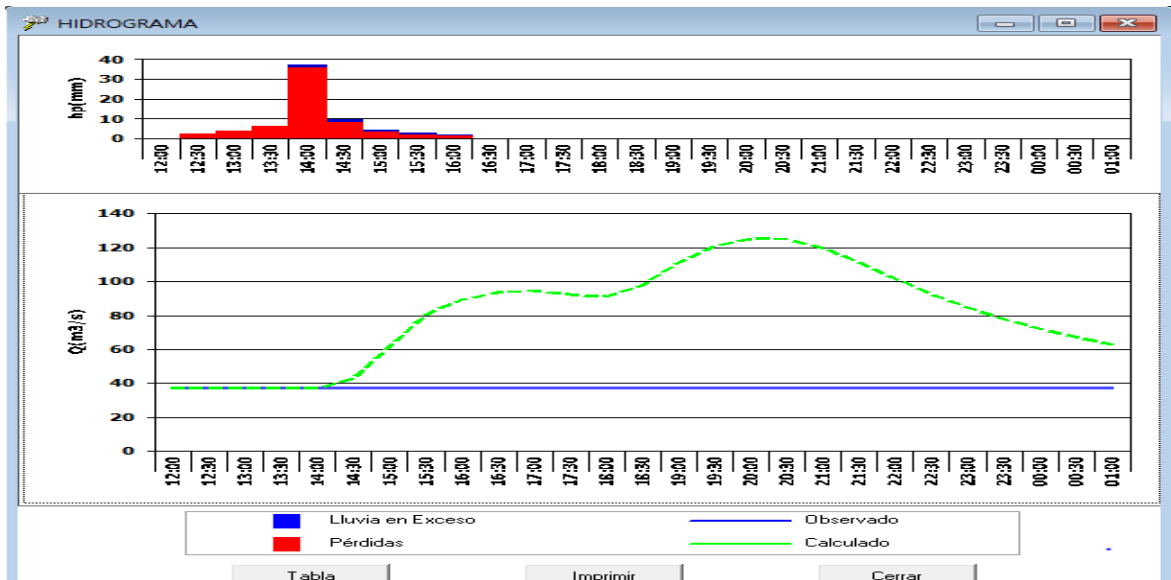


Hidrograma con periodo de retorno de diez mil años. Resumen de resultados del hidrograma de Tr diez mil años.



Anexo c

Hidrogramas MPE



Hidrograma con periodo de retorno de dos años.

The summary table window contains the following data:

Observaciones: (sin comas)

Lluvia		
Área de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	68.662	mm
Pérdidas	63.342	mm
Lluvia en Exceso	5.320	mm

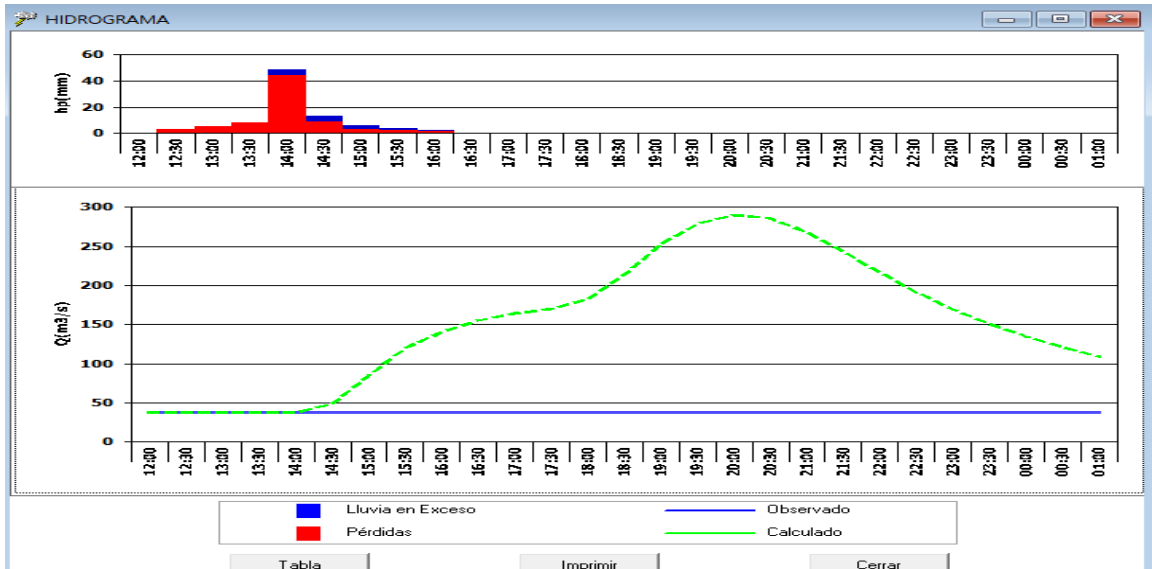
Volumen Escurrido			
	Observado	Calculado	
Total	3130.200	4252.442	Mm3
Directo	0.000	2454.242	Mm3
Base	3130.200	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Q máximo	37.000	125.391	m3/s

Buttons: Aceptar, Guardar tabla..., Cerrar



Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de dos años.



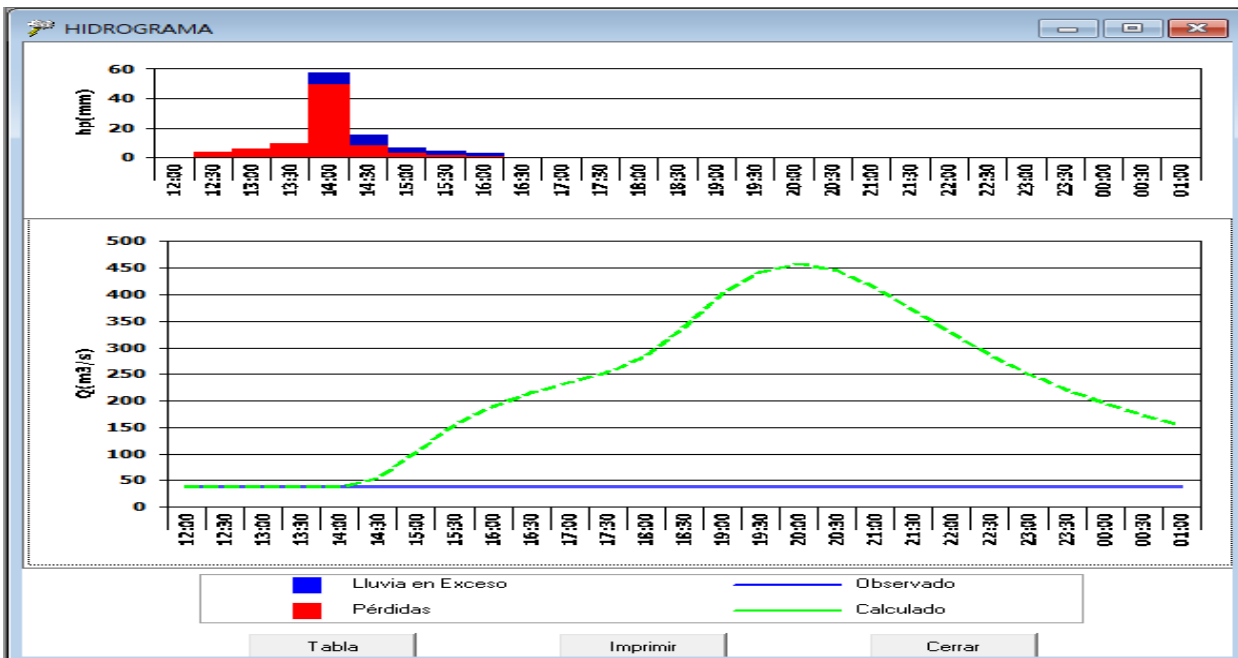
Hidrograma con periodo de retorno de cinco años.

Lluvia		
Área de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	89.843	mm
Pérdidas	75.716	mm
Lluvia en Exceso	14.128	mm

Volumen Escurrido			
	Observado	Calculado	
Total	3130.200	8315.505	Mm3
Directo	0.000	6517.305	Mm3
Base	3130.200	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	290.350	m ³ /s

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cinco años.



Hidrograma con periodo de retorno de diez años.

TABLA RESUMEN

Observaciones: [sin comas]

Lluvia

Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	105.178	mm
Pérdidas	82.290	mm
Lluvia en Exceso	22.888	mm

Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	3130.200	12356.799	Mm3
Directo	0.000	10558.599	Mm3
Base	3130.200	1798.200	Mm3

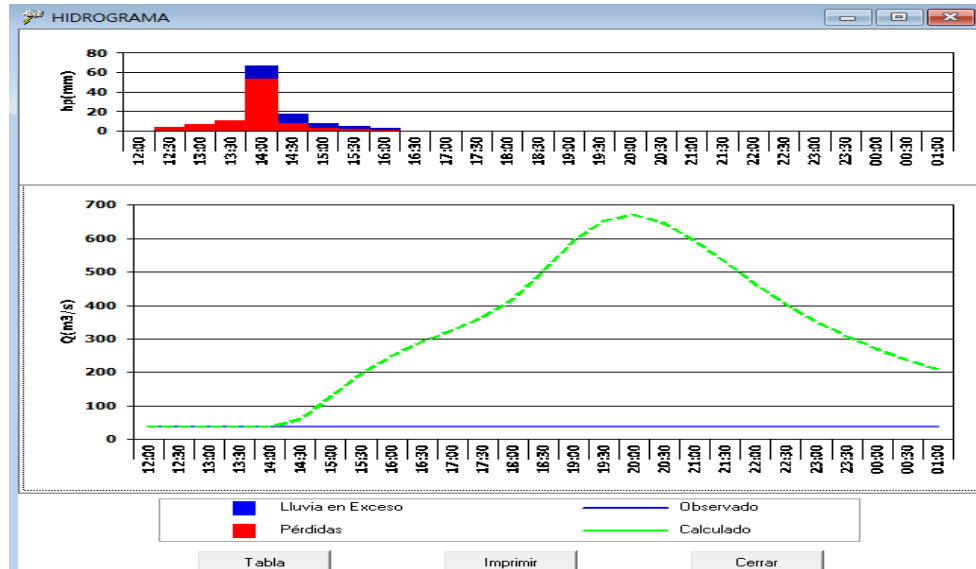
Qmáximo

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	458.254	m3/s

Buttons: Aceptar, Guardar tabla..., Cerrar.



Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de diez años.



Hidrograma con periodo de retorno de veinte años.

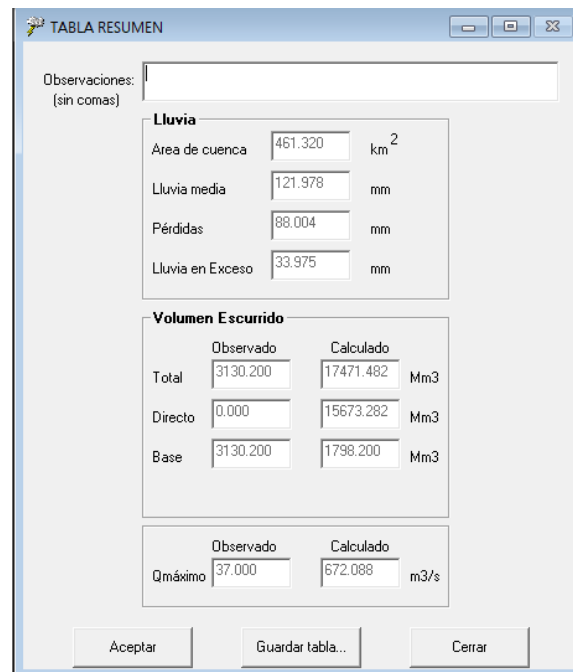
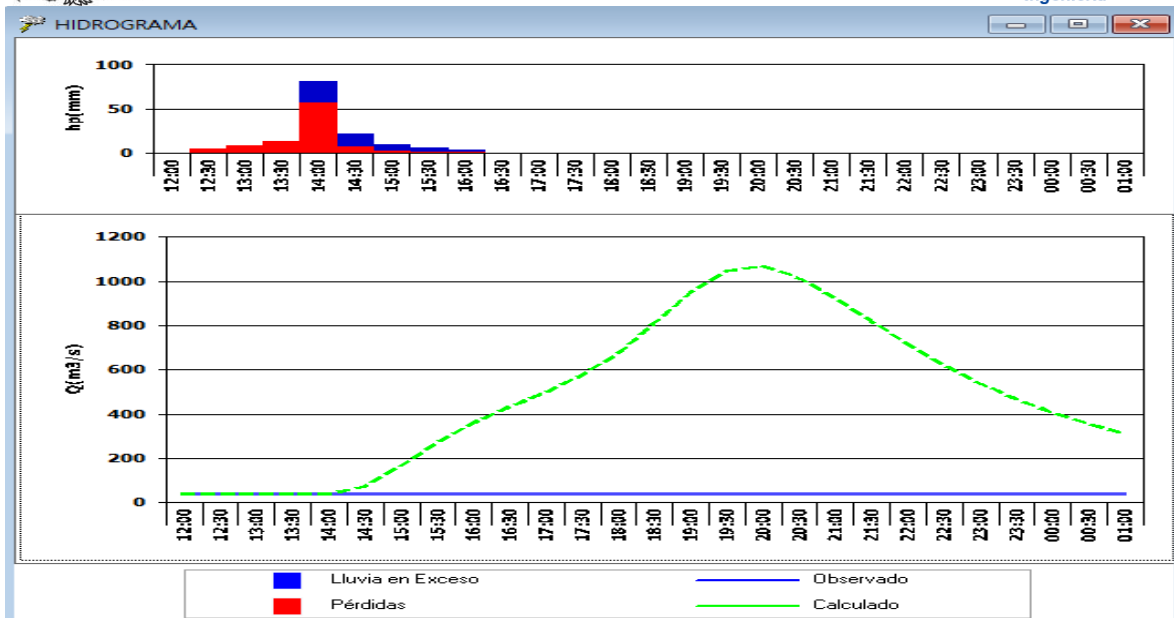


Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de veinte años.



Hidrograma con periodo de retorno de cincuenta años.

TABLA RESUMEN

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia

Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	149.730	mm
Pérdidas	95.216	mm
Lluvia en Exceso	54.514	mm

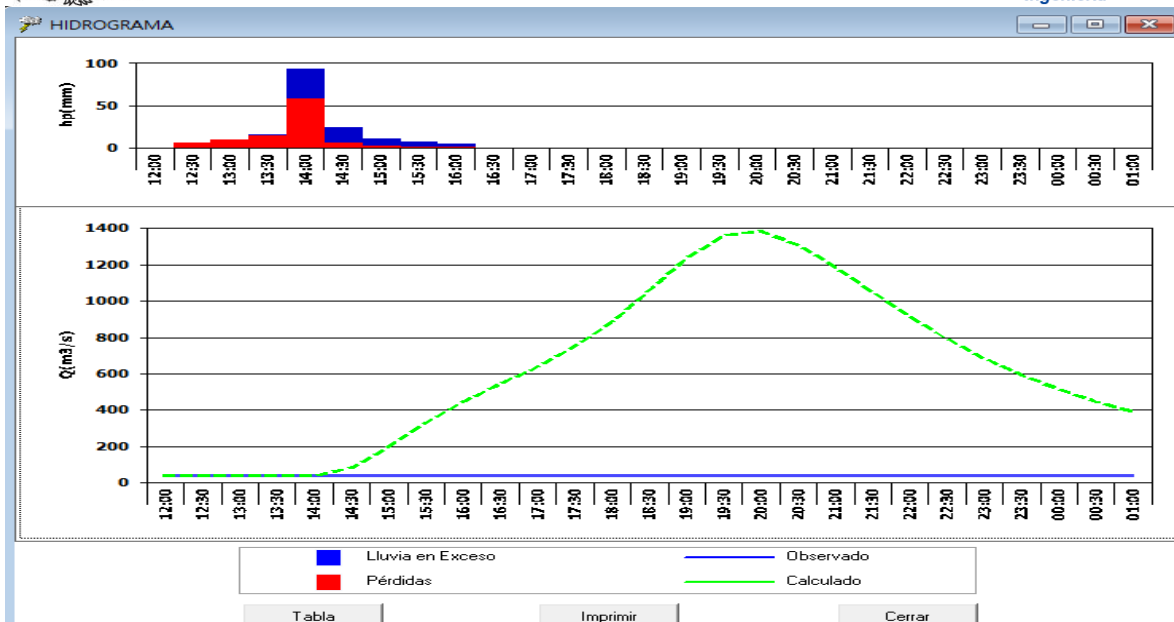
Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	3130.200	26946.560	Mm ³
Directo	0.000	25148.360	Mm ³
Base	3130.200	1798.200	Mm ³

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	1069.815	m ³ /s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cincuenta años.



Hidrograma con periodo de retorno de cien años.

TABLA RESUMEN

Observaciones: [sin comas]

Lluvia

Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	170.185	mm
Pérdidas	99.321	mm
Lluvia en Exceso	70.863	mm

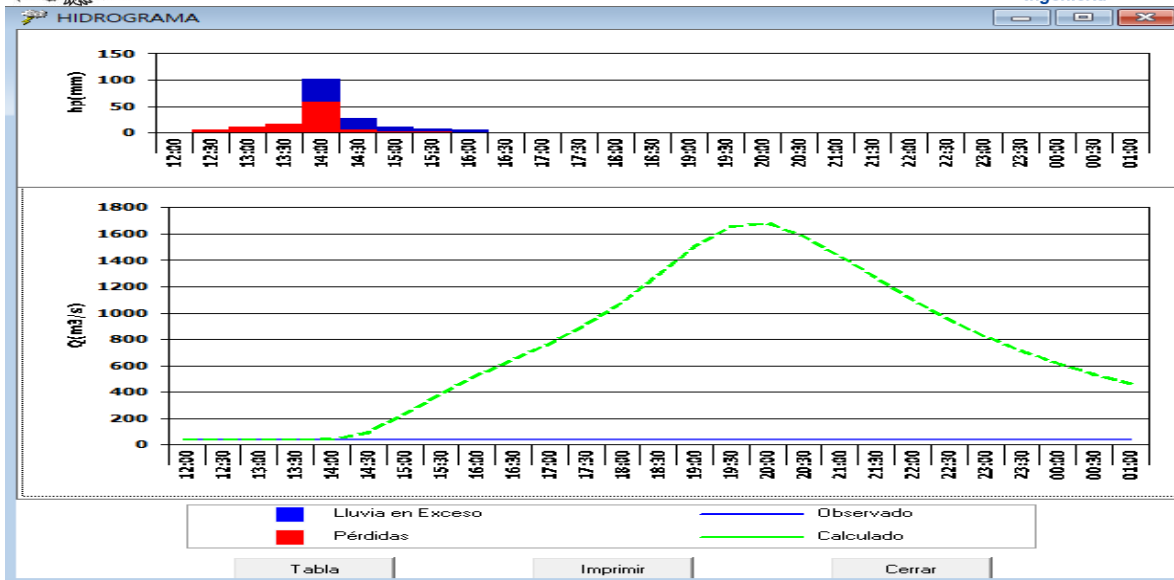
Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	3130.200	34488.936	Mm3
Directo	0.000	32690.736	Mm3
Base	3130.200	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	1387.389	m3/s

Buttons: Aceptar, Guardar tabla..., Cerrar

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cien años.



Hidrograma con periodo de retorno de doscientos años.

The summary table window displays the following data:

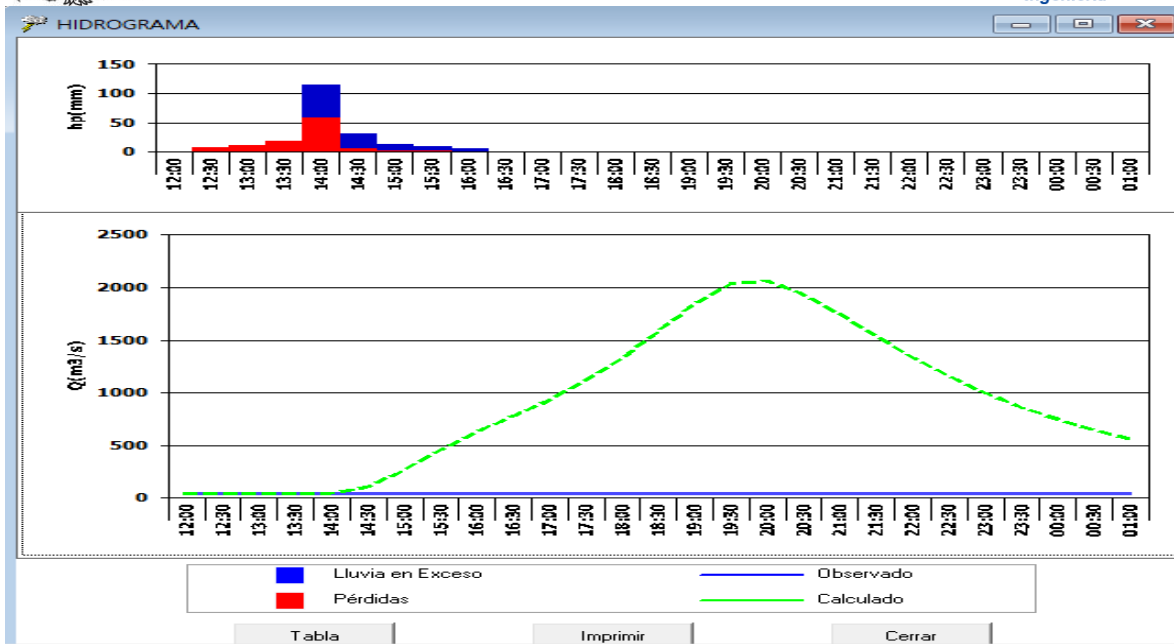
Lluvia			
Area de cuenca	461.320	km ²	
Lluvia media	188.451	mm	
Pérdidas	102.369	mm	
Lluvia en Exceso	86.083	mm	

Volumen Escurrido			
	Observado	Calculado	
Total	3130.200	41509.835	Mm3
Directo	0.000	39711.635	Mm3
Base	3130.200	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Q _{máximo}	37.000	1684.296	m3/s

Buttons: Aceptar, Guardar tabla..., Cerrar

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de doscientos años.



Hidrograma con periodo de retorno de quinientos años.

TABLA RESUMEN

Observaciones: (sin comas)

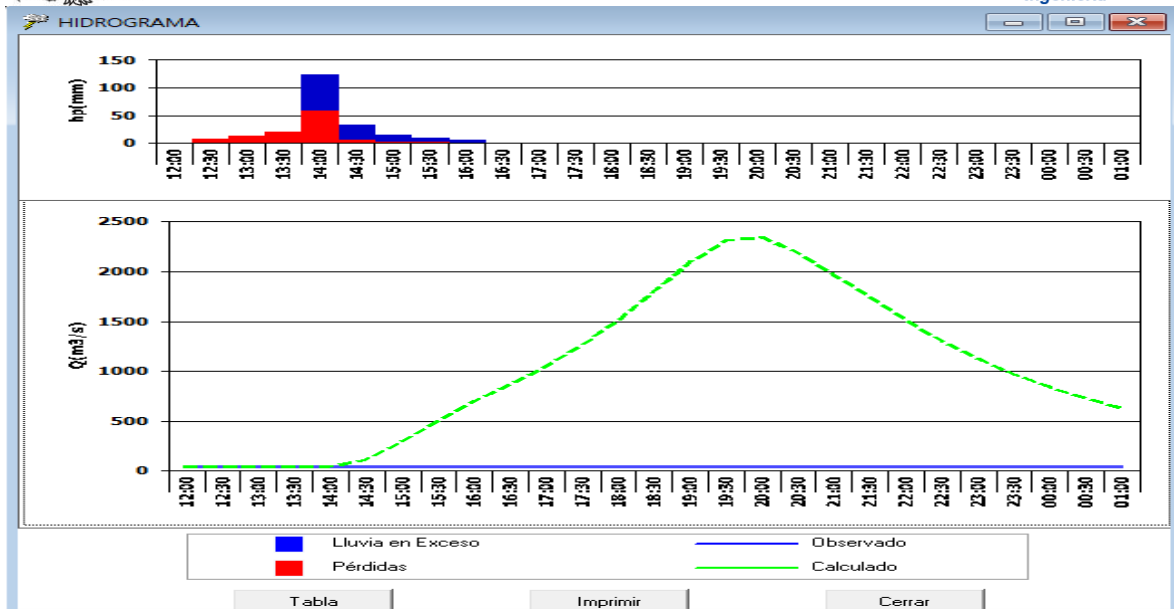
Lluvia		
Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	211.086	mm
Pérdidas	105.519	mm
Lluvia en Exceso	105.567	mm

Volumen Escurrido			
	Observado	Calculado	
Total	3263.400	50498.322	Mm3
Directo	0.000	48700.122	Mm3
Base	3263.400	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	2065.976	m ³ /s

Buttons: Aceptar, Guardar tabla..., Cerrar

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de quinientos años.



Hidrograma con periodo de retorno de mil años.

TABLA RESUMEN

Observaciones:
(sin comas)

Lluvia

Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	227.158	mm
Pérdidas	107.432	mm
Lluvia en Exceso	119.726	mm

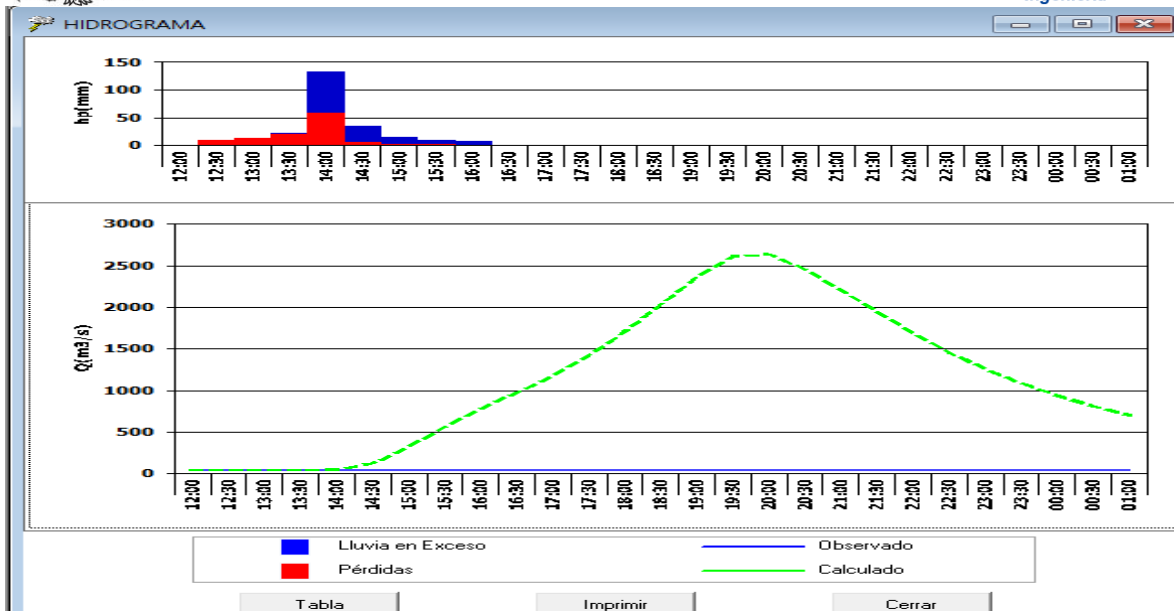
Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	3130.200	57030.018	Mm ³
Directo	0.000	55231.818	Mm ³
Base	3130.200	1798.200	Mm ³

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	2344.113	m ³ /s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de mil años.



Hidrograma con periodo de retorno de dos mil años.

TABLA RESUMEN

Observaciones: (sin comas)

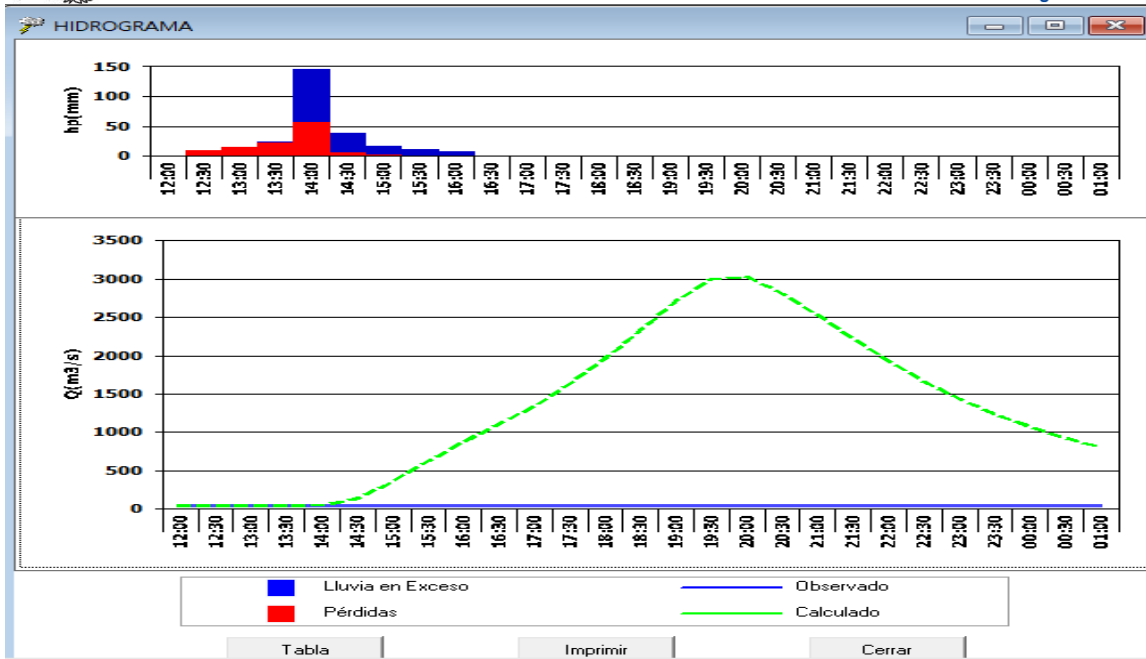
Lluvia		
Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	243.954	mm
Pérdidas	109.205	mm
Lluvia en Exceso	134.750	mm

Volumen Escurrido			
	Observado	Calculado	
Total	3130.200	63960.938	Mm3
Directo	0.000	62162.738	Mm3
Base	3130.200	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	2639.779	m3/s

Buttons: Aceptar, Guardar tabla..., Cerrar

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de dos mil años.



Hidrograma con periodo de retorno de cinco mil años.

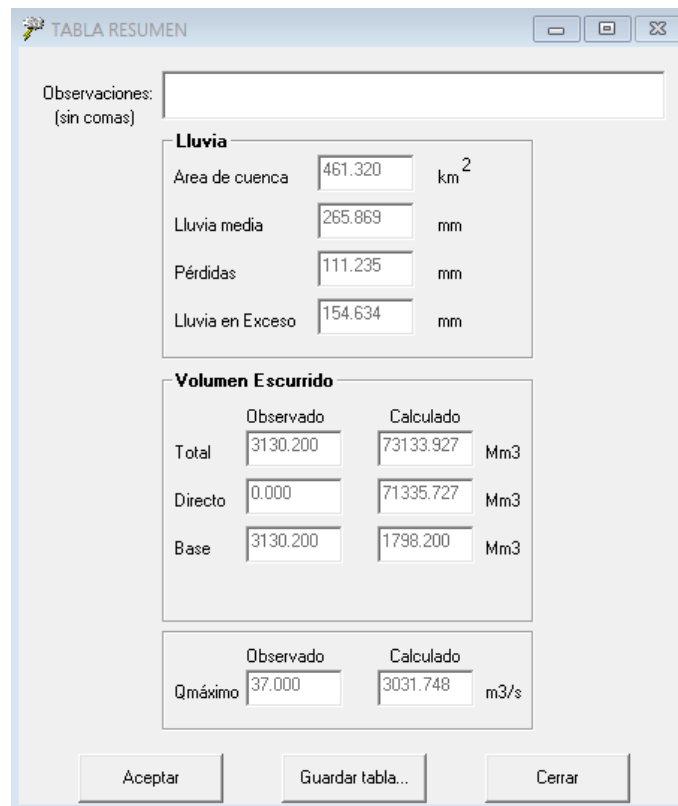
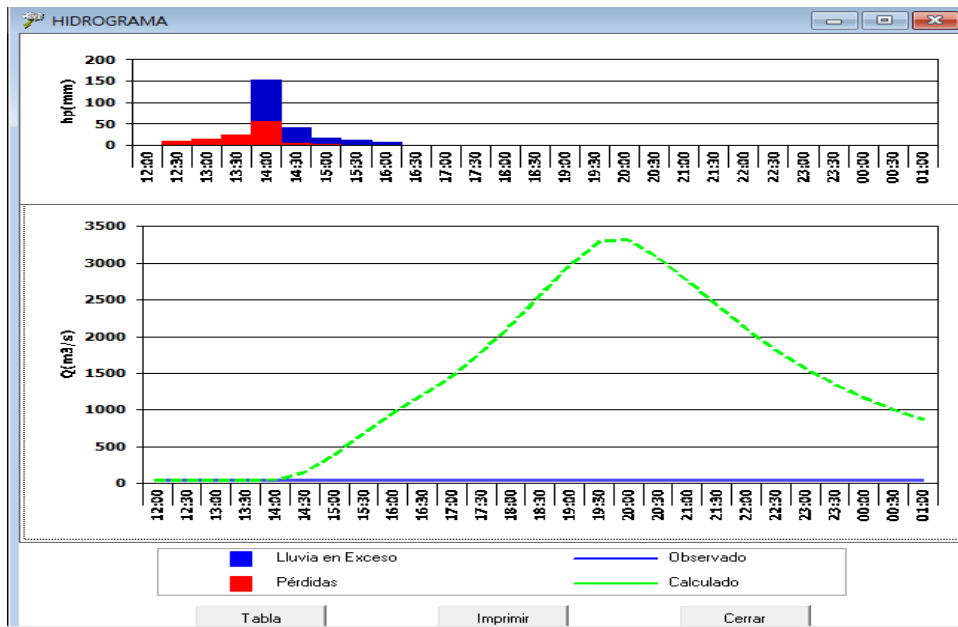


Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de cinco mil años



Hidrograma con periodo de retorno de diez mil años.

TABLA RESUMEN

Observaciones:

(sin comas)

Lluvia

Area de cuenca	461.320	km ²
Lluvia media	281.939	mm
Pérdidas	112.555	mm
Lluvia en Exceso	169.384	mm

Volumen Escurrido

	Observado	Calculado	
Total	3263.400	79938.314	Mm3
Directo	0.000	78140.114	Mm3
Base	3263.400	1798.200	Mm3

	Observado	Calculado	
Qmáximo	37.000	3322.869	m3/s

Aceptar Guardar tabla... Cerrar

Tabla resumen del hidrograma de un periodo de retorno de diez mil años