



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELO DE LLUVIA –
ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS
DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA
PEÑITAS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA :

**MAURICIO BECERRIL
OLIVARES**

DIRECTOR DE TESIS:

DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA



Ciudad Universitaria

Febrero 2016

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	MODELO PARA PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO (MPE)	10
	2.1 ANTECEDENTES GENERALES SOBRE HIDROLOGÍA.....	11
	2.2 CONCEPTOS GENERALES.....	17
	2.3 MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS.....	19
	2.4 MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS	21
	2.5 MODELO DISTRIBUIDO MPE.....	23
	2.6 MÉTODO EMPLEADO PARA EL CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN	24
	2.7 MÉTODO EMPLEADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ESCURRIMIENTO	26
	2.8 MÉTODO PARA EL TRANSITO DEL ESCURRIMIENTO (MÉTODO DE CLARK MODIFICADO).....	33
3	INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS ...	37
	3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	38
	3.2 SELECCIÓN DE LAS TORMENTAS DE ANÁLISIS PARA LA CUENCA PEÑITAS	43
4	OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS MEDIANTE UN SIG PARA LAS CUENCAS SAYULA, AZAPAC, TZIMBAC.....	49
	4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA “ÁNGEL ALBINO CORZO” (PEÑITAS)	50
	-CORTINA.....	51
	-OBRA DE DESVÍO	51
	-OBRA DE EXCEDENCIAS.....	52
	PLANTA HIDROELÉCTRICA.....	52
	4.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE).....	55
	4.3 ÁREA DE LA CUENCA.....	56
	4.4 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL	62
	4.5 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL	65
	4.6 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN.....	67
	4.7 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO.....	68
	4.8 COBERTURA VEGETAL, GEOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA.....	68
	4.9 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA.....	69

5	MODELO DE LLUVIA-ESCURRIMIENTO PARA LA CUENCA	
PEÑITAS		72
5.1	CONTENIDO DEL PROGRAMA MPE	77
5.2	ANÁLISIS DE LA CUENCA SAYULA	82
5.3	ANÁLISIS DE LA CUENCA TZIMBAC	84
5.4	ANÁLISIS DE LA CUENCA AZAPAC	85
5.5	ANÁLISIS DE LA CUENCA TZIMBAC CON AZAPAC	86
5.6	RESULTADOS	87
5.7	CÁLCULO DE LOS GASTOS BASE	103
5.8	TIEMPO DE PRONÓSTICO	108
6	CONCLUSIONES	109
7	REFERENCIAS	110

A Dios, por todas sus bendiciones, por permitirme salir adelante en cada etapa de mi vida.

A mi papá, por tu cariño, trabajo, dedicación y en ocasiones regaños que me han formado como hombre, por sacarnos adelante todos los días a base de tu esfuerzo y sacrificio, por apoyarme en cada momento, por enseñarme a ser mejor día a día, por ser simplemente mi ejemplo a seguir.

A mi mamá, por tu cariño, comprensión, entrega, y atenciones con las que siempre me has llenado, por confiar en mí, por darme tranquilidad cuando la necesito, por enseñarme a ver las cosas buenas de la vida, por ser simplemente la mejor.

A mi hermano, por estar siempre para mí, por las risas, juegos y peleas, por ser parte fundamental de mi vida y de mi familia.

A Paty, por acompañarme a lo largo de este tiempo, por apoyarme en cada momento y por ayudarme a culminar esta etapa de mi vida.

A mis tíos y primos, por cada uno de los momentos que hemos compartido, por su apoyo y atenciones.

A mis abuelas, que aunque ya no estén con nosotros, les debo gran parte de mi educación, sin ellas no sería hoy quien soy.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, todo mi agradecimiento y gratitud por permitirme estudiar en la mejor universidad de México y por permitirme superarme tanto en lo personal como en lo profesional.

A la Facultad de Ingeniería por la educación que me brindó a lo largo de estos años.

Al Instituto de Ingeniería, por el apoyo recibido a lo largo de la realización de este trabajo.

Al Dr. Ramón Domínguez Mora, por su paciencia, tiempo y dedicación para la realización, revisión y corrección de este trabajo.

A la M.I. Gabriela Esquivel, por su asesoría y tiempo.

A mis sinodales, por el tiempo que se tomaron en la revisión de este trabajo.

1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se presenta la metodología para la calibración del Modelo Lluvia-Escurrecimiento para la cuenca Peñitas utilizando el software ArcView 3.2 y el Modelo para pronóstico de Escurrecimiento (MPE) desarrollado en el Instituto de Ingeniería UNAM.

En el primer capítulo se abordará la localización del sitio de estudio, sus características generales, objetivo y alcances de la presente tesis.

En el segundo capítulo se describe el proceso Lluvia – Escurrecimiento, así como algunos antecedentes de hidrología de superficie; se presenta también la descripción de los modelos de parámetros concentrados y distribuidos, principalmente el modelo MPE, el cual es el que se emplea en esta Tesis.

En el tercer capítulo se presenta una descripción de las estaciones climatológicas e hidrométricas, así como los registros de lluvia y gastos que fueron consultados para la selección de las tormentas más importantes para la calibración del modelo.

En el cuarto capítulo se describen las características principales de la presa Ángel Albino Corzo (Peñitas), además del proceso de obtención de los parámetros hidrológicos de la cuenca mediante el programa ArcView 3.2.

En el quinto capítulo se analizan las tormentas seleccionadas de las cuencas Sayula, Azapac, Tzimac y Tzimac con Azapac y se calibran los parámetros del modelo MPE, a partir de los años 2009 hasta 2015, presentando de manera gráfica y tabular los resultados obtenidos.

Por último se presentan las conclusiones y referencias de la presente tesis.

El río Grijalva es el segundo río más caudaloso del país, tiene un área de cuenca aproximada de 58,000 km²; nace en la República de Guatemala y desemboca en el Golfo de México, en el estado de Tabasco, después de haber cruzado el estado de Chiapas. Su aportación media anual hasta el sitio de la presa Peñitas es del orden de 22,840 Mm³.

El río Grijalva es un río continuo, que tiene su origen en la sierra guatemalteca de los Cuchumatanes. Resulta de la unión de dos corrientes importantes, el río San Miguel y el río San Gregorio. El primero está formado por la confluencia cerca de Chicomuselo, Chiapas, de los ríos Yahuayita y Zacualpa, que bajan de la Sierra Madre, por territorio mexicano, a los cuales se une el río Tapizalá, que se origina en territorio de Guatemala, donde se le denomina río Cuilco, y cruza la frontera por Amatenango, Chiapas. El segundo, el río San Gregorio, se forma por la confluencia aproximadamente 3 kilómetros al oeste de la frontera, de los ríos Lagartero, Nentón, Azul y Selegua, provenientes de Guatemala, así como del río Tzimal, que se le une por su margen derecha. Una vez formado el río Grijalva por la convergencia de los ríos San Miguel y San Gregorio prácticamente en la orilla oriental del vaso de la presa La Angostura, sigue en dirección noroeste por el Valle de Chiapas.

La parte de la cuenca del río Grijalva que se encuentra en Guatemala tiene un área de 5,260 km². En territorio mexicano, el cauce sigue una dirección sureste-noroeste, con sentido hacia el noroeste, a lo largo de la Depresión Central de Chiapas. Posteriormente atraviesa la Meseta Central por el Cañón del Sumidero, recorre las sierras del norte y desciende en la llanura tabasqueña hasta unirse al río Usumacinta, desembocando juntos en el Golfo de México. En la figura 1.1 se muestra la región hidrológica Grijalva- Usumacinta. (Instituto Nacional de Ecología, 2009).

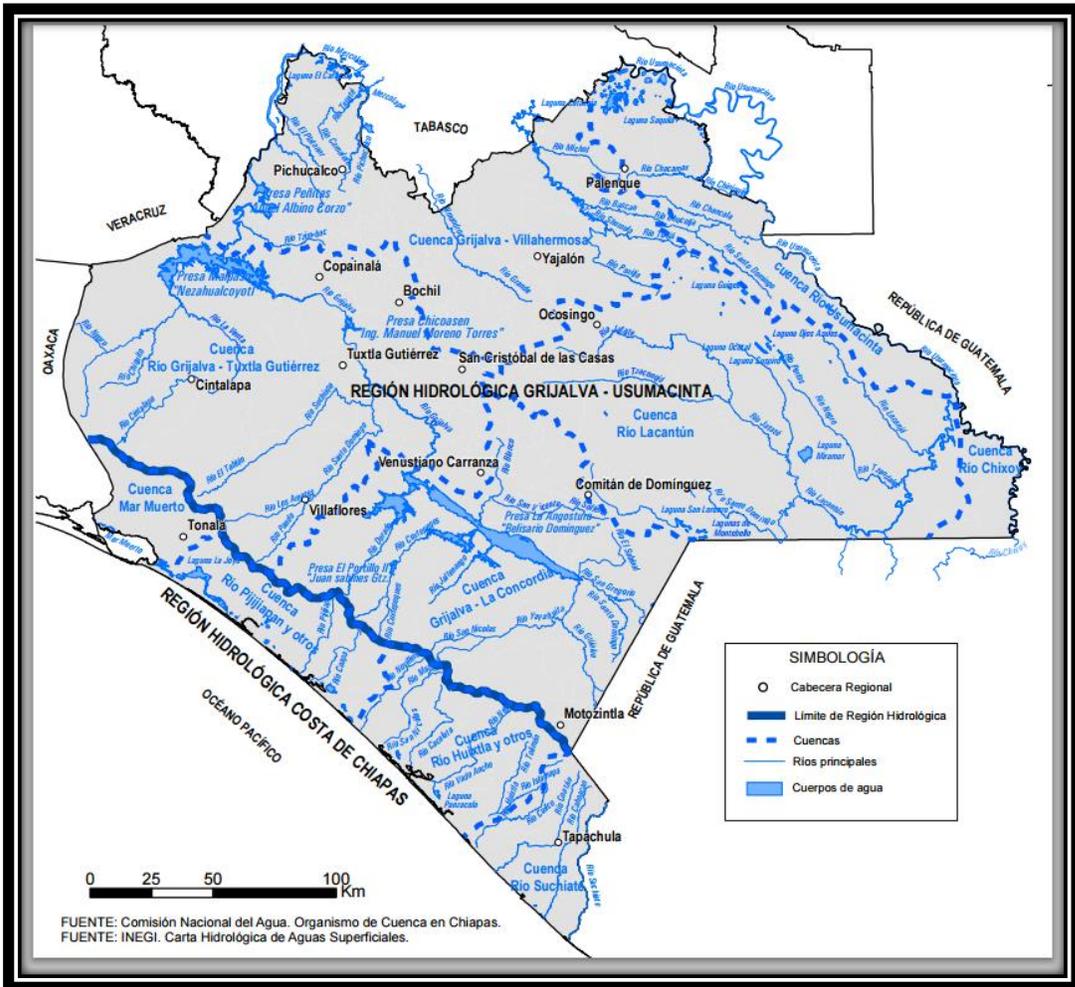


Fig. 1.1 (Región Hidrológica Grijalva- Usumacinta)

La cuenca del Río Grijalva comprende cuatro porciones geográficas:

El Alto y Medio Grijalva se ubican en la Depresión Central de Chiapas, cuenta con una extensa zona semiplana bordeada por la Sierra Madre, los Altos y las Montañas del Norte de Chiapas. En esta porción se presentan las mayores elevaciones de Chiapas, que alcanzan alturas superiores a los 2,700 (msnm).

En el Bajo Grijalva (Sierra), se ubica la Sierra del Norte de Chiapas, se compone de una serie de serranías separadas por valles que bordean a los Altos y las Montañas del Oriente. La disposición de las montañas permite interceptar la humedad que cargan los vientos del Golfo de México, lo que propicia un clima húmedo con lluvias todo el año.

La cuenca de la presa Peñitas se encuentra ubicada en El Bajo Grijalva (Planicie) (Figura 1.3), se presentan planicies ubicadas en la Llanura Costera del Golfo, esta llanura es ocupada en su mayoría por el estado de Tabasco.

En la parte alta de la cuenca se ubica una de las zonas de mayor precipitación en México, con poco más de 4,000 (mm) anuales. En esta zona se registran las más altas precipitaciones cuando se combina un sistema tropical con la entrada de frentes o corrientes de aire frío y ocasiona severas inundaciones aguas abajo. En la planicie del Bajo Grijalva la precipitación oscila entre los 1,700 (mm) y 2,300 (mm).

La precipitación de la región es la mayor del país y una de las más altas del mundo. Su media anual es de 2,143 mm, 2.6 veces el promedio nacional. En la Sierra de Chiapas y en la Sierra de la Lacandonia, las lluvias sobrepasan en algunos lugares los 4,000 mm al año y llegan hasta los 5,000 mm, mientras que en la zona costera del norte promedia 2,093 mm al año y alcanza los 2,750 mm. La temperatura media anual es de 24 °C y de 7 °C y 41°C en los extremos, lo que establece un gradiente de climas cálidos y semicálidos húmedos.

La invasión de masas de aire frío del norte y húmedos tropicales del Atlántico y el Pacífico provocan la mayoría de las precipitaciones anuales en la región. En el verano las lluvias son muy intensas. Entre el otoño y el invierno soplan los nortes, con lluvias prolongadas y torrenciales. Los ríos y lagunas alcanzan sus máximos niveles entre septiembre y noviembre, lo que vuelve a la planicie un espejo de agua. Es la época de las inundaciones, que provocan desastres en la agricultura y las poblaciones asentadas en la llanura costera del norte. Instituto Nacional de Ecología (2005).

La figura 1.2 muestra una comparación de los escurrimientos superficiales en toda la República Mexicana, se puede observar que en la cuenca del Rio Grijalva se presentan los máximos escurrimientos a nivel nacional.



Fig. 1.2 Ecurrimientos Superficiales en México (INEGI)

La presa Ángel Albino Corzo (Peñitas), junto con las Presas Belisario Domínguez (Angostura), Manuel Moreno Torres (Chicoasén) y Netzahualcóyotl (Malpaso), conforman el sistema de presas sobre el río Grijalva.

Este sistema de presas hidroeléctricas, generan cerca del 25% del total de energía hidroeléctrica disponible del país. De ellas, la más grande es La Angostura, ubicada en la parte más alta de Chiapas, aguas abajo está Chicoasén, después Malpaso y más adelante está Peñitas, como se muestra en la figura 1.3.



Fig. 1.3 Porciones Geográficas de la Cuenca del Río Grijalva

El sistema de Presas del Río Grijalva, además tiene como función fundamental el actuar como regulador de los volúmenes provenientes de las avenidas extraordinarias que se generan en las regiones de Chiapas y Tabasco; es de ahí la gran importancia de la actualización de los modelos de lluvia-escorrentía y de las avenidas de diseño, para la creación de las políticas de operación de cada una de las presas de dicho sistema, con el fin de prevenir daños a la población. En la figura 1.4 se presentan las capacidades de almacenamiento de las presas del Río Grijalva.



Fig. 1.4 Capacidad de almacenamiento de las presas del Río Grijalva (CONAGUA, 2010)

Para la operación de las centrales hidroeléctricas es necesario contar con información oportuna y confiable tanto hidrométrica como climatológica dentro de la cuenca, que permita la predicción anticipada de operaciones para el manejo de los sistemas, tanto con fines de generación eléctrica como de seguridad.

Las lluvias presentadas en Octubre y Noviembre de 2007 en los estados de Chiapas y Tabasco, causadas por un frente frío, aumentaron considerablemente los caudales recibidos por las presas Peñitas y Malpaso, provocando que la presa Peñitas desfagara. Debido a la precipitación que alcanzó los 1000 mm durante 3 días consecutivos, cantidad total que llueve en un año en Chiapas, el día 4 de noviembre del mismo año tuvo lugar un deslizamiento del talud en la margen derecha del río Grijalva, en el ejido Juan de Grijalva, en el tramo entre las presas Malpaso y Peñitas.

Los cambios morfológicos que ha sufrido la cuenca Peñitas, debidos a los últimos fenómenos hidrometeorológicos, deforestación y cambio en el uso de suelo, obligan a tener un nuevo modelo lluvia – escurrimiento de la cuenca.

El objetivo de esta tesis es obtener el modelo lluvia-escurrimiento de la Cuenca Peñitas, mediante un modelo de parámetros distribuidos, que permita pronosticar los volúmenes de

las avenidas hacia la presa Peñitas. Dicho modelo servirá para alimentar el programa Pronóstico de avenidas en tiempo real para la Presa Peñitas, de la Comisión Federal de Electricidad.

2 MODELO PARA PRONÓSTICO DE ESCURRIMIENTO (MPE)

2.1 ANTECEDENTES GENERALES SOBRE HIDROLOGÍA

2.1.1 HIDROLOGÍA

Es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo seres vivos (Aparicio 1992).

2.1.2 CUENCA

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida. (Aparicio 1992).

Está delimitada por una línea imaginaria denominada “Parteaguas” formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas.

Desde el punto de vista de su salida existen dos tipos de cuencas:

- a) **Endorreicas.**- El punto de salida está dentro de los límites de la cuenca, generalmente es un lago.
- b) **Exorreicas.**- El punto de salida no se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar.

2.1.3 PRECIPITACIÓN

La precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua (Aparicio, 2011).

2.1.4 TIPOS DE PRECIPITACIÓN

Los mecanismos que causan el levantamiento del aire húmedo provocan que la atmósfera se enfríe. De acuerdo con el mecanismo que provoca dicho levantamiento del aire la precipitación puede ser convectiva, ciclónica u orográfica.

a) **Precipitación convectiva**

Se origina por el calentamiento del suelo, que provoca corrientes ascendentes de aire húmedo. La precipitación asociada a este tipo de fenómeno afecta áreas reducidas, del orden de 25 a 50 kilómetros cuadrados.

b) Precipitación ciclónica

Está asociada al paso de ciclones, resulta del levantamiento del aire por convergencia de la masa de aire en una zona de baja presión. En general, afecta zonas muy extensas.

c) Precipitación orográfica

Es consecuencia del ascenso del aire producido por las barreras montañosas; su Distribución en el espacio está relacionada con las pendientes del terreno.

2.1.5 PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación efectiva es la parte de la precipitación que se convierte en escurrimiento directo, depende de la velocidad de infiltración del suelo, de la intensidad de la lluvia y su duración.

2.1.6 PROCESO LLUVIA-ESCURRIMIENTO

El agua proveniente de los ríos, océanos, lagos, se evaporan bajo el efecto de radiación solar y el viento. El vapor de agua se eleva hacia la atmósfera condensándose y cayendo nuevamente hacia la tierra en forma de precipitación.

La relación entre la lluvia y el escurrimiento inicia desde el momento en que el agua en forma de lluvia entra en contacto con la cuenca. Parte del agua de lluvia escurre sobre la superficie terrestre, otra se infiltra, y una tercera atraviesa la superficie terrestre sin alcanzar el manto freático. El primer fenómeno se le conoce como escurrimiento superficial, el segundo es el flujo subterráneo, y el tercero es el escurrimiento subsuperficial.

El flujo subterráneo es muy lento en comparación al escurrimiento superficial, pero en cada tormenta puede presentarse y se mantiene aún en época de sequía.

Por su parte, el flujo subsuperficial es más rápido que el subterráneo, aunque más lento que el escurrimiento superficial.

El escurrimiento superficial es más rápido que los flujos subterráneos y subsuperficial, y aparece poco después de iniciada la tormenta.

En la figura 2.1.1 se muestran los componentes principales del escurrimiento.

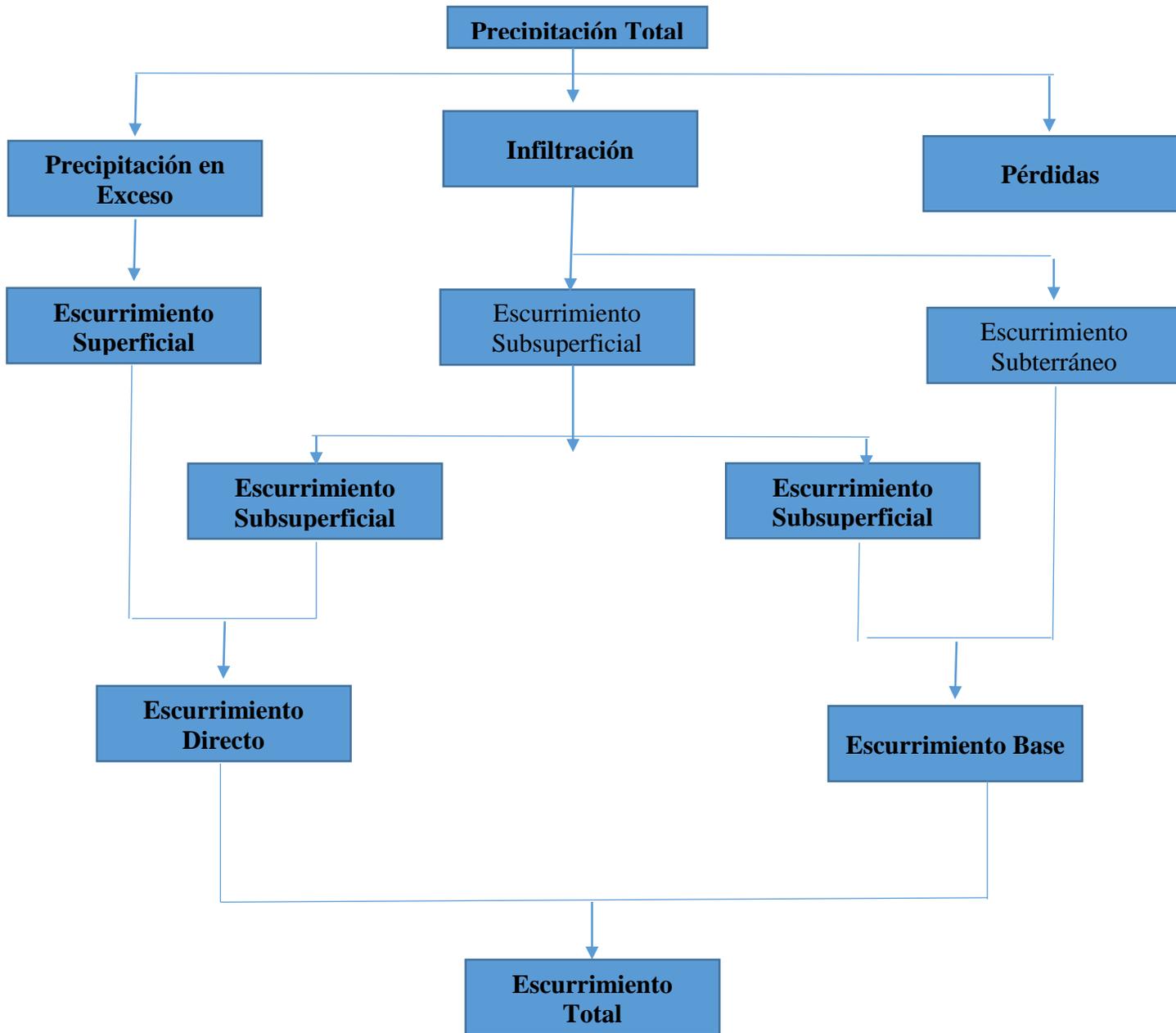


Fig. 2.1.1 Componentes Principales del Esgurrimiento (Campos Aranda, 2007).

2.1.7 HIDROGRAMA

El hidrograma es una representación gráfica o tabular de la variación en el tiempo de los gastos que escurren por un cauce. El gasto (Q) se define como el volumen de escurrimiento por unidad de tiempo (m^3/s) que escurre por un cauce. En el Hidrograma siguiente se distinguen los siguientes puntos (figura 2.1.2)

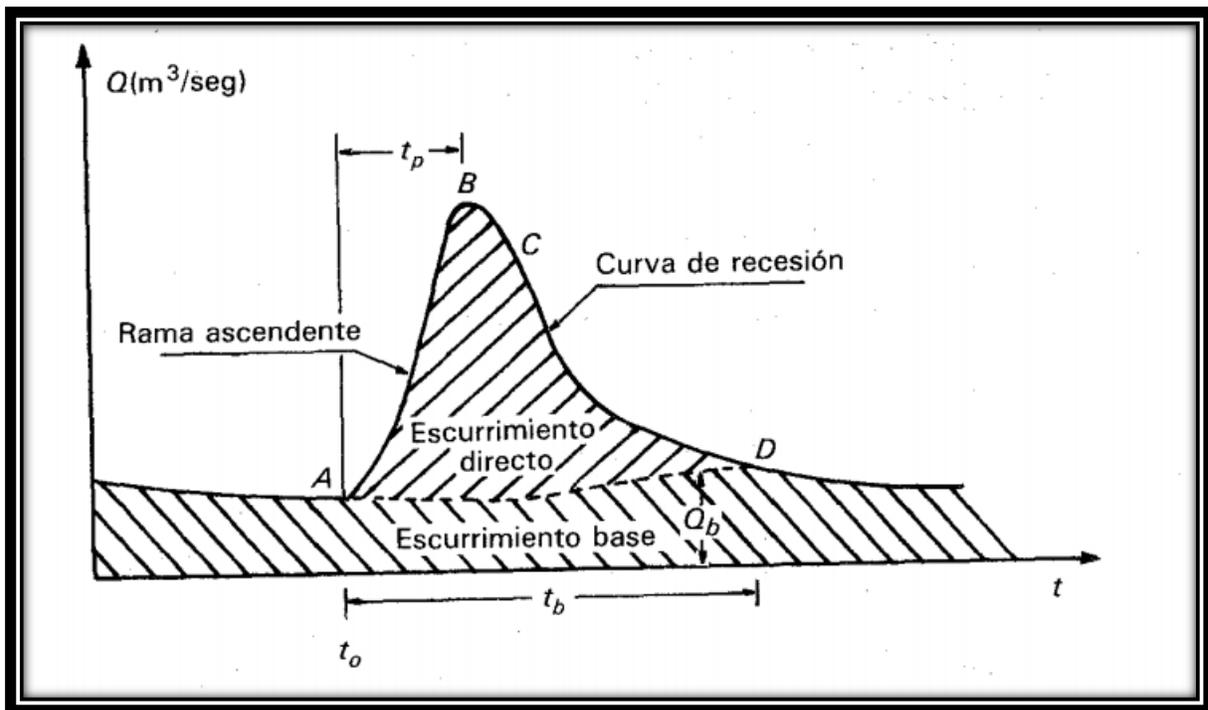


Fig. 2.1.2 Hidrograma Aislado (Aparicio, 1992)

A (Punto de levantamiento).- En este punto, el agua proveniente de la tormenta comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta.

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).- Es el punto donde comienza el vaciado de la cuenca.

T_p (Tiempo de Pico).- Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma.

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.

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.

El área bajo el hidrograma $\int_{T_0}^T Q dt$, es el volumen total escurrido; el área bajo el hidrograma y arriba de la línea de separación entre gasto base y directo, $\int_{T_0}^T (Q - Q_B) dt$, es el volumen de escurrimiento directo.

Donde:

$T_0 =$ *Tiempo Inicial*

$T =$ *Tiempo Final*

$Q_B =$ *Gasto Base*

$Q =$ *Volúmen Total Escurrido*

2.1.8 PÉRDIDAS

De la lluvia que cae en una cuenca al producirse una tormenta, una parte escurre superficialmente para alimentar los cauces por los que transita hasta llegar a la salida de la cuenca; la otra parte es interceptada por la vegetación, retenida en depresiones del terreno, en las que se forman charcos, o se infiltra para satisfacer primero la capacidad del terreno para humedecerse y alimentar después a los acuíferos. A la segunda parte, formada por la interceptación, la retención en depresiones y la infiltración, se acostumbra llamarla “pérdidas”.

En la práctica, los componentes de las pérdidas, es decir, la interceptación, la retención e infiltración, son difíciles de separar, por lo que en general, se acostumbra calcularlas conjuntamente y considerarlas como infiltración, ya que esta componente es la más importante.

2.1.9 INFILTRACIÓN

Es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de su superficie y queda retenida en él o alcanza un manto acuífero.

2.1.10 CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN

Se define como la máxima intensidad de lluvia que el suelo puede absorber en un tiempo específico.

2.1.11 EVAPORACIÓN

La evaporación es una componente significativa de la transferencia de masa y energía a la atmosfera; en hidrología el término evaporación se utiliza para definir la pérdida de humedad desde una superficie de agua libre, tales como, lagos, embalses, ríos.

2.1.15 EVAPOTRANSPIRACIÓN

Es el agua que consume o requiere una cierta área, debido a la evaporación del suelo y la transpiración de su vegetación. Es la aportación de agua de la superficie terrestre a la atmósfera bajo condiciones de disponibilidad suficiente de agua.

2.2 DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS

Cuando durante una tormenta se ha medido simultáneamente la lluvia y el escurrimiento, la determinación de las pérdidas se hace a partir de su definición, es decir, se calculan como la diferencia entre el volumen que llovió y el que se convirtió en escurrimiento directo.

$$V_P = V_{LL} - V_{ED}$$

Donde

V_P Volumen de pérdidas

V_{LL} Volumen llovido

V_{ED} Volumen de escurrimiento directo.

El volumen llovido se calcula multiplicando la precipitación media en la cuenca por su área. Para calcular el volumen de escurrimiento directo, es necesario analizar primero el hidrograma para separar el escurrimiento directo del escurrimiento base, el volumen de escurrimiento directo será igual al área del hidrograma de escurrimiento directo.

2.2 CONCEPTOS GENERALES

2.2.1 CONCEPTO DE SISTEMA

Es un conjunto de partes o elementos organizados y relacionados que interactúan entre sí para lograr un objetivo; particularmente está conformado por un conjunto de entradas y de salidas.

En el caso de un Modelo Lluvia- Esguerrimiento, el sistema está representado por la cuenca, las entradas por la lluvia y las salidas por los esguerrimientos.

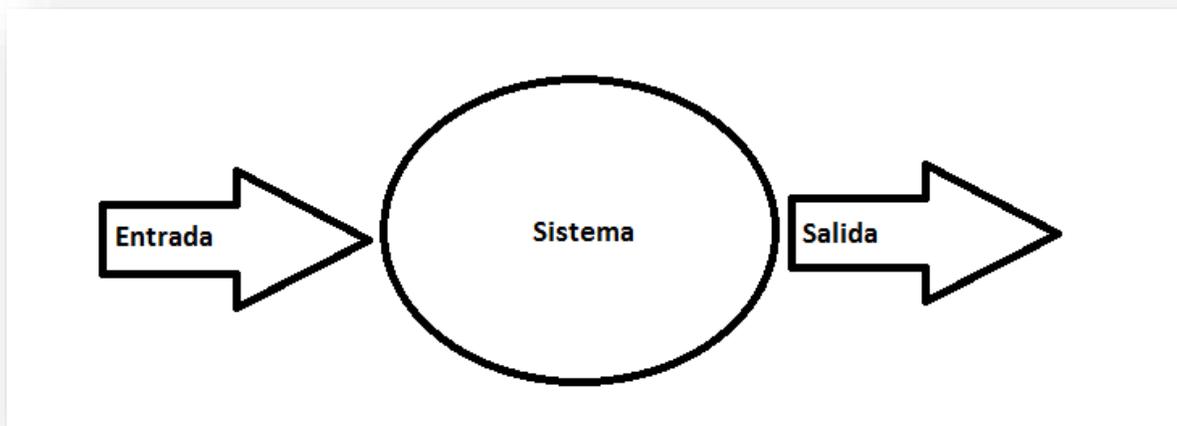


Fig. 2.2.1 Representación de un Sistema

Para el estudio de los comportamientos de los sistemas, se recurre a los modelos, los cuales representan las propiedades y características de los sistemas.

2.2.2 CONCEPTO DE MODELO

El modelo es una representación simplificada de un sistema elaborado para comprender, predecir y controlar el comportamiento de dicho sistema.

Clasificación de los modelos

- Modelos Físicos.- Simulan estructuras o situaciones muy particulares, los resultados que se obtienen son muy confiables para problemas específicos.
- Modelos Analógicos.- Son sistemas que reproducen en un medio físico diferente el comportamiento de un modelo. Su desarrollo está basado principalmente en la analogía eléctrica.
- Modelos Matemáticos.- Simulan el modelo mediante ecuaciones que relacionan las variables de entrada y de salida. Estas variables pueden ser funciones del espacio y tiempo, también pueden ser variables probabilísticas o aleatorias.

En el campo de la Hidrología, los modelos más utilizados son los matemáticos.

Clasificación de los modelos matemáticos

En el modelo matemático se da la combinación de dos principales componentes, la componente física y la estocástica. La componente física expresa todo el conocimiento previo que se tiene sobre el fenómeno que se representa, la componente estocástica expresa en términos estadísticos lo que no puede explicarse por conocimiento previo.

Los modelos matemáticos se clasifican en:

- **Modelos Determinísticos.**- So modelos matemáticos donde las mismas entradas producirán invariablemente las mismas salidas, estos modelos no contemplan aleatoriedad ni incertidumbre.
- **Modelos estocásticos.**- Son modelos estocásticos cuando al menos una variable del mismo modelo es aleatoria y las relaciones entre variables se toman por medio de funciones probabilísticas.
- **Modelos paramétricos.**- Estos modelos consideran variables aleatorias y no aleatorias, por lo que tienen una componente determinística y una componente estocástica, por lo que representan mejor el sistema.

En Hidrología, los fenómenos estudiados poseen variables aleatorias y no aleatorias, por lo que los modelos paramétricos son los más utilizados.

2.3 MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS

En la práctica es frecuente la necesidad de estimar gastos para el diseño y operación de obras de protección y aprovechamientos hidráulicos, justamente en zonas donde los registros disponibles de escurrimiento no son suficientes en cantidad o calidad.

Una manera de enfrentar la dificultad anterior es considerando los registros de precipitación disponibles, de los cuales se tiene menor incertidumbre respecto a su apego a la realidad, particularmente por la facilidad de su medición diaria, lo que ha contribuido al desarrollo de registros más abundantes.

Bajo estas premisas, se han desarrollado metodologías para determinar el escurrimiento en un sitio de interés, a partir de las características de una cuenca y las precipitaciones registradas.

Se conocen como métodos de *parámetros concentrados* a los criterios donde el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento, en cada lapso, se realiza tomando en cuenta que la precipitación efectiva es constante en toda la cuenca. (Domínguez, 1992)

Estos modelos se basan en la hipótesis de sistema lineal (modelos del tipo de función de transferencia), que consisten en identificar y estimar funciones que permiten la transformación de una serie temporal de entrada, en una serie de salida. Con la relación que existe entre dos series de tiempo, al utilizar los valores pasados y presentes de éstas series, es posible determinar una predicción.

Los modelos de parámetros concentrados tratan a una cuenca como una sola entidad y una sola entrada de lluvia (lluvia promedio), donde el gasto de salida se genera a partir de una dinámica global del sistema.

Este concepto es utilizado por los Hidrogramas unitarios, en el que se supone que la cuenca es un sistema lineal invariante en el tiempo donde la lluvia efectiva es la causante del escurrimiento. (Martínez, 2013)

En la figura 2.3.1 se presenta un esquema de los modelos hidrológicos de parámetros concentrados.

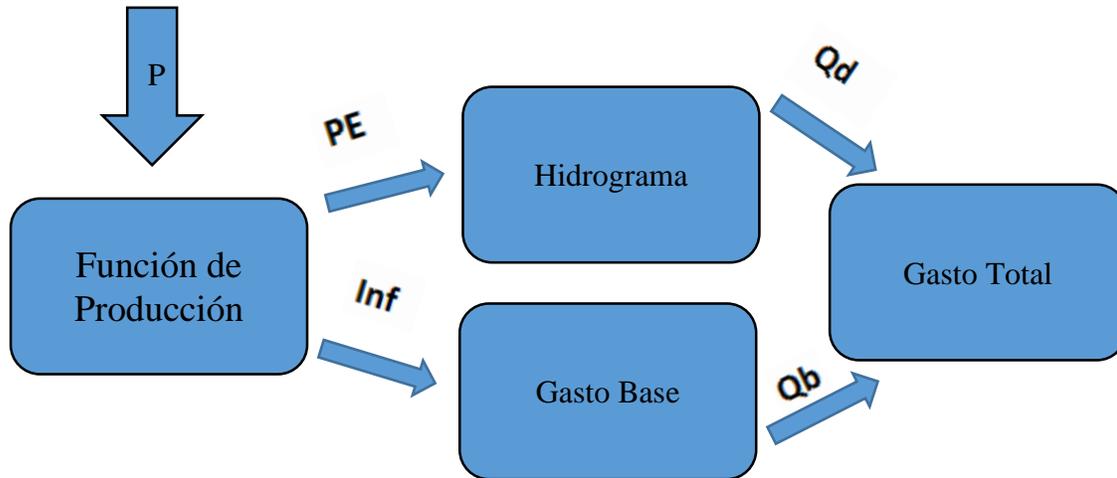


Fig. 2.3.1 Esquema general de un modelo hidrológico concentrado

Algunos modelos Hidrológicos de parámetros concentrados:

El *método de envolventes* y el empleo de la *fórmula racional* son ampliamente utilizados para una estimación simple de los gastos máximos del escurrimiento en cuencas no aforadas.

El *hidrograma unitario tradicional* representa la variación del escurrimiento directo respecto al tiempo, producido por una precipitación uniformemente distribuida sobre toda la cuenca.

El *hidrograma unitario instantáneo* es una función que resulta de considerar el exceso de lluvia como una cantidad unitaria y de duración infinitesimal. De esta manera se caracteriza la respuesta de una cuenca sin referirse a la duración de una tormenta. De ese concepto se derivan los llamados hidrogramas unitarios matriciales, que se asocian a una duración tan pequeña como se requiera.

El *hidrograma unitario sintético* se desarrolla ante la necesidad de determinar hidrogramas relativos a puntos sobre la corriente ajenos al lugar donde se hayan realizado mediciones de escurrimiento.

2.4 MODELO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

En estos modelos interviene un mayor número de variables, y se considera que la cuenca está formada por un conjunto de elementos con características uniformes en cada uno de ellos y simulan los procesos físicos que ocurren en cada elemento, tales como la infiltración, escurrimiento sobre la superficie, flujo de superficie, flujo de corrientes, etc. La falta de datos con suficiente información en la cuenca es una limitante para el uso de estos modelos.

Estos modelos son los que más se aproximan a la realidad al aceptar que el escurrimiento es una respuesta hidrológica continua en el espacio y en el tiempo que afecta de diversas maneras la superficie de toda la cuenca. Este tipo de modelos se caracterizan por considerar procesos internos del sistema, es decir, que el proceso hidrológico ocurre en varios puntos de la cuenca.

Un modelo de parámetros distribuidos divide al sistema en celdas (unidad de discretización espacial en la que se divide una cuenca donde se tiene área constante y forma regular) a cada una de las cuales se les asigna parámetros y factores uniformes, tales como el uso de suelo, tipo de suelo, pendiente, etc. Estos modelos se basan en el principio de conservación de la materia, manteniendo el balance de agua entre la lluvia, escurrimiento, evaporación e infiltración. (Martínez, 2013).

Las ventajas de los modelos de parámetros distribuidos son:

- Permiten el análisis de los distintos elementos que influyen en la respuesta hidrológica y que pueden modificarse por la intervención humana, tales como la vegetación y el uso de suelo principalmente.
- Se obtienen los gastos de salida de manera simultánea en diferentes puntos de la cuenca.
- Es posible considerar los rasgos dominantes en las propiedades de cada una de las unidades areales en que se divide la cuenca bajo estudio, por ejemplo, las variaciones de cobertura y tipo de suelo.

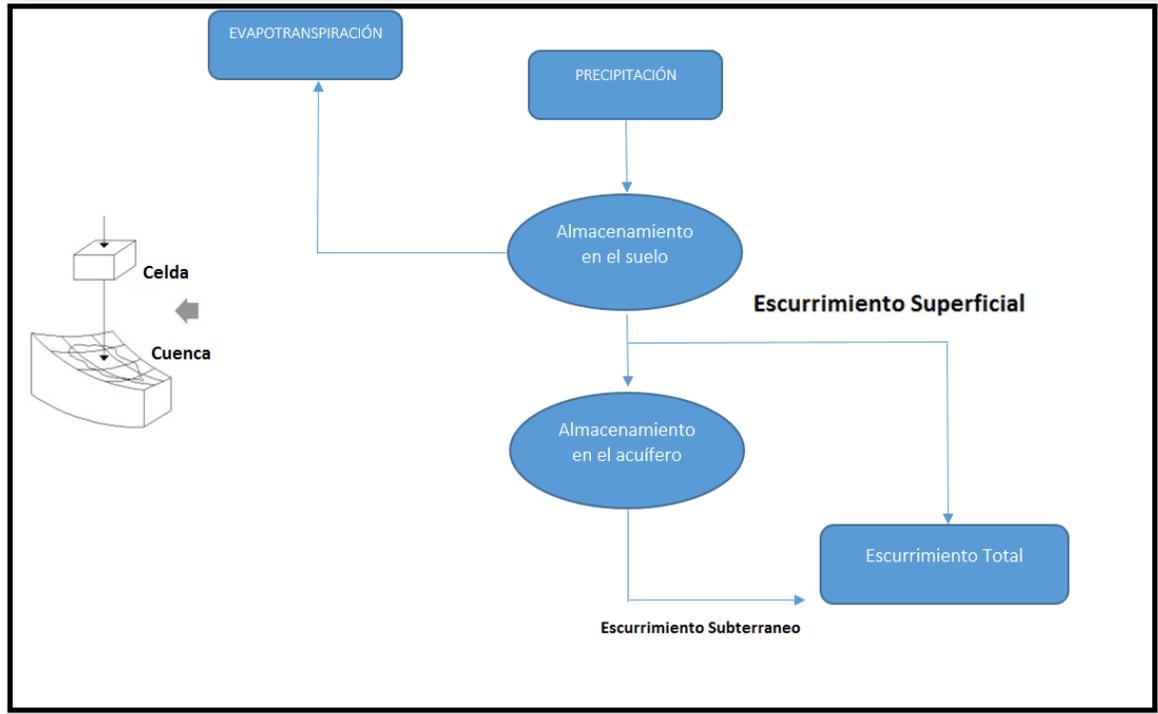


Fig. 2.4.1 Modelo Hidrológico de Parámetros Distribuidos

Para su aplicación, los modelos hidrológicos distribuidos se componen de dos submodelos conceptuales

- a) Modelos de producción de escurrimiento. Necesarios para la estimación de la parte de la lluvia que no se transforma en escurrimiento; es decir, las pérdidas. La diferencia es la cantidad de lluvia que se transforma en escurrimiento.
- b) Modelos de transferencia. Se representa el viaje del escurrimiento que se va agregando aguas abajo en la red de drenaje, hasta llegar al sitio de interés.

2.5 MODELO DISTRIBUIDO MPE

El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México ha propuesto un Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE), que es un programa para computadora desarrollado en lenguaje Visual Basic, y tiene la finalidad de calcular el hidrograma de escurrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos.

El programa MPE funciona con la información de la red de estaciones pluviográficas instaladas en la cuenca de interés, además del archivo que contenga la información de los parámetros hidrológicos de la cuenca, en forma de malla. El Sistema de Información Geográfica utilizado para obtener dichos parámetros es el ArcView 3.2, en conjunto con la extensión de Modelación hidrológica geoespacial (HEC-GeoHMS), desarrollada por el Hydrologic Engineering Center para el US Army Corps of Engineers. Con esta herramienta, la cuenca se subdivide en una malla de celdas cuadradas donde cada celda se considera como una subcuenca, y para cada una de éstas se definen sus propiedades hidrológicas como la precipitación, el tipo y uso de suelo, su elevación, pendiente, área, etc.

El modelo de interpolación de la precipitación utilizado por el programa MPE es el que propuso Shepard. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el del número de curva del Soil Conservation Service, con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de una lluvia. Finalmente, la transferencia del escurrimiento se realiza con el método de Clark modificado.

Bajo estas condiciones, el modelo distribuido estima la producción del escurrimiento en cada una de las celdas que componen la cuenca de estudio, y el escurrimiento generado en cada una de ellas se hace transitar siguiendo trayectorias individuales hasta los sitios de interés. (Domínguez et al., 2008).

Con la ejecución del programa MPE se obtiene lo siguiente:

1. El área de la cuenca
2. La precipitación media de la cuenca
3. El hietograma de precipitación
4. Las pérdidas
5. La lluvia en exceso
6. El gasto total, directo, base y máximo
7. El hidrograma de escurrimiento de la cuenca

2.6 MÉTODO EMPLEADO PARA EL CÁLCULO DE LA PRECIPITACIÓN

A partir de la información de las redes de estaciones pluviográficas se determina la precipitación distribuida en la cuenca por medio del método de interpolación de Shepard. Este consiste en obtener una media pesada de los valores de lluvia registrados en las estaciones cercanas al punto de interpolación, utilizando como peso el inverso de la distancia del punto a interpolar a los puntos que lo rodean, elevado a una potencia μ . (Domínguez et al. 2008).

La altura de lluvia que corresponde a un punto por interpolar, en el plano x-y, se obtiene de la ecuación siguiente

$$\phi(x, y) = \sum_{j=0}^N W_j(x, y) hp_j \quad (1)$$

Donde el factor de peso de cada estación se determina como:

$$W_j(x, y) = \frac{\frac{1}{r_j^\mu}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{r_j^\mu}}, \quad 0 < \mu < \infty \quad (2)$$

$$r_j(x, y) = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

Donde

$\phi(x, y)$: Punto por interpolar

N: Número de estaciones con información de lluvia;

W_j : Factor de peso de la estación j;

hp_j : Lluvia en la estación j;

r_j : Distancia desde el punto a interpolar (x, y) a la estación j;

μ : Coeficiente de calibración. Se recomienda que $2 \leq \mu \leq 6$

Se hace notar que la interpolación calculada con la ecuación se considera las N estaciones con información de lluvia disponibles en toda la cuenca.

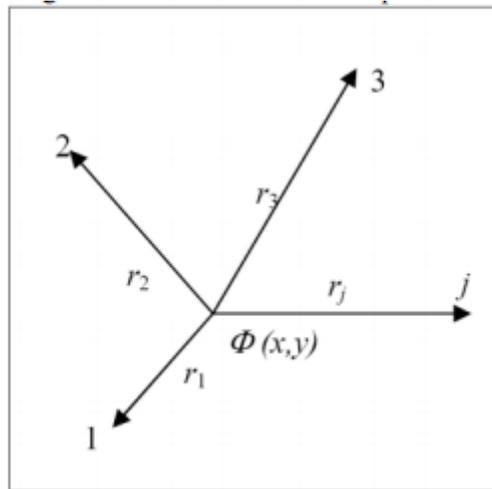


Fig. 2.6.1 Parámetros de Interpolación

Una variante del método de Shepard consiste en utilizar solamente las estaciones con datos de lluvia ubicadas dentro de un círculo de radio R alrededor del punto de interés (x, y) . Bajo esta consideración, el factor de peso de cada estación se obtiene a partir de lo siguiente:

$$W_j(x, y) = \frac{\xi_j^\mu(x, y)}{\sum_{j=1}^N \xi_j^\mu(x, y)} \quad (4)$$

$$\xi_j^\mu(x, y) \begin{cases} 1 - \frac{r_j(x, y)}{R} & \text{si } 0 < r_j(x, y) < R \\ 0 & \text{si } r_j(x, y) > R \end{cases} \quad (5)$$

Donde

ξ_j^μ Parámetro de Franke-Little

R: Distancia máxima a considerar en la interpolación

$r_j(x, y)$: Distancia desde el punto (x, y) a la estación j .

μ : Coeficiente de Calibración.

2.7 MÉTODO EMPLEADO PARA LA PRODUCCIÓN DEL ESCURRIMIENTO

La producción del escurrimiento se determina con el método del número de curva (CN) del Soil Conservation Service de los Estados Unidos (USSCS).

Este es uno de los métodos más utilizados para la estimación de los volúmenes de escurrimiento; su éxito se debe a que toma en cuenta con un solo parámetro, las principales características de la cuenca que producen el escurrimiento, como son la pendiente y el uso y tipo de suelo.

Este método se basa en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis:

La primera hipótesis establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda hipótesis establece que la infiltración inicial es una fracción de la retención potencial. La ecuación de balance hídrico y las hipótesis expresadas son, respectivamente:

- Ecuación de balance hídrico

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (6)$$

Donde

P = Precipitación total;

P_e = Precipitación efectiva;

I_a = Infiltración inicial;

F_a = Infiltración acumulada

- La razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F_a}{S} \quad (7)$$

Donde

S= Infiltración potencial máxima

- La infiltración inicial es una fracción de la retención potencial

$$I_a = \lambda S \quad (8)$$

Donde:

λ = Coeficiente, que en la práctica se considera igual a 0.2

La infiltración potencial máxima S, en centímetros, se calcula mediante

$$S = \frac{2540 - (25.4 \text{ CN})}{\text{CN}} \quad (9)$$

Donde

CN= Número de curva, que es función del tipo y uso de suelo.

La precipitación efectiva se calcula con la expresión 10.

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{508}{\text{CN}} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{\text{CN}} - 20.32} \quad (10)$$

Donde:

P_e = Precipitación Efectiva en cm.

P = Precipitación en cm.

2.7.1 PÉRDIDAS POR EVAPOTRANSPIRACIÓN (FACTOR DE OLVIDO)

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha propuesto el parámetro denominado Factor de olvido, útil para tomar en cuenta el secado del suelo después de una lluvia. De esta manera, al final del intervalo que existe entre tormentas, el suelo no necesariamente se encontrará saturado, y se presentarán infiltraciones que serán tomadas en cuenta. (Domínguez et al 2008).

Con el Factor de olvido se consideran las pérdidas por evapotranspiración, y por lo tanto se calcula una precipitación acumulada neta (P_{an})

$$P_{an} = P_n + P_{n-1} f_x + P_{n-2} f_x^2 + \dots + P_1 f_x^{n-1} \quad (11)$$

Donde

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

P_n = Precipitación en el intervalo de tiempo n, en cm;

f_x = Factor de olvido, ($0 \leq f_x \leq 1$)

2.7.2 PARÁMETROS DE INFILTRACIÓN

La determinación de los parámetros de infiltración a partir de las propiedades del suelo requiere algún tipo de reclasificación de las unidades del suelo en parámetros representativos para el modelo hidrológico. El SCS (Soil Conservation Service) ha propuesto un criterio para la determinación de la precipitación efectiva en función de la precipitación total y de las características del suelo mediante la clasificación de los suelos; dando una tabla de valores para el número de curva según estos suelos. (Méndez 2005).

CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS TIPOS DE SUELOS SEGÚN SU PERMEABILIDAD				
Clave de clasificación FAO	Suelos	Tipo hidrológico de suelo	Permeabilidad	Propiedades
T	Andosoles			
Q	Arenosoles	A	Muy alta	Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)
J	Fluvisoles			
O	Histosoles			
U	Ranker			
X, Y	Calcisoles (antes xerosol y yermosol)			
I, E	Leptosoles (antes litosoles y rendizinas)	B	Buena	Arenas finas y limos
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Regosoles			
H	Feozems			
K	Kastanozems	C	Media	
N	Nitsoles			Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
C	Chernozems			
-	Alisoles			
A	Acrisoles			
B	Cambisoles			
G	Gleysoles			

L	Luvisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)
V	Vertisoles			
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzolúvisoles			
-	Plintosoles			
-	Lixisoles			

Tabla 1 (Clasificación de los Suelos]) (Manual de diseño de obras civiles). (CFE, 2009).

2.7.3 ASIGNACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

Los números de curva se determinan a partir del grupo hidrológico al que pertenece el suelo, así como de la cobertura vegetal y la pendiente del terreno.

NÚMERO DE CURVA SEGÚN LA COBERTURA DEL SUELO		GRUPO HIDROLÓGICO USO			
DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50 % ó más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50 % ó menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95
	Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
	Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77

mesófilo de montaña)	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100
EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		100	100	100	100
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos acaules, crasicale, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, inerme, subinerme, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, natural-huizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	72	79
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83
SELVA (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, media na subcaducifolia)		45	66	77	83
TULAR		68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA		68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA		68	79	86	89

Tabla (2), Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidrotecnia, Pérdidas. (CFE,2009)

Definición de **condición hidrológica**

Suelos agrícolas:

Mala: tiene menos del 25 % del terreno cubierto
 Regular: tiene entre 25 y 50 % del terreno cubierto
 Buena: tiene más del 50 % del terreno cubierto.

Uso forestal:

Mala: tiene menos del 30% del terreno cubierto
 Regular: tiene entre 30 y 70% del terreno cubierto.
 Buena: tiene más del 70% del terreno cubierto.

2.8 MÉTODO PARA EL TRANSITO DEL ESCURRIMIENTO (MÉTODO DE CLARK MODIFICADO)

El proceso de transferencia del escurrimiento en el programa MPE toma como base la metodología del hidrograma unitario sintético de Clark.

El Método de Clark consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada punto de la cuenca hasta la salida de la misma, después de transcurrido un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde dicho punto hasta la salida, combinando un mapa de isócronas (curvas de igual tiempo de viaje) con la regulación de un embalse lineal.(Domínguez et al 2008).

El Hydrologic Engineering Center modificó el hidrograma unitario de Clark para adaptarlo a los modelos hidrológicos distribuidos. El modelo conceptual del método ModClark para modelos distribuidos se muestra en la figura 2.8.1. El procedimiento consiste en obtener, mediante el método de Clark, el hidrograma de salida de cada una de las subcuencas generadas al superponer una malla sobre el área de la cuenca. Los gastos del hidrograma de escurrimiento directo de la cuenca se calculan mediante la suma en el tiempo de las ordenadas de los hidrogramas de salida de las subcuencas.

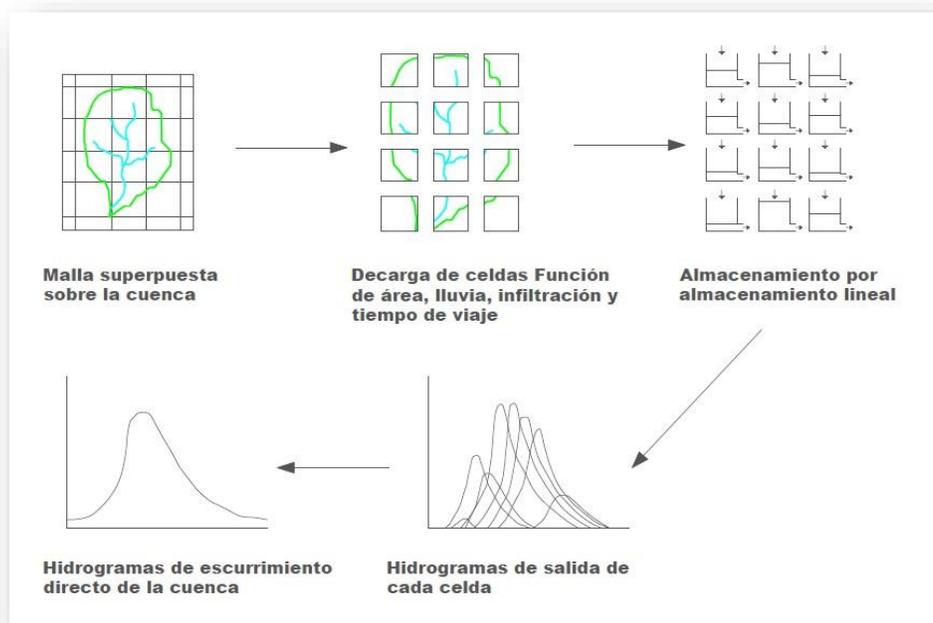


Fig. 2.8.1 Modelo de escurrimiento para parámetros distribuidos

Este método requiere la estimación de cuatro parámetros para determinar el hidrograma de la cuenca; el histograma tiempo-área, la distancia desde cada celda hasta la salida de la cuenca, el tiempo de concentración T_c y el coeficiente de atenuación por almacenamiento k .

Al escurrimiento transitado se le aplica el método de Muskingum, para considerar el tiempo de retraso por almacenamiento.

Método de Muskingum. El almacenamiento (S) en un tramo del cauce puede descomponerse en dos partes: almacenamiento en prisma, que sería proporcional al caudal de salida (O) y almacenamiento en cuña, que sería función de la diferencia entre el caudal de entrada y el de salida ($I-O$), ya que cuanto mayor sea esa diferencia, más pronunciada será la cuña:

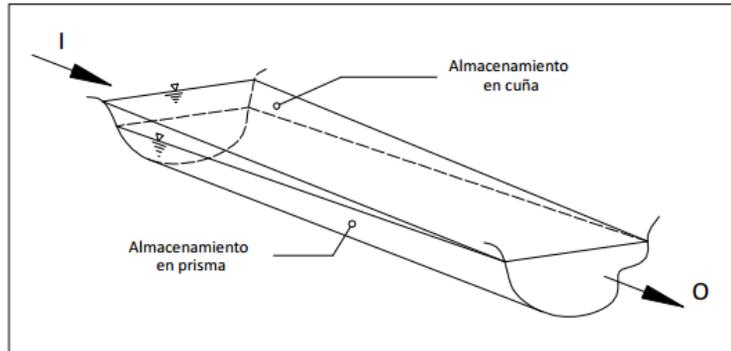


Fig. 2.8.2 Tránsito de Escurrimiento con el Método de Muskingum

$$S_{prisma} = k.O \quad (12)$$

$$S_{cuña} = k.x.(I - O) \quad (13)$$

Sumando las dos expresiones anteriores, se obtiene:

$$S = k[xI + (1 - x)O] \quad (14)$$

Donde;

S .- almacenamiento en el tramo considerado de un cauce.

I .- caudal de entrada en ese tramo.

O .- caudal de salida de ese tramo.

k, x , constantes que dependen de cada tramo del cauce.

Aplicando a dos intervalos de tiempo:

$$S_1 = k[xI_1 + (1-x)O_1] \quad (15)$$

$$S_2 = k[xI_2 + (1-x)O_2] \quad (16)$$

Sustituyendo estas dos últimas a la ecuación (8) y despejando O_2 , resulta:

$$O_2 = C_0I_2 + C_1I_1 + C_2O_1 \quad (17)$$

Donde:

$$C_0 = \left(\frac{-kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (18)$$

$$C_1 = \left(\frac{kx + 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (19)$$

$$C_2 = \left(\frac{k - kx - 0.5\Delta t}{k - kx + 0.5\Delta t} \right) \quad (14)$$

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (15)$$

El intervalo de tiempo Δt debe de estar entre k y $2kx$ o entre k y $k/3$. Dentro de estos márgenes, cuanto menor sea el Δt , mayor es la precisión del método. X es una constante que en teoría puede oscilar entre 0 y 0.5, pero normalmente vale entre 0.2 y 0.3.

El histograma tiempo-área representa el área de la cuenca que contribuye al escurrimiento en la salida de la cuenca, en un tiempo dado. Esta área se obtiene mediante la determinación de la distancia de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca. Lo anterior se complementa sea estimando el escurrimiento en las laderas y el tiempo de viaje de la corriente principal o simplemente suponiendo una velocidad de viaje constante, dada por la relación entre la distancia del punto más alejado de la salida de la cuenca entre el tiempo de concentración.

Una vez determinado el tiempo de viaje desde cada celda hasta la salida de la cuenca, el área de la cuenca se divide en zonas de igual tiempo de viaje (isócronas). Al relacionar

las áreas entre isócronas con el intervalo de tiempo correspondiente se obtiene el histograma tiempo-área de la cuenca.

En el SIG se obtienen las longitudes de viaje de cada celda, que posteriormente son convertidas por el programa MPE en tiempos de viaje para crear las isócronas que requiere el método de ModClark para la transferencia del escurrimiento:

$$T_t = T_c * \left(\frac{Lv_N}{Lv_n} \right) \quad (16)$$

Donde

T_c tiempo de concentración (h)

T_t tiempo de tránsito o tiempo de viaje desde la celda que se analiza (h)

Lv_N Longitud de viaje de la celda más lejana

Lv_n Longitud de viaje de la celda que analiza.

3 INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS E HIDROMÉTRICAS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

La Comisión Federal de electricidad (CFE), tiene a su cargo la operación de las presas en el Río Grijalva, cuenta con una red de estaciones hidrometeorológicas, la cual está a cargo del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). La red consta de 108 estaciones, las cuales miden en forma automática el nivel del río o de la presa y la precipitación pluvial (entre las variables más importantes). Esta información se transmite permanentemente vía satélite, a través de un sistema de satélites comerciales, con el objetivo de disponer la información en tiempo real.

La operación de la red tiene la finalidad de mejorar la seguridad, confiabilidad y disponibilidad de toda la infraestructura que conforma las centrales hidroeléctricas de la paraestatal y coadyuvar a la vez en la protección de la población asentada en las márgenes de los ríos aguas abajo de las presas.

La información obtenida en las redes de estaciones permite a la CFE contar con información hidrométrica y climatológica confiable en tiempo real, para llevar a cabo la planeación y manejo oportuno de las aportaciones a los vasos de almacenamiento y evitar en lo posible derrames por vertedor, aprovechando al máximo el agua para la generación de electricidad.

La comisión Federal de Electricidad cuenta con 2 tipos de estaciones diferentes:

Estación Climatológica.- Es el Conjunto de instrumentos colocados a la intemperie que permiten medir las variaciones del clima, colocados en sitios estratégicos representativos de ambientes diversos.

Evento climático	Instrumento de medición
Precipitación	Pluviómetro ó Pluviógrafo
Temperatura	Termómetro tipo "SIX"
Evaporación	Tanque evaporímetro
Viento	Veleta o anemoscopio
Tiempo y visibilidad	Observación

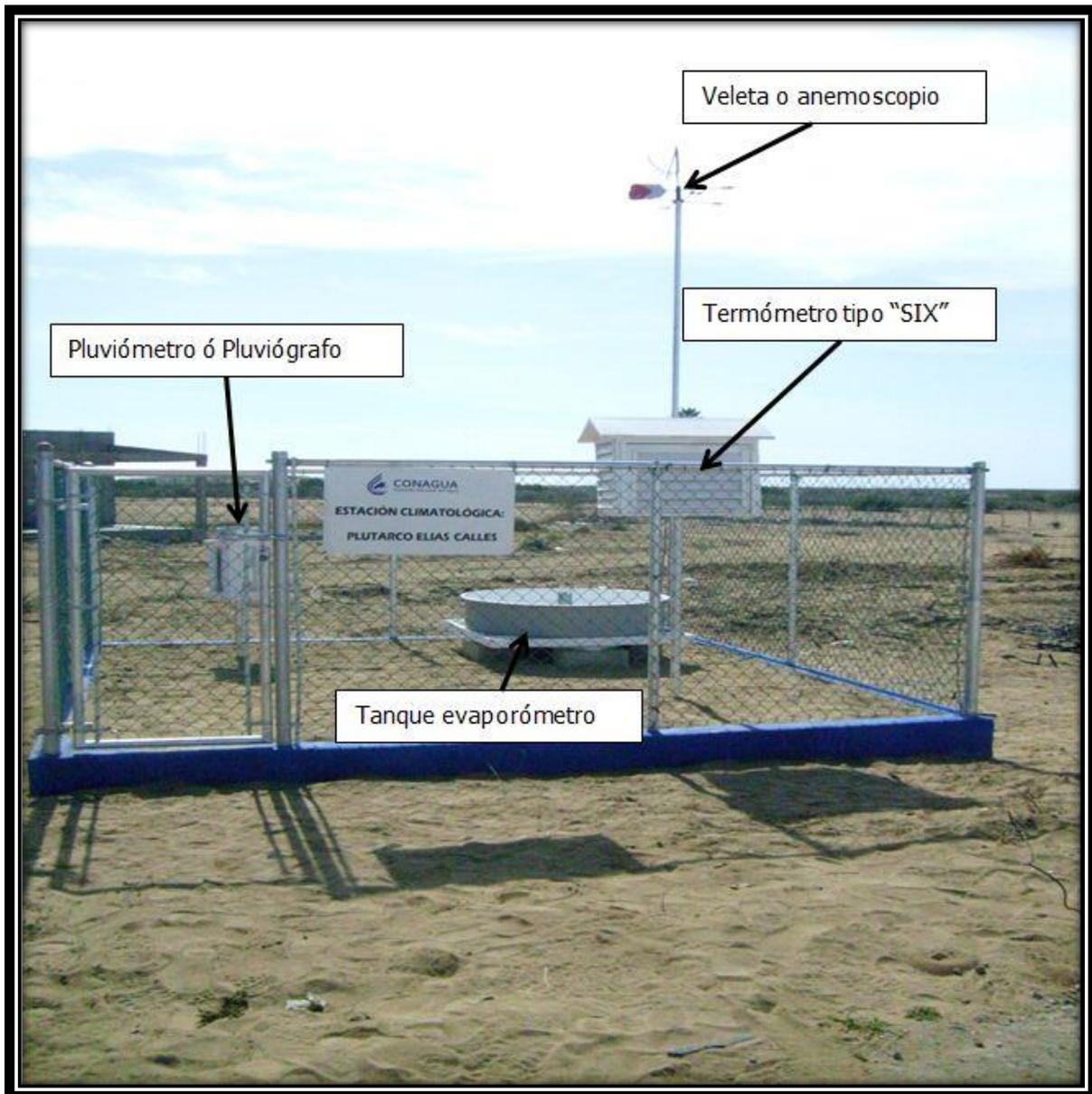


Fig. 3.1.1 (Estación Climatológica) Fuente CONAGUA

Estación Hidrométrica – En las estaciones hidrométricas se miden los niveles alcanzados en una sección del río o canal y se afora el escurrimiento que pasa por la misma.

Consiste esencialmente en una o varias reglas graduadas (escala o limnómetro) colocadas verticalmente y perfectamente niveladas entre sí y con referencia a un plano en una sección de río, arroyo, laguna o embalse.

Mediante el auxilio de un operador (escalero) se registra en planillas los niveles observados a horas preestablecidas y todo otro evento relevante para el funcionamiento de la estación. Donde es posible o necesario, por la topografía del lugar, la existencia de infraestructura y accesos mínimos o la importancia de la sección de medición, se colocan además instrumentos automáticos de registro continuo (mareógrafo o limnógrafo), de funcionamiento mecánico o electrónico.

Esta automatización de las estaciones permite tener una mayor continuidad de datos y reducir fallas por factor humano, pero en cambio aumenta drásticamente el volumen de información a almacenar y requiere mayor especialización en la instalación, operación y mantenimiento de los instrumentos.



Fig. 3.1.2 Estación Hidrométrica

3.1.2 MEDICIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Aparatos de medición de Precipitación

- **Pluviómetro:** Están formados por un recipiente cilíndrico graduado de área transversal al que descarga un embudo que capta el agua de lluvia, El área de captación es normalmente diez veces mayor que el área del recipiente, con el objeto de que, por cada milímetro de lluvia, se deposite un centímetro en el recipiente. Registra la precipitación de 24 horas (sirve para análisis de lluvias máximas).
- **Pluviógrafo.-** Los pluviógrafos son semejantes a los pluviómetros, con la diferencia de que tienen un mecanismo para producir un registro continuo de precipitación.

Este mecanismo está formado por un tambor que gira a velocidad constante sobre el que se coloca un papel graduado especialmente. En el recipiente se coloca un flotador que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel. El recipiente normalmente tiene una capacidad de 10 mm de lluvia y, al alcanzarse esta capacidad, se vacía automáticamente mediante un sifón.

Realiza una medición continua de la precipitación (curva masa).

- **Pluviógrafo de Balancín.-** El Pluviógrafo de Balancín es una variante del Pluviógrafo clásico. Consta de un embudo con las mismas características y medidas, pero cuyo embudo conduce el agua a un pequeño columpio cuyos platos son cubetas triangulares de plástico o metal; así cada vez que existe alguna precipitación y se llena uno de estas platos, cae su mitad por efecto del peso, el agua se derrama y se cierra un circuito eléctrico quedando listo el segundo plato para repetir el mismo proceso. Cada balanceo se produce con 0.2 mm. De precipitación. La alternancia producida por el balancín es registrada mediante un contador, por lo que es posible saber el número de veces que el Pluviógrafo ha descargado en cierto período de tiempo. La red de estaciones climatológicas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) cuenta con este aparato para la medición de la precipitación.



Fig. 3.1.3 Pluviógrafo de Balancín

3.2 SELECCIÓN DE LAS TORMENTAS DE ANÁLISIS PARA LA CUENCA PEÑITAS

La cuenca Peñitas cuenta con 9 estaciones tanto climatológicas como hidrométricas como se muestra en la figura 3.2.1. y la tabla 3.

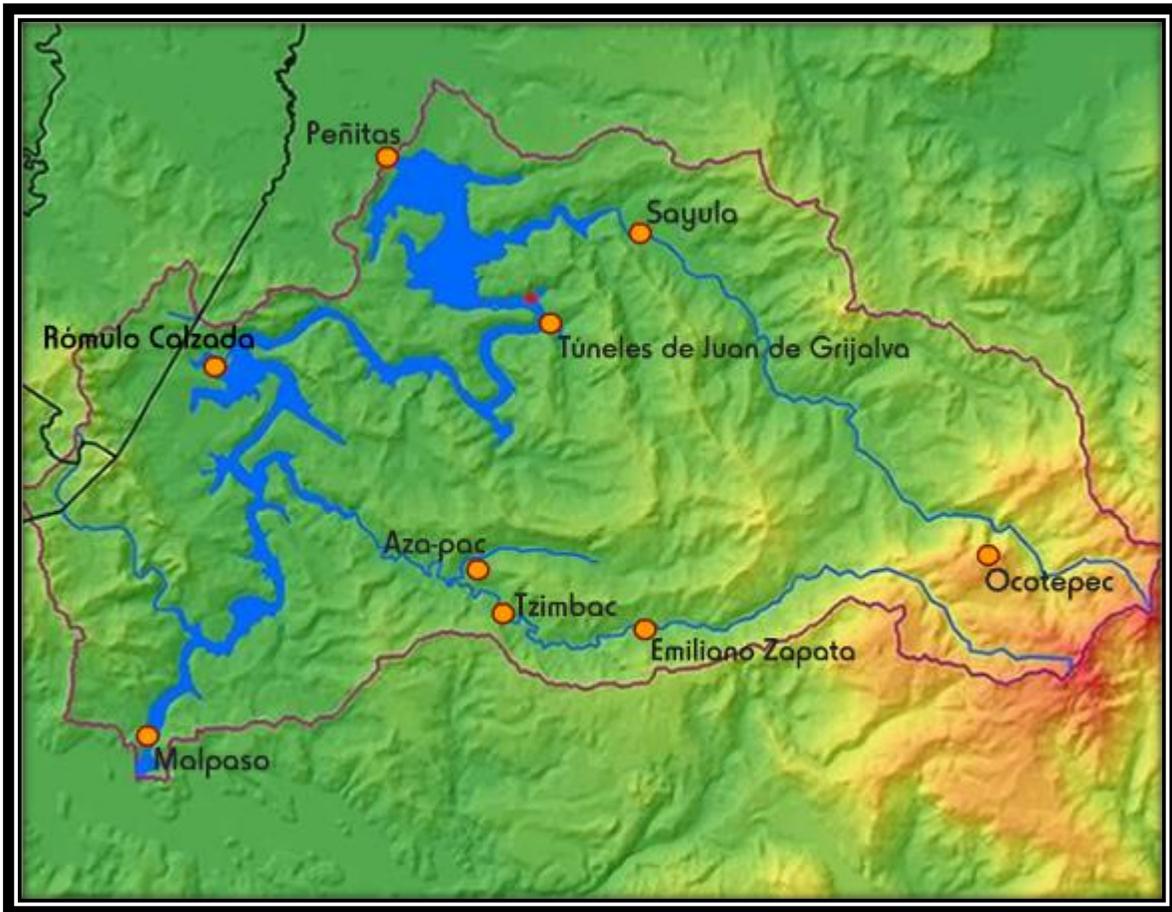


Fig. 3.2.1 Estaciones climatológicas e hidrométricas dentro de la cuenca Peñitas

Estación	Tipo de Estación	Latitud	Longitud	Y	X
Peñitas CFE	Climatológica Hidrométrica	e 17°26'42''	93°27'28''	17.445000	93.457778
Sayula CFE	Climatológica Hidrométrica	e 17°24'8''	93°19'55''	17.402222	93.331944
Malpaso	Climatológica Hidrométrica	e 17°11'58''	93°36'17''	17.199444	93.604722
E Zapata CFE	Climatológica	17°13'0''	93°20'32''	17.216667	93.342222
Ocoatepec CFE	Climatológica	17°13'30''	93°9'35''	17.225000	93.159722
R Calzada CFE	Climatológica Hidrométrica	e 17°21'14''	93°33'6''	17.353889	93.551667
Túneles de Juan de Grijalva	Hidrométrica Pluviométrica	y 17°21'51''	93°22'53''	17.364167	93.381389
AzaPac	Hidrométrica Pluviométrica	y 17°15'13''	93°25'38'	17.253611	93.427222
Tzimbac	Hidrométrica Pluviométrica	y 17°13'52''	93°24'51''	17.231111	93.414167

Tabla 3 Estaciones dentro de la cuenca Peñitas

El modelo de pronóstico de escurrimiento para las cuencas del río Grijalva (MPE) trabaja con las estaciones automáticas de CFE, por lo tanto para la calibración del modelo, se eligieron tormentas que provocaron algún evento extraordinario, como inundaciones, y que se tuviera información en las estaciones automáticas.

El análisis de tormentas comenzó desde el año 2009 hasta el presente año 2015.

Para determinar las fechas de análisis se utilizaron dos criterios:

1. Observación Directa.- De los registros de lluvia se seleccionan las tormentas más intensas ocurridas en la zona de estudio.
2. Observación Indirecta.- Consiste en consultar los reportes de tormentas intensas que ocasionaron daños en la zona de estudio.

En la siguiente tabla se muestran las fechas de análisis seleccionadas, así como las estaciones utilizadas para los análisis.

FECHAS DE ANÁLISIS	ESTACIONES UTILIZADAS
22 de octubre al 21 de noviembre de 2009	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepec, Rómulo Calzada, Sayula, Tzimbac
01 de septiembre al 01 octubre de 2010	(E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepec, Rómulo Calzada, Sayula, Tzimbac)
11 al 24 septiembre de 2011	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepec, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Tzimbac
18 al 25 diciembre de 2012	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepec, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac
18 de octubre al 17 de noviembre 2013	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepec, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac
18 de septiembre al 21 octubre 2014	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepec, Peñitas, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac
14 al 23 octubre de 2015	E Zapata, Azapac, Malpaso, Ocotepec, Rómulo Calzada, Sayula, Túneles de Grijalva, Tzimbac

Tabla 4. Fechas de análisis para la calibración en el MPE

La información de las estaciones de la CFE, fue obtenida en la página WEB del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) (Fig. 3.2.2), el cual es el encargado de la operación y del procesamiento de la información de estas estaciones.

Para la selección de las tormentas se dividieron los años en épocas de estiaje (Enero- Junio) y de lluvias (Julio-Diciembre); siendo la época de lluvias el periodo de lluvias de tiempo a calibrar en el MPE.

Al entrar a la página del IIE, se seleccionó la cuenca Peñitas y las estaciones dentro de la cuenca para conocer su información dentro del intervalo de tiempo seleccionado.

En la figura 3.2.2 se muestra la página del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), de donde se obtuvo la información de las estaciones automáticas de la CFE.

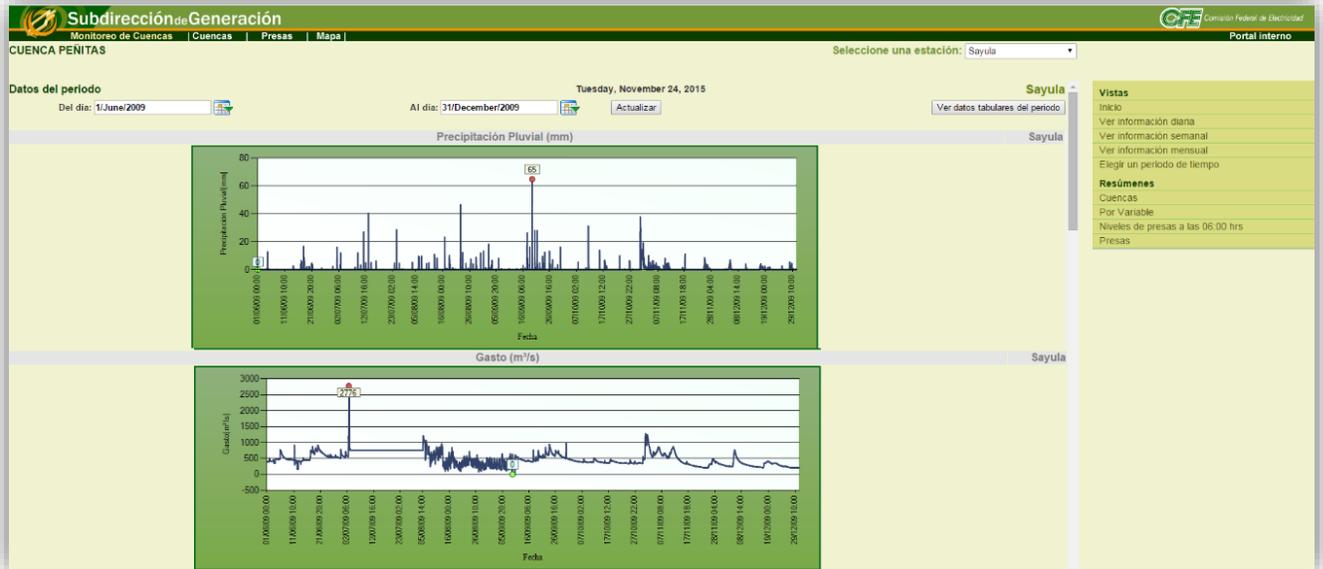


Fig. 3.2.2 Página WEB del Instituto de Investigaciones Eléctricas

Para la obtención de información en formato .xls, se seleccionó la opción “ver datos tabulares”, donde automáticamente se descargan todos los datos habidos en esa estación y en particular para el intervalo de tiempo seleccionado.

Los datos obtenidos de las estaciones tanto climatológicas como hidrométricas presentan intervalos de tiempo de 60 minutos.

Una vez descargados los datos de las estaciones climatológicas, se revisaron los datos exhaustivamente, pues en ocasiones presentan errores en los valores y/o, existe ausencia de datos; por lo que se complementó la información faltante para mayor certidumbre en la calibración del modelo.

Una vez finalizado el proceso de revisión de los datos, se graficaron los datos de precipitación y de gastos, creando hidrogramas y hietogramas que nos permitieron la mejor selección de fechas de la tormenta. Se procuró a la hora de seleccionar las fechas de las tormentas, tomar días antes y después de haber iniciado y de haber terminado la tormenta.

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

Fecha	Ara-hac		Emiliano Zapata		Malpaso		Ocotepes		Peñitas		Romulo Calzada		Sanula		Tunales de Guila		Timbar			
	Nivel (m)	Gasto (m ³ /s)	n Pluvial (mm)	Precipitación Pluvial (mm)	Nivel (m)	n Pluvial (mm)	Precipitación Pluvial (mm)	Nivel (m)	Gasto (m ³ /s)	n Pluvial (mm)	Nivel (m)	Gasto (m ³ /s)	Precipitación Pluvial (mm)							
15/12/2013 00:00	231	135	0	0	17385	0	0	0	8624	0	8657	0.1	0.99	49	0	8662	0	125	102	0
15/12/2013 01:00	23	134	0	0	17386	0	0	0.1	8622	0	8657	0	0.98	48	2.5	8659	0	124	99	0.1
15/12/2013 02:00	231	135	4.5	4.5	17387	0	0	0	8619	0.3	8653	0	1.02	52	6.6	8654	0	124	99	6.2
15/12/2013 03:00	242	147	4.4	14.3	17388	0.3	0.8	0.8	8616	0	8649	0	1	50	1.5	865	0	13	117	4.7
15/12/2013 04:00	256	162	4.7	12	17388	0	9	9	8613	3.6	8652	2.9	0.98	48	0.8	8647	0	134	129	5.7
15/12/2013 05:00	258	164	0.4	0.9	17389	0.2	7.2	7.2	8609	0	8645	1.3	0.99	49	1	8644	0	149	174	0.1
15/12/2013 06:00	244	149	1.3	2.5	1739	0	6.8	6.8	8605	0	8653	0	0.99	49	1.1	8639	0	14	147	0.3
15/12/2013 07:00	251	156	6.5	5.3	17388	0	12.7	12.7	8601	0.1	8653	0.4	0.98	48	1.1	8635	0	137	138	3.4
15/12/2013 08:00	261	167	1.6	9.1	1739	0.6	20.1	20.1	8597	1.1	8644	0.6	1.06	56	8.1	863	0	147	168	2.5
15/12/2013 09:00	28	189	11.5	8.9	17387	0.1	10.8	10.8	8593	8.7	8664	2	1.25	100	17.6	8627	0	151	181	10.4
15/12/2013 10:00	371	310	18	6.9	17389	2.2	9.7	9.7	8589	6.4	868	7.9	1.68	309	25.6	8642	0	199	227	52.6
15/12/2013 11:00	34	265	20.2	7.7	17388	4	12.2	12.2	8589	10.6	8706	6.8	2.31	610	22.5	8651	0	198	233	50
15/12/2013 12:00	347	275	14.8	4.6	17392	4.2	14	14	8593	7.6	8714	7.4	2.18	546	14	8668	0	212	48	9.6
15/12/2013 13:00	38	323	19	10.5	17391	1.7	20.9	20.9	8602	4.5	8734	4.1	2.47	694	8.6	8683	0	22	48.1	14
15/12/2013 14:00	41	369	17	8	17394	0.3	26.6	26.6	861	8.4	874	3.2	2.47	694	11.9	8698	0	256	714	11.2
15/12/2013 15:00	404	359	14.5	4.2	17395	6.7	19.1	19.1	862	10	8768	6.7	3.13	1015	10.7	8705	0	301	104	11.5
15/12/2013 16:00	374	315	7.4	2.5	17397	3.9	16	16	8633	13.5	8788	5.7	2.97	938	8.8	8718	0	288	80.1	4.3
15/12/2013 17:00	338	263	7.8	3.3	17399	0.7	13	13	8646	4.4	8788	3.6	2.93	922	8.1	8726	0	247	62	6
15/12/2013 18:00	328	249	5.7	3.9	18001	1	17	17	866	6.4	8817	3	2.91	944	5.5	8732	0	241	61.4	4
15/12/2013 19:00	336	260	7.9	3.4	18004	0.9	14.5	14.5	8667	5.8	8823	2.5	2.96	944	7	8738	0	246	64.6	6
15/12/2013 20:00	334	257	5.4	3.6	18006	0.2	11	11	8676	4.3	8824	2.3	2.98	922	6.3	8741	0	237	58.9	4.2
15/12/2013 21:00	332	255	5.7	3.8	18008	0	8.8	8.8	8683	3.9	882	1.7	2.96	944	6.7	8746	0	231	55.1	4.3
15/12/2013 22:00	327	248	2.4	2.4	18011	0.3	5.4	5.4	8688	2.3	8835	2.7	2.92	918	3.6	8749	0	233	50	1.9
15/12/2013 23:00	326	246	2.7	1.2	18013	0.2	4.6	4.6	8693	0.7	8838	1	2.83	882	4.4	875	0	222	49.4	1.7
16/12/2013 00:00	325	245	3.4	1.4	18014	0.2	5.6	5.6	8698	-0.9	8851	0.8	2.73	839	3.5	8756	0	226	51.9	3
16/12/2013 01:00	319	237	2	2	18016	0.2	5.7	5.7	8703	-2.5	8851	0.4	2.66	800	3.4	8758	0	231	55.1	1.7
16/12/2013 02:00	317	234	1.2	1.2	18017	0.3	4.3	4.3	8708	-4.1	8886	1.1	2.57	749	3.3	876	0	232	55.7	0.8
16/12/2013 03:00	31	225	2.5	1.5	18019	0.5	2.2	2.2	8713	-5.7	8883	1.5	2.52	721	3.8	8764	0	233	50	1.9
16/12/2013 04:00	305	218	2.2	1.3	1802	0	1.9	1.9	8718	-7.3	8874	0.4	2.44	679	4.5	8766	0	215	45	1.9
16/12/2013 05:00	304	216	0.8	1.2	18021	0.1	2.5	2.5	8723	-8.9	8873	0.3	2.38	647	2	8767	0	214	44.3	1
16/12/2013 06:00	304	216	2	1.3	18022	0.2	3.3	3.3	8728	-10.5	888	0.3	2.35	631	2.6	8769	0	203	37.4	1.2
16/12/2013 07:00	301	212	3	1.2	18023	1	2.6	2.6	8733	-12.1	8878	1.4	2.29	600	2.6	877	0	202	36.8	2.3
16/12/2013 08:00	301	212	2.3	1.5	18024	0.9	2.5	2.5	8738	-13.7	8873	0.9	2.23	570	2.4	877	0	199	35.1	3.1
16/12/2013 09:00	298	209	2.6	1.4	18026	0.7	2.1	2.1	8743	-15.3	8897	0.8	2.19	551	2.1	8769	0	195	33.7	1.4
16/12/2013 10:00	299	210	2	1.8027	0.5	1.6	1.6	8748	-16.9	8916	0.4	2.14	528	2.3	8768	0	194	33.4	1.5	
16/12/2013 11:00	298	209	2.4	1.2	1803	0.6	1.3	1.3	8753	-18.5	8932	0.8	2.11	515	1.7	8767	0	193	33	1.4
16/12/2013 12:00	296	207	3.7	1.5	18031	0.6	1	1	8758	-20.1	8933	0	2.05	488	2.2	8765	0	196	34.1	2.2
16/12/2013 13:00	293	203	3.3	1.2	18033	0.4	0.8	0.8	8763	-21.7	8934	0.6	2.04	483	0.9	8763	0	193	33	1.4
16/12/2013 14:00	296	207	2.9	0.8	18036	1.5	1.3	1.3	8768	-23.3	8964	0.1	2.03	479	1.9	8763	0	194	33.4	1.6

Fig. 3.2.3 Datos de las Estaciones climatológicas e hidrométricas de la cuenca Peñitas

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

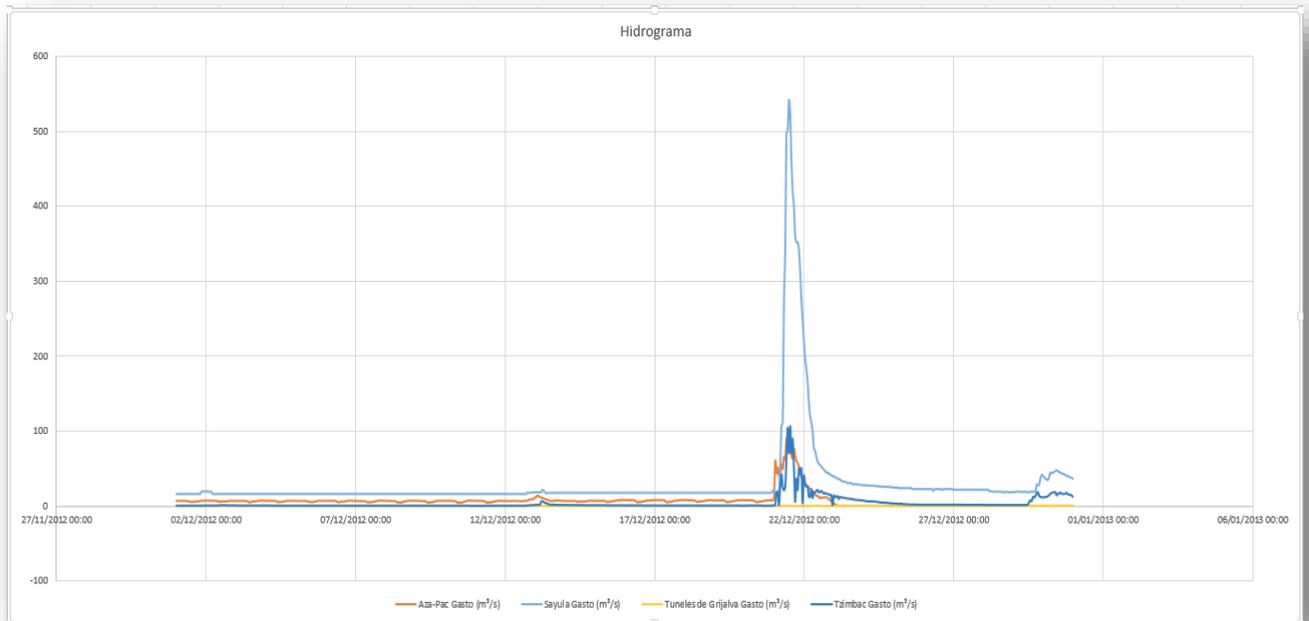


Fig. 3.2.4 Hidrograma de la Cuenca Peñitas

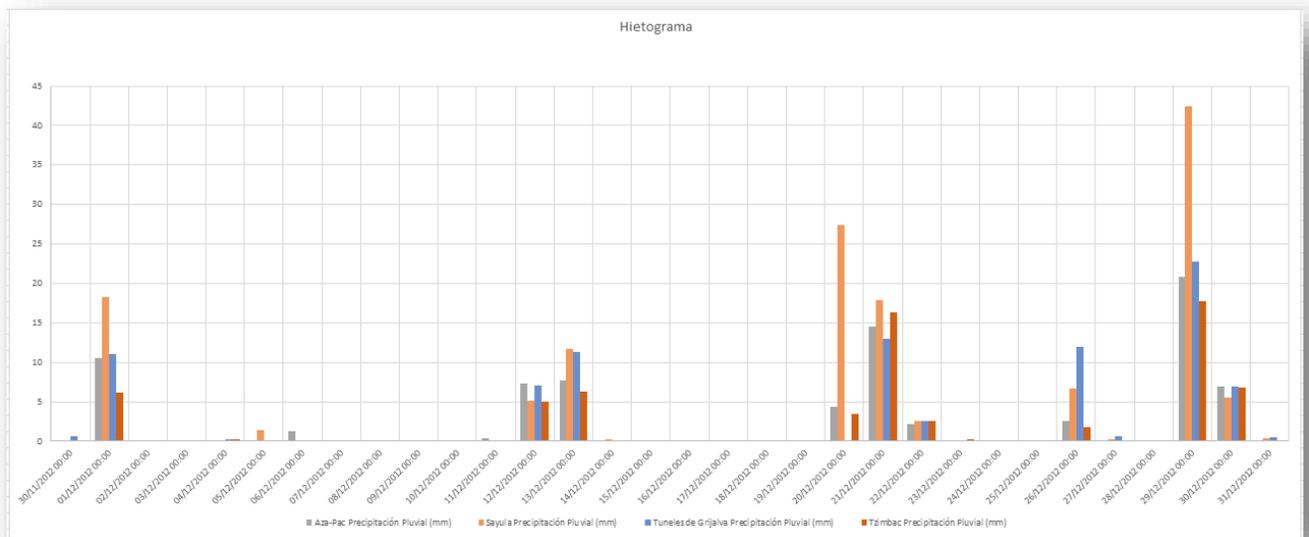


Fig. 3.2.5 Hietograma de Precipitación para la cuenca Peñitas

4 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS HIDROLÓGICOS MEDIANTE UN SIG PARA LAS CUENCAS SAYULA, AZAPAC, TZIMBAC

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA “ÁNGEL ALBINO CORZO” (PEÑITAS)

La Presa Ángel Albino Corzo “Peñitas” (Fig. 4.1.1) constituye el cuarto aprovechamiento del sistema de presas del Río Grijalva. Se construyó entre los años de 1979 a 1987 en el estado de Chiapas sobre el Río Grijalva, en el municipio de Ostuacán, ésta se localiza a 72 (km) aguas abajo de la Presa Malpaso. Sus coordenadas geográficas son: 17°26’42” de latitud norte y 93°27’28” de longitud oeste. La cuenca propia de Peñitas comprende un área aproximada de 1,402 km², área comprendida aguas abajo de la Presa Malpaso hasta dicha presa.



Fig. 4.1.1 (Cortina de la Presa “Ángel Albino Corzo”)

-CORTINA

La construcción de la cortina de materiales graduados se inició en 1980. Se aprovechó la amplitud de la boquilla en esta zona y la existencia de una isla que dividía el cauce en dos brazos, lo que permitió utilizar el brazo derecho para continuar su cauce, mientras que por el brazo izquierdo era rellenado y así poder comenzar con los primeros trabajos, entre ellos compactar los depósitos aluviales y poder desplantar la cortina directamente sobre el aluvión.

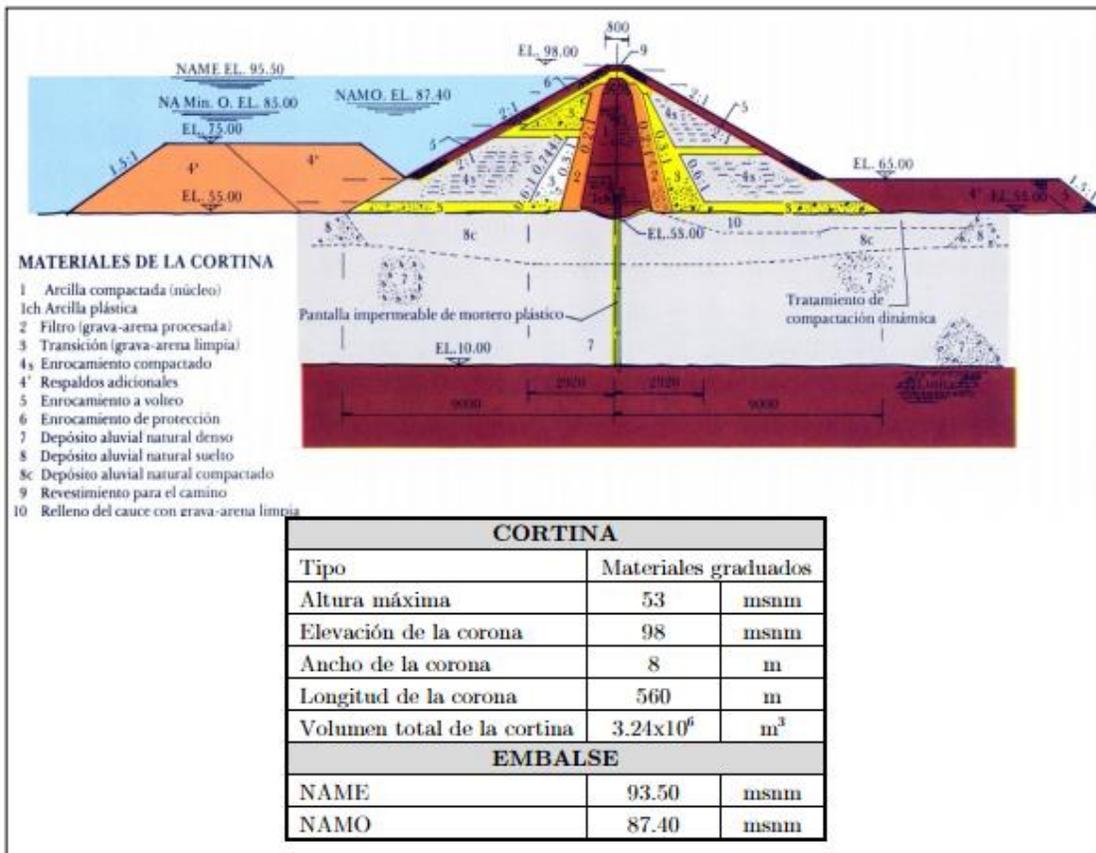


Fig. 4.1.2 Cortina de la Presa "Ángel Albino Corzo"

-OBRA DE DESVÍO

Con la obstaculización del brazo izquierdo, el cauce del río solamente fluía en dirección del brazo derecho, lo que permitió avanzar con la cortina por la margen izquierda. Paralelamente al avance de la cortina se excavó un canal de desvío a cielo abierto de 35 (m) de ancho en la margen derecha, lo que permitió concluir con la cortina .

-OBRA DE EXCEDENCIAS

Consta de dos vertedores alojados en la margen derecha, controlados por compuertas radiales. Cada uno de los vertedores tiene cuatro compuertas radiales de 14.5 (m) de ancho por 15 (m) de altura. La cresta del vertedor se fijó a una elevación de 76.50 (m), la longitud total de la cresta es de 116 (m) y permite evacuar un gasto de 18,700 (m³ /s), (9,350 (m³ /s) por cada vertedor.

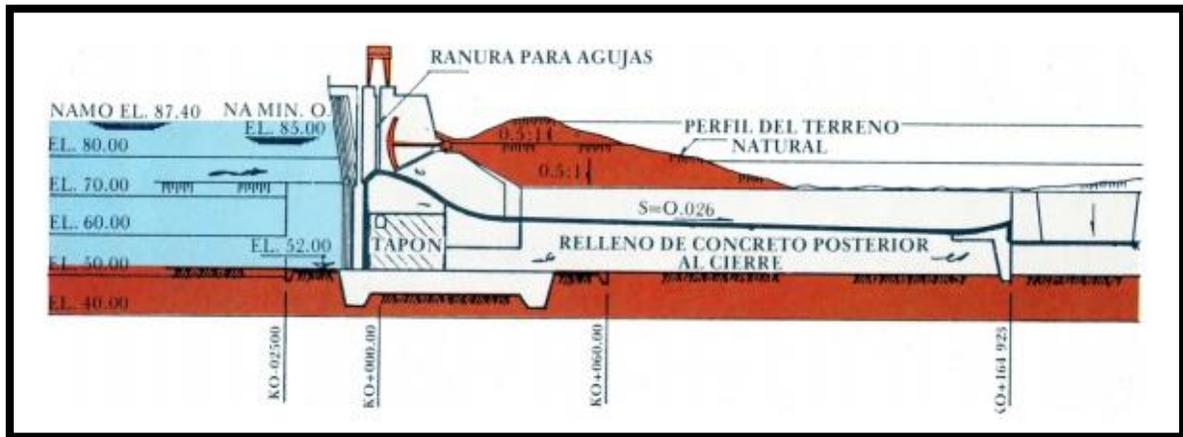


Fig. 4.1.3 Perfil del Vertedor de la Presa “ Ángel Albino Corzo”

PLANTA HIDROELÉCTRICA

La planta hidroeléctrica, localizada en la margen izquierda, consta de obra de toma, conducción a presión y casa de máquinas. La obra de toma consiste en un canal de llamada y 4 tomas independientes. Está diseñada con 8 rejillas semicirculares. La conducción a presión consta de 8 conductos de 9x12 (m) y longitud de 40 (m), con inclinación a 45° (Fig. 4.1.3). La casa de máquinas es de tipo exterior, tiene dimensiones de 165 m de longitud, 23.7 m de ancho y 60 (m) de altura. Está diseñada para alojar 4 unidades, cada una constituida por una turbina tipo Kaplan de eje vertical, con capacidad de 105 (MW) cada una.

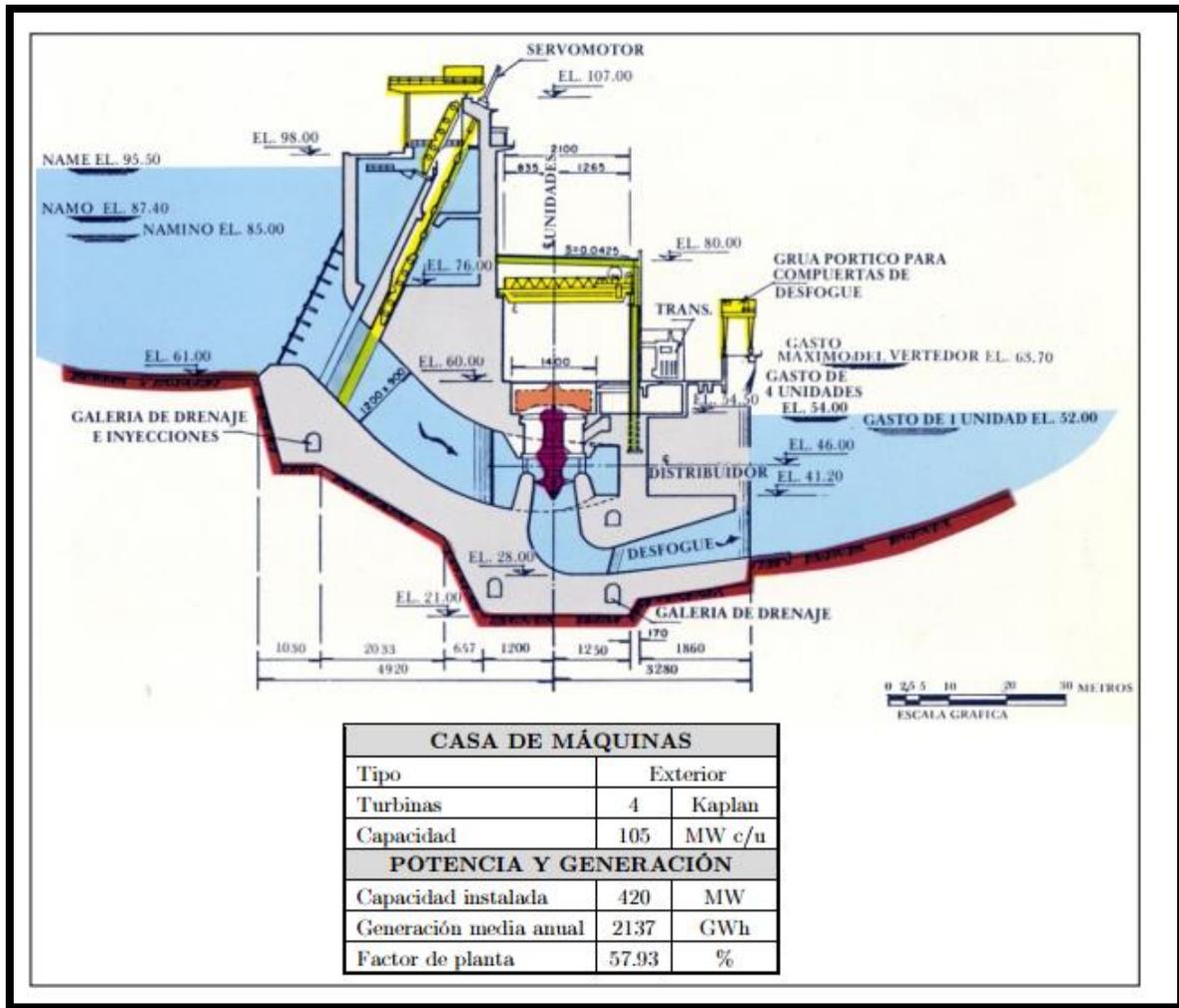


Fig. 4.1.3 Perfil del conducto a presión Presa Peñitas

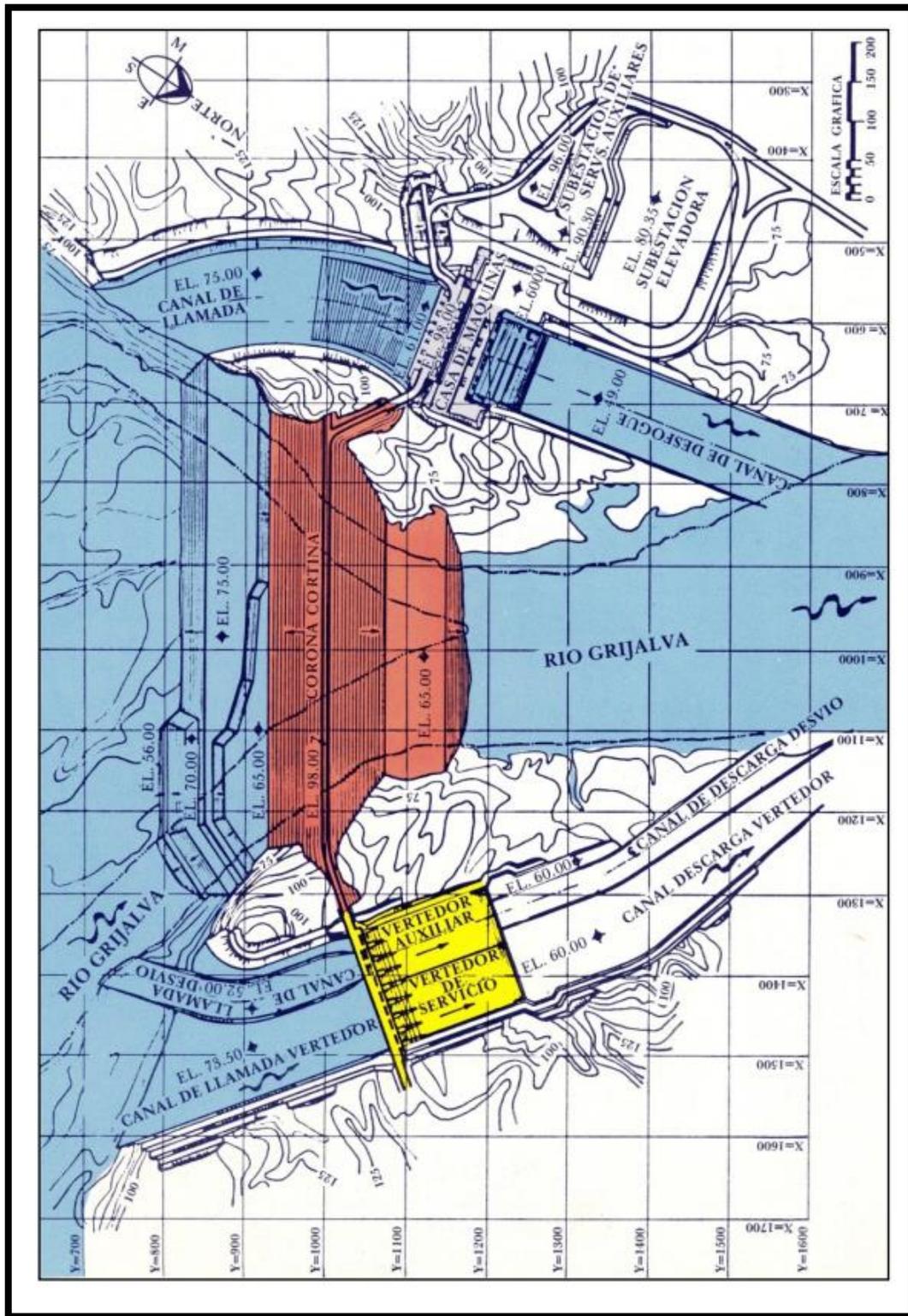


Fig. 4.1.4 Planta General de la Presa Ángel Albino Corzo "Peñitas"

4.2 MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE)

En la actualidad, la aplicación de los modelos de parámetros distribuidos está relacionada con el uso de los programas computacionales y en particular con los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

El INEGI define a los SIG como “El conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real”.

Tienen como objetivo el almacenamiento, manejo y manipulación de grandes volúmenes de datos espacialmente referenciados. Provee los medios para llevar a cabo análisis que implican, de manera específica, el componente de posición geográfica.

Los modelos digitales de elevaciones son la base para el funcionamiento de los SIG.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y elementos u objetos presentes en el mismo.

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

Se elaboraron los mapas distribuidos de la cuenca Peñitas utilizando el Sistema de Información Geográfica ArcView, el modelo digital de elevación, escala 1:50,000 y los mapas digitalizados de uso y tipo de suelo a escala 1:250,000 del INEGI.

4.3 ÁREA DE LA CUENCA

En general el tamaño de la cuenca determina las magnitudes de sus crecientes, gastos mínimos o de estiaje y escurrimiento promedio.

Una cuenca pequeña generará crecientes o avenidas repentinas, tanto en gastos máximos como en volumen; en cambio las grandes cuencas originarán crecientes de larga duración y previsibles, pero con gastos y volúmenes extraordinarios.

El tamaño o magnitud de la cuenca es el área plana en proyección horizontal, encerrada por su parteaguas.

Generalmente esta área es determinada con planímetro, o bien en la actualidad se utilizan los MDE apoyados con software especializados.

Para la elaboración del siguiente trabajo se generaron las áreas de la cuenca a través del programa ArcView.

Debido al deslizamiento del talud en el ejido Juan de Grijalva, en el tramo entre las presas Malpaso y Peñitas, ocasionado por las lluvias de Octubre del año 2007 se construyó un canal y dos túneles para desalojar las aguas retenidas por el caído, funcionando como una represa natural que retrasa el tiempo de llegada del escurrimiento de la cuenca, por lo que fue necesario realizar el análisis y calibración de la cuenca Peñitas aguas arriba y aguas abajo de Juan Grijalva.

A partir de este evento, se dividió a la cuenca Peñitas en dos: Cuenca Alta de Peñitas y Cuenca Baja de Peñitas (figura 4.3.1).

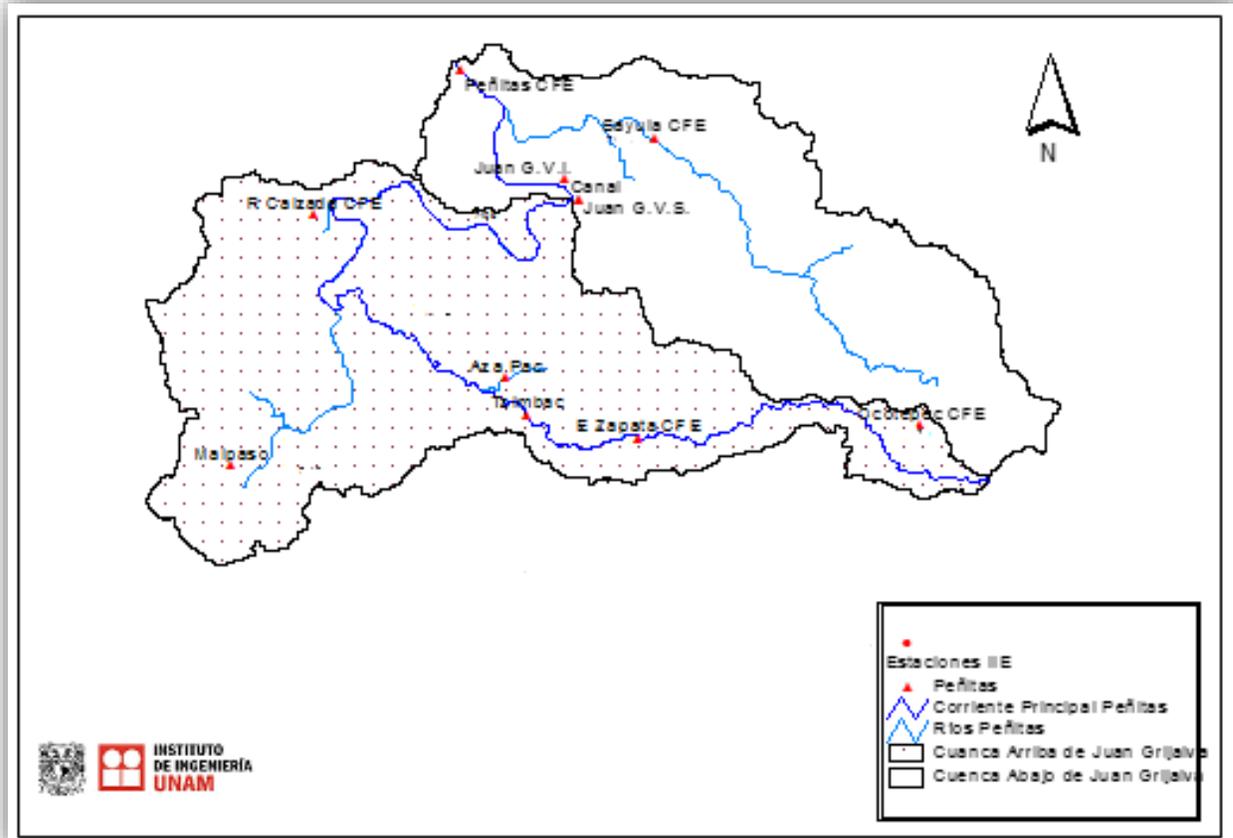


Fig. 4.3.1 Cuenca Peñitas, Cuenca Alta y Cuenca Baja

La cuenca Alta de Peñitas, recibe principalmente los escurrimientos de los ríos Tzimbac y Azapac así como también los excedentes de la presa Malpaso, mientras que los escurrimientos de la cuenca Baja de Peñitas provienen de la cuenca del río Sayula.

Para calibrar los escurrimientos en la cuenca Alta de Peñitas, se cuenta con la información de dos estaciones hidrométricas: Azapac y Tzimbac. Los parámetros para la cuenca Baja de Peñitas serán los obtenidos de la calibración de la cuenca Sayula. (Figura 4.3.2).

Es por esto que las cuencas que se consideraron para analizar fueron Azapac, Tzimbac, Tzimbac con Azapac, Sayula y Peñitas.

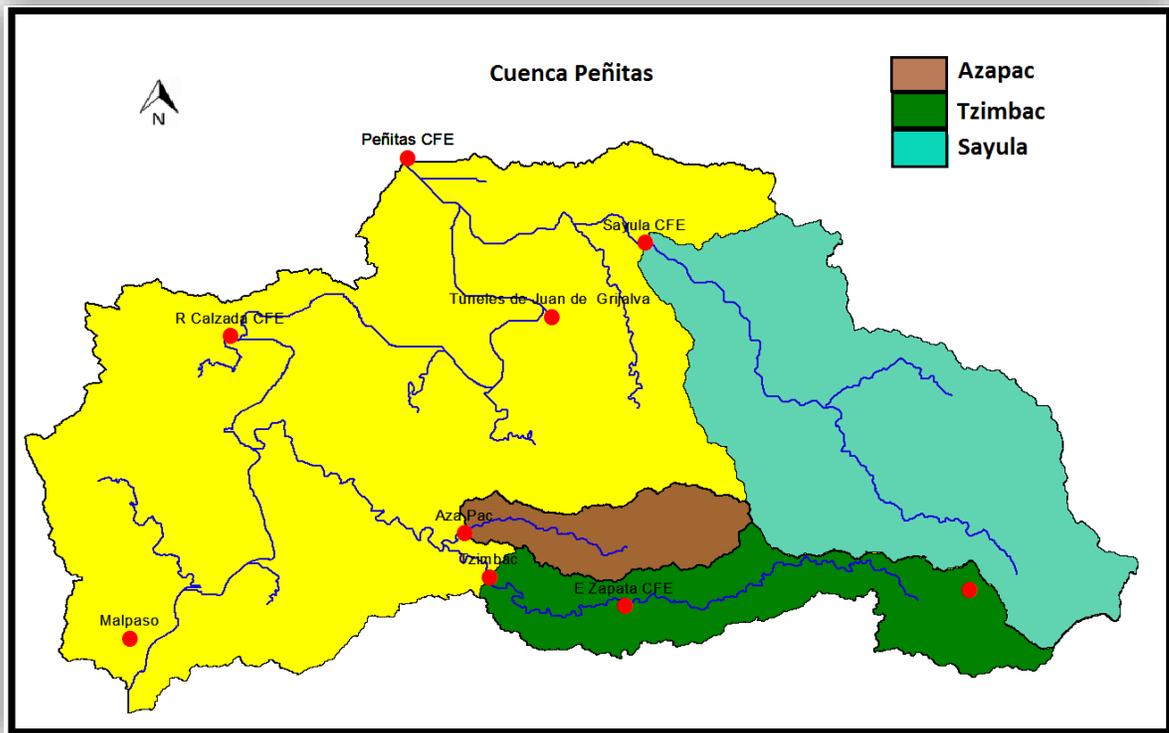


Fig. 4.3.2 Cuencas Azapac, Tzimbac y Sayula

Para la obtención de los parámetros hidrológicos de las cuencas Azapac, Tzimbac, Sayula y Peñitas, se realizó primero el análisis de terreno en el SIG para posteriormente crear un mallado de las cuencas, con un tamaño de celdas de 1km por 1 km, y con ello obtener dichos parámetros para cada celda.

En las figuras que a continuación se presentan, se muestra el mallado obtenido para el cálculo de las características fisiográficas de las cuencas en estudio por medio del ArcView 3.2

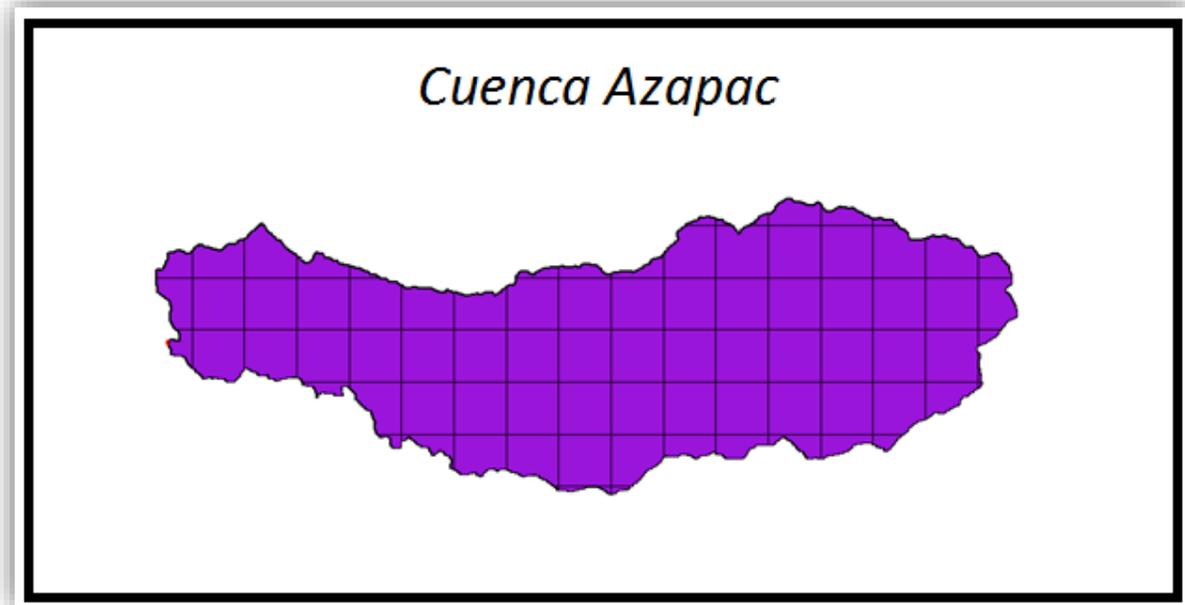


Fig. 4.3.3 Área de la cuenca Azapac

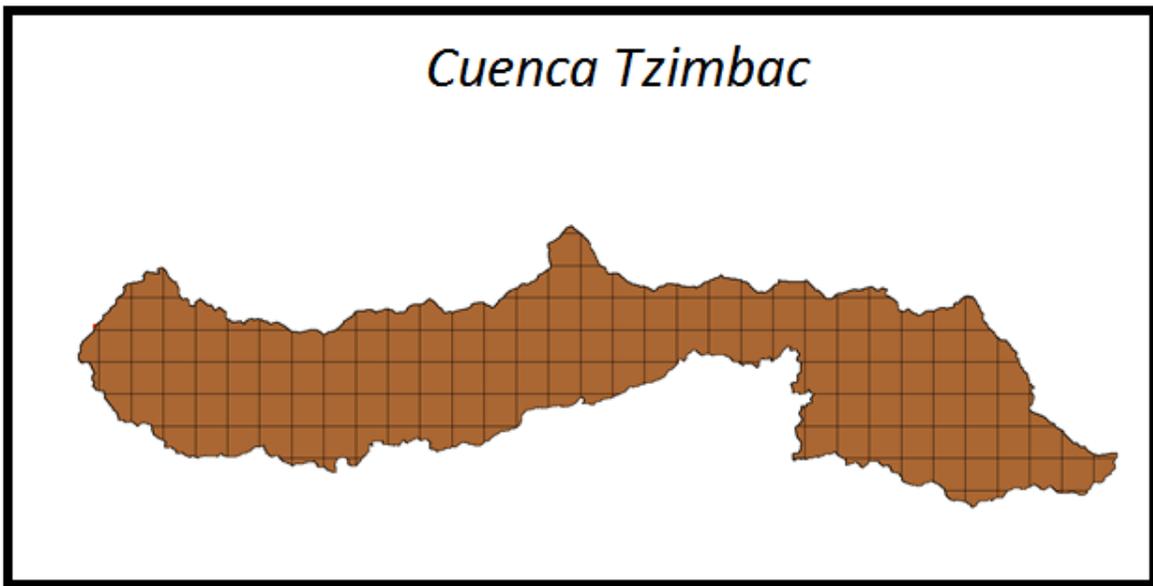


Fig. 4.3.4 Área de la cuenca Tzimbac

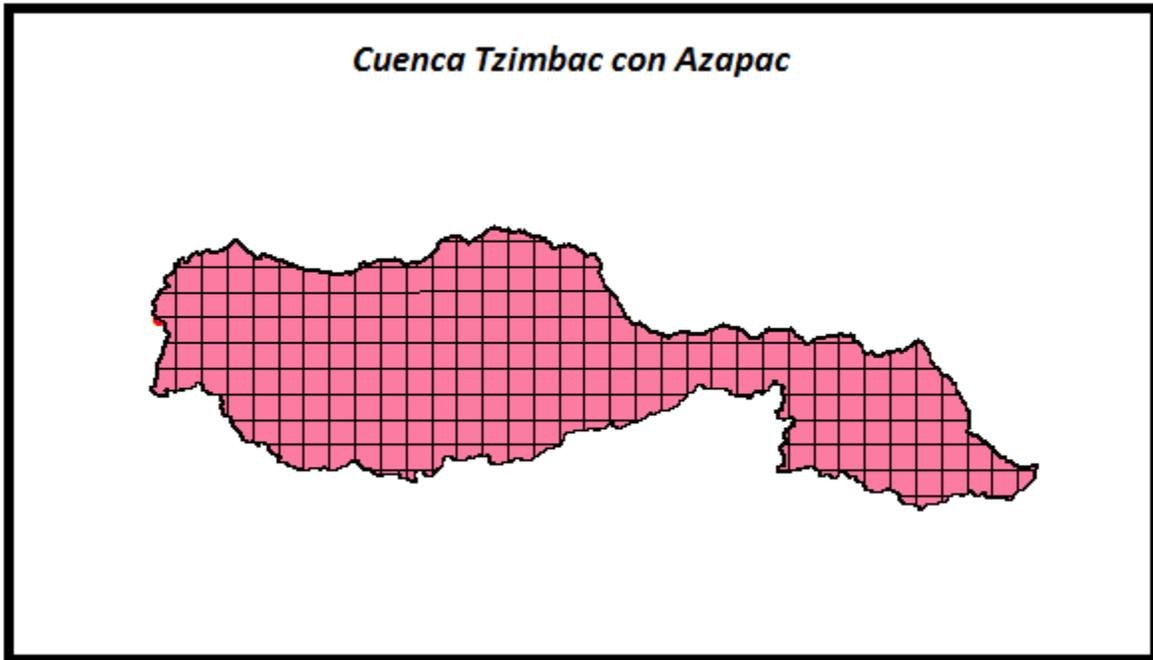


Fig. 4.3.5 área de la Cuenca Tzimbac con Azapac

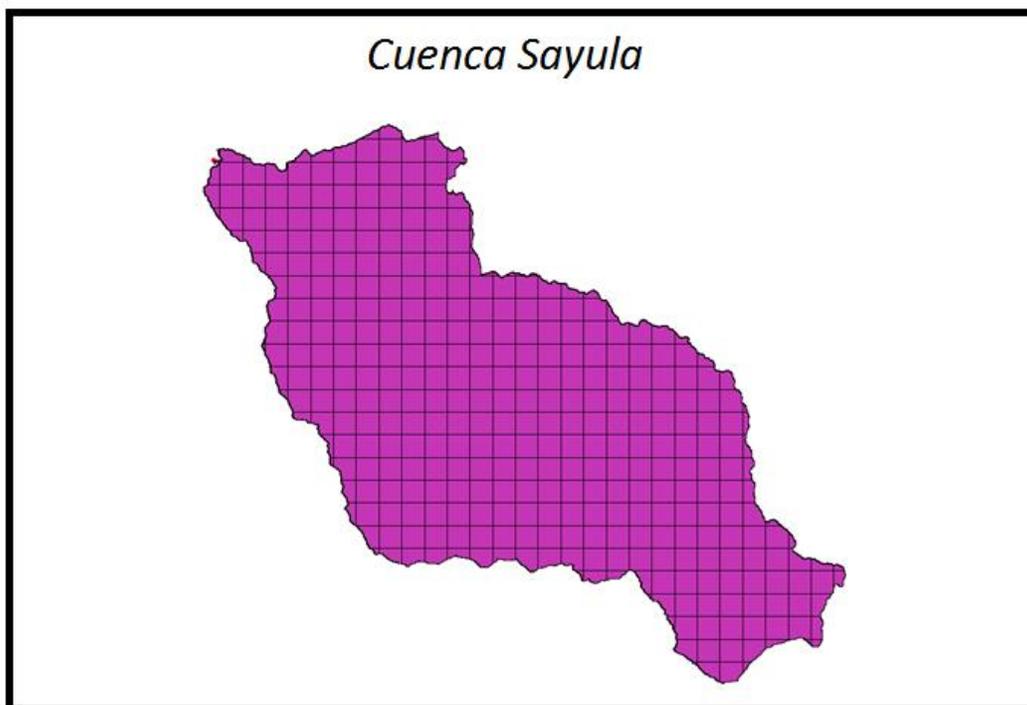


Fig. 4.3.6 Área de la cuenca Sayula

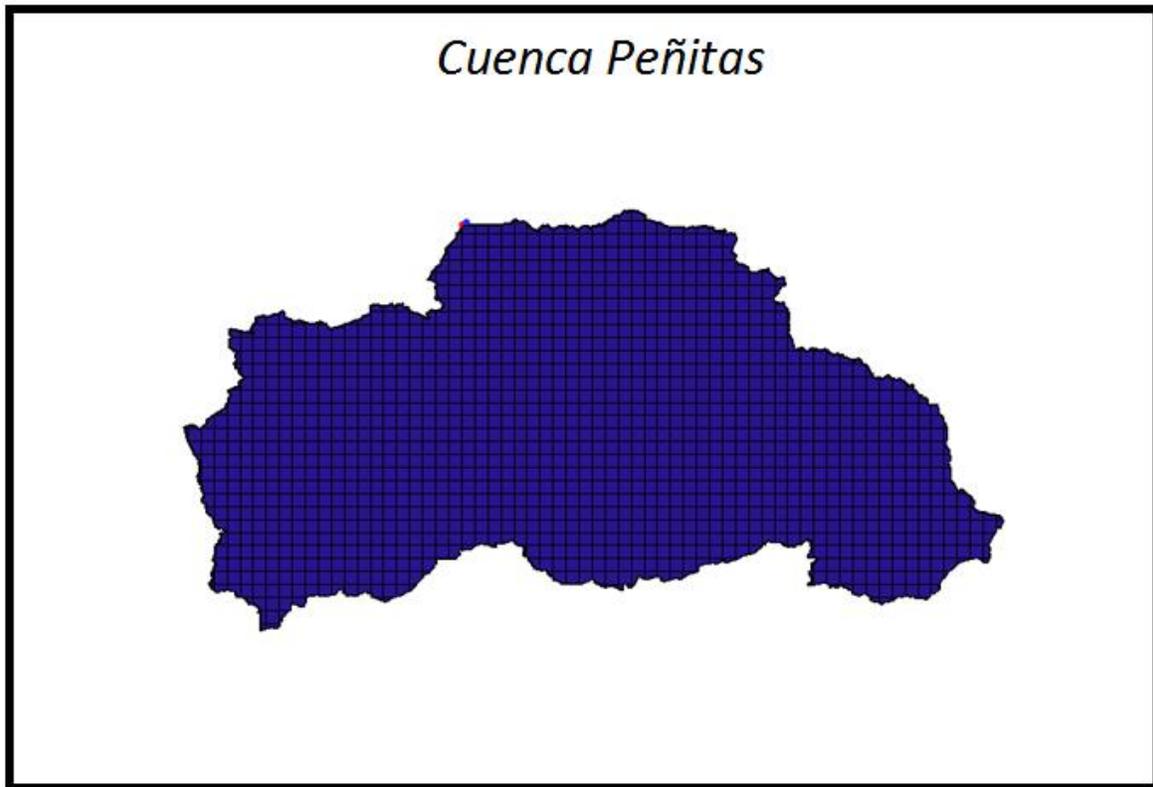


Figura 4.3.7 Área de la Cuenca Peñitas.

Estación	Área (m ²)	Área (km ²)	% Área
Azapac	56178904.14	56.18	4.43%
Tzimbac	127327719.5	127.33	10.03%
Sayula	320711174.3	320.71	25.27%
Azapac con Tzimbac	194528950.5	194.53	15.33%
Peñitas	1269203924	1269.20	100.00%

Tabla 5. Áreas de las cuencas

4.4 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL

Para la determinación del cauce principal en una cuenca, primero hay que determinar el orden de corrientes en una cuenca. El orden de corrientes es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación de la red de cauces. Las corrientes más pequeñas, las iniciales o que no están ramificadas son de orden 1, cuando se unen dos de orden 1 forman una de orden 2; las de orden 3 son las que tienen dos o más tributarios de orden 2 y así sucesivamente. Por lo tanto el orden de corriente principal en la salida de la cuenca, será un indicador de la magnitud de la ramificación y extensión de su red de cauces.

El cauce principal se determina con auxilio del orden de corrientes partiendo de la salida de la cuenca hacia aguas arriba, siguiendo la corriente de más alto orden, hasta alcanzar una bifurcación de dos corrientes del mismo orden, entonces el cauce que tenga mayor área de cuenca es el denominado cauce principal. (Campos Aranda, 2007)

En las siguientes figuran, se muestra las cuencas en estudio y su respectivo cauce principal.

Al final se muestra una tabla resumen con las longitudes de cada cauce principal de cada cuenca.

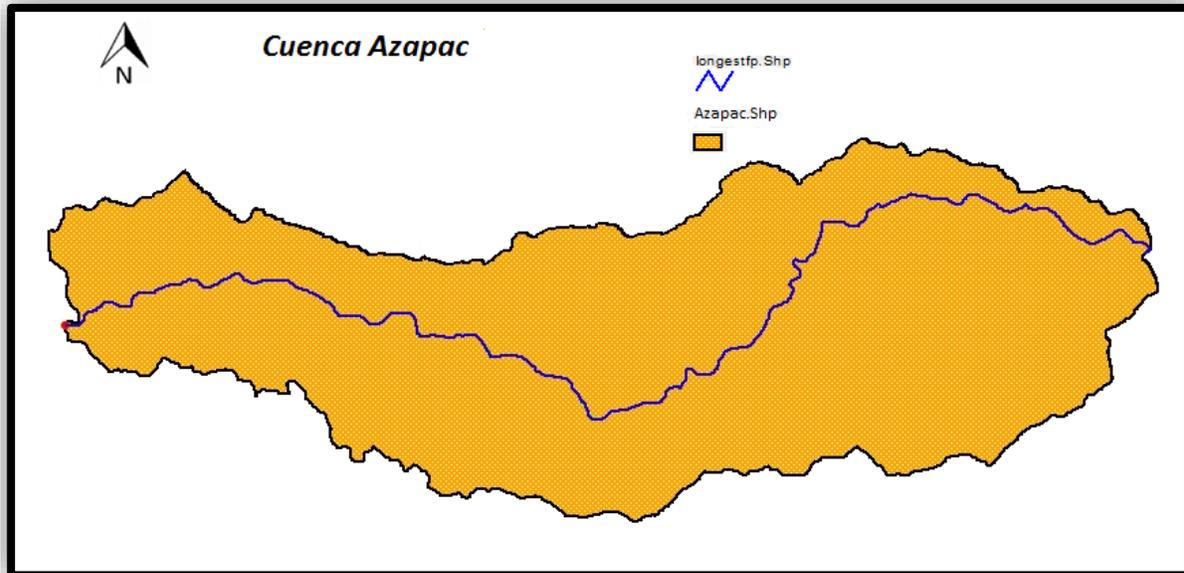


Fig. 4.4.1 Cauce Principal Cuenca Azapac

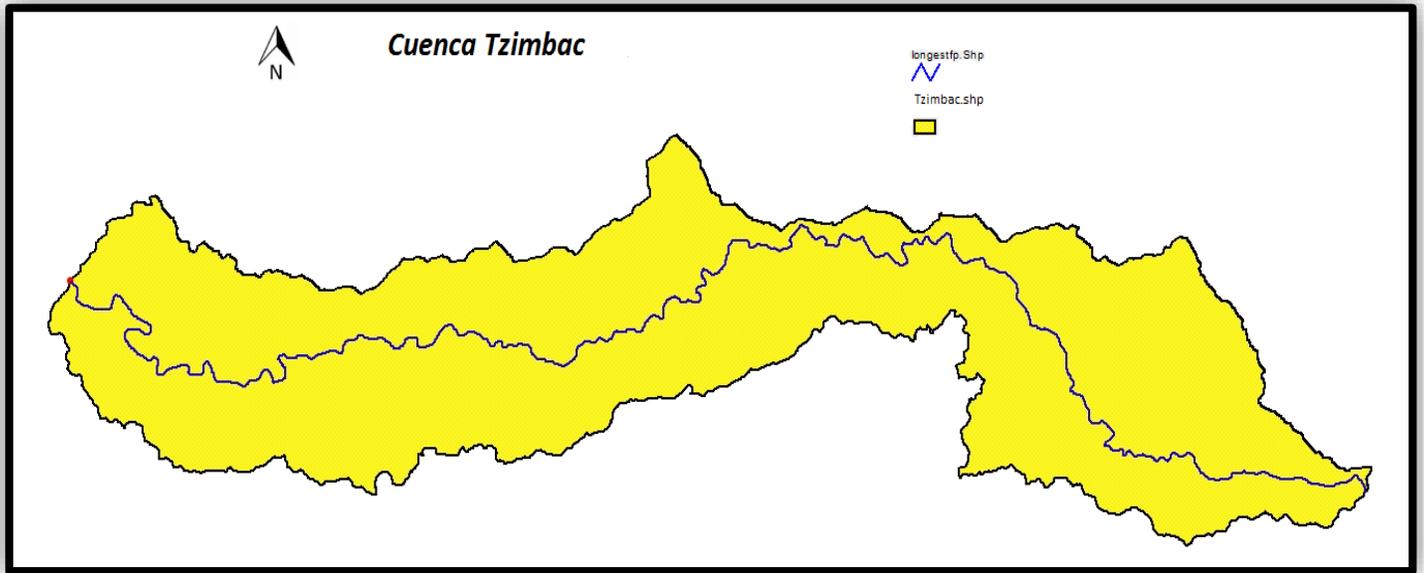


Fig. 4.4.2 Cauce Principal Cuenca Tzimbac

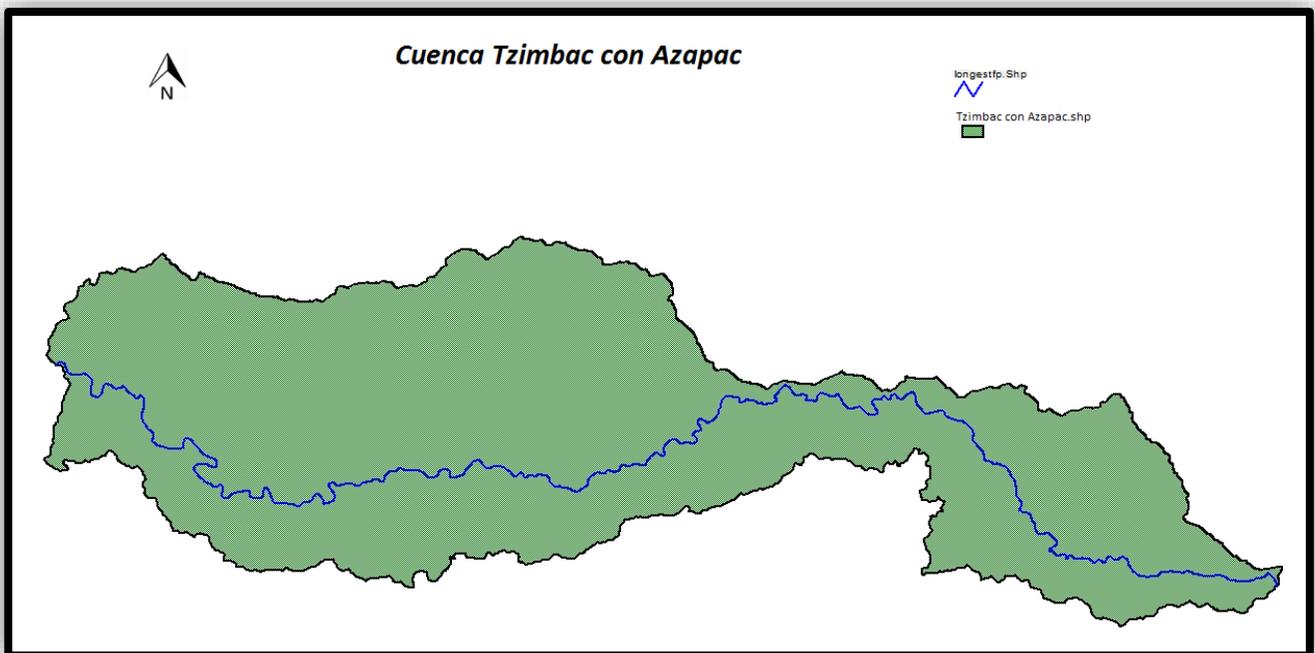


Fig. 4.4.3 Cauce Principal Cuenca Tzimbac con Azapac

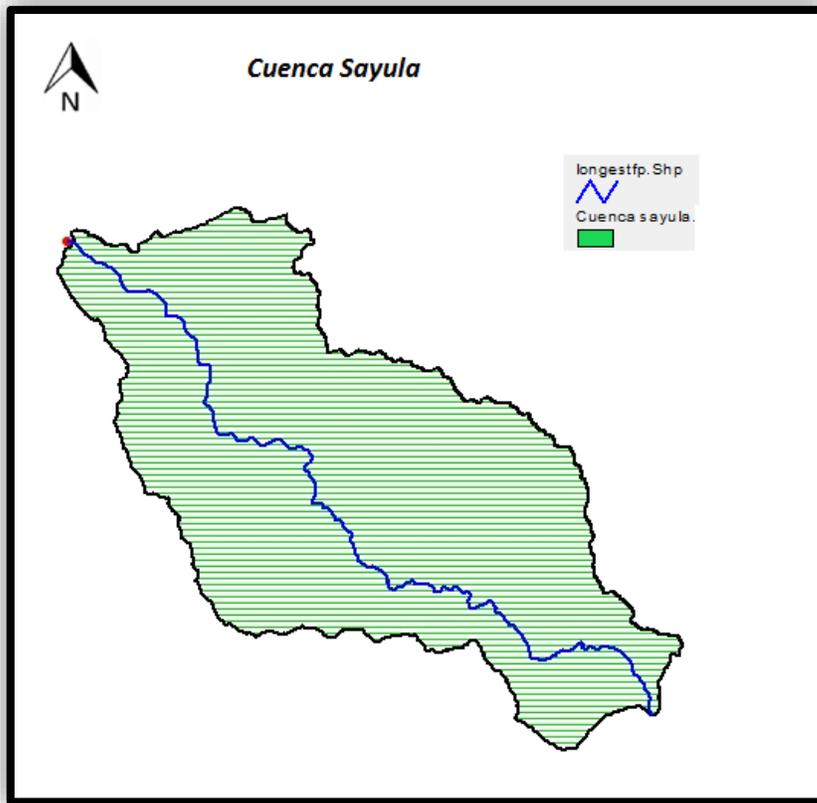


Fig. 4.4.3 Cauce Principal Cuenca Sayula

Estación	Longitud (m)	Longitud (km)
Azapac	21747.84	21.75
Tzimbac	49550.401	49.55
Sayula	46558.866	46.56
Azapac con Tzimbac	54374.76	54.37
Peñitas	136920.409	136.92

Tabla 6. Longitud de los cauces principales.

4.5 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL

Uno de los indicadores más importante del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal. Dado que está pendiente varía a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media; para ellos existen diversos métodos.

- a) Pendiente media es igual al desnivel entre los extremos de la corriente dividido entre su longitud.

$$S = \frac{\Delta H}{L} \quad (17)$$

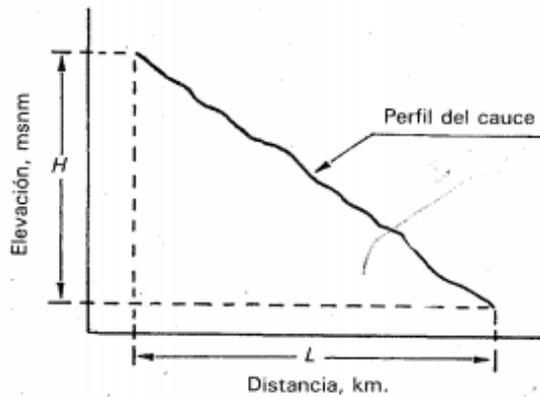


Fig. 4.5.1 Pendiente media de la cuenca

- b) Pendiente Compensada.- La pendiente media es la de una línea recta que, apoyándose en el extremo aguas abajo de la corriente, hace que se tengan área iguales entre el perfil del cauce, arriba y debajo de dicha línea.

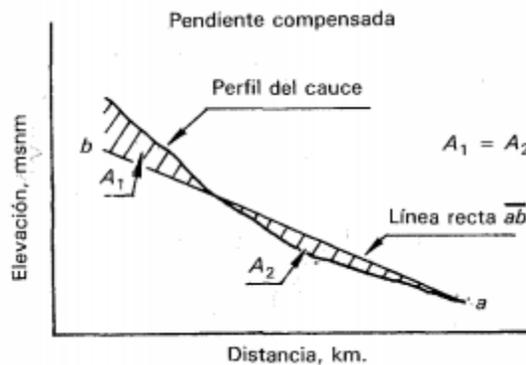


Fig. 4.5.2 Pendiente compensada de la cuenca

- c) Pendiente Taylor – Schwarz.- Calcula la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrida que la corriente en cuestión.

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (18)$$

El método utilizado por el software ArcView 3.2, es el de la pendiente media, obteniendo los siguientes resultados mostrados en la tabla 7.

Estación	Pendiente(S)
Azapac	0.049
Tzimbac	0.042
Sayula	0.05
Azapac con Tzimbac	0.03
Peñitas	0.016

Tabla 7. Pendientes de los cauces principales

4.6 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Es el tiempo que tarda el escurrimiento de la tormenta en viajar desde el punto hidráulicamente más distante hasta la salida de la cuenca, o bien es el lapso transcurrido desde el final de la tormenta hasta el término de su hidrograma de escurrimiento superficial.

La expresión utilizada para calcular el tiempo de concentración fue Kirpich.

$$T_c = 0.000325 * (L^{0.77}) * (S^{-0.385}) \quad (19)$$

Donde

Tc.- Tiempo de Concentración

L.- Longitud del cauce principal (m)

S.- Pendiente del cauce principal

Estación	Longitud (Km)	Pendiente(S)	Tc (Kirpich) (hrs)
Azapac	21.75	0.049	2.27
Tzimbac	49.55	0.042	4.54
Sayula	46.56	0.05	4.05
Azapac con Tzimbac	54.37	0.039	5.02
Peñitas	136.92	0.016	14.40

Tabla 8. Tiempo de Concentración.

4.7 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

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

$$Ca = 0.6 T_c \quad (20)$$

$$Ca > \Delta T / 2$$

Ca , es el coeficiente de almacenamiento, (hrs).

T_c , tiempo de concentración, (hrs).

ΔT , intervalo de tiempo para el cálculo del pronóstico, min.

4.8 COBERTURA VEGETAL, GEOLOGÍA Y EDAFOLOGÍA

La cobertura vegetal se encuentra relacionada con factores como el suelo, el agua y el clima. En la Bajo Grijalva se ubica la Sierra del Norte de Chiapas, son serie de serranías separadas por alargados valles que bordean a los Altos y las montañas del Oriente.

La disposición de las montañas permite interceptar la humedad que cargan los vientos del Golfo de México, lo que propicia un clima húmedo con lluvias todo el año. La pérdida de suelos por erosión hídrica extrema y muy extrema afecta al 89% del territorio de Tabasco y al 83% de Chiapas y alcanza valores de pérdidas de suelos mayores a las 500 ton/ha/año. La erosión hídrica es especialmente crítica en la Sierra Madre de Chiapas, los Altos de Chiapas y en las montañas marginales del norte, donde los valores van de severos a extremos (mayores a 100 ton/ha/año); severa y alta (de 25 a 100 ton/ha/año) en la Selva Lacandona, Valles centrales y Malpaso, provocados y acelerados por los intensos procesos de deforestación que ocasiona la erosión de laderas, frecuentes derrumbes y caídas de árboles que obstruyen el flujo del agua y provocan taponamientos e inundaciones. Instituto nacional de Ecología (2005).

La cuenca de Peñitas presenta en la mayor parte de su superficie permeabilidad baja, figura 4.8.4, por ser un suelo abundante en arcillas (suelo Acrisol, ver Figura 4.8.2),

En cuanto al uso de suelo, en la cuenca Peñitas se tiene que el 10% es zona urbana, el 45% es de pastizal, y el 38% es zona selvática, los cuerpos de agua ocupan un 5% de la superficie de la cuenca. Figura 4.8.3.

4.9 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

Los hidrólogos de Soil Conservation Service (SCS) proponen un método para estimación de la lluvia en exceso ocasionada por una tormenta, el cual se basa en el parámetro del número de curva o parámetro "N", que describe numéricamente una combinación específica de suelo, uso de suelo y su tratamiento.

Para la calibración del modelo lluvia-escorrimento de parámetros distribuidos es necesario que cada celda generada en el Programa ArcView3.2, se le asigne un valor de número de curva. Este se obtuvo a través de tablas con el uso de suelo de la cuenca y de la Edafología de la cuenca (Figura 4.9.2) proporcionadas por el INEGI; las cuales se interpolaron dependiendo de las características de cada tipo de suelo y su permeabilidad. Figura 4.9.1.

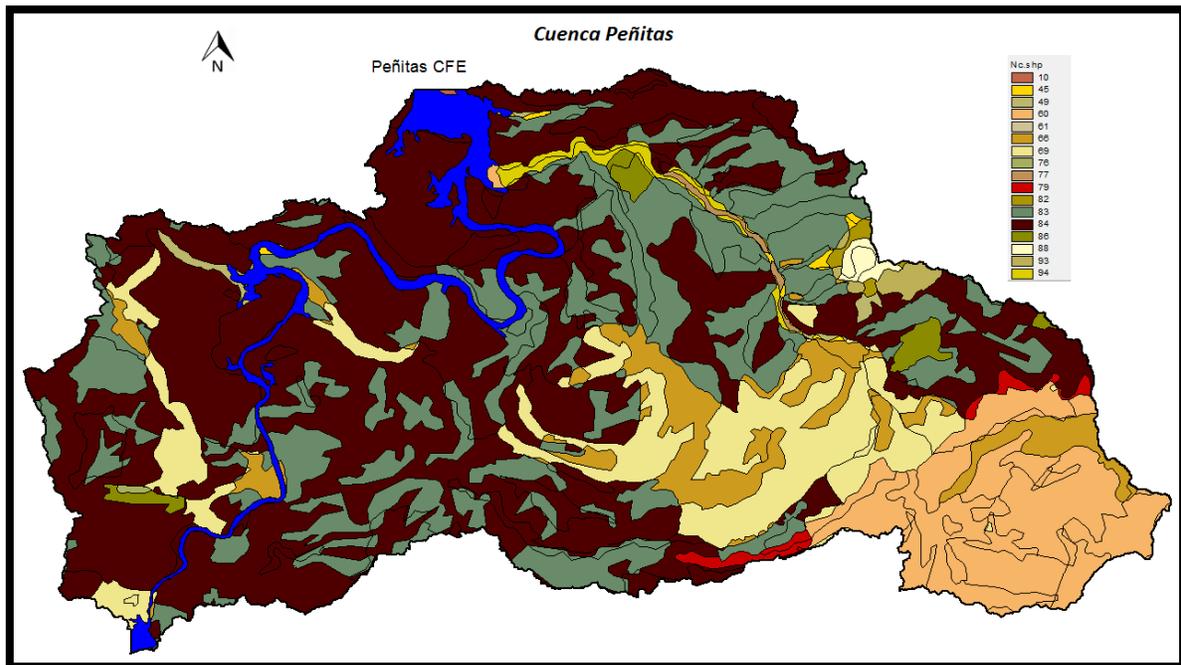


Fig. 4.9.1 (Número de curva Cuenca Peñitas)

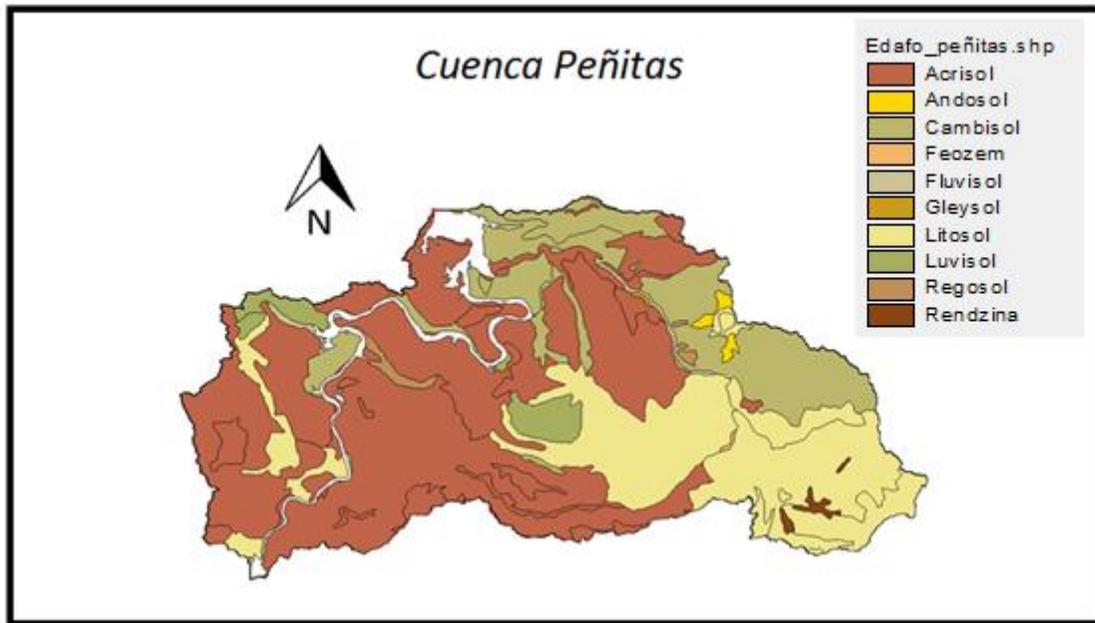


Fig. 4.9.2 (Edafología en la Cuenca Peñitas)

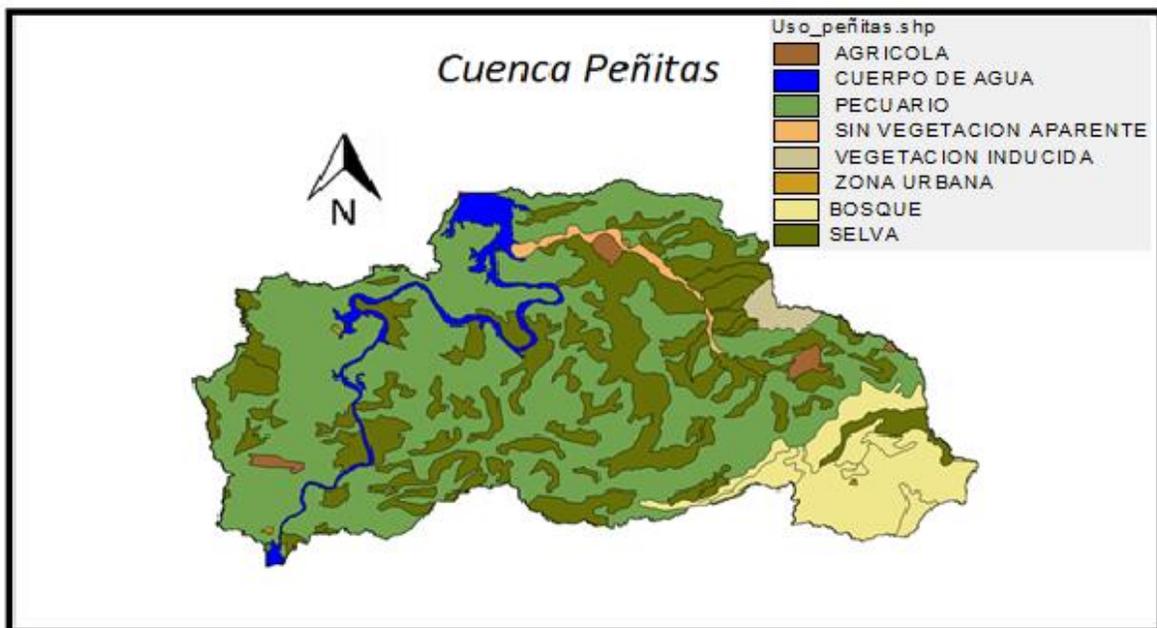
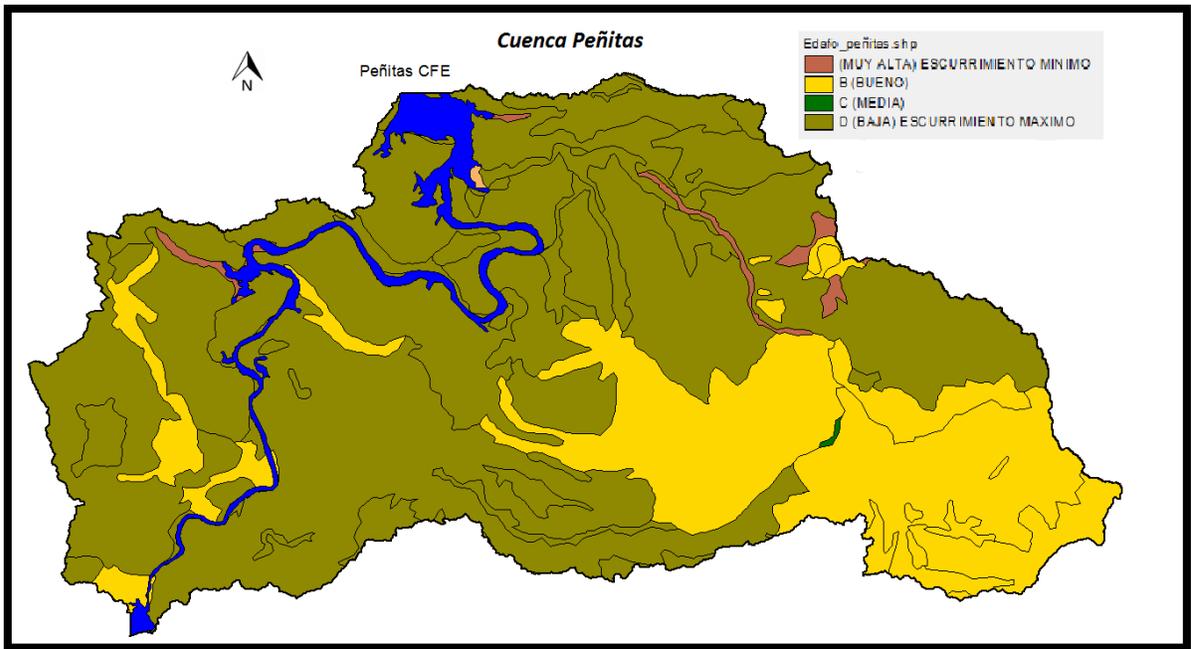


Fig. 4.9.3 (Uso de Suelo Cuenca Peñitas)



4.9.4 Permeabilidad de la cuenca Peñitas

5 MODELO DE LLUVIA- ESCURRIMIENTO PARA LA CUENCA PEÑITAS

Para la calibración del Modelo Lluvia- escurrimiento se deben calibrar la cuenca Alta de Peñitas, para eso, se calibrarán las cuencas Azapac, Tzimbac y Tzimbac con Azapac. Para la calibración de la cuenca Baja de Peñitas será la calibración obtenida de la cuenca Sayula.

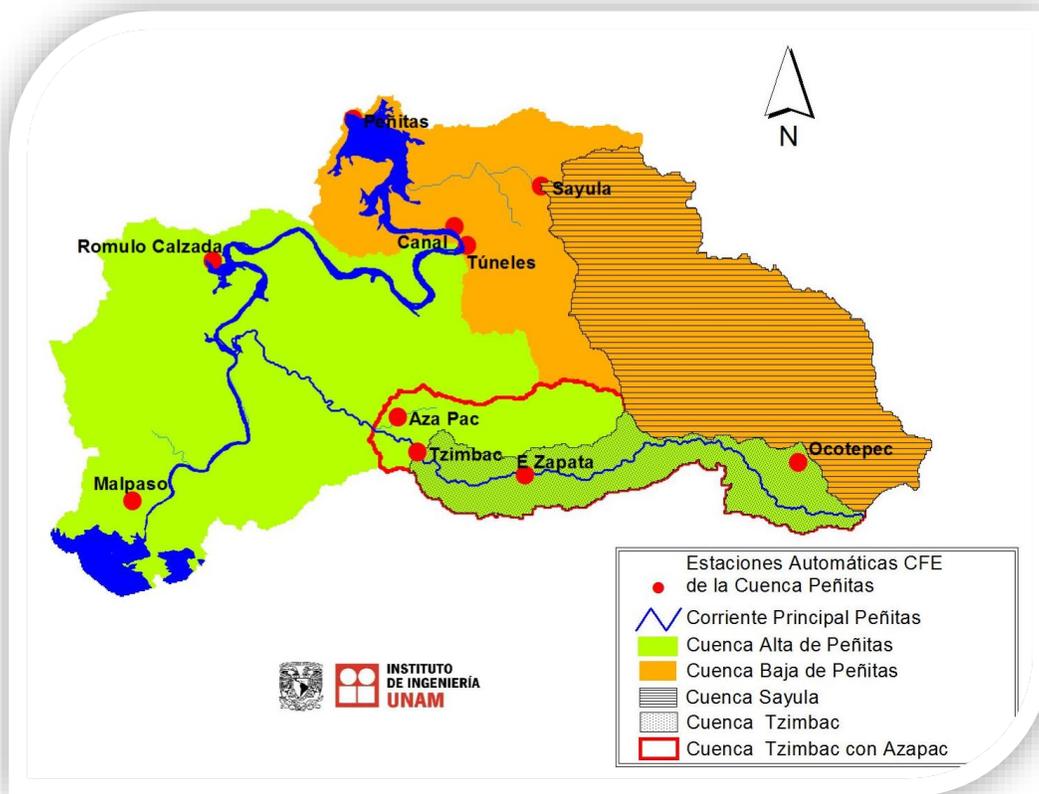


Fig. 5.1.1 Subcuencas de la Cuenca Peñitas

Una vez terminado el análisis de la cuenca mediante el SIG, fue necesario exportar los archivos de los parámetros hidrológicos de cada una de las cuencas generadas en el ArcView 3.2 . Estos archivos contienen para cada celda creada sus coordenadas x , y , su área, su longitud de viaje y el valor del número de curva asignado.

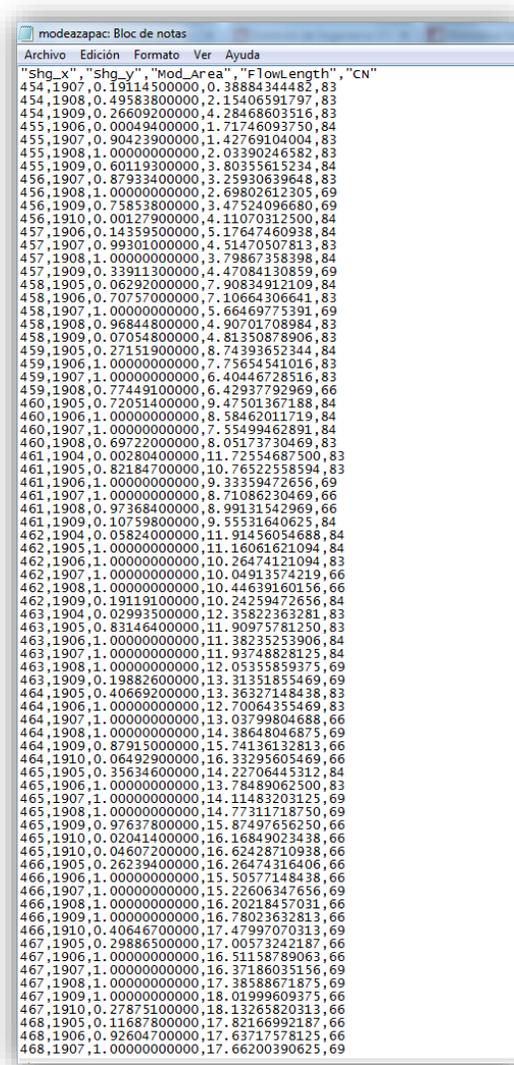


Fig. 5.1.2 Ejemplo de parámetros hidrológicos exportados

Una vez exportados los archivos con los parámetros hidrológicos y una vez definidas las fechas, fue necesario crear archivos con extensión .txt., el cual es la extensión con la cual trabaja el MPE. Estos archivos fueron creados para calcular la precipitación y el gasto dentro de la cuenca para cada uno de los años a analizar; en este caso de 2009 a 2015.

Para el cálculo de la precipitación, estos archivos contienen las coordenadas de cada una de las estaciones climatológicas e hidrométricas, la fecha y hora de comienzo de la precipitación hasta la fecha y hora de la terminación, así como el registro de la precipitación para cada intervalo de tiempo. En el caso de la precipitación, la matriz generada fue transpuesta con fines del funcionamiento del MPE. Como se muestra en la siguiente figura.

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda	22/10/2009 00:00	22/10/2009 01:00	22/10/2009 02:00	22/10/2009 03:00	22/10/2009 04:00	22/10/2009 05:00	22/10/2009 06:00	22/10/2009 07:00	22/10/2009 08:00	22/10/2009 09:00	22/10/2009 10:00	22/10/2009 11:00	22/10/2009 12:00													
X	Y																													
24/10/2009 12:00	24/10/2009 13:00	24/10/2009 14:00	24/10/2009 15:00	24/10/2009 16:00	24/10/2009 17:00	24/10/2009 18:00	24/10/2009 19:00	24/10/2009 20:00	24/10/2009 21:00	27/10/2009 00:00	27/10/2009 01:00	27/10/2009 02:00	27/10/2009 03:00	27/10/2009 04:00	27/10/2009 05:00	27/10/2009 06:00	27/10/2009 07:00	27/10/2009 08:00	27/10/2009 09:00	27/10/2009 10:00	27/10/2009 11:00	27/10/2009 12:00								
09/11/2009 00:00	09/11/2009 01:00	09/11/2009 02:00	09/11/2009 03:00	09/11/2009 04:00	09/11/2009 05:00	09/11/2009 06:00	09/11/2009 07:00	09/11/2009 08:00	09/11/2009 09:00	09/11/2009 10:00	09/11/2009 11:00	09/11/2009 12:00	11/11/2009 00:00	11/11/2009 01:00	11/11/2009 02:00	11/11/2009 03:00	11/11/2009 04:00	11/11/2009 05:00	11/11/2009 06:00	11/11/2009 07:00	11/11/2009 08:00	11/11/2009 09:00	11/11/2009 10:00	11/11/2009 11:00	11/11/2009 12:00					
1/2009 01:00	06/11/2009 02:00	06/11/2009 03:00	06/11/2009 04:00	06/11/2009 05:00	06/11/2009 06:00	06/11/2009 07:00	06/11/2009 08:00	06/11/2009 09:00	06/11/2009 10:00	06/11/2009 11:00	06/11/2009 12:00	08/11/2009 00:00	08/11/2009 01:00	08/11/2009 02:00	08/11/2009 03:00	08/11/2009 04:00	08/11/2009 05:00	08/11/2009 06:00	08/11/2009 07:00	08/11/2009 08:00	08/11/2009 09:00	08/11/2009 10:00	08/11/2009 11:00	08/11/2009 12:00						
09/13:00	08/11/2009 14:00	08/11/2009 15:00	08/11/2009 16:00	08/11/2009 17:00	08/11/2009 18:00	08/11/2009 19:00	08/11/2009 20:00	08/11/2009 21:00	08/11/2009 22:00	08/11/2009 23:00	11/11/2009 00:00	11/11/2009 01:00	11/11/2009 02:00	11/11/2009 03:00	11/11/2009 04:00	11/11/2009 05:00	11/11/2009 06:00	11/11/2009 07:00	11/11/2009 08:00	11/11/2009 09:00	11/11/2009 10:00	11/11/2009 11:00	11/11/2009 12:00							
1/2009 02:00	16/11/2009 03:00	16/11/2009 04:00	16/11/2009 05:00	16/11/2009 06:00	16/11/2009 07:00	16/11/2009 08:00	16/11/2009 09:00	16/11/2009 10:00	16/11/2009 11:00	16/11/2009 12:00	18/11/2009 00:00	18/11/2009 01:00	18/11/2009 02:00	18/11/2009 03:00	18/11/2009 04:00	18/11/2009 05:00	18/11/2009 06:00	18/11/2009 07:00	18/11/2009 08:00	18/11/2009 09:00	18/11/2009 10:00	18/11/2009 11:00	18/11/2009 12:00							
09/14:00	18/11/2009 15:00	18/11/2009 16:00	18/11/2009 17:00	18/11/2009 18:00	18/11/2009 19:00	18/11/2009 20:00	18/11/2009 21:00	18/11/2009 22:00	18/11/2009 23:00	21/11/2009 00:00	21/11/2009 01:00	21/11/2009 02:00	21/11/2009 03:00	21/11/2009 04:00	21/11/2009 05:00	21/11/2009 06:00	21/11/2009 07:00	21/11/2009 08:00	21/11/2009 09:00	21/11/2009 10:00	21/11/2009 11:00	21/11/2009 12:00								
2:00	21/11/2009 03:00	21/11/2009 04:00	21/11/2009 05:00	21/11/2009 06:00	21/11/2009 07:00	21/11/2009 08:00	21/11/2009 09:00	21/11/2009 10:00	21/11/2009 11:00	21/11/2009 12:00																				
464705.5841	1523933.685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
3	2.7	2.1	1.5	2.6	3.4	1.5	1.8	0.6	0.9	0.4	0.5	0.8	0.9	0.6	0.5	0.6	0.7	1	4.9	4.3	3.4	1.7	0.8	2.1	2	1.6	1.6	0.3	0.5	
435705.5841	1901633.685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	0.1	0	0.1	0.7	0.4	0.6	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.1	0	0.1	0.2	0	0	0	0	
463605.5841	1903433.685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.7	1.7	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.7	1.8	1.7	1.8	1.7	1.7	1.8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
483005.5841	1904333.685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.7	5.8	9.5	8.2	4.9	2.9	4.9	1.9	2.6	1.3	0.6	0.6	0	0.3	0.7	2.2	3	3.4	3.2	2.2	1.7	7	3.5	1.9	1.6	1.6	1.5	2.4	3.1	1.9	
441405.5841	1918633.685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	1.3	2	1.6	0.1	0	0	0	0.1	0.6	1	2.1	2.4	4.4	0.1	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0.1	0	0	2	0	0.1	0	
454605.5841	1907533.685	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
456005.5841	1905033.685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.3	3	1	0.9	1.6	1.4	1	1.1	1.3	1	1	0.9	1.1	1.2	0.2	0.3	0	0	1.1	2.2	2.7	2.4	0.9	0.1	0.1	1.4	1.2	1.8	1	0.6	

Fig. 5.1.3 Ejemplo de archivo de lluvia año 2009

Para el cálculo del escurrimiento, los archivos creados contienen la información de los gastos obtenidos a través de las estaciones hidrométricas. Para el funcionamiento del MPE, es necesario que estos archivos contengan la información de la fecha, del Gasto Directo (Qd), Gasto Base (Qb) y Gasto Total (Qt).

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

Fecha	qt	Qd	Qb			
22/10/2009	00:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	01:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	02:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	03:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	04:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	05:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	06:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	07:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	08:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	09:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	10:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	11:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	12:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	13:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	14:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	15:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	16:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	17:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	18:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	19:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	20:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	21:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	22:00		21.7	21.7	0	
22/10/2009	23:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	00:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	01:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	02:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	03:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	04:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	05:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	06:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	07:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	08:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	09:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	10:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	11:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	12:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	13:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	14:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	15:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	16:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	17:00		21.7	21.7	0	
23/10/2009	18:00		21.5	21.5	0	
23/10/2009	19:00		22.1	22.1	0	
23/10/2009	20:00		22.7	22.7	0	
23/10/2009	21:00		23.7	23.7	0	
23/10/2009	22:00		22.7	22.7	0	
23/10/2009	23:00		22.3	22.3	0	
24/10/2009	00:00		22.1	22.1	0	
24/10/2009	01:00		21.9	21.9	0	
24/10/2009	02:00		21.9	21.9	0	
24/10/2009	03:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	04:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	05:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	06:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	07:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	08:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	09:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	10:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	11:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	12:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	13:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	14:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	15:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	16:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	17:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	18:00		21.7	21.7	0	
24/10/2009	19:00		21.5	21.5	0	
24/10/2009	20:00		21.5	21.5	0	
24/10/2009	21:00		21.5	21.5	0	
24/10/2009	22:00		21.5	21.5	0	
24/10/2009	23:00		21.5	21.5	0	
25/10/2009	00:00		21.5	21.5	0	
25/10/2009	01:00		21.5	21.5	0	

Fig. 5.1.4 Ejemplo de archivo de gasto año 2009

5.1 CONTENIDO DEL PROGRAMA MPE

Se muestra a continuación el contenido de la interfaz del programa MPE.

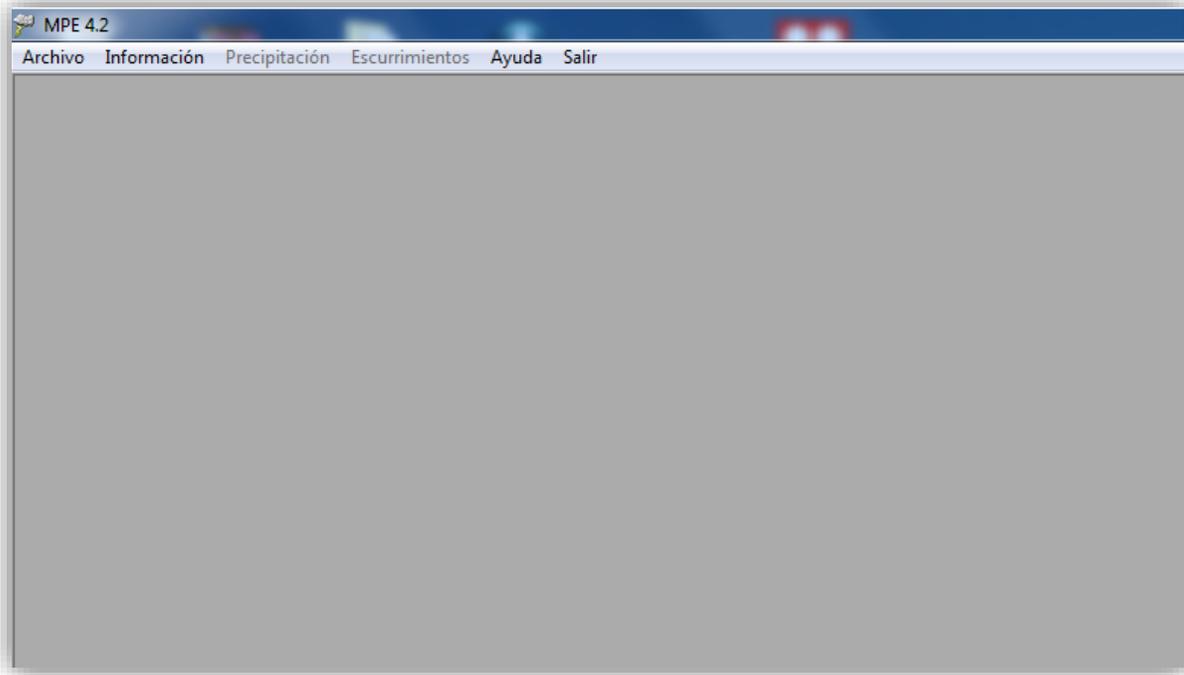


Fig. 5.2.1 Menú Principal del MPE

Archivo

- **Abrir Proyecto.-** Proyecto Existente
- **Cerrar Proyecto.-** Cerrar Proyecto sin guardar ningún procedimiento realizado
- **Guardar Proyecto.-** Guarda el proyecto realizado
- **Guardar proyecto Como.-** Guarda el proyecto realizado asignándole un nombre de archivo
- **Salir.-** Cierra el proyecto y sale del programa

Información

- **Información inicial.-** Es la información de la tormenta a analizar.
- **Fecha inicial.-** Se introduce la fecha de inicio de la tormenta (dd/mm/aaaa)
- **Hora inicial.-** Se introduce la hora de inicio de la tormenta (hh:mm)
- **Fecha Final.-** Se introduce la fecha final de la tormenta (dd/mm/aaaa)
- **Hora Final.-** Se introduce la hora final de la tormenta (hh:mm)

- **Intervalo de tiempo Δt .**- Se introduce el intervalo de tiempo en el cual está la información de precipitación en los archivos .txt. Para efectos de proyecto este intervalo es de 60 minutos.

Archivos de entrada.- Son los archivos generados a través del SIG y que contienen los parámetros hidrológicos de las cuencas en estudio. Y los archivos generados .txt con los datos de precipitación.

- **Archivo de Celdas.**- Es el Archivo generado en el SIG con los parámetros hidrológicos de la cuenca.
- **Archivo con lluvias.**- Es el archivo generado con la información de las estaciones climatológicas, con sus respectivas mediciones de precipitación.

Precipitación

- **Precipitación media.**- A través de esta opción calcula la precipitación media en la cuenca, interpolando la información de las estaciones. En esta opción se presenta una tabla con la fecha, hora y precipitación media en mm. Para cada intervalo de tiempo; Además muestra tres recuadros en donde se presentan el área de la cuenca en estudio, así como la precipitación media total de la cuenca en mm, y uno más para la representación del hietograma de precipitación de la tormenta en estudio.

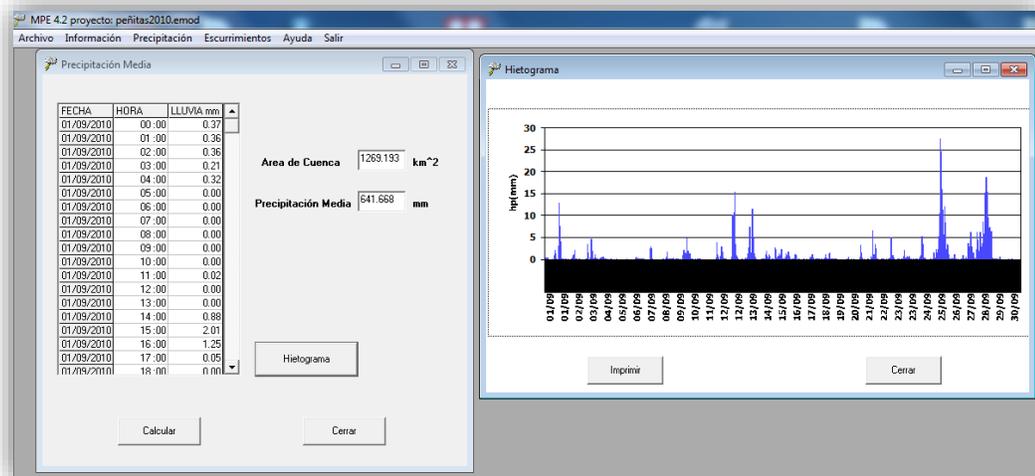


Fig. 5.2.3 Representación de la Precipitación en el MPE

Escurreimientos

- **Observados.-** Se introduce la información de los gastos obtenidos a través de las estaciones hidrométricas durante la tormenta.
- **Observaciones.-** Se pueden agregar datos u observaciones de la estación en estudio.
- **Fecha inicio.-** Se introduce la fecha de inicio del escurrimiento. (dd/mm/aaaa)
- **Hora inicio.-** Se introduce la hora de inicio del escurrimiento. (hh:mm)
- **Fecha Final.-** Se introduce la fecha final del escurrimiento. (dd/mm/aaaa)
- **Hora Final.-** Se introduce la hora final del escurrimiento. (hh:mm)
- **Intervalo de tiempo Δt .**- Se introduce el intervalo de tiempo en el cual está la información de gastos en los archivos .txt. Para efectos de proyecto este intervalo es de 60 minutos.
- **Ingresar Datos.-** Ingresa al programa en forma de tabla los datos introducidos previamente, fecha y hora inicial, fecha y hora final así como el intervalo de tiempo.
- **Ingresar Tabla.-** Ingresa al programa el archivo .txt generado con la información de los gastos para cierta estación hidrométrica. Este archivo contiene la fecha y la hora de la tormenta, el gato total, gasto directo y gasto base.

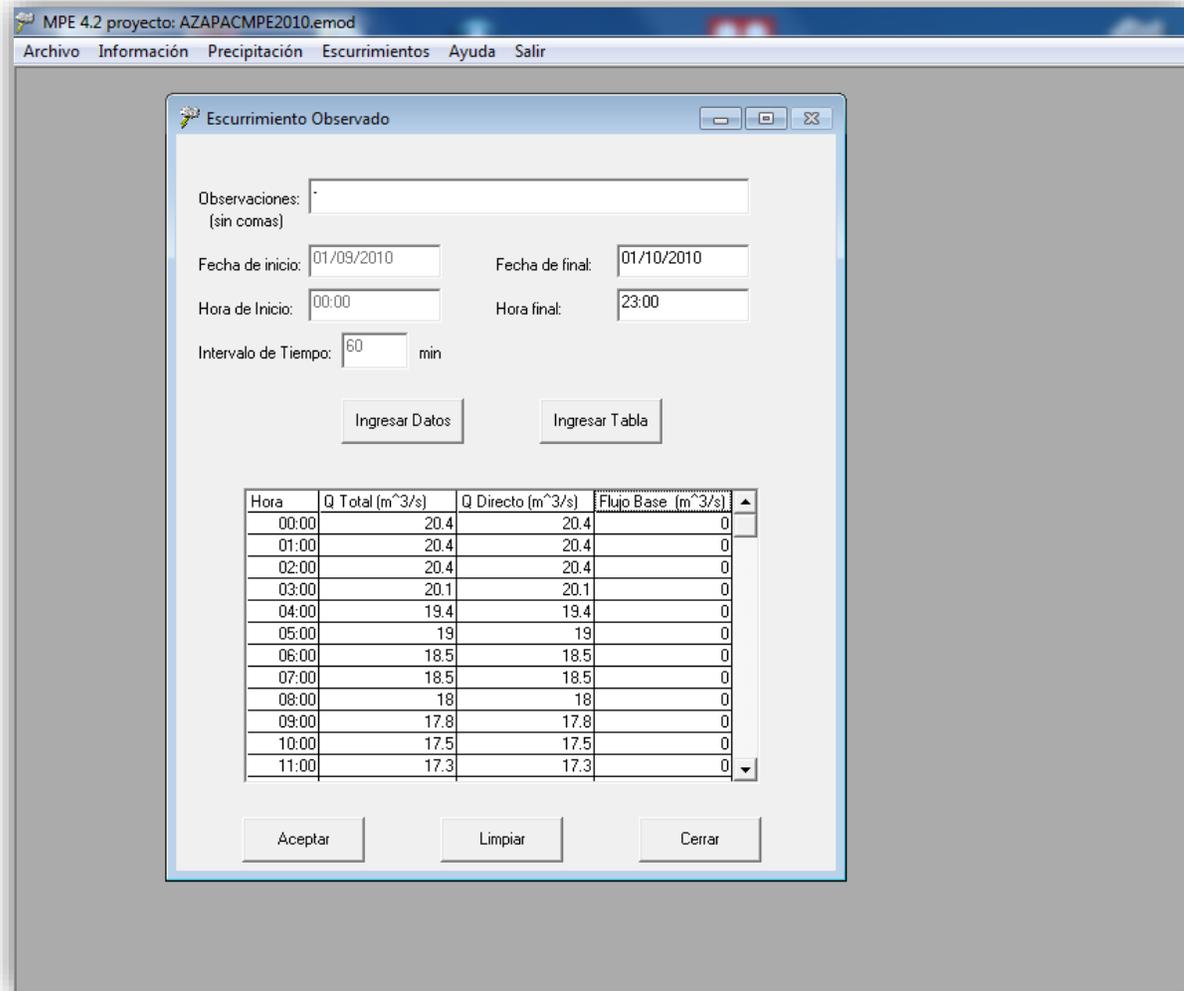


Fig. 5.2.4 Representación del esguerrimiento en el MPE

Hidrograma.- Presenta los parámetros de pérdidas, de forma y de esguerrimiento base a calibrar.

Parámetros de Pérdidas.- Intervienen en la producción del esguerrimiento.

- **-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 de $\lambda=0.2$

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

$$S = S * f_s$$

Menos permeable (mayor escurrimiento), al disminuir el valor de fs.

Más permeable (menor escurrimiento), al aumentar el valor de fs.

- **Factor de Olvido (fx).** Con 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 quieran modelar varios días:

$$0 < f_x \leq 1$$

Menor evapotranspiración (mayor escurrimiento), al aumentar el valor de fx.

Mayor evapotranspiración (menor escurrimiento), al disminuir el valor de fx.

- **Parámetros de forma.**- Intervienen en el traslado del escurrimiento. Son los parámetros que le dan forma al hidrograma.

- **Tiempo de Concentración (Tc).**- Tiempo que tarda la precipitación excedente en alcanzar la salida de la cuenca desde punto más alejado.

$$T_c > \Delta T$$

- **Coefficiente de Almacenamiento (Ca).**- Es el tiempo de retraso provocado por el efecto de almacenamiento natural. Para una primera aproximación:

$$Ca = 0.6 T_c$$

$$Ca > \Delta T / 2$$

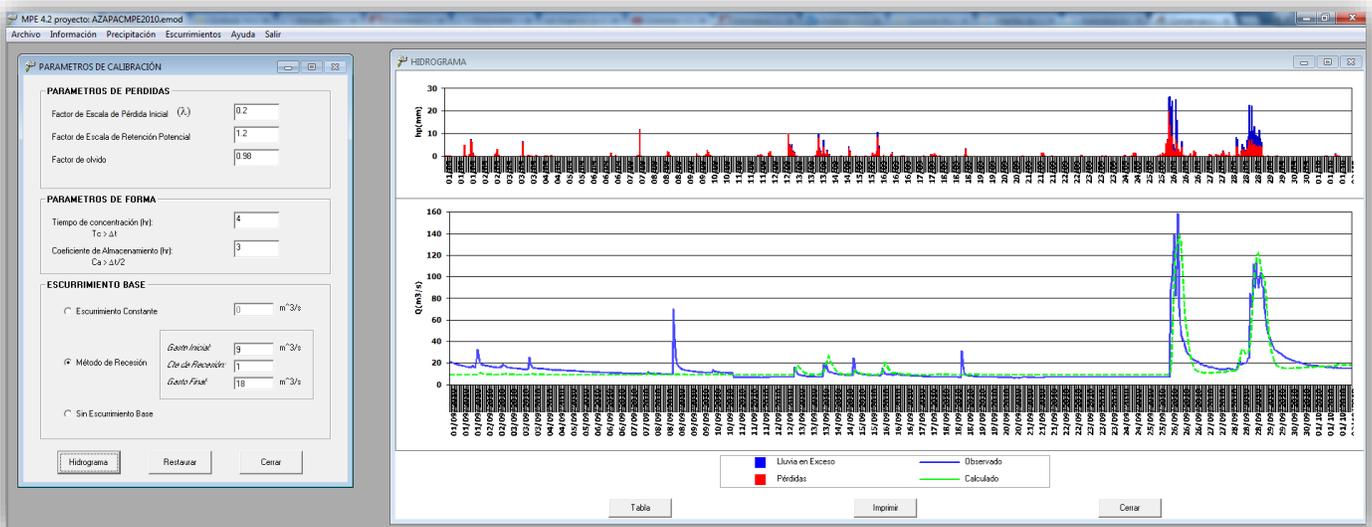
Ca, es el coeficiente de almacenamiento, hrs.

Tc, tiempo de concentración, hrs.

Δt, intervalo de tiempo para el cálculo del pronóstico, min.

- **Escorrimento Base.-** Permite determinar el escurrimiento base, dependiendo de la forma y de las características del hidrograma se pueden utilizar los siguientes métodos:
- - Escorrimento constante
 - Método de recesión
 - Sin escurrimiento base

Fig. 5.2.5 Representación de los parámetros de forma en el MPE



En la cuenca Peñitas se tienen 3 estaciones de medición de gasto, las cuales se utilizaron para comparar los gastos medidos con los calculados y con ello calibrar los parámetros que intervienen en el modelo lluvia-escorrimento, por lo tanto para el pronóstico del hidrograma de entrada a la presa Peñitas, se obtuvo el hidrograma de las subcuencas, Sayula, Tzimbac, Azapac y Tzimbac con Azapac.

5.2 ANÁLISIS DE LA CUENCA SAYULA

Se utilizaron las estaciones automáticas de CFE. En el programa MPE se ingresan los datos de todas las estaciones que están dentro de la cuenca Peñitas aunque en realidad las estaciones que tienen influencia en la cuenca son Peñitas, Sayula, Ocoatepec y Juan de Grijalva con la finalidad de tener una mayor densidad de estaciones.

Los parámetros de calibración que se obtuvieron son:

Sayula							
PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	22OCT-21NOV 2009	01sept-01oct 2010	11-24 SEPT 2011	18-25 DIC 2012	18OCT-17NOV 2013	18SEPT-21OCT 2014	14-23 OCT 2015
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS							
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2
Factor de olvido (fx)	0.99	0.99	0.995	0.99	0.99	0.99	0.99
PARÁMETROS DE FORMA							
Tc, en hrs.	5	5	5	5	5	5	5
K, en hrs.	4	4	3	4	4	4	4

Tabla 9. Parámetros de calibración para la cuenca Sayula

5.3 ANÁLISIS DE LA CUENCA TZIMBAC

Al igual se utilizaron las estaciones automáticas de CFE. En el programa MPE se ingresan los datos de todas las estaciones que están dentro de la cuenca de Peñitas aunque en realidad las estaciones que tienen influencia en la cuenca son Azapac, Tzimbac, Emiliano Zapata y Ocoatepec.

Los parámetros de calibración que se obtuvieron para Tzimbac son:

Tzimbac							
PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	22OCT-21NOV 2009	01sept-01oct 2010	11-24 SEPT 2011	18-25 DIC 2012	18OCT-17NOV 2013	18SEPT-21OCT 2014	14-23 OCT 2015
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS							
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2	1.5	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2
Factor de olvido (fx)	0.96	0.96	0.995	0.98	0.99	0.98	0.98
PARÁMETROS DE FORMA							
Tc, en hrs.	5	5	5	5	5	6	5
K, en hrs.	4	4	4	4	4	4	4

Tabla 10. Parámetros de calibración para la cuenca Tzimbac

5.4 ANÁLISIS DE LA CUENCA AZAPAC

Los parámetros de calibración que se obtuvieron para Azapac son:

AZAPAC							
PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	22OCT-21NOV 2009	01sept-01oct 2010	11-24 SEPT 2011	18-25 DIC 2012	18OCT-17NOV 2013	18SEPT-21OCT 2014	14-23 OCT 2015
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS							
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2	1.2	0.5	1.2	1.1	1.2	1
Factor de olvido (fx)	0.98	0.98	0.995	0.98	0.995	0.995	0.99
PARÁMETROS DE FORMA							
Tc, en hrs.	7	4	2	4	2	2	3
K, en hrs.	5	3	1	3	1	1	2

Tabla 11. Parámetros de calibración de la cuenca Azapac.

5.5 ANÁLISIS DE LA CUENCA TZIMBAC CON AZAPAC

Los parámetros de calibración que se obtuvieron para Tzimbac con Azapac son:

TZIMBAC CON AZAPAC							
PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	22OCT-21NOV 2009	01sept-01oct 2010	11-24 SEPT 2011	18-25 DIC 2012	18OCT-17NOV 2013	18SEPT-21OCT 2014	14-23 OCT 2015
PARÁMETROS DE PÉRDIDAS							
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2	1.2	0.5	1.2	1.2	1.2	1
Factor de olvido (fx)	0.98	0.98	0.995	0.98	0.99	0.99	0.99
PARÁMETROS DE FORMA							
Tc, en hrs.	4	4	4	4	4	4	3
K, en hrs.	3	3	3	3	3	3	2

Tabla 12. Parámetros de calibración de la cuenca Tzimbac con Azapac.

5.6 RESULTADOS

En las figuras siguientes (Fig. 5.6.1 - 5.6.28) se presentan los hidrogramas resultantes para cada una de las cuencas y para cada uno de los años analizados.

Los hidrogramas en color azul representan los datos observados en las estaciones climatológicas e hidrométricas. Los hidrogramas en color verde representan datos calculados por el programa MPE.

La diferencia obtenida entre los hidrogramas observados y calculados se puede deber a errores en la medición de los valores en las estaciones climatológicas.

2009

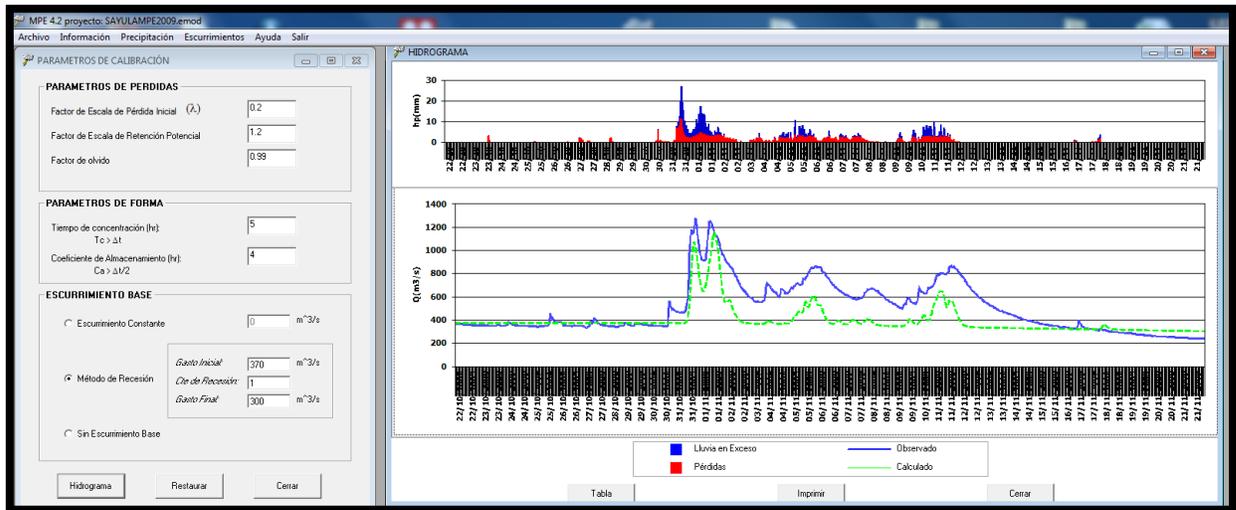


Fig. 5.6.1 Hidrograma de Sayula para el periodo 22 OCT-21NOV 2009

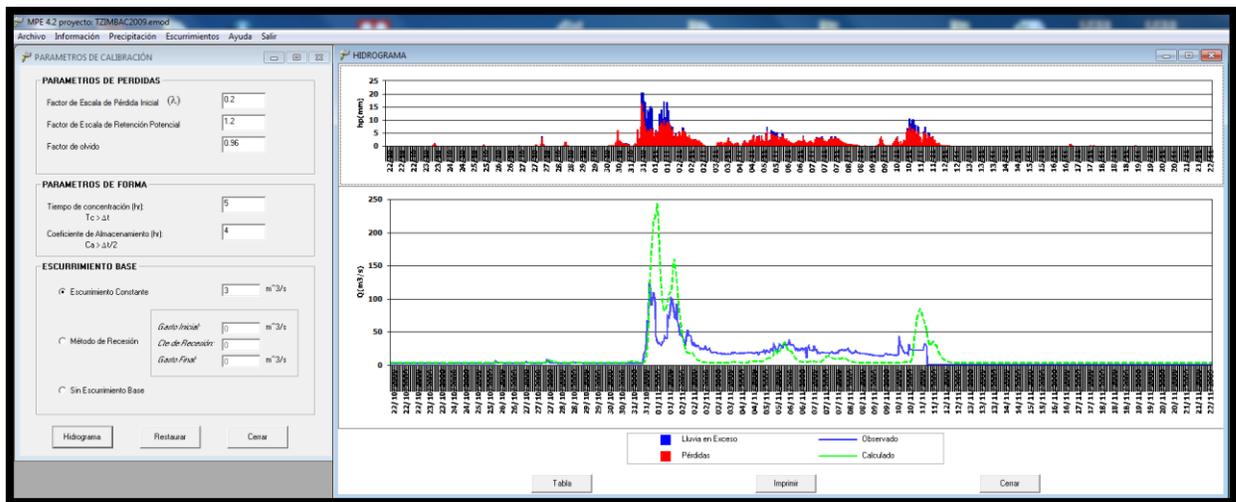


Fig. 5.6.2 Hidrograma de Tzimbac para el periodo 22OCT-21NOV 2009

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

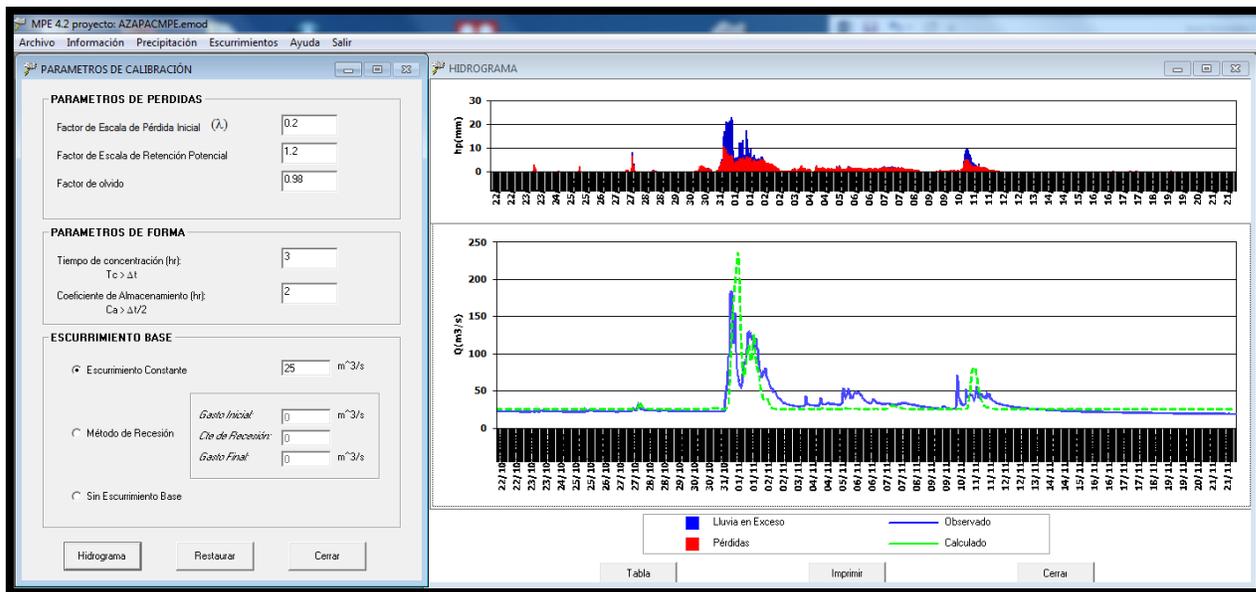


Fig. 5.6.3 Hidrograma de Azapac para el periodo 22OCT-21NOV 2009

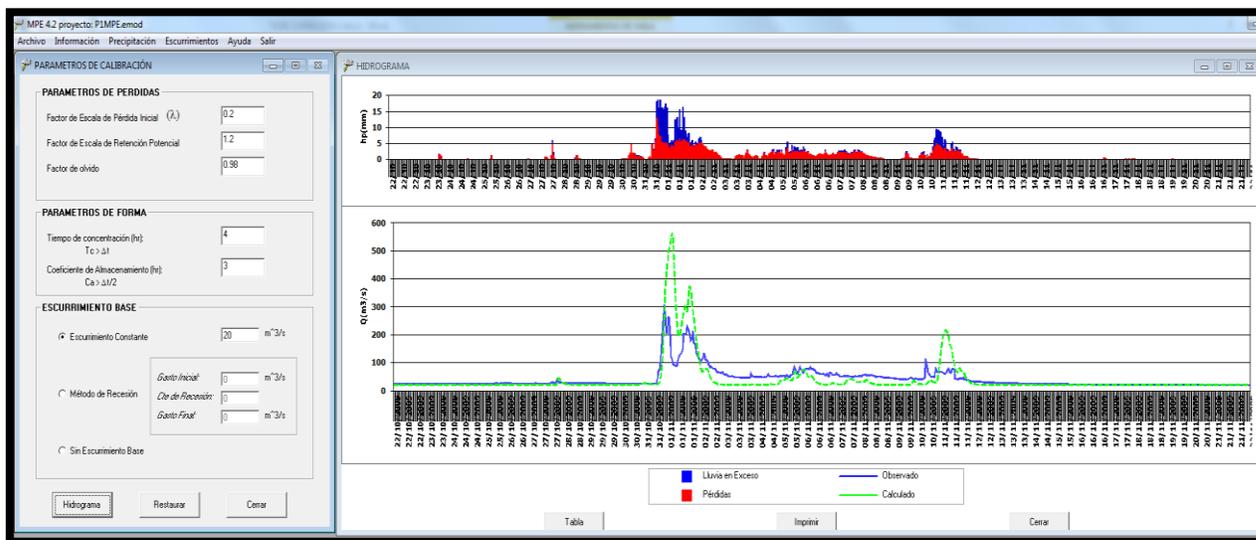


Fig 5.6.4 Hidrograma de Tzimbac con Azapac para el periodo 22OCT-21NOV 2009

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

2010

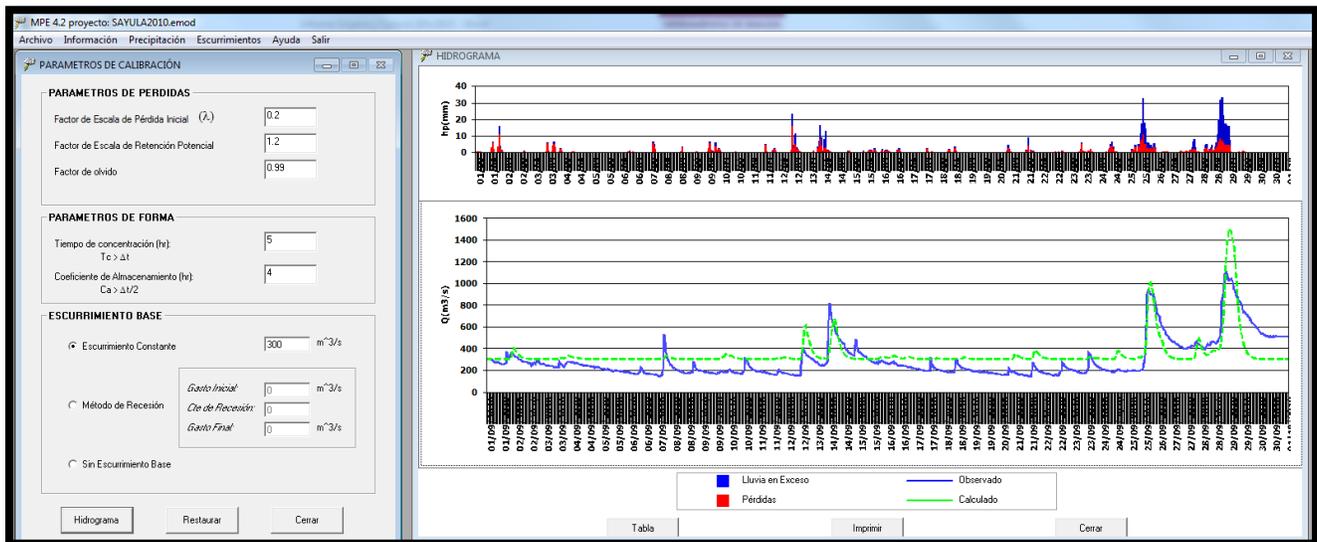


Fig. 5.6.5 Hidrograma de Sayula para el periodo 01sept-01oct 2010

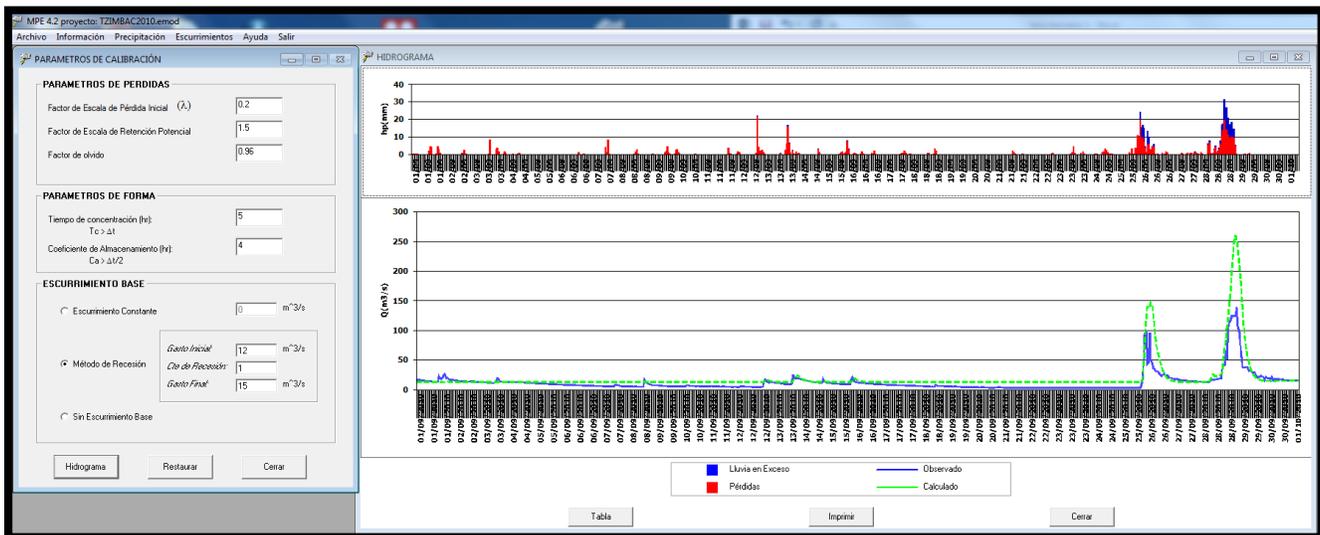


Fig. 5.6.6 Hidrograma de Tzimbac para el periodo 01sept-01oct 2010

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

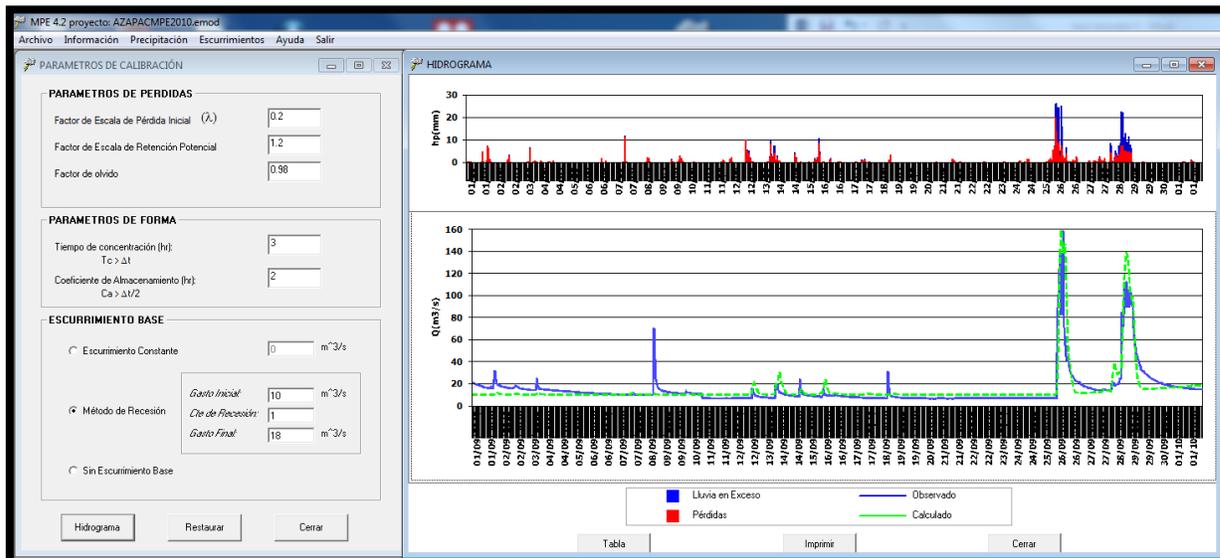


Fig. 5.6.7 Hidrograma de Azapac para el periodo 01sept-01oct 2010

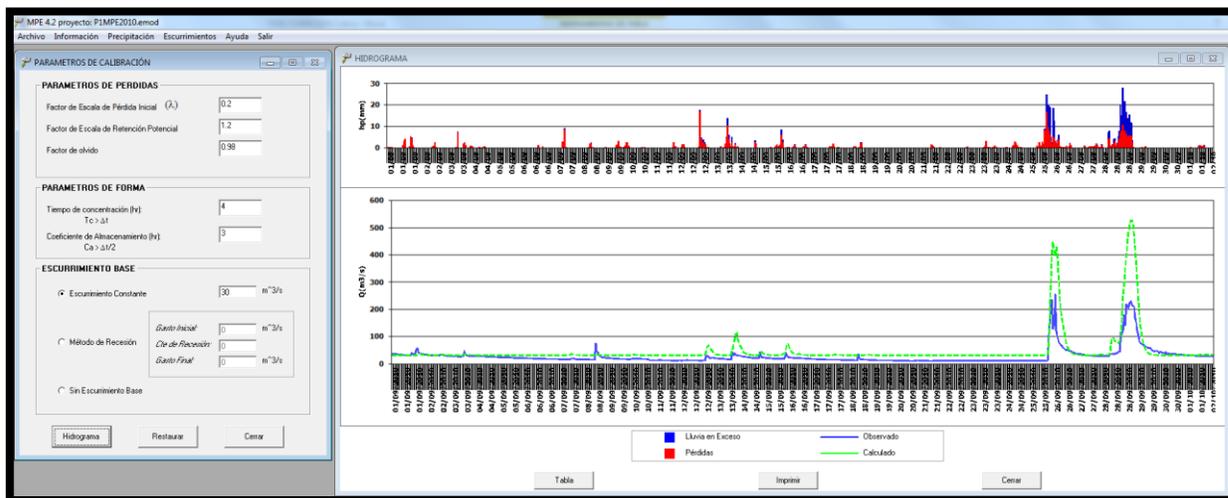


Fig 5.6.8 Hidrograma de Tzimbac con Azapac para el periodo 01sept-01oct 2010 .

En este año se presentaron problemas de medición en las estaciones de Azapac, Tzimbac y Sayula, es por esto que el MPE no pudo reproducir satisfactoriamente los primeros hidrogramas de la tormenta analizada.

2011

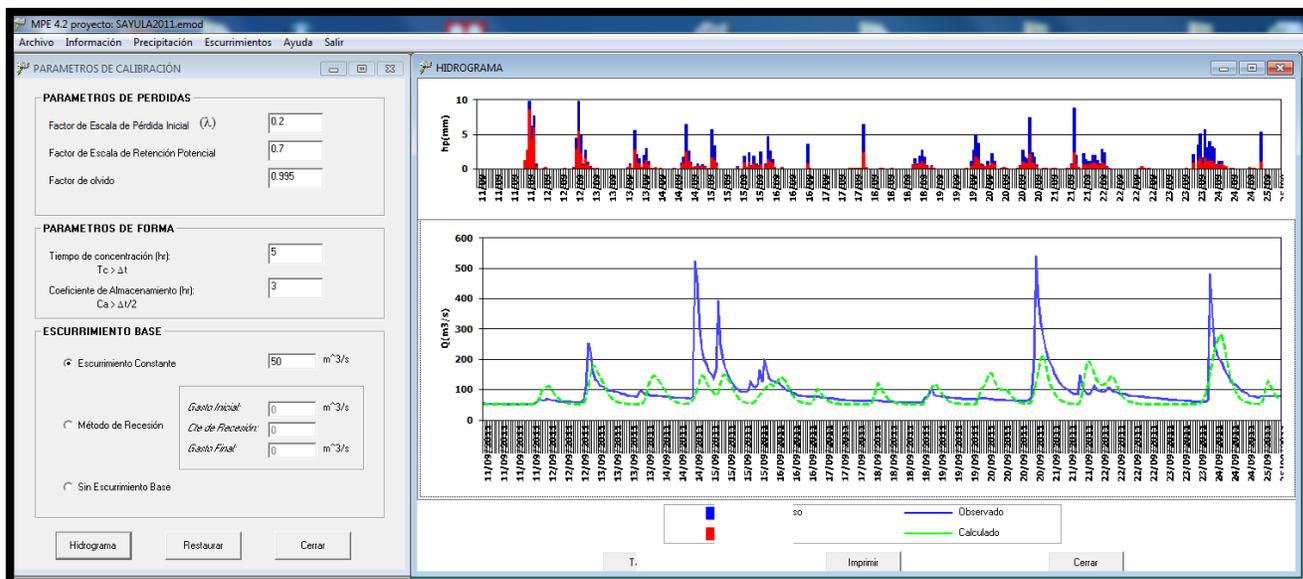


Fig. 5.6.9 Hidrograma de Sayula para el periodo 11 al 24 SEPT 2011

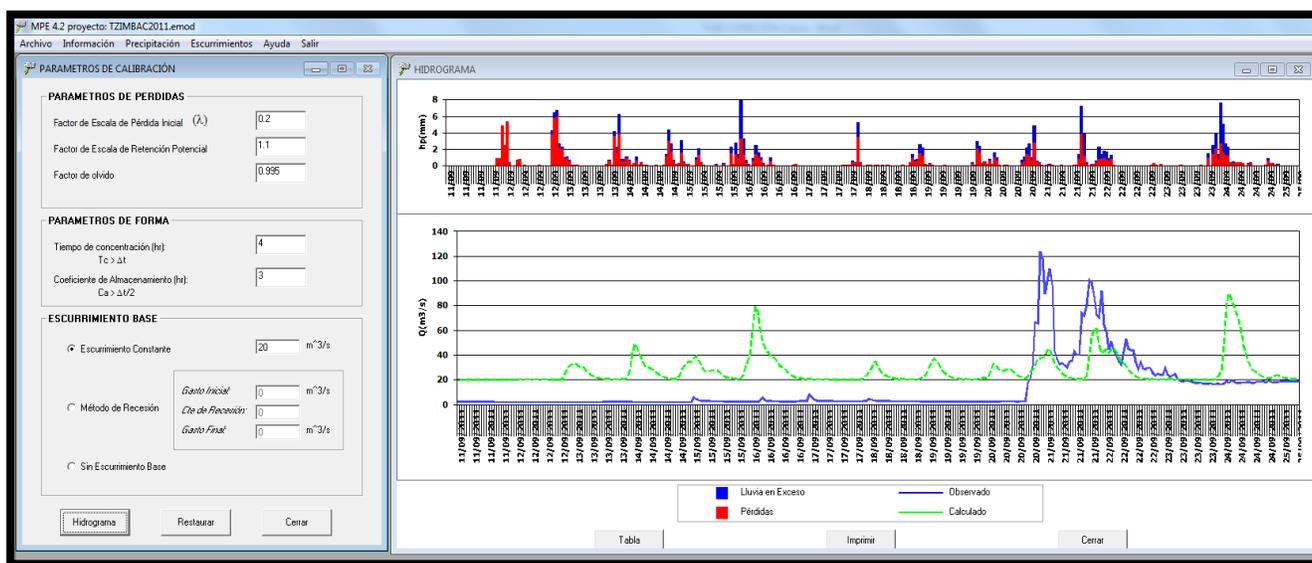


Fig. 5.6.10 Hidrograma de Tzimbac para el periodo 11 al 24 SEPT 2011

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

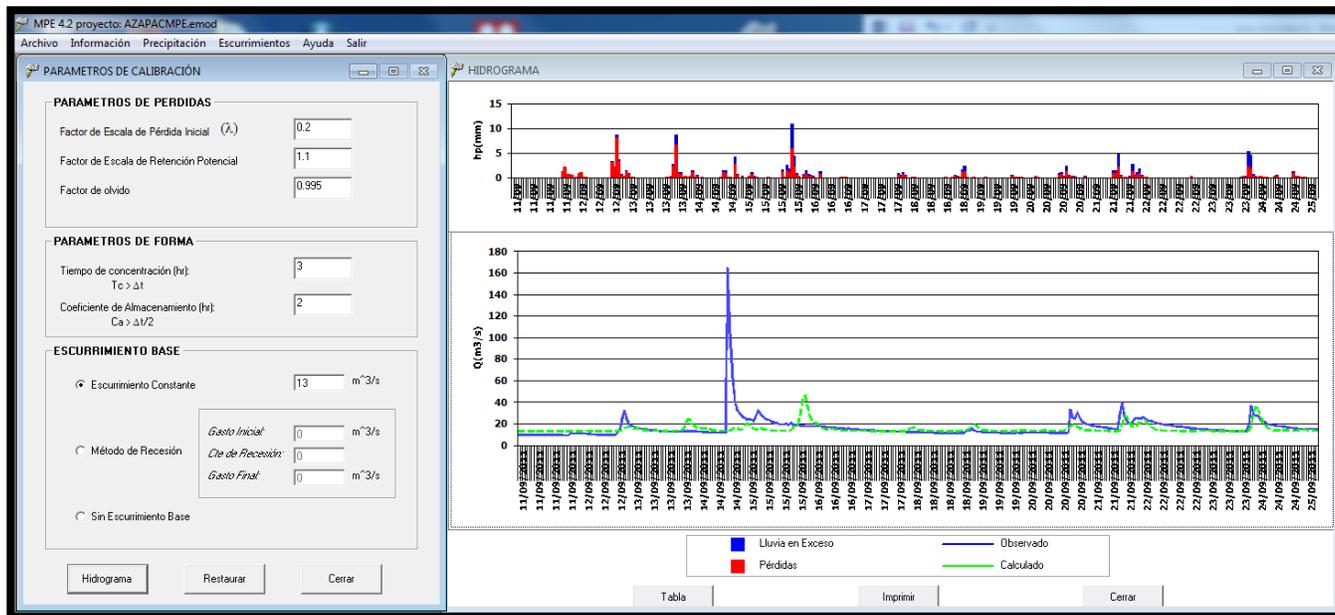


Fig. 5.6.11 Hidrograma de Azapac para el periodo 11 al 24 SEPT 2011

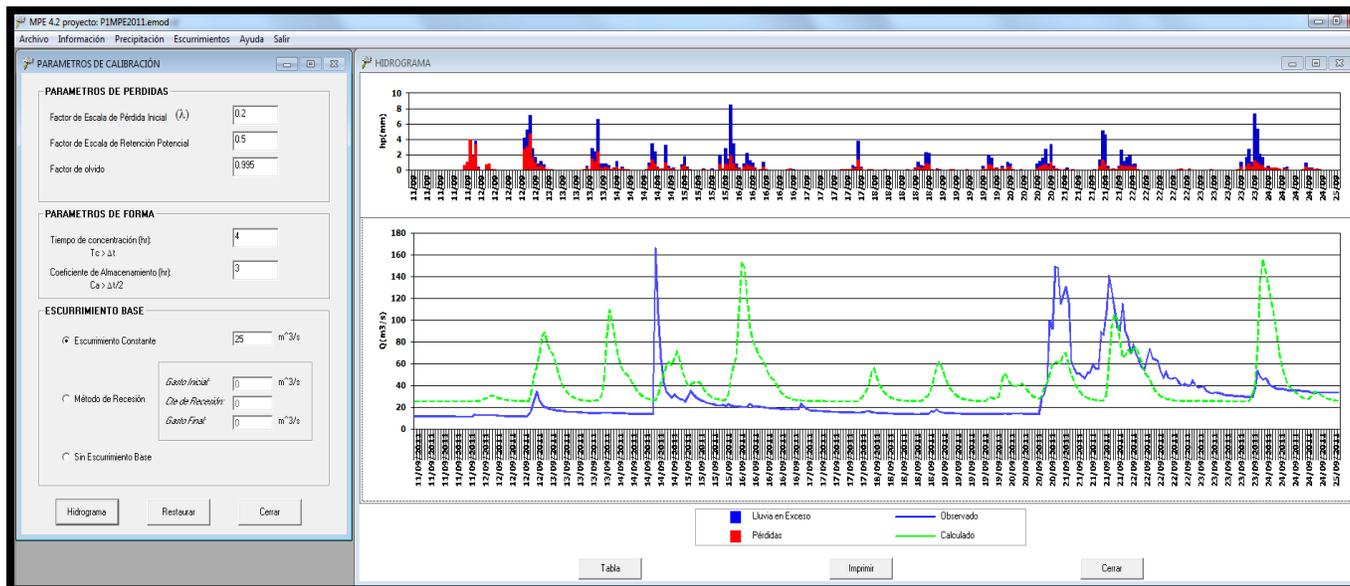


Fig. 5.6.12 Hidrograma de Tzimbac con Azapac para el periodo 11 al 24 SEPT 2011

En las fechas analizadas del año 2011, se presentaron errores de registros de las estaciones hidrométricas y climatológicas, es por esto que el Modelo de Pronóstico de Escurrimiento (MPE), no pudo simular correctamente los escurrimientos en dichas cuencas, de ahí la discrepancia de los hidrogramas observados a los hidrogramas calculados.

2012

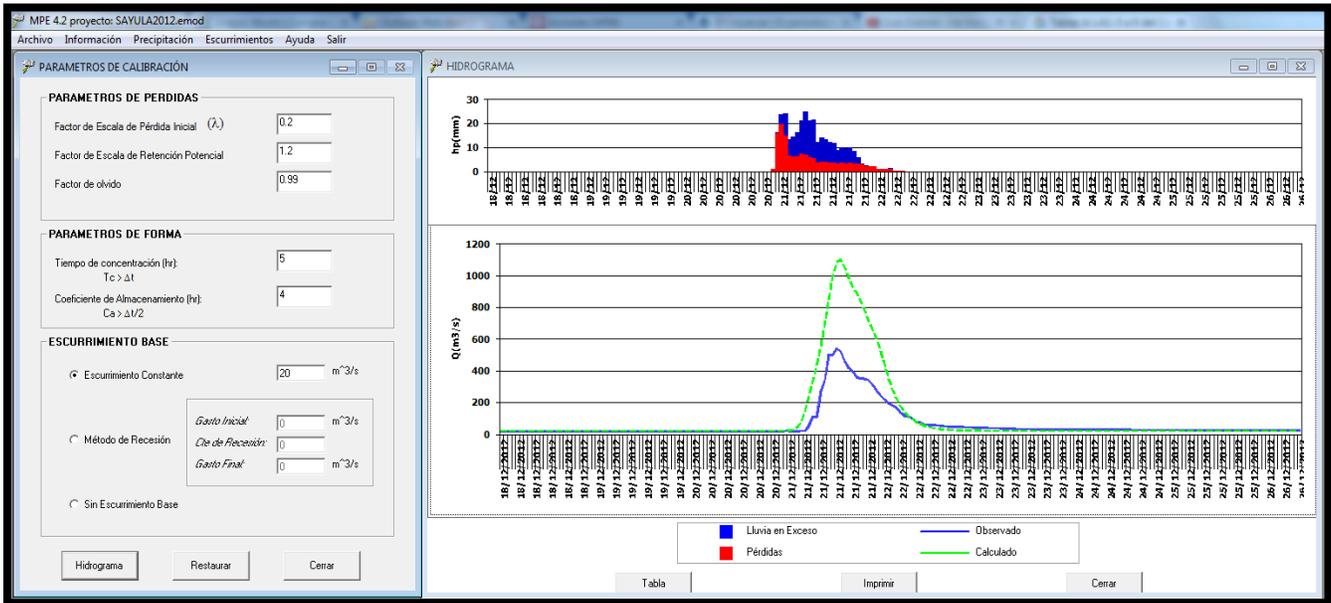


Fig. 5.6.13 Hidrograma de Sayula para el periodo 18-25 DIC 2012

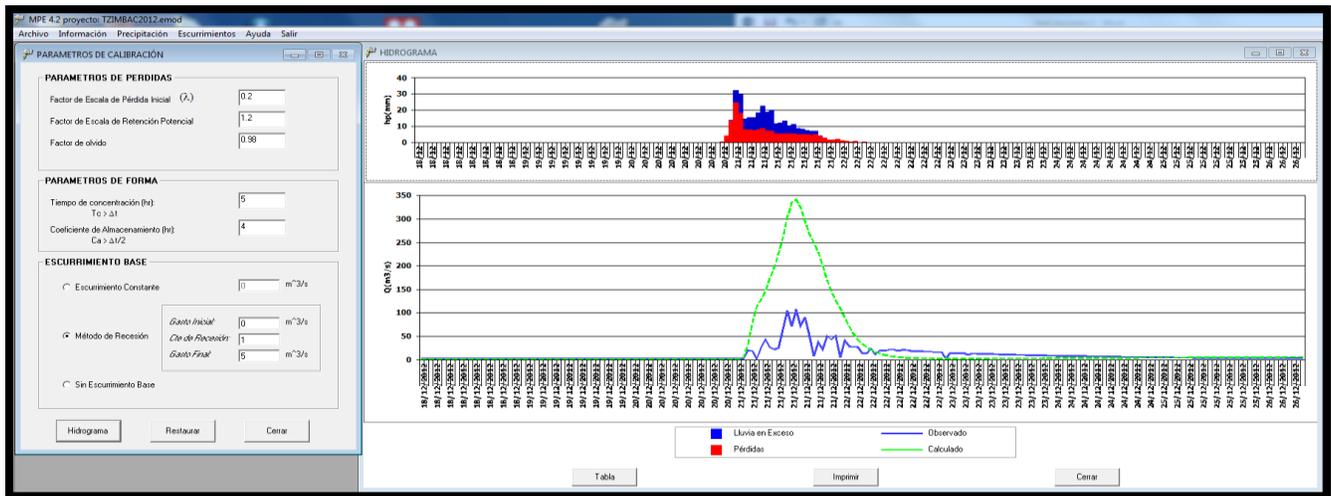


Fig. 5.6.14 Hidrograma de Tzimbac para el periodo 18-25 DIC 2012

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

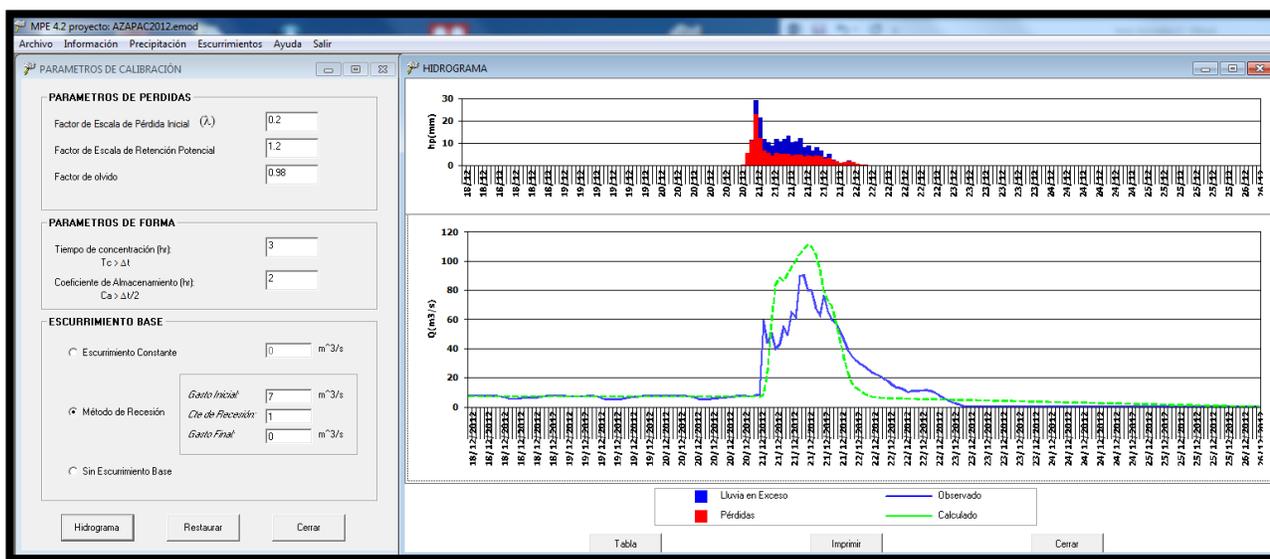


Fig. 5.6.15 Hidrograma de Azapac para el periodo 18-25 DIC 2012

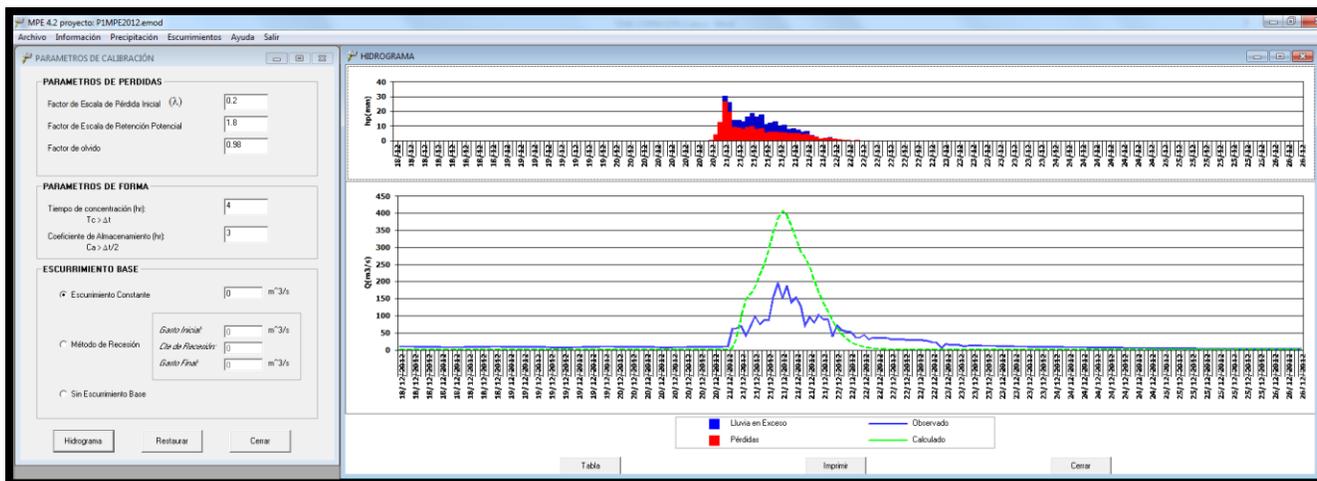


Fig. 5.6.16 Hidrograma de Tzimbac con Azapac para el periodo 18-25 DIC 2012

2013

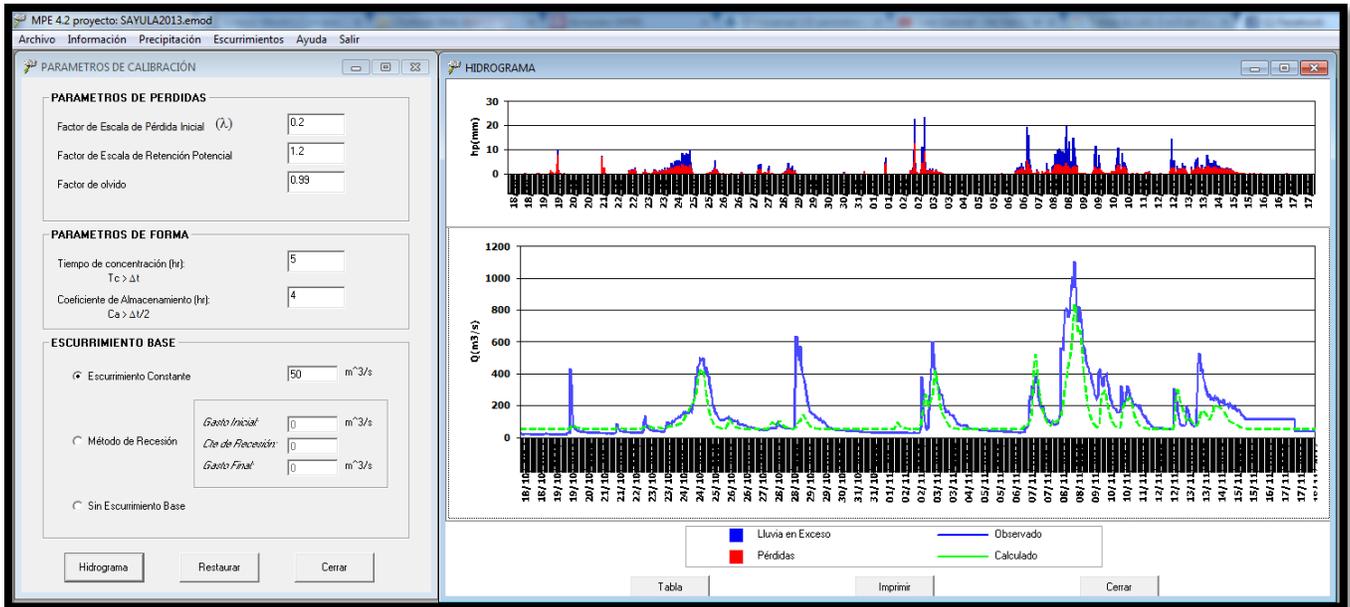


Fig. 5.6.17 Hidrograma de Sayula para el periodo 18OCT-17NOV 2013

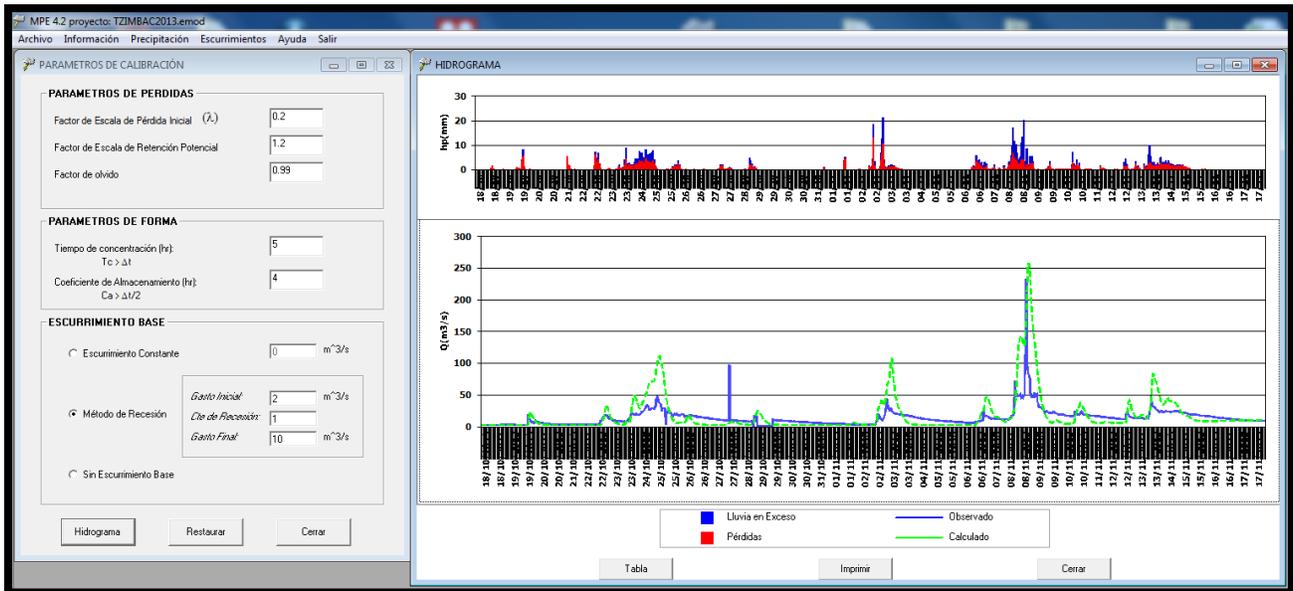


Fig. 5.6.18 Hidrograma de Tzimbac para el periodo 18OCT-17NOV 2013

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS



Fig. 5.6.19 Hidrograma de Azapac para el periodo 18OCT-17NOV 2013

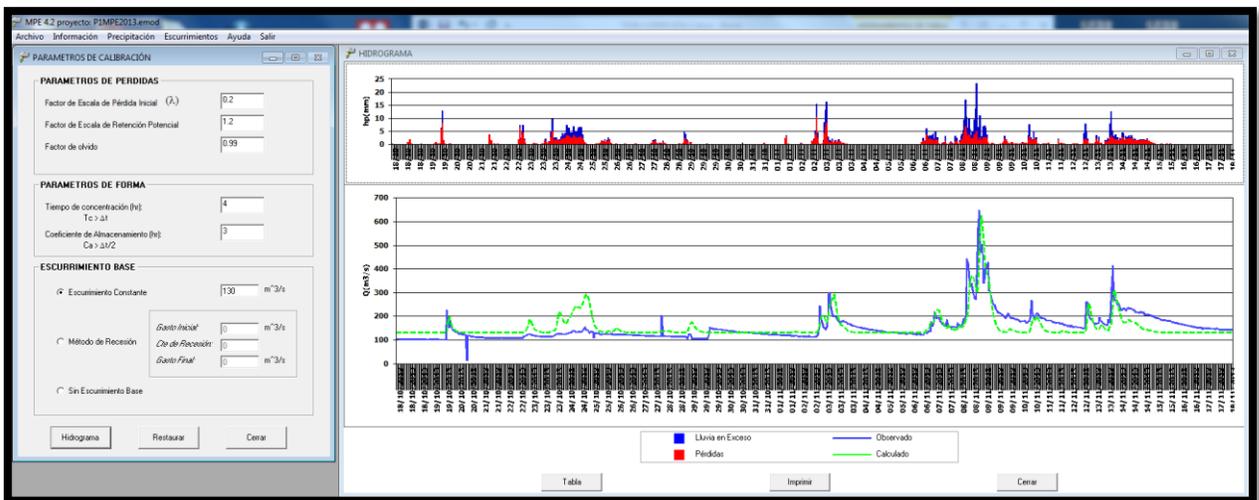


Fig. 5.6.20 Hidrograma de Tzimbac con Azapac para el periodo 18OCT-17NOV 2013

2014

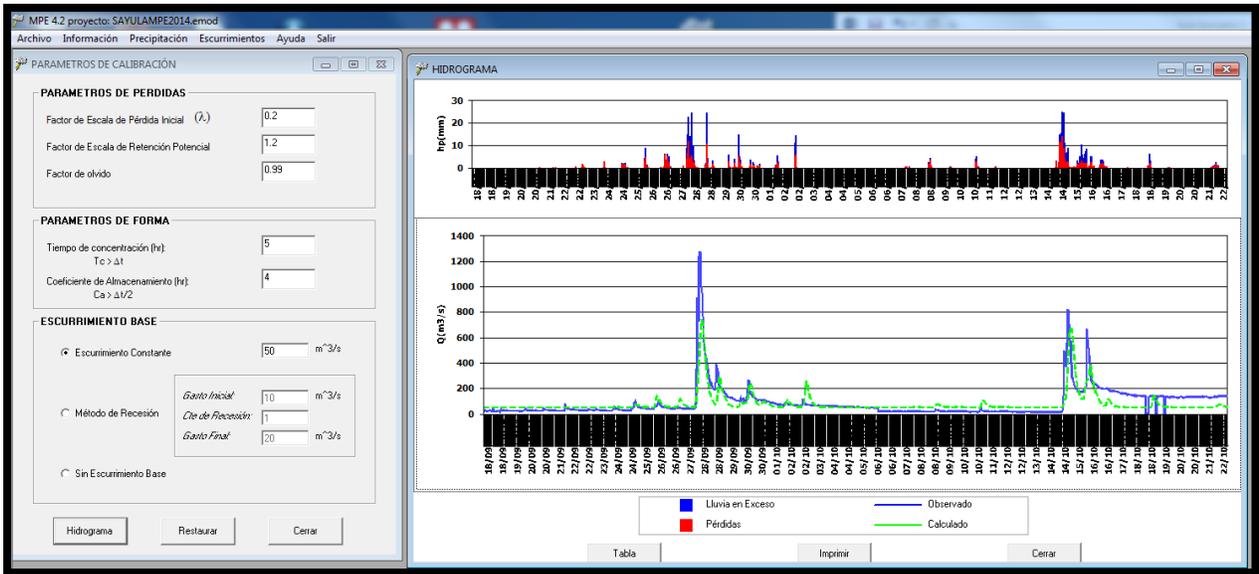


Fig. 5.6.21 Hidrograma de Sayula para el periodo 18SEPT-21OCT 2014

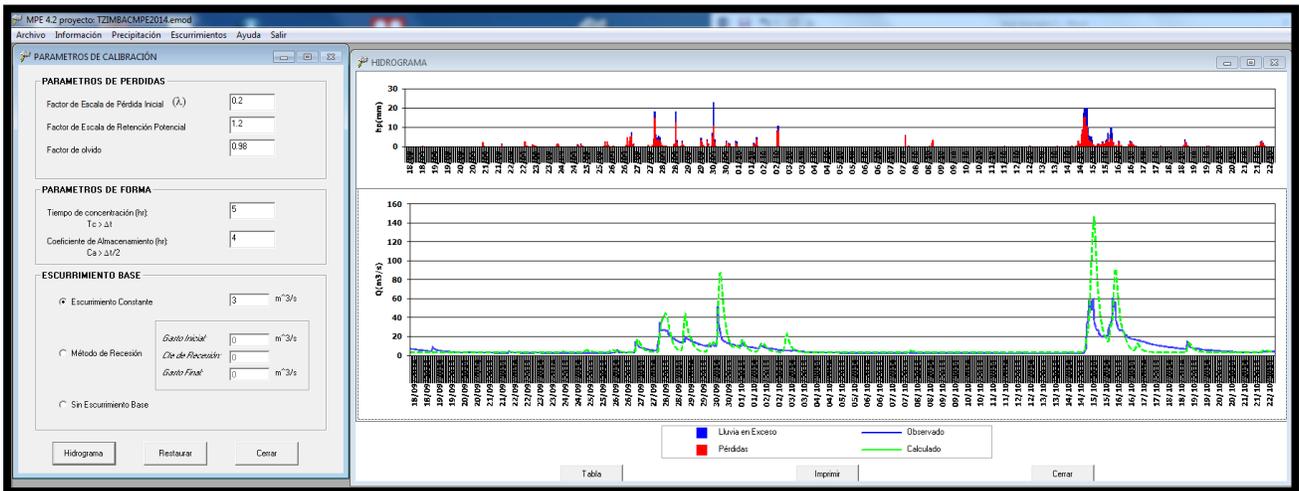


Fig. 5.6.22 Hidrograma de Tzimbac para el periodo 18SEPT-21OCT 2014

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

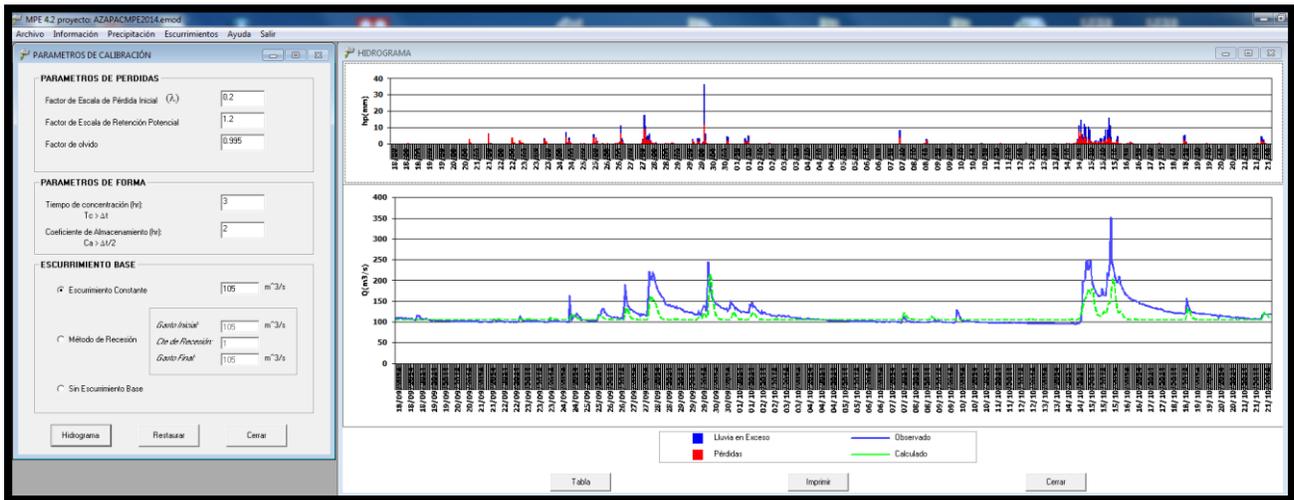


Fig. 5.6.23 Hidrograma de Azapac para el periodo 18SEPT-21OCT 2014

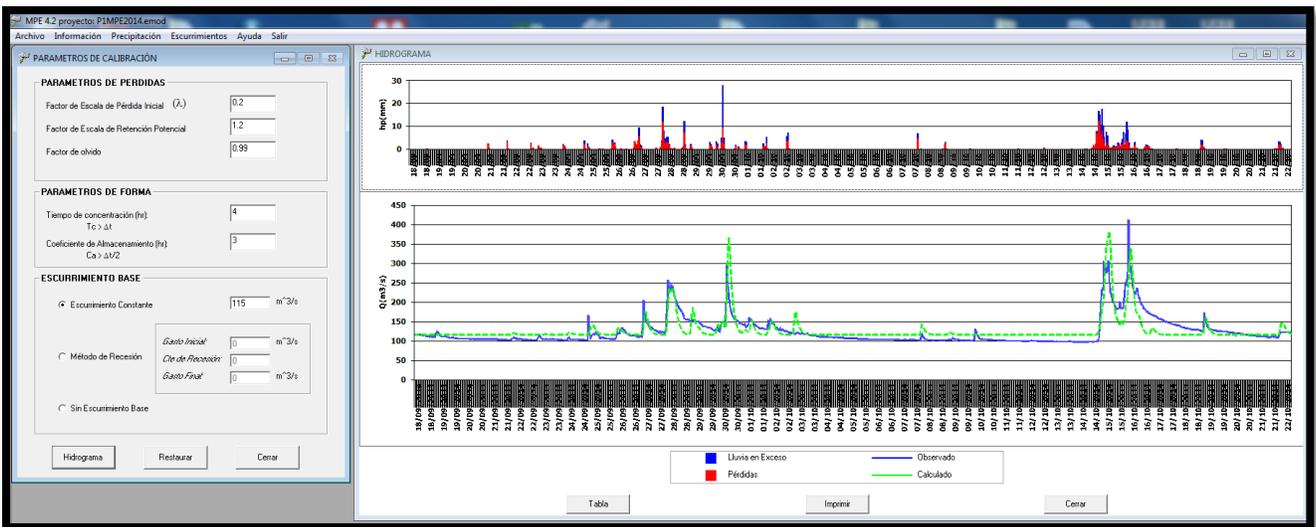


Fig. 5.6.24 Hidrograma de Tzimbac con Azapac para el periodo 18SEPT-21OCT 2014

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

2015

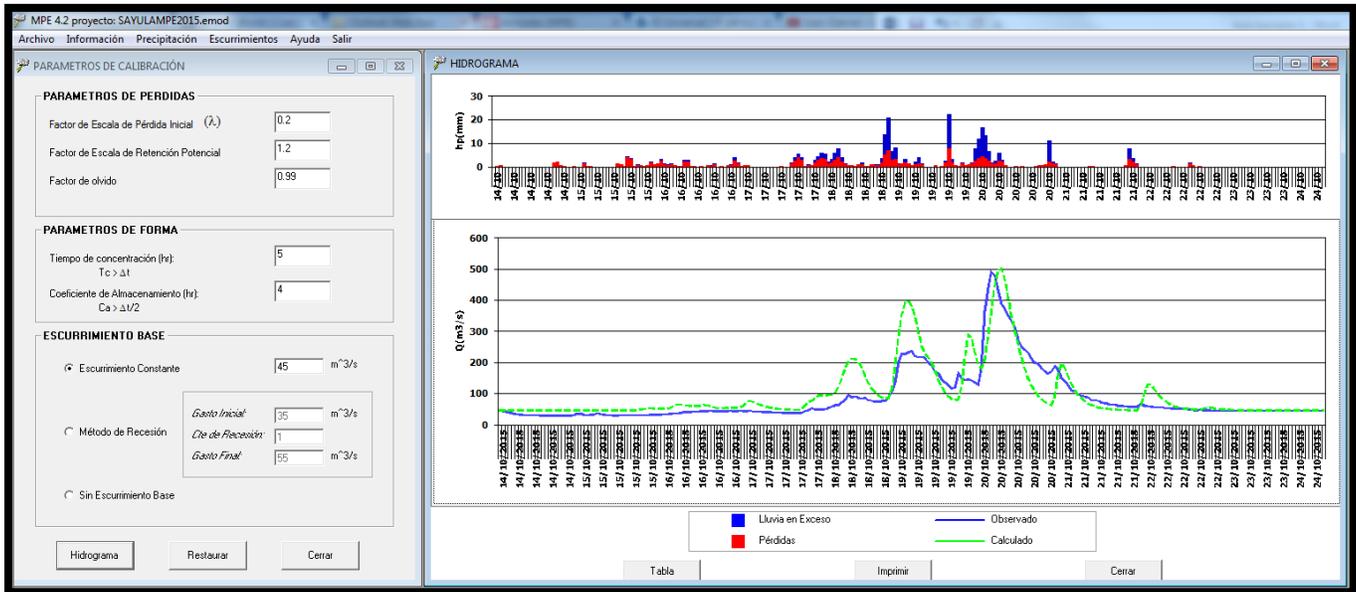


Fig. 5.6.25 Hidrograma de Sayula para el periodo 14-23 OCT 2015

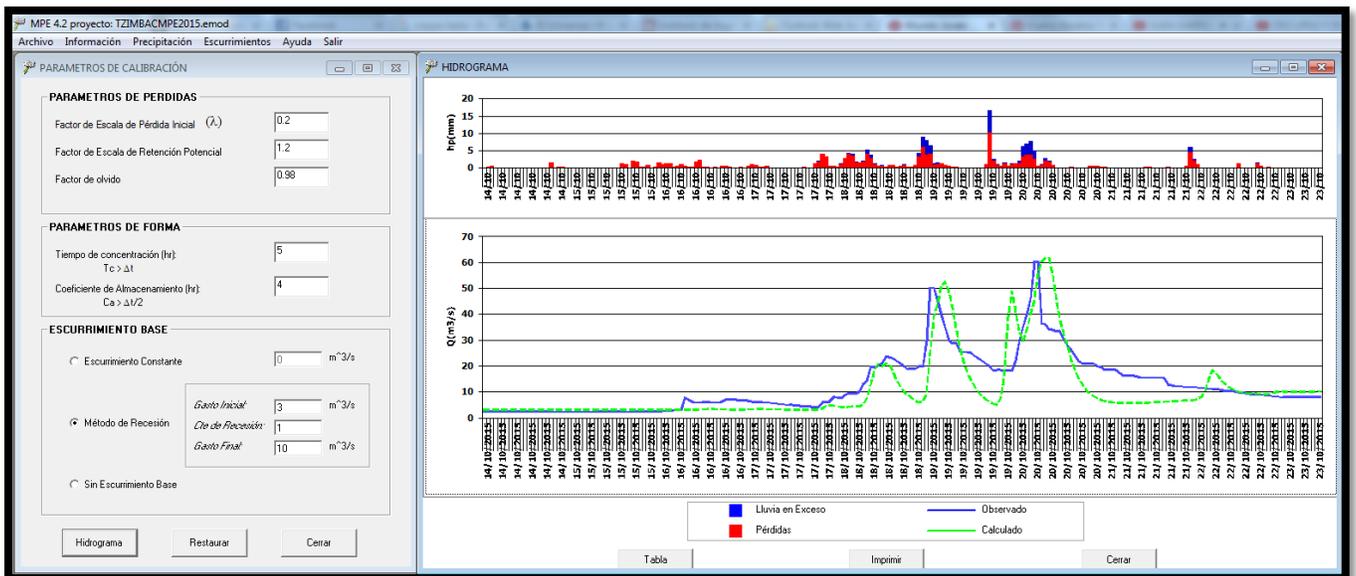


Fig. 5.6.26 Hidrograma de Tzimbac para el periodo 14-23 OCT 2015

MODELO DE LLUVIA - ESCURRIMIENTO DE PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LA CUENCA PEÑITAS

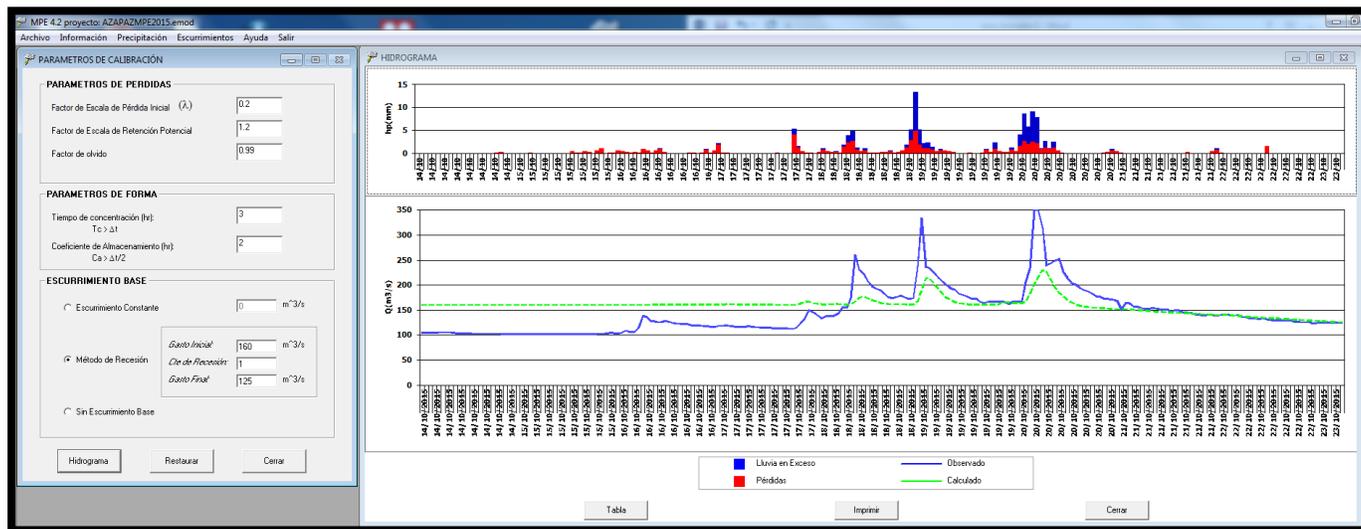


Fig. 5.6.27 Hidrograma de Azapac para el periodo 14-23 OCT 2015

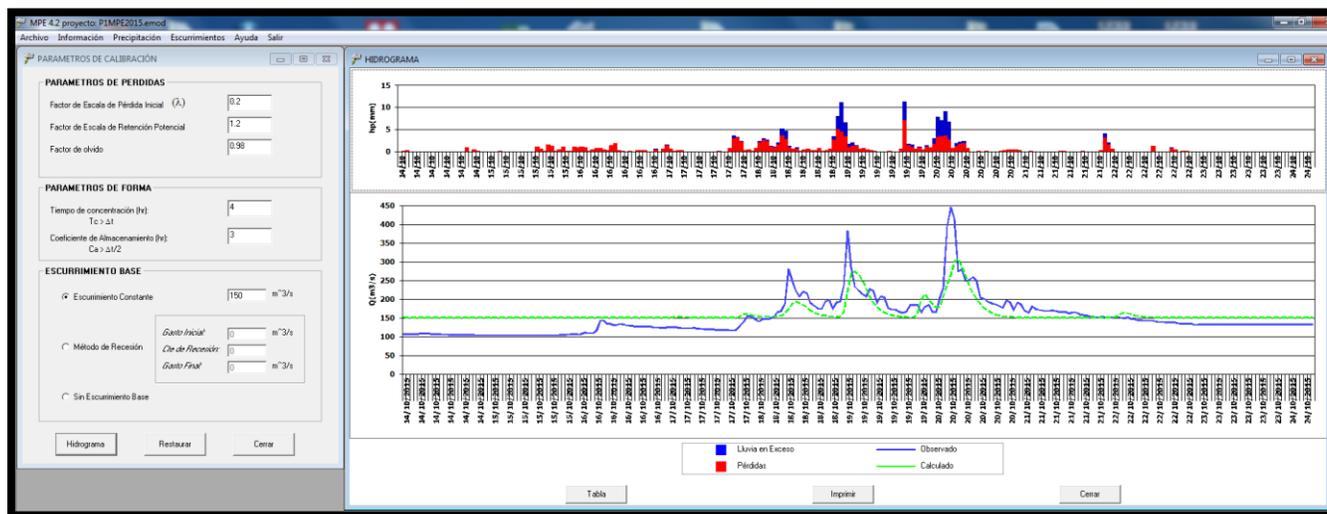


Fig. 5.6.28 Hidrograma de Tzimbac con Azapac para el periodo 14-23 OCT 2015

5.7 CÁLCULO DE LOS GASTOS BASE

Para el cálculo del gasto base se realiza una búsqueda de gasto mínimo medido, en la estación correspondiente a cada cuenca, durante el intervalo de tiempo que se empleará para la predicción, figura 5.8.1.

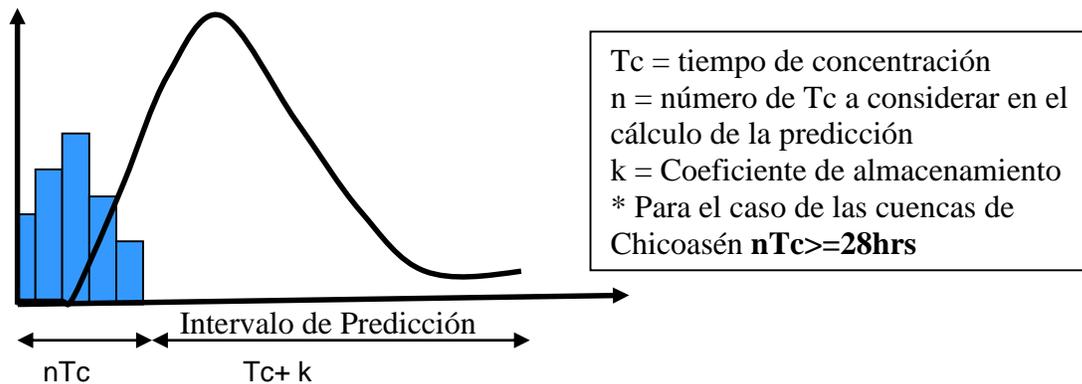


Fig. 5.8.1 Intervalo de tiempo para la predicción

Este gasto se considerará constante a partir del inicio de dicho periodo hasta el gasto máximo observado, figura 5.8.2. A partir del gasto máximo observado se le aplicará un factor de recesión al gasto mínimo medido para que vaya disminuyendo con el tiempo. El factor de recesión tendrá que ser calibrado en el futuro, por el momento dicho factor es igual a 0.99 para todas las cuencas del estudio.

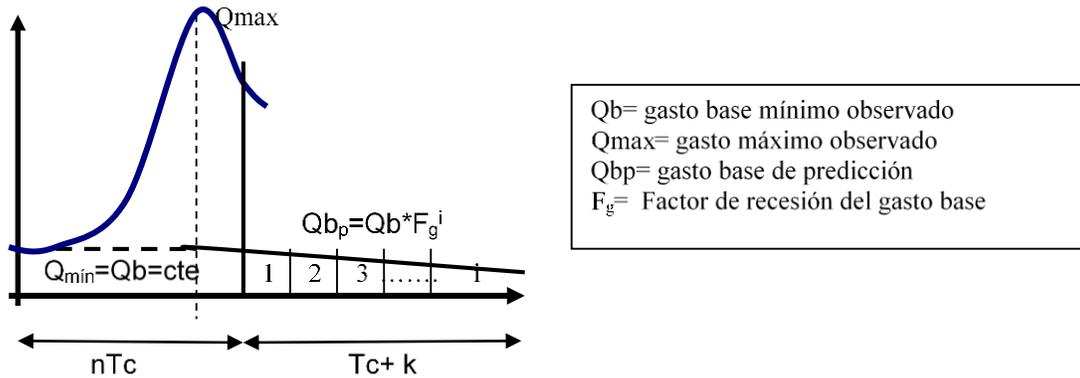


Fig. 5.8.2 Cálculo de gasto base

Para definir el gasto base correspondiente a las cuencas Alta y Baja de Peñitas se tomaron en cuenta los resultados de un estudio anterior realizado en el Instituto de Ingeniería, en el que se muestra que el gasto Total en Peñitas es aproximadamente 3 veces el gasto en Tzimbac más 1.4 veces el de Sayula.

De acuerdo con ese resultado, para el caso de la cuenca Alta de Peñitas se tomó como dato el gasto mínimo medido en la estación Tzimbac y se multiplicó por 3; y para el caso de la cuenca Baja de Peñitas se tomó el gasto mínimo medido en la estación Sayula y se multiplicará por 1.4.

A estos gastos obtenidos por Cuenca Propia, se le deben sumar los gastos provenientes de los excedentes de la presa "Malpaso". Como se muestra en la figura 5.8.3.

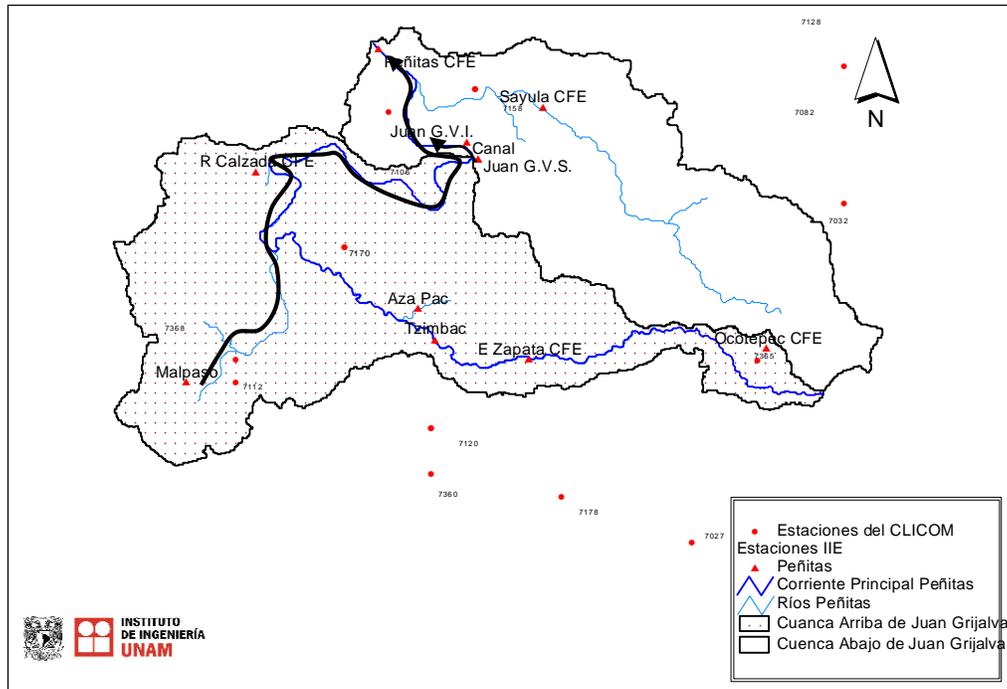


Fig. 5.8.3 Gasto en la Cuenca Peñitas

Para la obtención de los parámetros finales de la Cuenca Baja de Peñitas, se buscó que se fijaran parámetros únicos para la subcuenca Sayula.

En el caso de la cuenca alta de Peñitas, se unificaron los parámetros de las cuencas Tzimbac con Azapac.

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN FINALES TZIMBAC	
PARAMETROS DE PERDIDAS	
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2
Factor de olvido (f_x)	0.98
PARAMETROS DE FORMA	
Tc, en hrs.	5
K, en hrs.	4

Tabla 13. Parámetros de calibración finales Cuenca Tzimbac

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN FINALES AZAPAC	
PARAMETROS DE PERDIDAS	
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2
Factor de olvido (f_x)	0.98
PARAMETROS DE FORMA	
Tc, en hrs.	4
K, en hrs.	3

Tabla 14. Parámetros de calibración finales Cuenca Azapac.

Utilizando los parámetros de calibración del análisis en Tzimbac, Azapac y en Tzimbac con Azapac se tiene que los parámetros de calibración para la cuenca Alta de Peñitas son:

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN FINALES CUENCA ALTA DE PEÑITAS	
PARAMETROS DE PERDIDAS	
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2
Factor de olvido (fx)	0.98
PARAMETROS DE FORMA	
Tc, en hrs.	7
K, en hrs.	5

Tabla 15. Parámetros de calibración finales Cuenca Alta de Peñitas

Los parámetros de Sayula y por lo tanto de la Cuenca Baja de Peñitas son:

PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN FINALES CUENCA BAJA DE PEÑITAS	
PARAMETROS DE PERDIDAS	
Factor de escala de pérdida inicial (λ)	0.2
Factor de escala de retención potencial	1.2
Factor de olvido (fx)	0.99
PARAMETROS DE FORMA	
Tc, en hrs.	5
K, en hrs.	4

Tabla 16. Parámetros de calibración finales Cuenca Baja de Peñitas.

5.8 TIEMPO DE PRONÓSTICO

El tiempo de pronóstico es igual al tiempo de concentración de la cuenca más el tiempo de retención por almacenamiento.

Cuencas	Tc (hrs)	K (hrs)	Tp (hrs)
Alta Peñitas	7	5	12
Baja Peñitas	5	4	9
Sayula	5	4	9
Tzimbac	5	4	9
Azapac	3	2	5

Tabla 17. Tiempo de Pronostico en la cuenca Peñitas.

6 CONCLUSIONES

A partir de las modelaciones previamente mostradas, se obtuvieron los parámetros de calibración y el modelo Lluvia-Escorrimento para la cuenca Peñitas.; esto nos permite tener una herramienta de estimación de avenidas ante eventos meteorológicos que pueden llegar a poner en peligro a la población y a la generación de energía eléctrica.

Debido al deslizamiento del talud en el municipio de Juan de Grijalva, ya no es posible calibrar la Cuenca Peñitas como una sola cuenca, por lo que fue necesario realizar el análisis y la calibración aguas arriba y aguas abajo del talud.

La calibración se realizó en las subcuencas Tzimbac con aportaciones de Azapac, y en la cuenca Sayula, los parámetros obtenidos en la primera se utilizaron en el modelo de la cuenca aguas arriba de Juan de Grijalva y los parámetros en Sayula se utilizaron en el modelo de la cuenca aguas abajo de Juan de Grijalva.

La principal dificultad que se encontró en la realización de este proyecto fue la escasa y en ocasiones mala información en los registros de lluvia y de gastos.

Los hidrogramas que mejor se lograron reproducir fueron los correspondientes a los años 2010, 2013 y 2014.

Se puede concluir que el programa MPE desarrollado en el Instituto de Ingeniería, reproduce satisfactoriamente los hidrogramas y hietogramas de las tormentas analizadas, por lo que el modelo lluvia-escorrimento puede tener una gran confiabilidad.

7 REFERENCIAS

- <http://www.iie.org.mx/sitioIIE/sitio/control/06/detalle1.php?id=583>
- <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- http://www.cepal.org/publicaciones/xml/3/33373/L864_parte_1_de_8.pdf
- http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5141106&fecha=29/04/2010
- Aparicio, M.F. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. México: Editorial Limusa S.A.
- Campos, A, D.F. (2007). Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. México
- Domínguez, R., Esquivel, G., Méndez, B., Mendoza, A., Arganis, M., y Carrizosa, E. (2008) Manual del Modelo para el Pronóstico de Escurrimiento. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Domínguez, M, R. Hidrología de Superficie Apuntes de clase Instituto de Ingeniería UNAM.
- Méndez, A. B. (2005) Aplicación Hidrológica de Radares Meteorológicos. Tesis de Doctorado. Posgrado de Ingeniería UNAM.
- Arganis, M. L. (2004) Operación óptima de un sistema de presas en cascada para generación hidroeléctrica tomando en cuenta condiciones reales de operación y el uso de muestras sintéticas para el pronóstico. Tesis Doctoral. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Domínguez, M, R., Gracia S, J., Esquivel, G, G., Carrizosa, E, E., Arganis, J, M. (2009) Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE “Pérdidas”. Instituto de Ingeniería UNAM.
- Juárez D, J, I., (2014) Estimación del hidrograma de salida en una cuenca usando un modelo hidrológico de parámetros distribuidos y un modelo hidráulico bidimensional en volúmenes finitos con un módulo hidrológico. Tesis de Maestría. Posgrado de Ingeniería. UNAM
- Esteban, C, C, P. (2013) Gastos máximos de tres subcuencas de la zona del poniente del Valle de México, calculados a partir de modelos de parámetros concentrados y el modelo distribuido MPE. Tesis de Maestría. Posgrado de Ingeniería UNAM.
- Chow, V, T. (1994) Hidrología Aplicada. Mcgraw-Hill Interamericana, S.A.
- Fuentes, M, A., (2009) Estudio Integral de la Cuenca alta del río Grijalva, modelación hidráulica y tránsito de avenidas. Informe Final. Instituto de Ingeniería

- Esquivel, G,G (2000) Modelo lluvia-escorrimento para la cuenca del río Mixcoac. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería UNAM.