



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

**PROGRAMA DE POSGRADO EN GEOGRAFÍA  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA  
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS**

**ESTUDIO DEL AGUA DE ESCURRIMIENTO EN LA  
CUENCA DEL RÍO TECOLUTLA, MÉXICO**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRO EN GEOGRAFÍA (AMBIENTAL)**  
P R E S E N T A  
**JOSÉ ANTONIO AGUSTÍN PÉREZ SESMA**

DIRIGIDA POR:  
DRA. LAURA ELENA MADEREY RASCÓN

MÉXICO, D.F.

MARZO, 2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROGRAMA DE POSGRADO EN GEOGRAFIA AMBIENTAL

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA



ESTUDIO DEL AGUA DE ESCURRIMIENTO EN LA  
CUENCA DEL RÍO TECOLUTLA, MÉXICO.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL**

**P R E S E N T A**

**JOSÉ ANTONIO AGUSTÍN PÉREZ SESMA**

DIRIGIDA POR:

**DRA. LAURA ELENA MADEREY RASCÓN**

MÉXICO, D.F.

MARZO, 2009

## RECONOCIMIENTOS

- A LA DRA. LAURA ELENA MADEREY RASCÓN. DIRECTORA DE ESTA TESIS.
- A LA COMISIÓN REVISORA DE ESTA TESIS. AGRADEZCO SUS COMENTARIOS Y SUGERENCIAS.
- A MI PACIENCIA.

## ÍNDICE

	<i>Pág.</i>
<b>RESUMEN</b>	1
<b>INTRODUCCIÓN</b>	2
El ciclo hidrológico y la cuenca del río Tecolutla.....	2
Importancia del tema.....	5
Objetivos.....	5
Generalidades de cada capítulo.....	6
<b>I. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICO-FÍSICAS DE LA CUENCA QUE DAN LUGAR AL SISTEMA FLUVIAL TECOLUTLA</b>	7
1.1 Ubicación.....	7
1.2 Geología.....	8
1.2.1 Características geológicas de la cuenca del río Tecolutla.....	9
1.3 Fisiografía.....	10
1.4 Vegetación.....	12
1.5 Clima.....	14
1.5.1 Sistemas de circulación atmosférica.....	15
1.5.1.1 Invierno.....	16
1.5.1.2 Verano.....	16
1.5.2 Temperatura.....	17
1.5.3 Precipitación.....	18
1.5.3.1 La variabilidad de la precipitación.....	19
1.5.4 Evaporación.....	19
1.5.5 Tipos de climas.....	21
1.6 Hidrografía.....	21
<b>II. HIDROLOGÍA</b>	26
2.1 Hidrología superficial.....	26
2.1.1 Análisis estadístico de la precipitación.....	26
2.1.1.1 Precipitación media.....	27
2.1.1.2 Precipitación máxima probable (pmp).....	35
2.1.2 Esguerrimiento superficial.....	40
2.1.2.1 Comportamiento de gastos máximos, mínimos y medios registrados en la cuenca del río Tecolutla.....	42
2.1.2.2 Modelos lluvia-esguerrimiento.....	45
2.1.4 Hidrograma unitario (HU).....	49
2.1.5 Hidrograma unitario instantáneo (HUI).....	50
2.1.6 Avenida de diseño aplicando el modelo del HUI.....	57
2.2 Hidrología subterránea.....	62
2.2.1 Agua subterránea en México.....	63
2.2.2 Agua subterránea en la región Golfo Centro de CNA.....	64
<b>III. LAS INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO TECOLUTLA</b>	66
3.1 Análisis del registro histórico de las inundaciones en la cuenca del río Tecolutla.....	68

3.1.1 Causas generadoras de las inundaciones.....	71
3.1.2 Daños causados por inundaciones.....	73
3.1.3 Factores que favorecen la ocurrencia de una inundación.....	73
3.2 Consecuencias de la ocurrencia de la avenida máxima probable.....	74
3.3 Medidas que se llevan a cabo cuando hay inundaciones.....	74
3.4 Recomendaciones.....	76
<b>IV. CONCLUSIONES</b>	<b>77</b>
<b>Apéndice A</b> .....	<b>81</b>
<b>Apéndice B</b> .....	<b>89</b>
<b>Apéndice C</b> .....	<b>93</b>
<b>Apéndice D</b> .....	<b>95</b>
<b>Bibliografía</b> .....	<b>97</b>

## RESUMEN

En esta investigación se presenta una aplicación del método del hidrograma unitario instantáneo (HUI), que se construye a partir de la transposición de varios hidrogramas unitarios suficientes para llegar al gasto de equilibrio. Este método se utiliza para diseñar hidrogramas asociados a duraciones de precipitación efectiva diferentes para las cuales se calculó originalmente el hidrograma unitario tradicional. El hidrograma unitario de una cuenca se define como una curva que representa la variación del escurrimiento a través del tiempo; por lo tanto, hay que destacar que todo hidrograma unitario está necesariamente relacionado con una duración en exceso o lluvia efectiva y que si no se conoce ésta, entonces el hidrograma unitario pierde completamente su significado. En este trabajo se diseñó la avenida máxima probable que se pueda presentar en la cuenca del río Tecolutla, a la altura de la estación hidrométrica El Remolino. Se utilizó la información pluviométrica de 24 estaciones localizadas dentro y en las cercanías de la cuenca para el período 1960-1990. De este período se seleccionaron las 16 tormentas más intensas registradas en la cuenca, cuyo gasto máximo generado haya sido mayor a  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los hidrogramas de diseño se obtuvieron en base a las curvas intensidad-duración-período de retorno diseñadas también en este trabajo, para los períodos de retorno de 100, 500 y 1000 años respectivamente, habiéndose encontrado que el hidrograma de diseño para 100 años tendría un pico de  $26280.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , para 500 años de  $32649.8 \text{ m}^3/\text{s}$  y para 1000 años de  $35243.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , mismos que desaparecerían en unas cuantas horas debido al alto drenaje de la cuenca y la fuerte pendiente que tiene en su parte media y superior.

## **INTRODUCCIÓN**

En los últimos años, el aumento desmedido de la población mundial ha originado un incremento en el uso y aprovechamiento de los recursos hídricos. Los recursos hídricos superficiales son función de un gran número de factores, entre los principales, se tienen: los climáticos, los geomorfológicos, los geológicos y los hidráulicos; dichos recursos están asociados además, a la incertidumbre o aleatoriedad de la naturaleza. Por lo anterior, para su cuantificación y aprovechamiento se debe recurrir primeramente a la evaluación en campo y al acervo teórico, así como a las metodologías hidrológicas más adecuadas.

Los estudios hidrológicos son indispensables desde el inicio hasta la formulación de un proyecto hidráulico y aun más, hasta su explotación. Dentro de los proyectos hidráulicos se tienen: el abastecimiento de agua potable y de riego, la protección contra crecientes, el drenaje, las centrales hidroeléctricas, etc. El dimensionamiento, la seguridad y la correcta explotación de las obras hidráulicas están siempre unidas a una acertada evaluación de los recursos hídricos promedio y extremos (avenidas y estiajes), problema que es totalmente del dominio de la hidrología superficial.

Así mismo, cuando se va a diseñar una obra hidráulica de control sobre un cauce, es necesario conocer la cantidad de agua máxima probable que pueda circular por éste, después de que se ha presentado una tormenta muy desfavorable sobre una cuenca. Por lo tanto, en este trabajo se presenta una metodología que permite conocer la precipitación máxima probable (pmp), así como los gastos máximos probables que se pueden presentar en la cuenca del río Tecolutla, en la estación hidrométrica El Remolino en el estado de Veracruz.

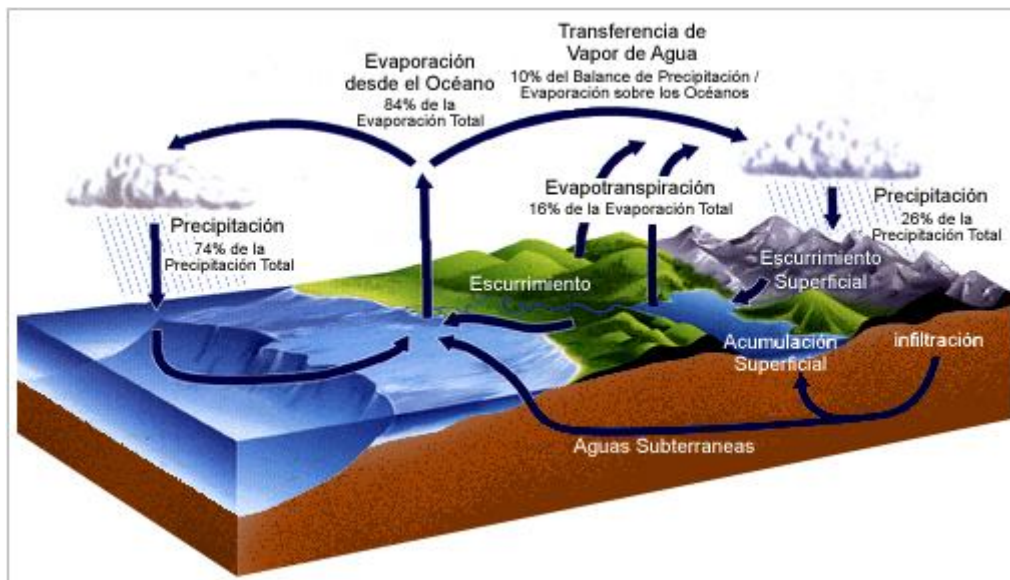
### **El Ciclo Hidrológico y la cuenca del río Tecolutla**

Campos (1998), considera que el ciclo hidrológico es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la Tierra, el cual se define como: *sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la superficie y volver a la*



atmósfera; evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo de masas de agua y reevaporación (Figura 1).

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, que se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, la energía del Sol para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento).



**Figura 1.** El Ciclo Hidrológico  
(Tomada de: [http://www.puc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/1e01.html](http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/1e01.html)).

Se puede suponer que el ciclo hidrológico se inicia con la evaporación del agua en los océanos (recordemos que la mayor parte de la superficie es océano), el vapor de agua resultante del proceso anterior es transportado por las masas de aire en movimiento (viento) hacia los continentes. Bajo condiciones meteorológicas adecuadas el vapor de agua se condensa para formar nubes, las cuales a su vez dan origen a las precipitaciones (Sánchez, 2004).

No toda la precipitación llega a la superficie, ya que parte se evapora durante su caída y otra es retenida (intercepción), por la vegetación y a través de las estructuras que conforman el paisaje cultural (plataformas y paredes de edificios, carreteras,

etc.) y poco tiempo después, es retornada a la atmósfera en forma de vapor. Del agua que alcanza la superficie del suelo, una parte queda retenida en los huecos e irregularidades naturales y artificiales del suelo (almacenamiento laminar superficial en depresiones y embalses) que en su mayoría vuelve a la atmósfera por evaporación.

Otra parte del agua que llega al suelo circula sobre la superficie (lluvia en exceso) y se concentra en pequeños surcos que luego integran arroyos, los cuales posteriormente desembocan en los ríos (escurrimiento superficial) los que conducen las aguas a los lagos, embalses o mares, desde donde se evapora, o bien se infiltra en el terreno.

Por último, hay una parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno (infiltración) y va rellorando los poros y fisuras de tal medio poroso. Si el agua infiltrada es abundante, una parte desciende hasta recargar el agua subterránea, en cambio, cuando el volumen infiltrado es escaso el agua queda retenida en la zona no saturada (humedad del suelo), de donde vuelve a la atmósfera por evaporación, o por transpiración de las plantas; como en la práctica no es fácil separar ambos fenómenos, se suelen englobar en el término evapotranspiración. Bajo la influencia de la gravedad, tanto el escurrimiento superficial como el agua subterránea se mueve hacia las zonas bajas y con el tiempo integran el escurrimiento total de un río para fluir hacia los océanos.

Según el Consejo del Sistema Veracruzano del Agua (CSVA)<sup>1</sup>, en lo que toca a la cuenca del río Tecolutla, las componentes del ciclo hidrológico juegan un papel preponderante, ya que en esta cuenca destacan grandes obras hidráulicas patrocinadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como es el caso de la presa La Gloria y plantas hidroeléctricas generadoras de electricidad, así como la utilización del agua para diferentes usos (doméstico, agrícola e industrial, principalmente). En los capítulos I y II se presenta con mayor detalle el

---

<sup>1</sup> <http://www.csva.gob.mx/biblioteca/estudiosProyectos/terminados/>; Consulta realizada en marzo de 2005

comportamiento de los principales elementos del ciclo hidrológico del agua en la cuenca del río Tecolutla.

### **Importancia del tema**

Tanto el caudal que fluye sobre el terreno, como el que se acumula en sus alrededores y el que se retiene por materia orgánica y las edificaciones, es el aspecto más palpable del problema pluvial. Sin embargo, este fenómeno es el menos estudiado y por lo mismo el más complejo de analizar. En consecuencia, los estudios realizados generalmente se han enfocado principalmente a grandes extensiones de terreno, para dar soluciones de gran visión a grandes cuencas.

Además, la presentación de los registros de precipitación en una forma útil que representa la precipitación como una fuente de humedad para el crecimiento de las plantas (u otra utilidad), requiere al menos de un conocimiento básico de las formas en que actúa tanto el suelo como depósito de agua y la materia orgánica como interfase evaporativa. La experiencia de todos los días señala que un valor medio de precipitación da relativamente poca información con respecto al problema de la producción de las cosechas agrícolas, por ejemplo.

Sin embargo, es importante reconocer que una gran cantidad de agua precipitada, se escurre a través de pequeños canalillos hasta formar corrientes que posteriormente formarán un río, y que suelen tener una crecida (o avenida) anual o en periodos aleatorios en varios años, de tales proporciones que los caudales pueden no quedar contenidos dentro del cauce y se desborden causando inundaciones, de aquí la importancia de conocer con precisión una avenida de diseño.

### **Objetivos**

- Estimar la máxima avenida de diseño en la cuenca del río Tecolutla, usando como variable independiente la precipitación máxima probable (pmp), a través del modelo de hidrograma unitario instantáneo, aplicando métodos matriciales.
- Analizar el impacto de las inundaciones en la cuenca del río Tecolutla.

## **Generalidades de cada capítulo**

En este trabajo se propone hacer un análisis matemático para estimar una avenida máxima probable, como función de la precipitación diaria y del periodo de retorno considerado. En el primer capítulo se presentan las principales características geográfico-físicas de la cuenca del río Tecolutla, tales como: ubicación geográfica, geología, geomorfología, clima e hidrografía.

En el capítulo dos, se muestra la parte hidrológica de la cuenca. Aquí se analizan los principales aspectos de la hidrología superficial, tal es el caso de las relaciones precipitación-escorrentía y la avenida máxima probable. Además, se realiza un bosquejo general de la hidrología subterránea de la cuenca del río Tecolutla.

En el capítulo tres, se evalúa el posible impacto ambiental producto de las inundaciones, así como, la importancia y consecuencia de las mismas. Además, se analizan las posibles medidas preventivas que deben llevarse a cabo cuando se presentan inundaciones, con algunas recomendaciones resultado de este trabajo. Por último, en el capítulo cuatro se dan las conclusiones finales de éste proyecto de investigación.

# I. CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICO-FÍSICAS DE LA CUENCA QUE DAN LUGAR AL SISTEMA FLUVIAL TECOLUTLA

## 1.1 Ubicación

La cuenca del Río Tecolutla se encuentra ubicada geográficamente entre los 19°30' y 20°30' latitud norte, y los 97° y 98°15' longitud oeste del meridiano de Greenwich (Figura 1.1). Tiene un área aproximada de 7342 km<sup>2</sup> hasta la desembocadura del Golfo de México, la cual se encuentra distribuida entre los estados de Tlaxcala, Hidalgo, Puebla y Veracruz (Pereyra y Hernández, 1987).



Figura 1.1. Ubicación geográfica de la cuenca del río Tecolutla.

En esta cuenca se pueden distinguir tres zonas: a) La parte alta, ubicada dentro de la Sierra Madre Oriental, en la que los cauces se encuentran alojados en cañones angostos y profundos con fuertes pendientes; b) La parte media, donde disminuyen

las pendientes de los cauces y es posible construir vasos de almacenamiento para generar energía eléctrica; c) La parte baja, que atraviesa la planicie costera del centro del estado de Veracruz, hasta la desembocadura en el Golfo de México (C.F.E., 1977).

## **1.2 Geología<sup>2,3</sup>**

Las rocas son agregados consolidados de dos o más minerales, que afloran a la superficie formando parte del paisaje regional o se encuentran debajo de los suelos a los que en gran parte dan origen.

Los surgimientos de rocas son productos de movimientos epirogénicos u orogénicos ocurridos durante diversas etapas geológicas. Por su origen las rocas pueden ser sedimentarias, ígneas o metamórficas.

En la región que comprende la cuenca del río Tecolutla, se localizan rocas de estos tres tipos (Figura 1.2) y su edad va desde el paleozoico hasta el cuaternario.

Las rocas ígneas fueron formadas por enfriamiento y solidificación de magmas volcánicos, es el grupo más abundante en la corteza terrestre. Rocas ígneas son los granitos, gabros, basalto y obsidianas.

Las rocas sedimentarias han sido formadas a través de medios físicos o mecánicos. Los sedimentos o fragmentos de las rocas ígneas son consolidados por efecto de la presión y la infiltración de material cementante. Algunas son producidas por precipitación química o bioquímica. Los precipitados bioquímicos comprenden animales marinos que pueden ser fosilíferos. Entre las principales rocas sedimentarias están los conglomerados, areniscas, pizarras y calizas.

---

<sup>2</sup><http://www.inegi.gob.mx>; Consulta realizada en enero-septiembre de 2007

<sup>3</sup><http://www.geologia.unam.mx>; Consulta realizada en enero-abril de 2008

Las rocas metamórficas derivan de las rocas ígneas y sedimentarias por alteraciones geológicas que generan calor y presión. Entre estas rocas se encuentran el gneiss, esquistos, pizarras, cuarcita y mármol.

### 1.2.1 Características geológicas de la cuenca del río Tecolutla<sup>2,3</sup>

La descripción de las rocas que caracterizan las diversas etapas geológicas en las que se formó el territorio que actualmente ocupa la cuenca del río Tecolutla, puede resumirse como sigue (Figura 1.2).

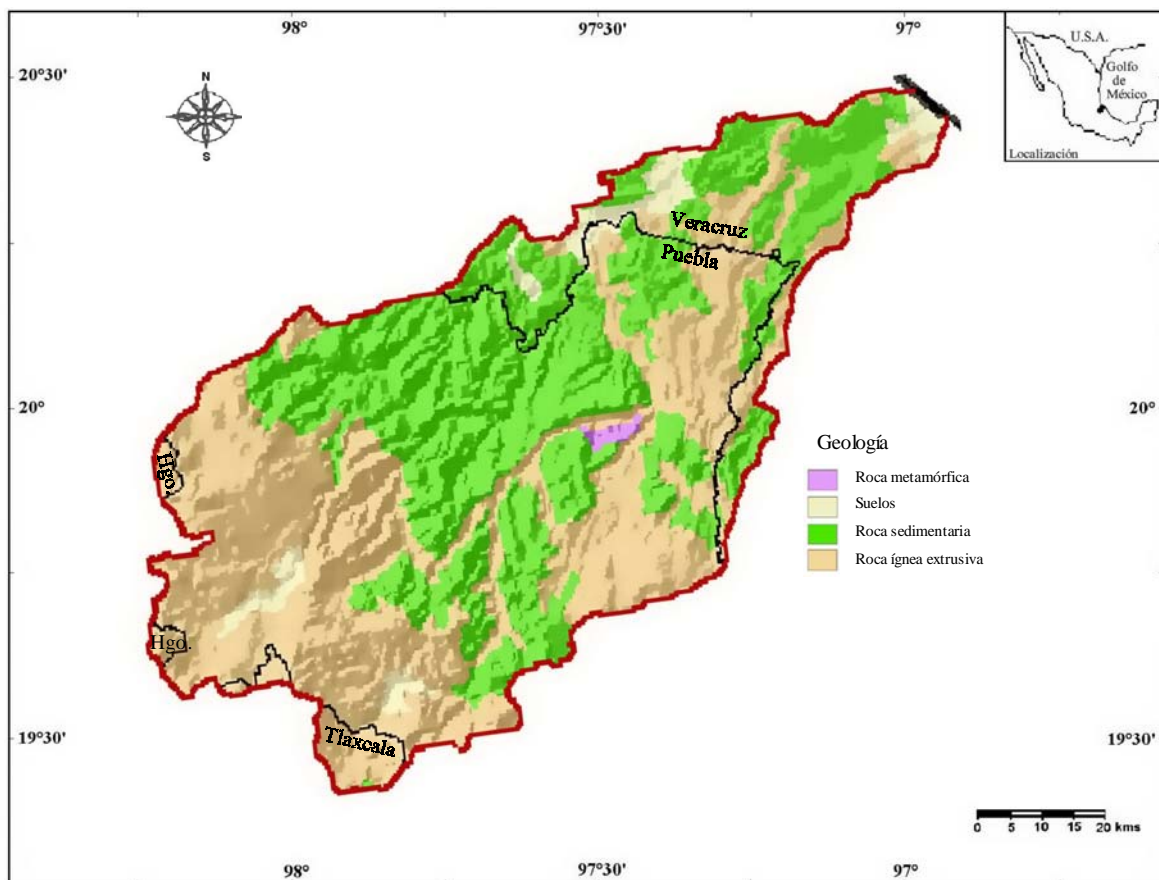


Figura 1.2. Geología de la cuenca del río Tecolutla.

- Rocas sedimentarias: comprenden las del mesozoico y cenozoico. Los sedimentos del jurásico (mesozoico) conocidos dentro de la cuenca del río Tecolutla, se localizan en su mayoría en los alrededores de las Sierras de

<sup>2</sup><http://www.inegi.gob.mx>; Consulta realizada en enero-septiembre de 2007

<sup>3</sup><http://www.geologia.unam.mx>; Consulta realizada en enero-abril de 2008

Chignahuapan y Teziutlán, Puebla (zona media de la cuenca). El cenozoico de la cuenca del río Tecolutla comprende, los periodos de eoceno, oligoceno, mioceno y plioceno, que están profundamente distribuidos sobre la planicie costera del Golfo de México (zona baja y media de la cuenca). En general están dispuestos en fajas burdamente paralelas a la línea de costa y son más jóvenes (geológicamente) cuando más cerca de esta área se encuentran.

- Rocas ígneas intrusivas y extrusivas: que comprenden el paleozoico, mesozoico y cenozoico. Las rocas ígneas intrusivas que propiamente no las hay, constituyen el núcleo de las sierras de Chignahuapan y Teziutlan, mientras que las rocas extrusivas se localizan en gran parte de la región media y alta de la cuenca. En este caso particular se trata de rocas ácidas, de tipo granítico, pero las hay también de tipo intermedio ácido y básico en conexión con las primeras.
- Rocas metamórficas: de edad probablemente paleozoica. Los afloramientos de rocas metamórficas dentro de la cuenca del Tecolutla son escasos, al grado de que puede decirse que prácticamente no los hay. Las más notables se localizan en la región media de la cuenca sobre el río Tecolutla.

### **1.3 Fisiografía<sup>2,4</sup>**

Los rasgos geomorfológicos que el relieve de una región presenta determinan en gran medida el uso de los recursos naturales, los asentamientos humanos y las actividades principales de la población, así como, sus posibilidades de desarrollo posterior. De ahí la importancia de conocer los rasgos fisiográficos de una región (Figura 1.3).

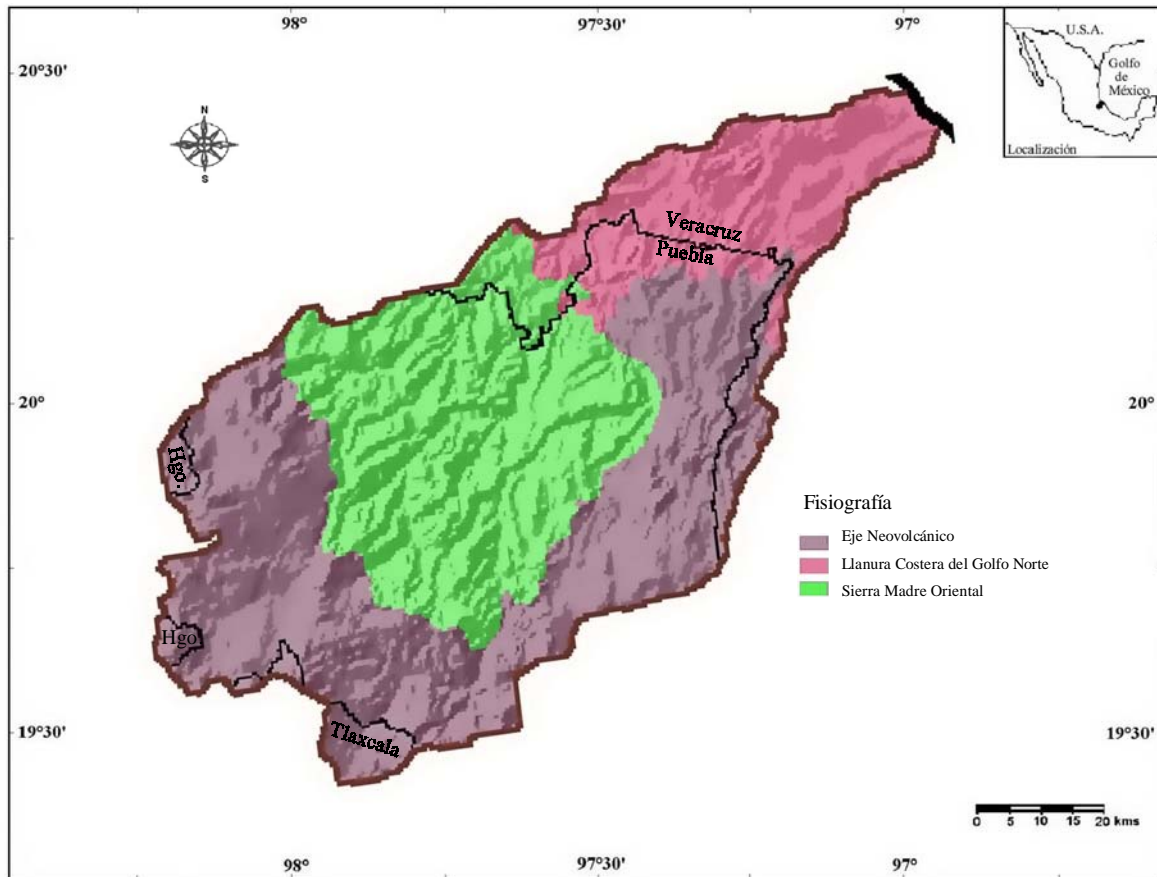
La región de la cuenca del río Tecolutla, se encuentra alojada dentro de tres provincias fisiográficas: Eje Neovolcánico, Llanura Costera del Golfo Norte y de la Sierra Madre Oriental, que a continuación se detallan.

---

<sup>2</sup><http://www.inegi.gob.mx>; Consulta realizada en enero-septiembre de 2007

<sup>4</sup><http://www.igeograf.unam.mx>; Consulta realizada de enero-agosto de 2008





**Figura 1.3.** Fisiografía de la cuenca del río Tecolutla.

- Eje Neovolcánico. Esta provincia se caracteriza por ser una enorme masa de rocas volcánicas de diversos tipos, acumulada por la constante actividad iniciada a mediados del Terciario. Dentro de la cuenca del río Tecolutla se encuentran áreas que forman parte de dos subprovincias del Eje Neovolcánico; Lagos y Volcanes de Anáhuac (consta de sierras volcánicas o grandes aparatos individuales que alternan con amplias llanuras formadas, en su mayoría, por vasos lacustres) y Chiconquiaco (en ella dominan los lomeríos de tobas asociados con llanuras, aunque en algunas áreas se encuentran sin éstas; pero también hay una sierra volcánica de laderas tendidas con algunas cañadas, mesetas basálticas y una llanura aluvial).
- Llanura Costera del Golfo Norte. Esta provincia se extiende paralelamente a las costas del Golfo de México, desde el río Bravo hasta la zona de Nautla,

Veracruz. En Territorio de la cuenca del Tecolutla se encuentran áreas que corresponden a la subprovincia de Llanuras y Lomeríos; en esta región se encuentran valles labrados por el río Tecolutla, que atraviesan por sistemas de lomeríos. Al oeste, cerca de la sierra, existen mesetas constituidas de sedimentos antiguos, que al igual que las sierras son de laderas convexas, remanentes de antiguas superficies de depositación aluvial.

- Sierra Madre Oriental. Esta provincia consiste fundamentalmente en un conjunto de sierras formadas por estratos plegados. Dichos estratos están constituidos de rocas sedimentarias calcáreas y arcillosas de edad mesozoica, predominantemente de origen marino. Las rocas ígneas son poco abundantes; éstas cubren a algunas de las estructuras plegadas situadas en las proximidades del Eje Neovolcánico, así como a otras zonas de poca extensión ubicadas a lo largo de la Sierra de Puebla . En general, las altitudes de las cumbres de la Sierra Madre Oriental varían entre 2 000 y 3 000 msnm.

#### **1.4 Vegetación<sup>2,4</sup>**

A través de los años la cubierta vegetal de la cuenca del río Tecolutla, ha presentado grandes cambios en su distribución original y en su composición florística, en algunos casos drásticamente, sin embargo, se advierten principalmente aquellos que son ocasionados por la influencia del hombre, entre estos, la deforestación como uno de los mas importantes; los patrones climatológicos son más erráticos, los desastres naturales son más frecuentes y severos, los bosques cada vez están más fragmentados, por ende muchos hábitats de especies animales están desapareciendo.

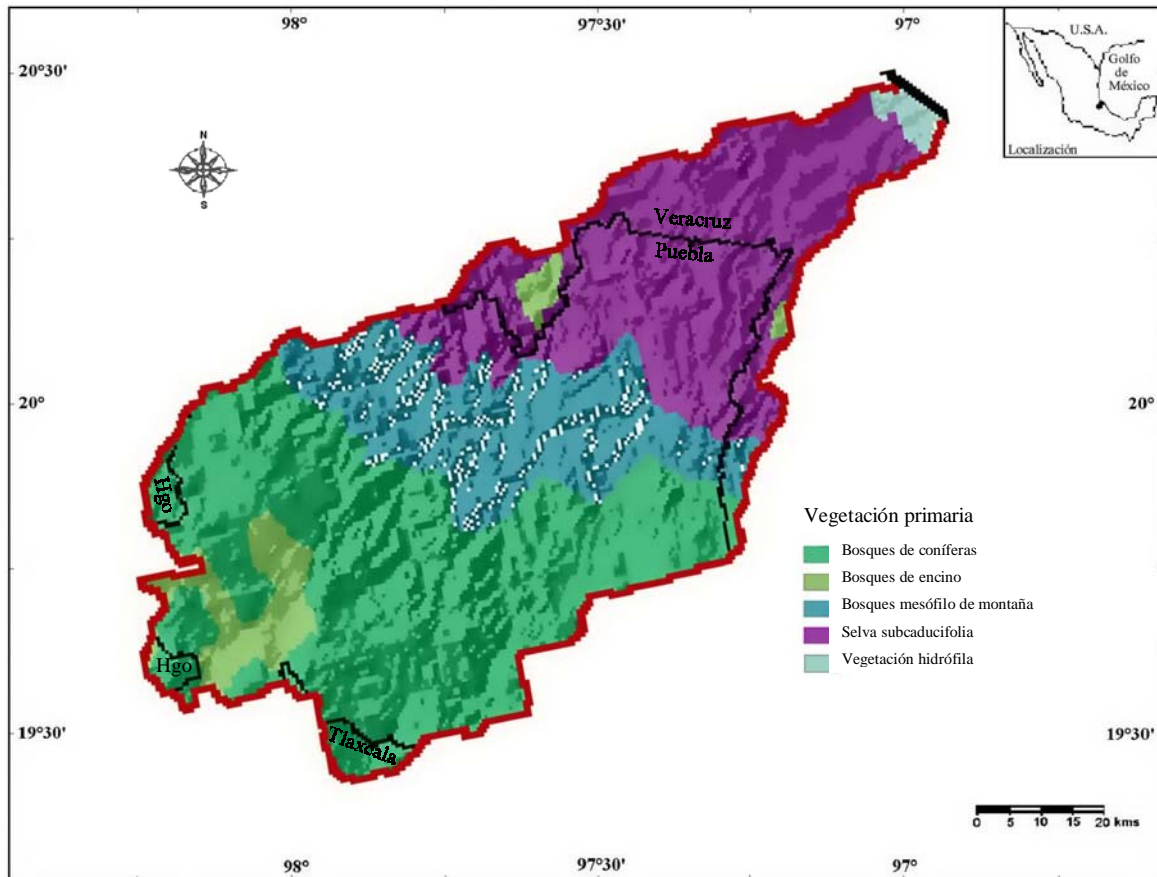
Por los constantes cambios que presenta hoy en día la cubierta vegetal en algunos casos es difícil determinar el tipo de vegetación, sin embargo, por revisión de literatura especializada y con la información recabada en campo por el INEGI, se

---

<sup>2</sup><http://www.inegi.gob.mx>; Consulta realizada en enero-septiembre de 2007

<sup>4</sup><http://www.igeograf.unam.mx>; Consulta realizada de enero-agosto de 2008

puede concluir qué tipo de vegetación se desarrolla a lo largo de la cuenca del río Tecolutla (Figura 1.4).



**Figura 1.4.** Vegetación predominante en la región de la cuenca del río Tecolutla.

En la región de estudio, se encuentra una gran variedad de comunidades vegetales destacando las siguientes: Bosques de Coníferas (se caracterizan por tener casi puros grupos de árboles como abetos, piceas, pinabetes y pinos), se desarrollan en la parte alta de la cuenca colindante con la Sierra Madre Oriental; Bosques de Encino, localizados propiamente en las vecindades de los estados de Hidalgo y Tlaxcala (zona alta de la cuenca); Bosque Mesófilo de Montaña o Caducifolio, localizado principalmente en las estribaciones de la Sierra Madre Oriental; Selva Subcaducifolia, se desarrolla en la parte media y baja de la cuenca paralelamente a la provincia fisiográfica de la llanura costera del golfo norte; Vegetación Hidrófila, confinada en la parte baja en las vecindades de la zona costera del Golfo de México.

## 1.5 Clima

El clima es uno de los factores más importantes que operan sobre cualquier territorio al modificar las condiciones físicas de un lugar. En primer término el clima influye en la transformación de las rocas expuestas a la intemperie para disgregarlas y junto con otros factores formar los diferentes tipos de suelos que se presentan en una región. El clima es responsable del predominio de diversos tipos de flora y fauna, además es decisivo en el desarrollo de las actividades agropecuarias y las tendencias en los asentamientos humanos originales (Fernández, 1996).

Mosiño (1974), señalan que los factores determinantes del clima son por orden de importancia: latitud, orografía, distribución de tierras y aguas, corrientes marinas y las tormentas junto con sus trayectorias. A los tres primeros se les considera como “controles permanentes”, mientras que a los dos últimos “controles variables”.

Por lo que se refiere al primer control permanente (latitud), la región que comprende la cuenca del río Tecolutla queda comprendida en su mayoría entre latitudes tropicales, pero por su cercanía con el Trópico de Cáncer, habrá de esperarse que también sea afectada por los fenómenos extratropicales (Mosiño y García, 1974).

La orografía (segundo control), es en parte escarpada por lo que inducirá embalses, encañonamientos, elevamientos forzados del aire, desviaciones, etc., que modifiquen sustancialmente los efectos de las tormentas y las masas de aire que afecten a la zona de estudio, y a su vez impedirán que se contemplen condiciones climáticas homogéneas en toda ésta región.

Además de los efectos que provoca la orografía local sobre los sistemas de circulación atmosférica de gran escala, están la brisa marina y la brisa terral, circulaciones debidas a los contrastes térmicos entre el mar y el continente. Como es bien conocido, la brisa terral es el viento nocturno que va del continente hacia el mar, el cual proveerá de humedad a barlovento de la Sierra Madre Oriental: la corriente cálida del Golfo de México se inicia frente a estas tierras, a las que llegan

básicamente dos tipos de masas de aire (a veces en forma de tormentas); el aire tropical en el semestre centrado en el verano, y las masas polares en los meses centrados en el invierno.

Según Pereyra *et al.*, (1986), la mayor frecuencia mensual con la que se han presentado los ciclones tropicales en el Golfo de México, se da en el mes de septiembre, seguido por agosto<sup>5</sup>, en tanto que las lluvias que acompañan a los fenómenos atmosféricos tropicales, afectan en un área mucho mayor que el área que afectan los vientos. Estos fenómenos atmosféricos no sólo causan daño a la población, sino también les produce beneficios, principalmente a la agricultura. Una parte de las fuertes lluvias que acompañan estas perturbaciones tropicales, recargan los acuíferos que son aprovechados en muchas regiones para el riego de cultivos agrícolas, y otra parte es almacenada en presas que el gobierno aprovecha generalmente para la generación de energía eléctrica o para distribuirla a los distritos de riego.

Algunas de las tormentas tropicales que afectan a la cuenca del río Tecolutla se forman en la sonda de Campeche y en general en el Golfo de México. Estas son perturbaciones que por su corto recorrido sobre las aguas del Golfo de México no tienen oportunidad de desarrollarse plenamente, aunque las lluvias asociadas al hidrometeoro llegan a ocasionar inundaciones considerables en la cuenca, siendo septiembre el mes de mayor actividad (Jáuregui y Zitácuaro, 1995).

### **1.5.1 Sistemas de circulación atmosférica**

Dos tipos de masas de aire se alternan en el dominio del Golfo de México: la tropical, esencialmente en el semestre centrado en el verano, y la polar, que tiene incursiones frecuentes en el invierno. Existen periodos de transición cuando se pasa de un semestre a otro y estas masas de aire se van alternando, o en ocasiones no hay una situación bien definida (GEV, 1998).

---

<sup>5</sup> <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/metadateexplorer/index.html>; Consulta realizada de julio de 2008

### **1.5.1.1. Invierno**

Durante el invierno el aire polar del Hemisferio Norte avanza hacia el sur, presentándose en la parte veracruzana de la vertiente del Golfo de México y suele presentarse de octubre a mayo, a veces como un frente frío o norte, que consiste en un desprendimiento de la masa de aire polar por el norte del Golfo de México, lo cual provoca una disminución sensible de la temperatura en superficie, asociado con nublados en las cimas de la sierra, de cara al Golfo de México. En tanto a la planicie costera, así como a la vertiente oriental de la sierra llega fácilmente humedad proveniente del Golfo de México y las invasiones de aire frío provocan nublados y lluvias ligeras, que apenas representan el 10% de la lluvia anual. En las partes más altas a partir de los 1800 msnm, durante inviernos muy severos pueden presentarse nevadas (Tejeda *et al.*, 1989).

### **1.5.1.2. Verano**

En el verano llega del oriente aire tropical “cálido húmedo” a la vertiente del Golfo de México. Aquí actúa el efecto de la latitud, permitiendo la llegada de masas de aire tanto tropical como polar. Esta región se caracteriza por la disminución de invasiones de aire polar y la ganancia de terreno por parte de aire tropical, aunque a veces en mayo se desprende algún Norte poco profundo y poco severo, pero por lo regular para junio ya se estableció el aire tropical. Su forma de manifestarse son los vientos alisios (Tejeda *et al.*, 1989).

Las Ondas del Este tienen su frecuencia máxima entre agosto y septiembre. Se forman en el Atlántico e ingresan al territorio veracruzano afectando la cuenca del Tecolutla, y el paso de una de ellas deja una secuencia de 3 a 4 días con lluvia a los que siguen unos días despejados, pero cuando éstas han alcanzado el nivel de depresión o tormenta tropical y llegan a chocar o a pasar cerca del territorio veracruzano, dejan tras de sí cantidades considerables de lluvia. Su máxima ocurrencia es en septiembre, aunque pueden presentarse desde mayo hasta noviembre (Tejeda *et al.*, 1989).

El sistema de alta presión conocido como Anticiclón de las Bermudas, llega a afectar la vertiente del Golfo de México; si esto ocurre a mitad de la estación lluviosa impide el desarrollo nuboso y mantiene los cielos despejados, por el contrario, si es a medio invierno las noches serán significativamente frías (Pereyra *et al.*, 1992).

### 1.5.2 Temperatura

Para Fernández (1996), la consecuencia más directa de la radiación solar es la temperatura y este elemento es, junto con la precipitación, el más representativo de las características climáticas de una zona. La mayor parte de los fenómenos físicos, como la evaporación o condensación, dependen directamente de la temperatura del aire; lo mismo ocurre con otros fenómenos fisiológicos, de tal modo que las plantas, el hombre y los seres vivos en general no pueden subsistir fuera de unos determinados umbrales térmicos.

En lo que respecta a la distribución espacial de la temperatura, ésta varía en función de la latitud, la proximidad o lejanía de las masas marítimas y el relieve. En zonas de latitud similar, es el relieve el que de manera más acusada condiciona la distribución de las temperaturas. Su influencia se manifiesta en la disimetría térmica entre vertientes, según su exposición, y por los gradientes térmicos altitudinales.

En lo que toca a la distribución de la temperatura en la cuenca del río Tecolutla, de acuerdo a las características antes mencionadas, la temperatura media anual disminuye de norte a sur y de la costa hacia la sierra (Tabla 1.1), con mínimos en las cimas volviendo a aumentar al occidente de la Sierra Madre Oriental y máximos situados en la zona costera (Tejeda *et al.*, 1989).

Tabla 1.1. Distribución espacial de la temperatura en la cuenca del río Tecolutla

Región	Temperatura media anual (°C)	Temperatura máxima media anual (°C)	Temperatura mínima media anual (°C)
<b>Alta de la cuenca</b>	14-16	20-22	6-8
<b>Media de la cuenca</b>	16-22	22-28	8-18
<b>Baja de la cuenca</b>	22-24	28-30	18-20

### 1.5.3 Precipitación

Junto con la temperatura, es el elemento climático que de manera más directa influye en la configuración del medio natural. Su ritmo temporal y su distribución espacial condicionan los ciclos agrícolas y la distribución de las principales especies vegetales y animales. Influye también de manera muy directa en la economía, especialmente en aquellas zonas en las que las precipitaciones son escasas (Fernández, 1996).

Su integración a estudios del clima de una región, presenta una serie de dificultades derivadas de algunos de sus rasgos más característicos, como son (Fernández, 1996):

- **La irregularidad** (fenomenológica), que es muy acusada en las zonas de transición climática. La localización de los centros de presión, de los que dependen las precipitaciones y su frecuencia sobre determinadas áreas es bastante más aleatoria que los mecanismos que actúan sobre las temperaturas. Por ello, las observaciones puntuales de las precipitaciones carecen de significado, los valores medios son muy poco significativos y se precisa de series bastante largas para poder evaluar y caracterizar este elemento del clima.
- **La duración e intensidad**, de las precipitaciones es otro aspecto fundamental para determinar su influencia sobre las demás variables del medio natural. La cantidad total registrada en un observatorio o estación climatológica, puede tener efectos muy diferentes en función de su intensidad. Las lluvias torrenciales provocan inundaciones y daños graves en las obras de ingeniería, vías de comunicación, etc., al mismo tiempo que aceleran las pérdidas de suelo fértil sin vegetación por el arrastre de la gran escorrentía superficial; en contrapartida, la infiltración es muy escasa y el uso del agua por las plantas, mínima.
- **Las disponibilidades hídricas** dependen no sólo de la cantidad precipitada, sino también de la evaporación.



### 1.5.3.1. La variabilidad de las precipitaciones

Es el rasgo que mejor define a este elemento climático y adquiere espacial relevancia en los climas de transición. La variabilidad es tanto espacial como temporal y está relacionada con la dinámica general de la atmósfera, de la que dependen el régimen pluviométrico anual y las oscilaciones interanuales, y con la topografía y el relieve, que introducen desequilibrios muy marcados en la distribución espacial de las precipitaciones (Fernández, 1996).

De acuerdo con la precipitación media anual de la cuenca, se pueden distinguir tres zonas a saber: en la parte alta localizada entre los estados de Tlaxcala, Hidalgo y Puebla, la precipitación media anual es del orden de 700 mm, en la parte media del orden de 2500 mm, con centros de alta precipitación en Jopala y Atexcaco, Puebla, donde la precipitación media anual alcanza los 3400 mm, y en la parte baja la precipitación es de 1400 mm aproximadamente (Pereyra y Hernández, 1987). En lo que respecta a la precipitación máxima media anual en 24 hrs; en la parte alta de la cuenca es del orden de los 200 mm, mientras que en la parte media de aproximadamente 400 mm y la parte baja es del orden de los 300 mm. La precipitación promedio mensual de los meses representativos del año, así como, la precipitación máxima media anual en 24 hrs, se presentan en la tabla 1.2 (Tejeda *et al.*, 1989).

Tabla 1.2. Precipitación promedio mensual y máxima en 24 hrs para la cuenca del río Tecolutla.

Precipitación media total (mm) para enero	Precipitación media total (mm) para abril	Precipitación media total (mm) para julio	Precipitación media total (mm) para octubre	Precipitación máxima media en 24 hrs (mm) anual
72.8	116.1	297.3	217.9	300

### 1.5.4 Evaporación

La planificación y gestión de los recursos hídricos exige conocer no sólo la cantidad de agua que alcanza la superficie terrestre en forma de precipitaciones, sino también la que retorna a la atmósfera en forma de evaporación.

Según Campos (1998), el balance de agua, expresado en términos de diferencia entre ambos parámetros del ciclo hidrológico, es una medida esencial en los estudios medioambientales, debido a la incidencia del agua sobre la vegetación y cultivos, sobre las escorrentías superficiales y subterráneas, y en las demandas urbanas e industriales de este elemento.

El contenido de humedad del aire y la limitación que éste tiene para contener vapor, son parámetros fundamentales a la hora de determinar algunos de los índices más utilizados en bioclimatología, como la evaporación y transpiración. El hecho fundamental es que cuando un volumen de aire contiene el máximo de vapor, el aire está saturado. La capacidad depende de la temperatura y para cada temperatura existe una capacidad máxima de contenido en vapor.

Por lo tanto, el agua contenida en la atmósfera procede de la evaporación directa que se produce en los mares, ríos o lagos, de la evaporación del agua existente en el suelo en forma de rocío o escarcha y de la transpiración que las plantas realizan a través de los estomas de las hojas.

De lo anterior se concluye que en el intercambio de humedad tierra-atmósfera intervienen dos procesos: la evaporación y la transpiración. Entonces la evaporación bajo este contexto, se puede considerar como el resultado de un proceso físico mediante el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso y retorna a la atmósfera directamente en forma de vapor.

En lo que toca a la cuenca del río Tecolutla, la variación espacial de la evaporación alcanza sus máximos donde la insolación es alta o la humedad del ambiente es baja; es decir, sobre la llanura costera o a sotavento de la Sierra Madre Oriental, distinguiéndose tres zonas como se indica en la Tabla 1.3 (Tejeda *et al.*, 1989).

**Tabla 1.3.** Distribución espacial de la evaporación media en la cuenca del río Tecolutla

Región	Evaporación media total mensual (mm)				Evaporación media total anual (mm)
	Enero	Abril	Julio	Octubre	
Alta	125-140	150-200	125-150	125-150	1500-1600
Media	75-125	125-150	75-150	75-125	1000-1500
Baja	50-75	125-135	125-150	75-100	1250-1350

### 1.5.5 Tipos de climas

De lo expuesto anteriormente en esta unidad, por clima se habrá de entender el comportamiento medio y las fluctuaciones más importantes de las variables climáticas en una región, para este caso la cuenca del río Tecolutla. Esas variables climáticas son la temperatura, la precipitación, la radiación, el viento, etc., y se les conoce como elementos del clima. Según el criterio de Koeppen adaptado a la República Mexicana por García, la distribución de los climas es el siguiente (Tabla 1.4): clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano y clima templado húmedo con lluvias abundantes todo el año en la parte alta de la cuenca; cálido húmedo y subhúmedo con abundantes lluvias en verano y todo el año en la cuenca baja (Tejeda *et al.*, 1989).

**Tabla 1.4.** Tipos de climas según Koeppen modificado por García para la cuenca del río Tecolutla (Fuente: Tejeda *et al.*, 1989)

Región	Tipos de climas		
	Templado	Semicálido	Cálido
Alta	C(W <sub>1</sub> ); C(W <sub>2</sub> ); C(m)		
Media	C(f)	ACf	Af
Baja			AW <sub>2</sub> ; Am

### 1.6 Hidrografía

Los recursos hídricos siempre han jugado un papel importante en el desarrollo de las civilizaciones de cualquier región del mundo; en la cuenca del río Tecolutla estos recursos son aprovechados, para la agricultura, la pesca, la generación de energía eléctrica y para el consumo doméstico de las poblaciones asentadas dentro de la misma.



Según Pereyra y Hernández (1987), los arroyos que dan origen al río Tecolutla nacen en la Sierra de Puebla, en los municipios de Huachinango, Zacatlán, Acatlán y Teziutlán. A esta corriente se le conoce primero por los nombres de arroyo Zapata, río Coyuco, río Apulco y finalmente río Tecolutla; los principales afluentes en la parte alta, son los ríos Xiucayucan, Tecuantepec, Laxaxalpa y en la parte media el arroyo Joloapan y el río Chichicatzapa (Figura 1.5).

El colector general tiene su origen en el arroyo Zapata, en el parteaguas con la región hidráulica No. 18 a una elevación de 3500 msnm y 20 Km al norte de Huamantla de Juárez, Tlaxcala, descargan a él los arroyos Huixcolotla y Los Lobos por la margen izquierda y a partir de esta confluencia recibe el nombre de río Coyuca. Su curso se desarrolla a 2000 m de altitud en el estado de Puebla, donde recibe por la margen izquierda los arroyos Tetzoncuahuixtic y San José y por la margen derecha los arroyos Texocuixpan y Tlapizaco; en este sitio el colector se empieza a llamar río Apulco. El arroyo La Gloria se une al colector general a una elevación de 1460 msnm después de un corto recorrido desde su nacimiento a 13 km al norte de Zacapoaxtla y 2500 m de altitud (Pereyra y Hernández, 1987).

La corriente principal recibe por su margen derecha otros dos afluentes de importancia que son los arroyos Xilita y Santalaco. El primero nace en el Cerro Caculco a 2500 msnm, 2 km al este de Zacapoaxtla, Puebla y después de un recorrido de 7 km se une con al colector a 1000 m de elevación y a 3.5 km aguas debajo de la confluencia del arroyo La Gloria. Sobre este afluente se encuentra la planta hidroeléctrica Xilita. Respecto al arroyo Sontalaco su origen se sitúa a 4 km al este de Zacapoaxtla a 2500 msnm; su curso se desarrolla en zonas de topografía abrupta en la que la precipitación anual es superior a los 2000 mmm.

El curso de la corriente principal cambia hacia el norte por un angosto cañón después de flanquear la zona abrupta del cerro San Cristóbal y aproximadamente a 2 km de distancia se encuentra la presa La Soledad, que almacena aguas del río Apulco, así como las de los arroyo Dos Ríos y del río Galapa, derivadas y

conducidas hasta la presa para ser utilizadas aguas abajo en la generación de energía eléctrica, en la planta Mazatepec. A 6 km aguas abajo confluyen por su margen derecha el río Xiucayucan, desde el colector inicia su descenso por una zona abrupta de aproximadamente 15 km hacia la planicie costera, lugar donde la corriente recibe sus afluentes más importantes.

Al iniciar su recorrido por la planicie el río Apulco recibe por su margen derecha al arroyo La Aurora y por su margen izquierda la afluencia del río Cuichat que nace en la Sierra de Puebla a 1450 msnm a 5 km al sur de Quetzalapan y que desemboca en las proximidades de Mazatepec a 150 m de altitud. En su curso confluyen por su margen derecha los arroyos El Rosario, Zacapotexco, San Carlos, Santa Rosa y Comatl y por la izquierda el río Coatinchan; en todos ellos y sus afluentes, a excepción del último, están instaladas estaciones hidrométricas que proporcionan la información necesaria para estudiar las posibilidades de su aprovechamiento.

Otros atributos de importancia del río Apulco, que confluyen por su margen izquierda, son los ríos Tecuantepec y Laxaxalpan, que tienen como subafluente al río Necaxa. Los afluentes antes descritos confluyen al Colector en la planicie costera y a partir de esta zona la corriente se conoce con el nombre de río Tecolutla. Recibe también en el curso bajo y por su margen derecha las aportaciones del arroyo Mexonate y río Joloapan. El río Joloapan nace con el nombre de río El Encanto al sureste de Mexcalcuahutla, Puebla a 1800 m de altitud; aguas abajo se le conoce con el nombre de río Acateno; continúa su trayectoria al noreste como río Rancho Viejo, cambiando posteriormente su nombre a río Joloapan afluyendo por su margen derecha la corriente formada por los arroyos Mazalapa, Pahuapan, Ayahualo y Xolot. Aguas debajo de la confluencia anterior afluyen por la margen izquierda los arroyos San Carlos y Cuahutamingo, el que recibe por la margen izquierda la aportación del arroyo Maloapan. Aguas arriba de su afluencia con el colector general del río Joloapan recibe por la margen derecha al río Cedros. El colector continúa su recorrido hacia el ENE a través de la planicie costera, pasa por Gutiérrez Zamora y cerca de su desembocadura afluyen a él por la margen derecha el río Chichicatzapa

y el estero Ostiones; finalmente descarga en la barra de Tecolutla del Golfo de México a través de un canal de 25 m de ancho y 2 m de profundidad. La barra se prolonga mar adentro formando un banco de aproximadamente 3 km, a 500 m de su desembocadura (Islas y Pereyra, 1990).

## II. HIDROLOGÍA

### 2.1. Hidrología Superficial

Domínguez *et al.*, (1980), consideran que la componente más importante del ciclo hidrológico es el escurrimiento, ya que desde el punto de vista del aprovechamiento de los recursos hídricos de una región o del país, el escurrimiento de una corriente constituye la disponibilidad para ser derivada y utilizada inmediatamente, en el riego y/o el abastecimiento de agua a las poblaciones; o bien, para ser almacenada en los embalses y empleada posteriormente en diversos fines, inclusive retenida para su control, con el objeto de reducir los daños que cause su abundancia (por ejemplo inundaciones).

#### 2.1.1. Análisis estadístico de la precipitación

**Precipitación** es cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre, esto incluye básicamente: lluvia, nieve y granizo, así como rocío y escarcha que en algunas regiones constituyen una parte pequeña pero apreciable de la precipitación total.

En relación con su origen, pueden distinguirse precipitaciones ciclónicas, de convección y orográficas. Las ciclónicas son provocadas por los frentes asociados a una borrasca o por un ciclón tropical; las de convección se producen por el ascenso de masas de aire caliente y son tormentas de verano; y las orográficas se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa (Campos, 1998).

El estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituyen la principal entrada de agua a una cuenca. También es fundamental en la previsión de avenidas, diseño de obras hidráulicas, estudios de erosión, etc.



Se pueden cuantificar las precipitaciones caídas en un punto mediante cualquier recipiente de paredes rectas (pluviómetros y pluviógrafos). La precipitación se mide en lámina de agua recogida y se expresa comúnmente en milímetros (mm); un mm de lámina de agua es equivalente a un litro de agua en un metro cuadrado.

### 2.1.1.1 Precipitación media

Campos (1998), considera que si las estaciones pluviométricas estuvieran repartidas homogéneamente en una región, bastaría con calcular la media aritmética, pero como en las zonas de montaña la variabilidad altitudinal es mayor que en la llanura, este procedimiento genera un error grande, por lo que, para determinar la precipitación media en la cuenca del río Tecolutla, se utilizan dos procedimientos adicionales: el mapa de isoyetas y los polígonos de Thiessen.

De la información hidrométrica y climatológica proporcionada por la División Hidrométrica Golfo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de la base de datos CLICOM (Sistema para el manejo automático de bases de datos climatológicos en computadoras personales), se seleccionaron las estaciones climatológicas que se utilizarían en el análisis, incluyendo a aquellas que se localizan fuera de la cuenca pero muy próximas a ésta; en total se seleccionaron 24 estaciones que contaran con registros pluviométricos del período 1960 a 1990 (Figura 1.5 y Tabla 2.1).

Posteriormente se calculó la precipitación media anual de la cuenca del río Tecolutla, aplicando los métodos que a continuación se detallan:

- a) **Método aritmético.** Consiste simplemente en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usadas en el análisis:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{pi} \quad (2.1)$$

donde  $\bar{h}_p$  es la altura de precipitación media en mm,  $h_{pi}$  es la altura de precipitación registrada en la estación  $i$  en mm y  $n$  es el número de estaciones bajo análisis.

**Tabla 2.1.** Estaciones climatológicas e hidrométricas ubicadas dentro y fuera en las cercanías de la cuenca del río Tecolutla.

No.	Estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
1*	El Remolino, Papantla, Ver.	20°25'	97°14'	35
2	Joloapan, Papantla, Ver.	20°15'	97°16'	125
3	Espinal, Espinal, Ver.	20°16'	97°25'	111
4	Melchor Ocampo, Espinal, Ver.	20°22'	97°32'	200
5	Santa Ana, Chumatlán, Ver.	20°15'	97°35'	210
6	Coyutla, Coyutla, Ver.	20°16'	97°39'	245
7	Jopala, Jopala, Pue.	20°11'	97°44'	725
8	Pueblo Nvo, Chignahuapan, Pue.	19°57'	98°05'	2700
9	Loma alta, Chignahuapan, Pue.	19°47'	98°02'	2350
10	Aquixtla, Aquixtla, Pue.	19°48'	97°57'	2310
11	La Gloria, Tlaxco, Tlax.	19°34'	97°56'	2850
12	Ixtacamaxtitlán, Ixtacamaxtitlán,	19°36'	97°49'	2175
13	San Antonio Arroyo Prieto, Pue.	19°29'	97°48'	3140
14	Santiago Zautla, Zautla, Pue.	19°40'	97°40'	1940
15	Capuluaque, Tetela de O., Pue.	19°47'	97°46'	2200
16	Huahuaxtla Xochitán, Pue.	19°55'	97°36'	1625
17*	Tecuntepec, Zozocolco, Ver.	20°08'	97°29'	250
18	Ayotoxco, Ayotoxco, Pue.	20°05'	97°24'	320
19	Presa La Soledad, Pue.	19°57'	97°29'	816
20	Tlatlauquitepec, Pue.	19°46'	97°30'	2025
21*	Atexcaco, Hueyapan, Pue.	19°56'	97°25'	900
22	La Pagoda, Pue.	19°51'	97°27'	2235
23	La Fundación, Pue.	19°50'	97°25'	1565
24	San Juan Acateno, Teziutlán, Pue.	19°51'	97°21'	1656

\*Estación Hidrométrica

b) **Polígonos de Thiessen.** Este método consiste en unir mediante líneas rectas dibujadas en el plano de la cuenca, las estaciones más próximas entre sí. Con ello se forman triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas, a continuación se trazan líneas rectas perpendiculares que bisectan los lados de los triángulos. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas que forman los llamados polígonos de Thiessen, en donde dichos polígonos y el parteaguas forman el área de influencia de cada estación pluviométrica (Springall, 1967).

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi} \quad (2.2)$$

donde  $A_i$  es el área de influencia de la estación  $i$  en  $\text{km}^2$ ,  $A_T$  es el área total de la cuenca en  $\text{km}^2$ .

- c) **Mapa de isoyetas.** Consiste en trazar con la información registrada en las estaciones pluviométricas, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas, de modo semejante como se trazan las curvas de nivel en topografía. La precipitación media se obtiene de forma similar que en el caso de los polígonos de Thiessen, pero ahora el peso es el área  $A'_i$  entre cada dos isoyetas y el parteaguas de la cuenca, y la cantidad que se pesa es la altura de precipitación promedio entre dos isoyetas,  $\bar{h}_{pi}$  (Springall, 1967).

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} (\bar{h}_{pi} A'_i) \quad (2.3)$$

donde  $n'$  es el número de áreas  $A'_i$  consideradas. Cabe mencionar que las isoyetas se trazaron con la ayuda del Software Surfer versión 7.

Los resultados obtenidos del análisis de la precipitación media de las tres tormentas más desfavorables (Tabla 2.2), además, de la precipitación media anual de la cuenca del río Tecolutla, se presentan en las tablas 2.3 y 2.4, así como en las figuras 2.1, 2.2 y 2.3. De las figuras 2.1-2.3, se puede concluir que existen dentro de la cuenca, dos centros de alta precipitación, ubicados en las regiones de Jopala (7) y Atexcaco (21), Puebla, aseveración que confirma lo dicho anteriormente, en la unidad uno.

**Tabla 2.2.** Tormentas severas ocurridas en la cuenca del río Tecolutla, para el período 1960-1990.

No. de tormenta	Año	Periodo	Gasto máximo (m³/s)
1	1969	4 al 9 de septiembre	3952
2	1971	8 al 10 de octubre	4258
3	1973	25 al 30 de agosto	4415
4	1974	18 al 26 de septiembre	7491
5	1975	7 al 12 de septiembre	3049
6	1976	15 al 17 de octubre	3188
7	1979	4 al 6 de agosto	3198
8	1979	6 al 10 de septiembre	3621
9	1980	22 al 26 de septiembre	3467
10	1981	23 al 28 de agosto	8321
11	1981	16 al 18 de septiembre	3031
12	1984	10 al 14 de septiembre	3024
13	1986	14 al 16 de octubre	3447
14	1986	11 al 14 de noviembre	7755
15	1988	3 al 5 de septiembre	5782
16	1989	21 al 23 de septiembre	4481

**Tabla 2.3.** Precipitación media acumulada de las tormentas más desfavorables presentadas en la cuenca del río Tecolutla, para el período 1960-1990.

Tormenta / Método	Aritmético	Thiessen	Isoyetas
18-26 de septiembre de 1974	344.97 mm	346.03 mm	342.68 mm
23-28 de agosto de 1981	317.83 mm	288.06 mm	285.33 mm
11-14 de noviembre de 1986	189.93 mm	168.10 mm	162.05 mm

**Tabla 2.4.** Precipitación media anual de la cuenca del río Tecolutla, para el período 1960-1990.

Método	Aritmético	Thiessen	Isoyetas
$\bar{h}_p$ (mm)	1732.8	1594.7	1593.9

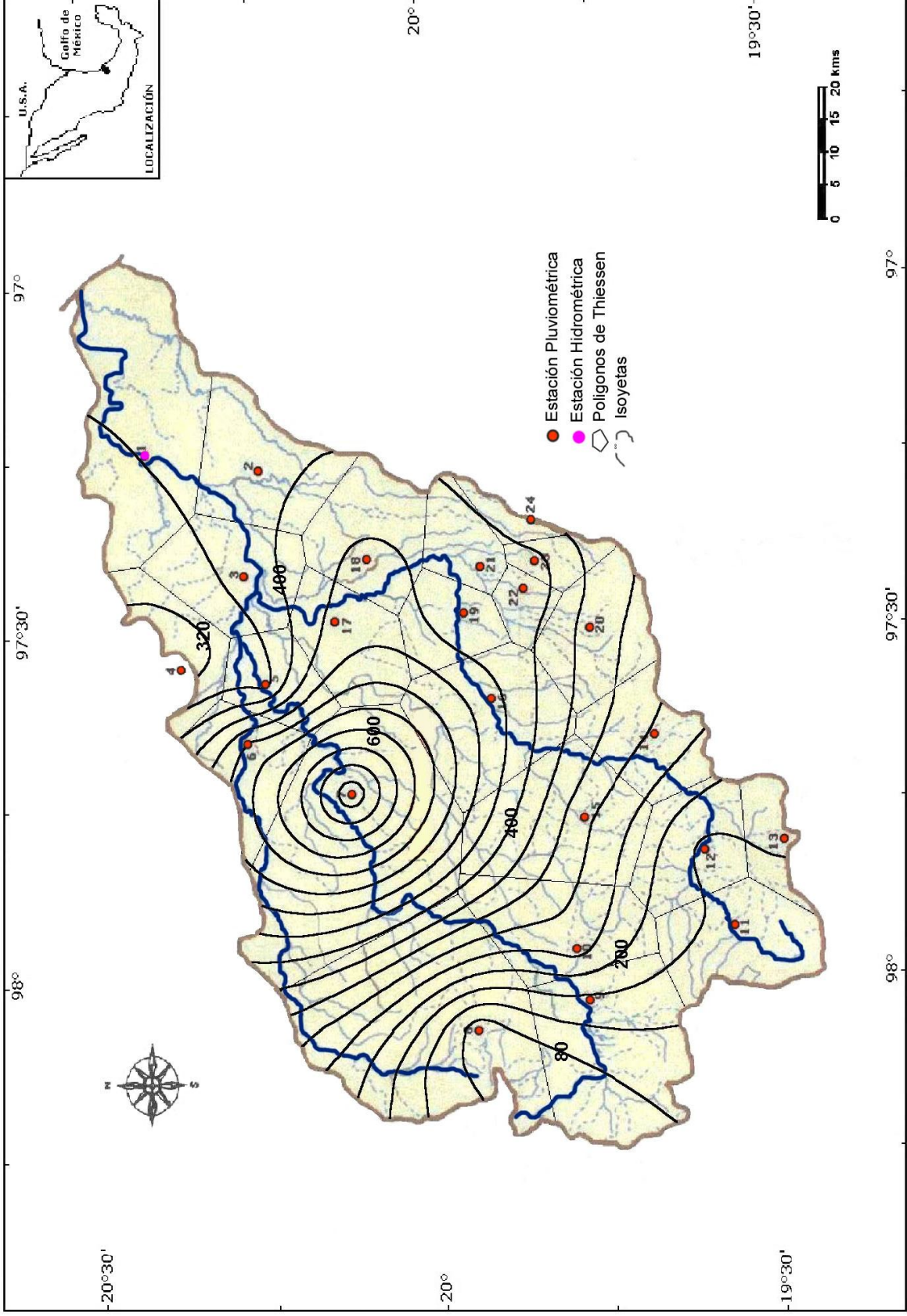
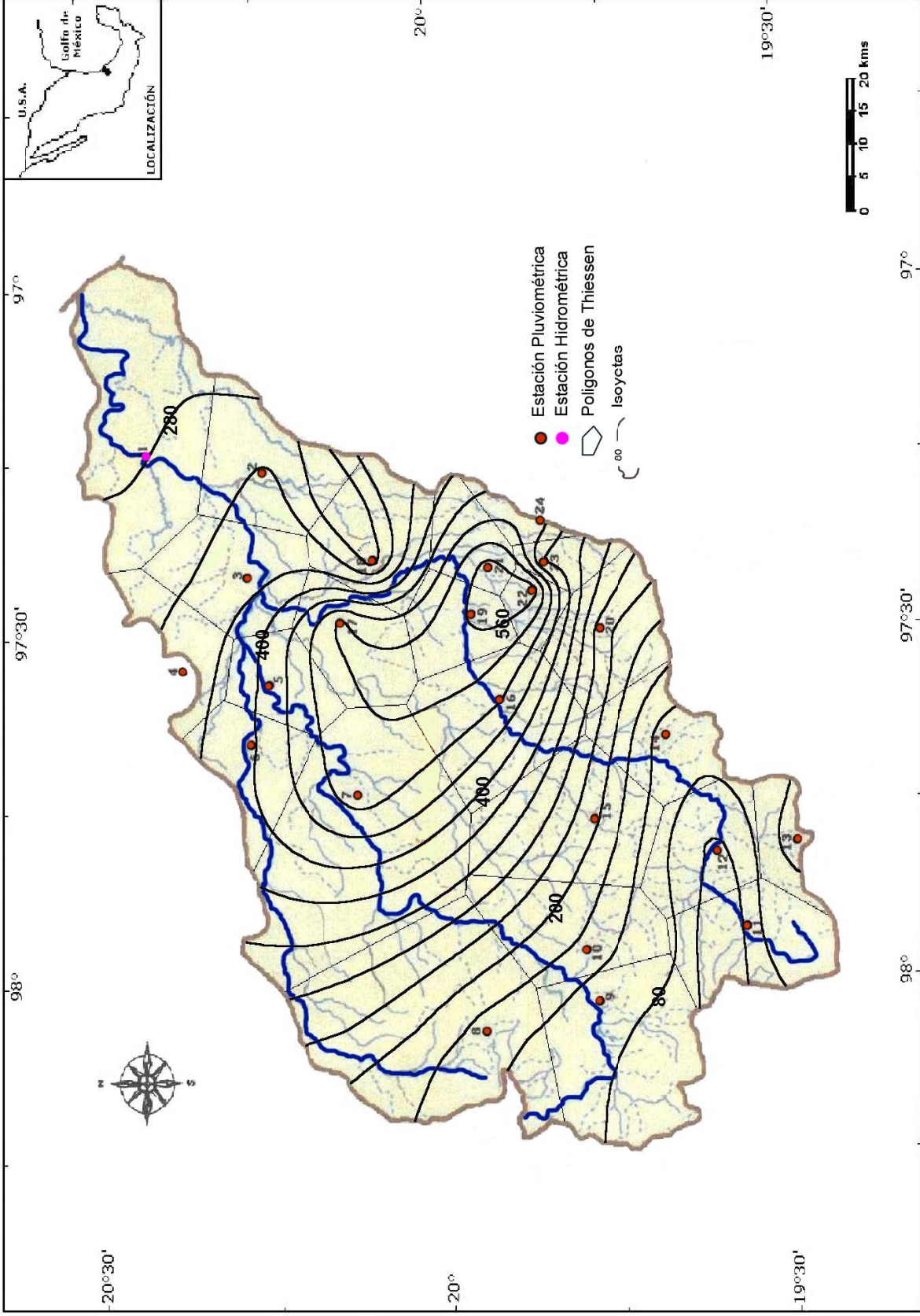
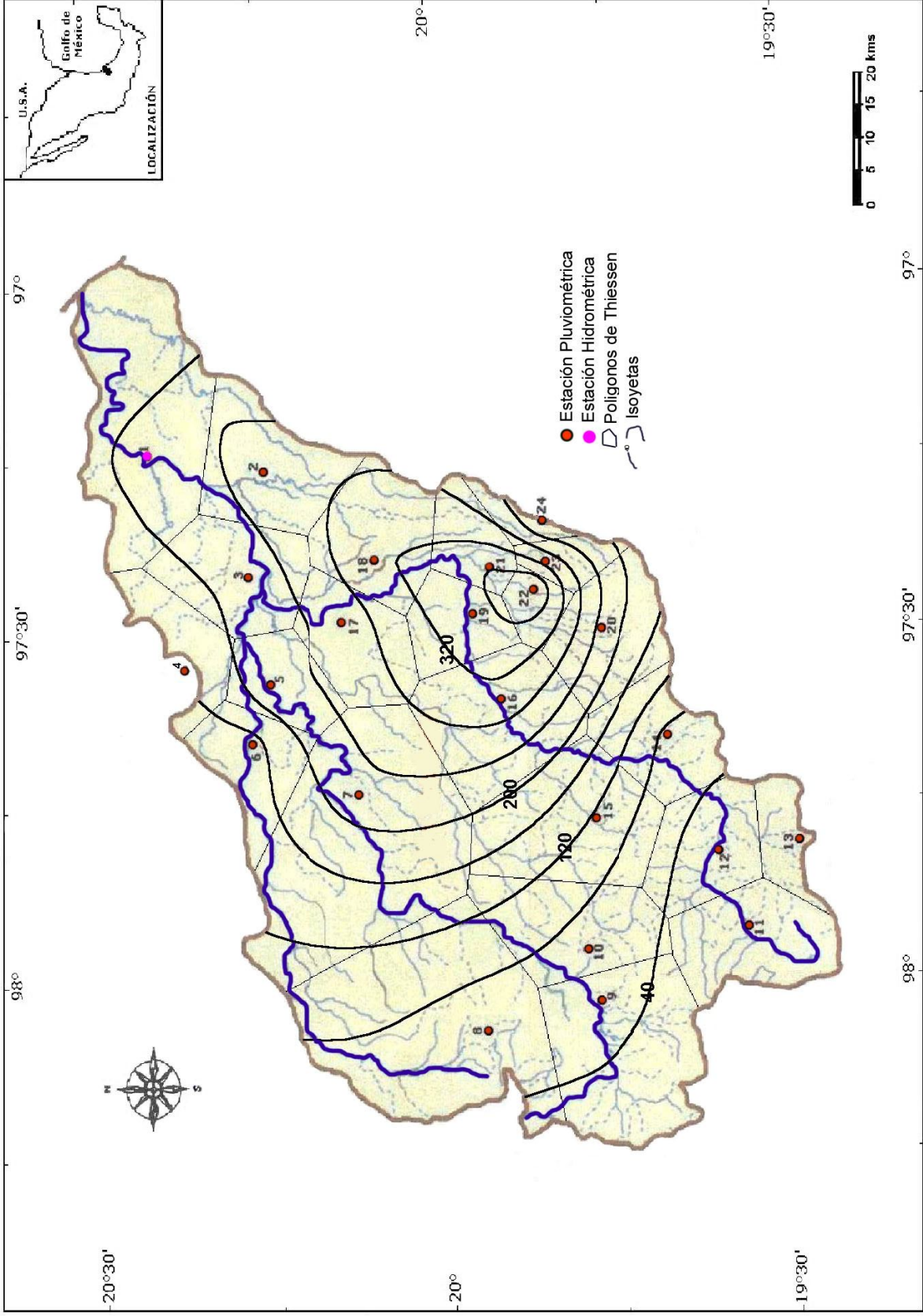


Figura 2.1. Mapa de isoyetas de la precipitación acumulada durante la tormenta ocurrida del 18 al 26 de septiembre de 1974.



**Figura 2.2.** Mapa de isoyetas de la precipitación acumulada durante la tormenta ocurrida del 23 al 28 de agosto de 1981.





**Figura 2.3.** Mapa de isoyetas de la precipitación acumulada durante la tormenta ocurrida del 11 al 14 de noviembre de 1986

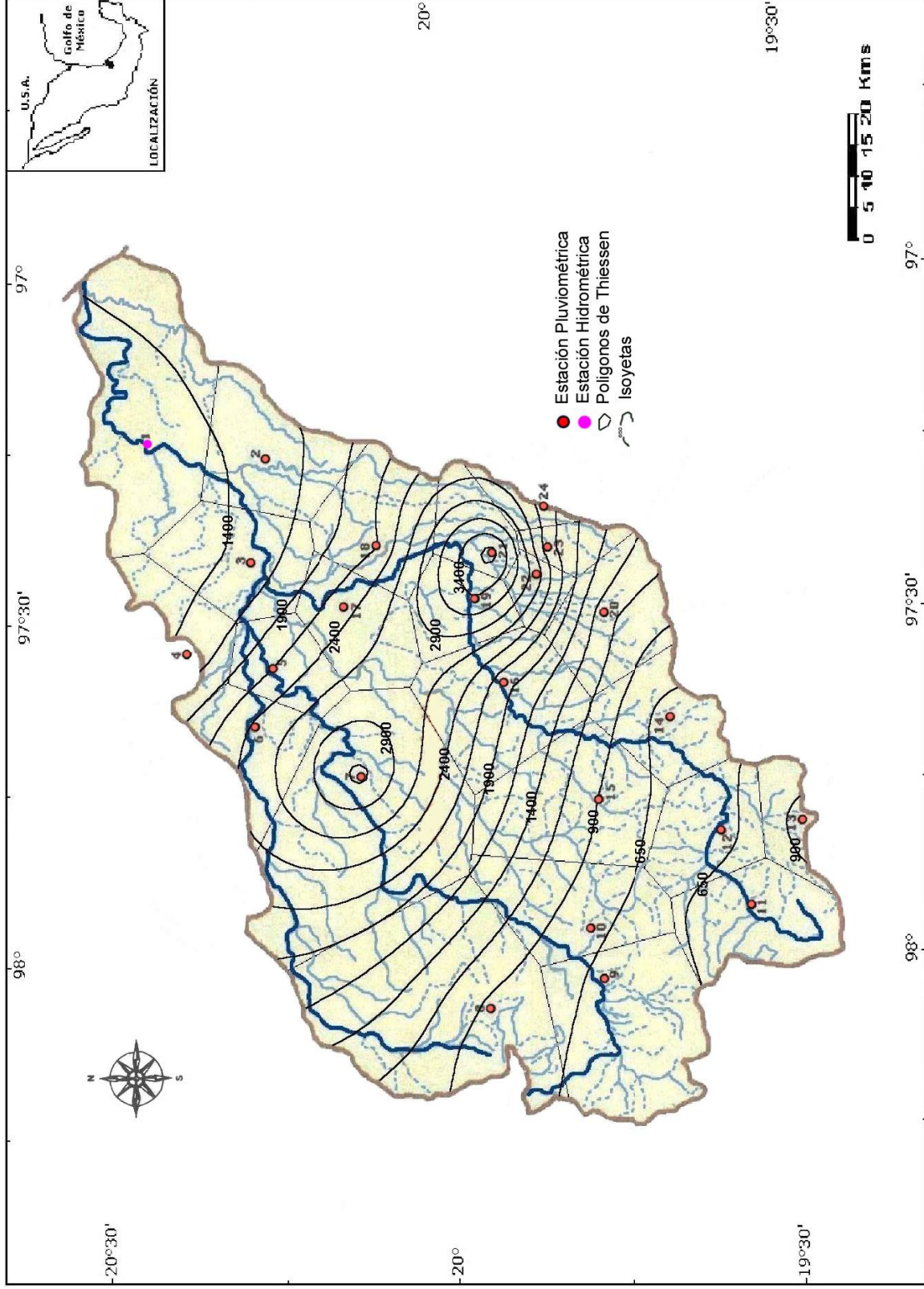


Figura 2.4. Mapa de isoyetas de precipitación media anual, periodo 1960-1990



### 2.1.1.2. Precipitación máxima probable (pmp)

De la información aportada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y CLICOM del Servicio Meteorológico Nacional, se seleccionaron las fechas de las tormentas más desfavorables (lluvias intensas que duran varias horas) que generaron un gasto mayor a 3000 m<sup>3</sup>/s en la estación hidrométrica de El Remolino, para el periodo de 1960 a 1990 (Tabla 2.2). De los resultados de este análisis, se encontró que las tormentas más intensas ocurridas en esta cuenca, se presentaron en los años de 1974, 1981 y 1986.

Para conocer la pmp, que se pueda presentar para un determinado período de retorno (intervalo promedio de tiempo dentro del cual un evento de cierta magnitud puede ser igualado o excedido por lo menos una vez) asignado a una cierta obra hidráulica, se ajustó la función de distribución doble exponencial o Gumbel a las precipitaciones máximas en 24 horas ocurridas en la cuenca para el período comprendido entre 1960 y 1990. La función Gumbel fue elegida entre otras para valores extremos de precipitación, en virtud de haber sido probada por otros autores para precipitaciones máximas en la región (Pereyra, *et. al.*, 1984; Pereyra, 1993), dando resultados ampliamente confiables.

La expresión matemática de la función de distribución doble exponencial o de Gumbel es la siguiente (Springall, 1978):

$$Y(T_m) = \bar{Y} - \frac{S_Y}{\sigma_N} \left\{ \bar{Y}_N + \ln \ln \left( \frac{T_m}{T_m - 1} \right) \right\} \quad (2.4)$$

donde:

$\bar{Y}$  es la media de la muestra de datos

$S_Y$  es la desviación estándar de la muestra de datos

$\bar{Y}_N$  y  $\sigma_N$  son la media y la desviación estándar esperada, en función del tamaño de la muestra (Tabla 2.5)

$T_m$  es el periodo de retorno asignado a la obra

$Y(T_m)$  es el valor de la variable  $Y$ , pronosticado para el periodo de retorno  $T_m$

**Tabla 2.5.** Media  $\bar{Y}_N$  y desviación estándar  $\sigma_N$  esperada en función del tamaño de la muestra.

N	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$	N	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$	N	$\bar{Y}_N$	$\sigma_N$
8	0,48430	0,90430	35	0,54034	1,12847	64	0,55330	1,17930
9	0,49020	0,92880	36	0,54100	1,13130	66	0,55380	1,18140
10	0,49520	0,94970	37	0,54180	1,13390	68	0,55430	1,18340
11	0,49960	0,96760	38	0,54240	1,13630	70	0,55477	1,18536
12	0,50350	0,98330	39	0,54300	1,13880	72	0,55520	1,18730
13	0,50700	0,99720	40	0,54362	1,14132	74	0,55570	1,18900
14	0,51000	1,00950	41	0,54420	1,14360	76	0,55610	1,19060
15	0,51280	1,02057	42	0,54480	1,14580	78	0,55650	1,19230
16	0,51570	1,03160	43	0,54530	1,14800	80	0,55688	1,19382
17	0,51810	1,04110	44	0,54580	1,14990	82	0,55720	1,19530
18	0,52020	1,04930	45	0,54630	1,15185	84	0,55760	1,19670
19	0,52200	1,05660	46	0,54680	1,15380	86	0,55800	1,19800
20	0,52355	1,06283	47	0,54730	1,15570	88	0,55830	1,19940
21	0,52520	1,06960	48	0,54770	1,15740	90	0,55860	1,20073
22	0,52680	1,07540	49	0,54810	1,15900	92	0,55890	1,20200
23	0,52830	1,08110	50	0,54854	1,16066	94	0,55920	1,20320
24	0,52960	1,08640	51	0,54890	1,16230	96	0,55950	1,20440
25	0,53086	1,09145	52	0,54930	1,16380	98	0,55980	1,20550
26	0,53200	1,09610	53	0,54970	1,16530	100	0,56002	1,20649
27	0,53230	1,10040	54	0,55010	1,16670	150	0,56461	1,22534
28	0,53430	1,10470	55	0,55040	1,16810	200	0,56715	1,23598
29	0,53530	1,10860	56	0,55080	1,16960	250	0,56878	1,23292
30	0,53622	1,11238	57	0,55110	1,17080	300	0,56993	1,24786
31	0,53710	1,11590	58	0,55150	1,17210	400	0,57144	1,25450
32	0,53800	1,11930	59	0,55180	1,17340	500	0,57240	1,25880
33	0,53880	1,12260	60	0,55208	1,17467	750	0,57377	1,26506
34	0,53960	1,12550	62	0,55270	1,17700	1000	0,57450	1,26851

Los resultados del pronóstico de la pmp, se muestran en las figuras 2.5, 2.6 y 2.7, así como en la tabla 2.6, donde se puede observar que existe una gran similitud con la forma del mapa de isoyetas medias anuales de la cuenca (Figura 2.4); también se puede apreciar cierta semejanza al analizar las tormentas más desfavorables ocurridas en la región de estudio (Figuras 2.1-2.3). De lo anterior, se puede concluir que las precipitaciones de la cuenca son generalmente de tipo orográfico.

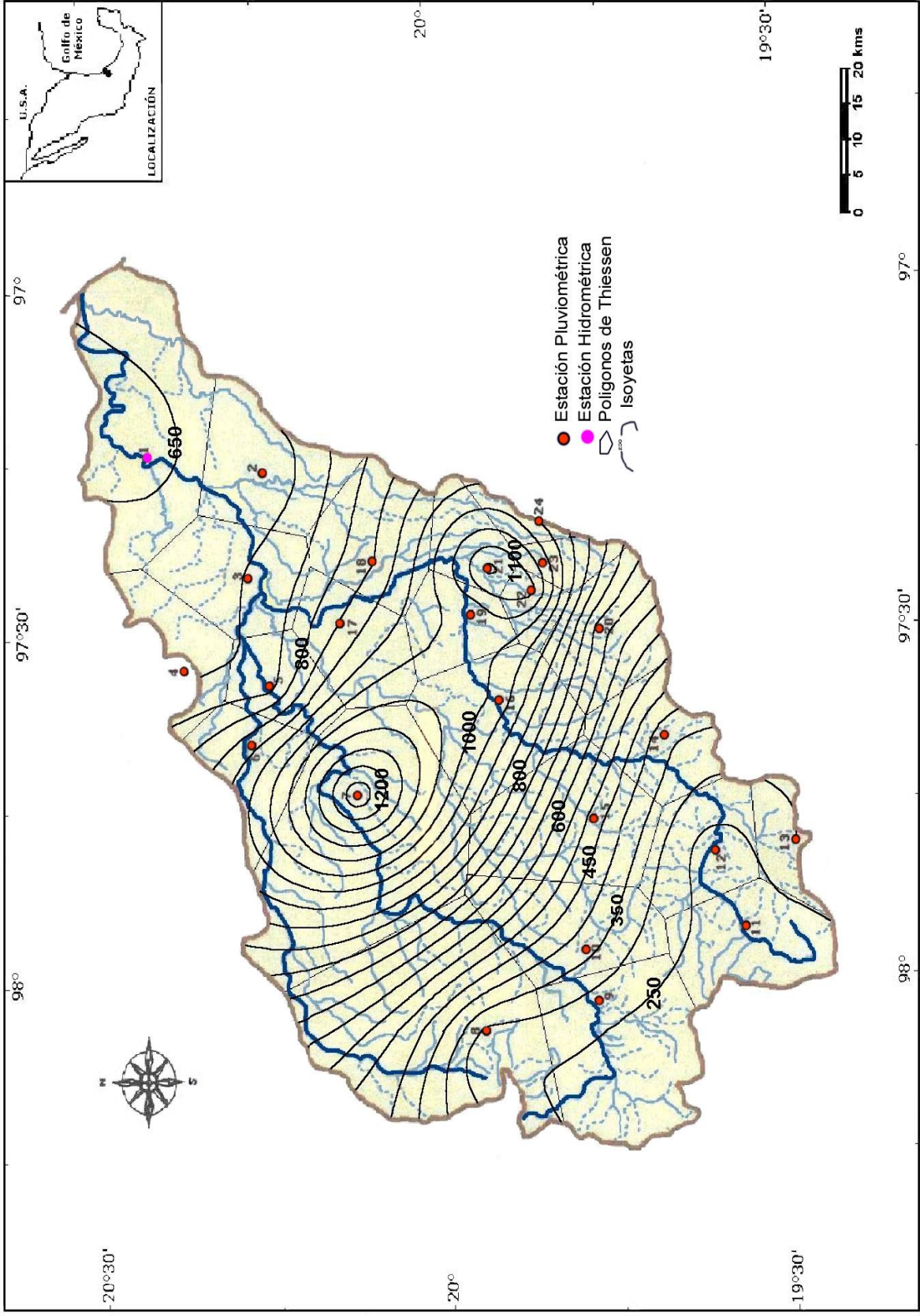


Figura 2.5. Mapa de isoyetas de la tormenta de diseño, para  $T_m = 100$  años

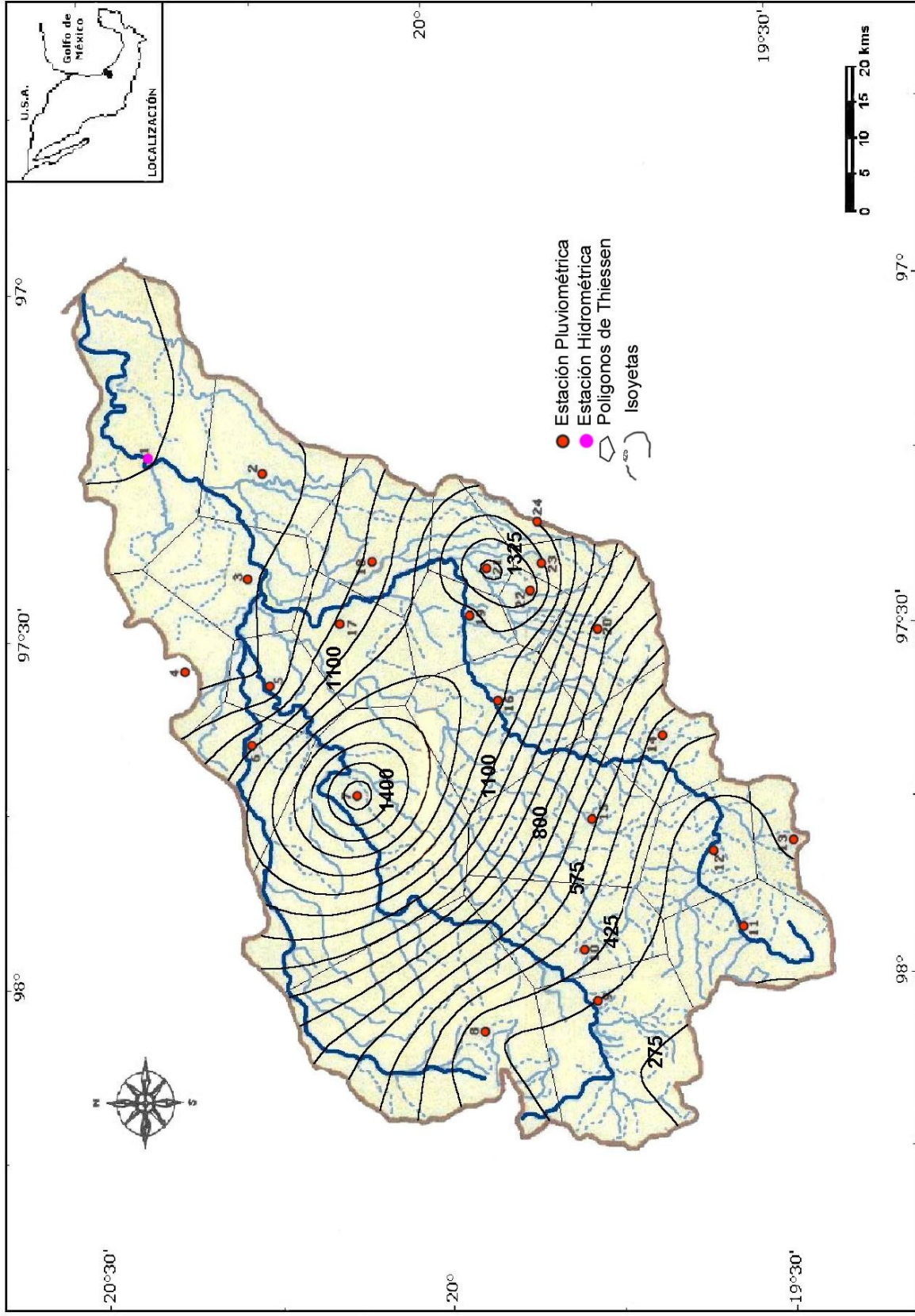


Figura 2.6. Mapa de isoyetas de la tormenta de diseño, para  $T_m = 500$  años



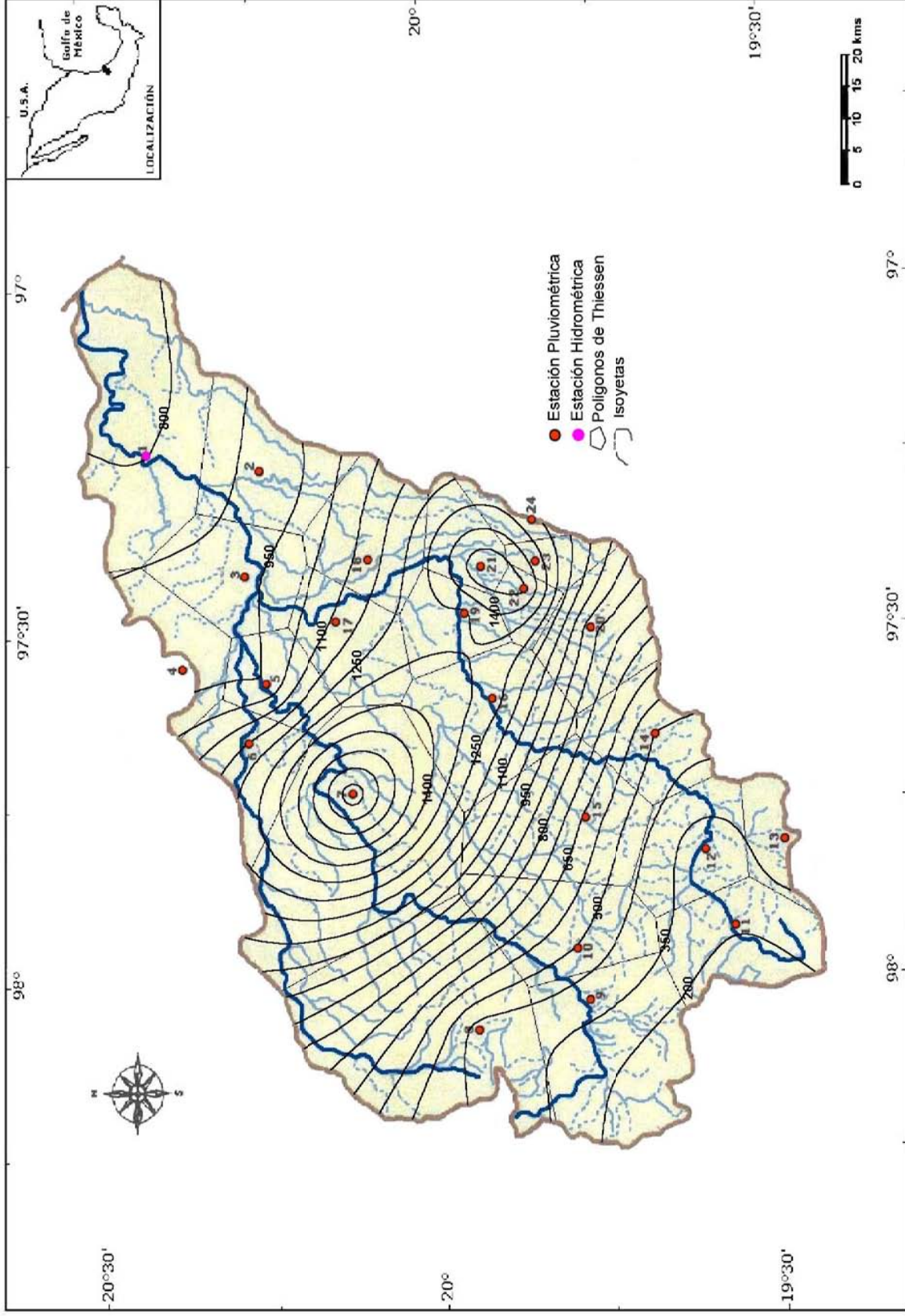


Figura 2.7. Mapa de isoyetas de la tormenta de diseño, para  $T_m = 1000$  años

**Tabla 2.6.** Precipitación media de las tormentas de diseño para un periodo de retorno  $T_m$

$T_m$ en años	100	500	1000
$Y(T_m)$ en mm	669	825.5	892.8

### 2.1.2 Escurrimiento superficial

Para Campos (1998), el estudiar las precipitaciones y conocer su distribución temporal es motivo de interés para diversos fines, por ejemplo meteorológicos y edafológicos, como también hidrológicos, al tiempo de lo cual se pueden proporcionar índices para realizar estudios de crecidas o permitir la alimentación de modelos precipitación-escurrimiento que permitan mejorar la información disponible, para un adecuado diseño y dimensionamiento de las obras civiles. Para esto, es necesario conocer las intensidades de precipitación, para distintos períodos de retorno.

Ahora bien, la disponibilidad de datos de escurrimiento es indispensable para el diseño y planificación de actividades físicas. No obstante, muchas veces no se dispone de registros de escurrimientos, o éstos no tienen la suficiente duración como para hacer los análisis de frecuencia requeridos; debe entonces usarse la información pluviométrica para estimar crecidas de cierta frecuencia.

Es, por lo tanto, muchas veces necesario presentar la información pluviométrica correspondiente a una tormenta o lluvia en formas de intensidades, a partir de los registros de las estaciones pluviométricas en estudio.

Con lo anterior, se debe dejar en claro que son las variaciones en la precipitación las que de inicio controlan el flujo en cualquier sistema hidrológico. Las relaciones entre precipitación y escurrimiento, así como los métodos para distribuir el escurrimiento a través del tiempo, son la base para la predicción eficaz de la operación de proyectos hidráulicos, para la extensión de registros de caudal en ríos con estaciones hidrométricas y para la estimación de caudales en ríos sin estaciones de medida.

Por lo tanto, se puede definir como **escurrimiento** aquella parte de la precipitación que llega a la red fluviométrica de la cuenca y fluye por ella dando lugar a los caudales. Se pueden señalar dos tipos generales de escurrimiento: el primero, llamado **escurrimiento directo**, compuesto únicamente por el escurrimiento superficial, el cual viaja por la superficie y llega a los cursos en poco tiempo y son los causantes de los caudales punta de las avenidas; el segundo, que conforman el **flujo base** a través de los escurrimientos subsuperficiales y subterráneos que alimentan los cauces de una forma lenta, dan como resultado el caudal base que fluye por la red entre aguaceros o en períodos estivales.

Por otro lado, gran parte de la lluvia que cae durante la primera parte de la tormenta se deposita en la cobertura vegetal, a este proceso se le denomina *intercepción*, mientras que otra parte queda en las depresiones del terreno como *almacenamiento superficial*. A medida que la tormenta continúa, se va formando una delgada capa de agua que cubre la superficie del suelo, proceso conocido como *detención superficial*, y en la medida que exista pendiente, el flujo se moverá hacia un canal, río, estero o lago.

El agua retenida en pozas, zanjas y otras depresiones de la superficie del terreno se llama *almacenamiento de depresión*. Tan pronto como la intensidad de la lluvia excede el límite de la capacidad de infiltración, el exceso de lluvia comienza a llenar las depresiones superficiales, proceso que se va repitiendo a lo largo de un gradiente altitudinal y que va generando un flujo de escurrimiento.

Por su parte, la *infiltración* es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra. Aún cuando existe una diferencia con la *percolación*, que es el movimiento del agua dentro del suelo, los dos fenómenos están íntimamente relacionados, puesto que la infiltración no puede continuar libremente sino cuando la percolación ha removido el agua de las capas superiores del suelo. A la razón máxima por la cual puede penetrar agua a un suelo en un sitio en particular y bajo una serie dada de condiciones, se llama *capacidad de infiltración*.

En resumen, el **ciclo de escurrimiento** es el término descriptivo que se aplica a aquella parte del ciclo hidrológico entre la precipitación incidente sobre un área y la descarga subsiguiente de esta agua a través de cauces superficiales, previa infiltración y saturación de un suelo no impermeable.

#### **2.1.2.1. Comportamiento de gastos máximos, mínimos y medios registrados en la cuenca del río Tecolutla**

Cuando en una sección de un río se dispone de un registro de niveles del agua en forma continua (limnigrama) y se tiene además el gráfico elevación-gasto de dicha sección, se puede construir un gráfico que muestre la variación del gasto en el río con respecto al tiempo, este gráfico se conoce como **hidrograma**. El hidrograma en un punto de un río permite conocer la fluctuación del gasto, sus fechas o épocas de ocurrencia, así como, sus magnitudes extremas, sin embargo, su utilidad más importante radica en el cálculo del volumen escurrido en la corriente, en un día, un mes o un año.

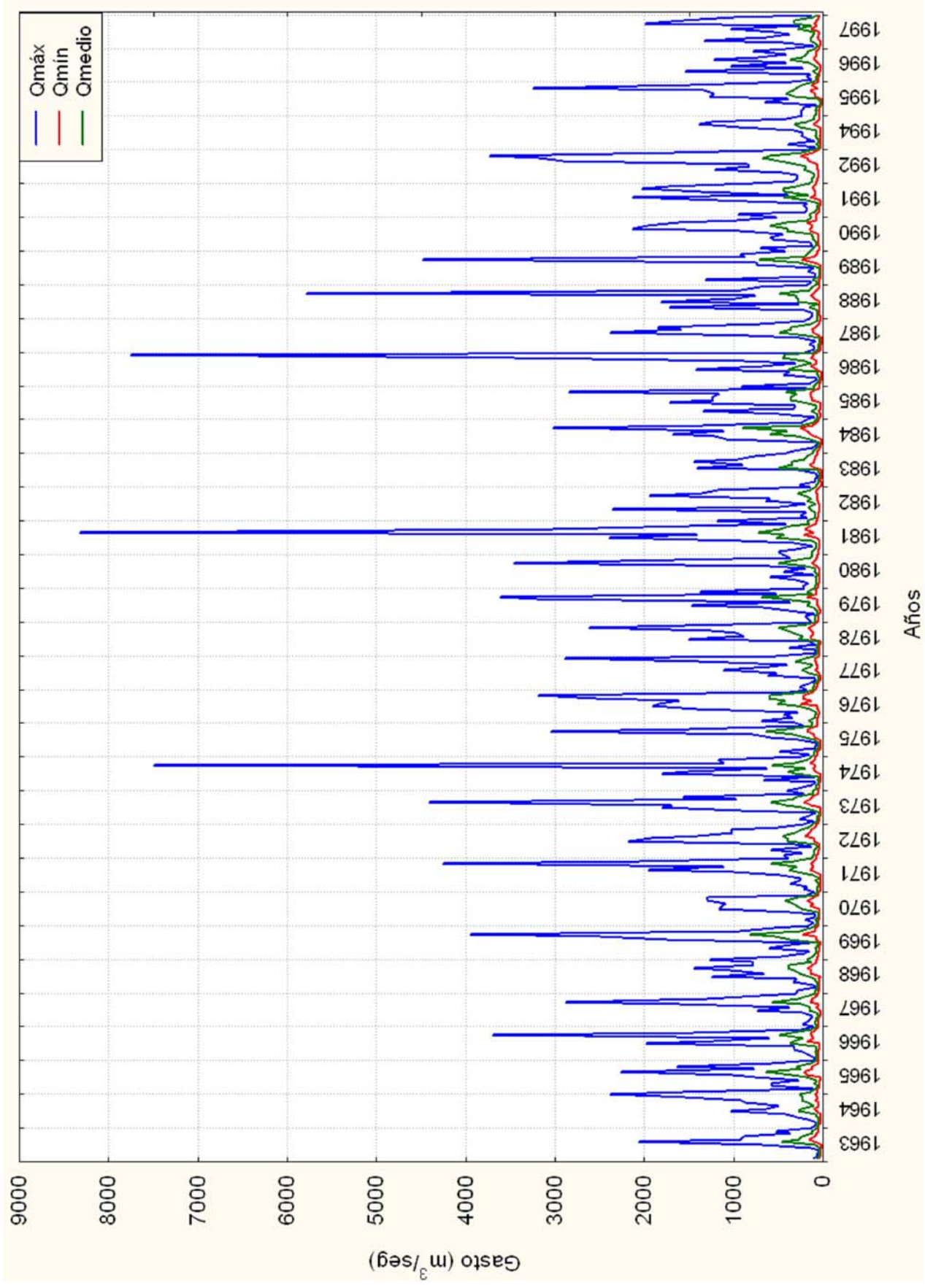
Como el hidrograma de un río relaciona gastos contra tiempo, el área bajo tal gráfica representa el volumen escurrido, ya que el gasto es el volumen que circula en la unidad de tiempo; entonces, cuantificando el área bajo un hidrograma en un cierto intervalo de tiempo, se obtendrá el volumen escurrido por la corriente en dicho lapso.

En el caso particular de la cuenca del río Tecolutla, se solicitó acceso a la información hidrométrica de la estación El Remolino Papantla de la Comisión Federal de Electricidad, localizada cerca de la salida al Golfo de México, que comprende el periodo de registro de 1963 a 1997. El comportamiento de los gastos registrados en dicha estación se muestran en la tabla 2.7 y figura 2.8, donde se puede deducir que las tormentas más intensas y que generaron los gastos más altos, se presentaron en los años de 1974, 1981 y 1986; asimismo, en la columna 7 de la tabla 2.7 se presenta la variabilidad anual del volumen escurrido para dicha cuenca.



**Tabla 2.7.** Gastos máximos, mínimos y medios anuales registrados en la cuenca del río Tecolutla: período 1963-1997

<b>Año</b>	<b>Mes/día</b>	<b>Gasto máximo anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Mes/día</b>	<b>Gasto mínimo anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Gasto medio anual (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Volumen medio anual en Miles de m<sup>3</sup></b>
1963	Jul. 24	2067	Jun. 11	16,9	132	4205625
1964	Dic. 01	2383	May. 12	28,2	151	4793081
1965	Ago. 13	2271	Jun. 14	19,1	198	6302101
1966	Sep. 22	3701	Jun. 06	35,8	195	6164075
1967	Sep. 28	2882	May. 02	26,4	165	5204728
1968	Sep. 12	1452	Jun. 11	25,5	175	5537544
1969	Sep. 07	3952	Jun. 17	25	223	7061633
1970	Sep. 27	1295	May. 31	30,5	171	5414552
1971	Oct. 10	4258	Abr. 28	20	201	6376119
1972	Jun. 13	2188	May. 02	38,5	213	6746416
1973	Ago. 28	4415	Abr. 21	25	200	6357853
1974	Sep. 21	7491	Abr. 13	21,8	201	6342863
1975	Sep. 10	3049	May. 06	26,9	187	5920227
1976	Oct. 17	3188	Abr. 26	41,4	276,5	8773650
1977	Nov. 22	2892	Abr. 09	21,6	138	4355566
1978	Oct. 08	2622	May. 02	28	192,3	6101953
1979	Sep. 09	3621	abr. 17	30	186	5873432
1980	Sep. 26	3467	Jun. 13	34	149	4704215
1981	Ago.28	8321	Abr. 10	33,4	279	8825166
1982	Abr. 11	2360	abr. 05	38,3	140	4421848
1983	Sep. 27	1444	Abr. 05	12,1	168	5332863
1984	Sep. 13	3024	Abr. 11	14,3	253	7997220
1985	Oct. 06	2847	Abr. 07	26,1	190	6034072
1986	Nov. 13	7755	Mar. 18	16,6	190,5	6016153
1987	Jul. 30	2384	Abr. 19	13,9	157	4987540
1988	Sep. 05	5782	May. 23	31	175,1	5527851
1989	Sep. 23	4481	Jun. 06	22,5	166,5	5237725
1990	Ago. 07	2130	Ene. 20	40	226	7141649
1991	Jul. 04	2140	Jun. 04	23,3	213	6720216
1992	Oct. 24	3740	Abr. 13	48,9	272	8617854
1994	Sep. 18	1389	Ene. 18	19,8	115,7	3653175
1995	Oct. 21	3247	May. 17	17,5	171,9	5446566
1996	Abr. 24	1546	Jun. 06	21,1	139	4395513
1997	Sep. 25	1993	Feb. 03	29,3	154,7	4891130



**Figura 2.8.** Comportamiento mensual de los gastos máximos, mínimos y medios de la cuenca del río Tocolutla: período 1963-1997.

### **2.1.2.2. Modelos lluvia-escorrentamiento**

En la práctica es muy frecuente que no se cuente con registros adecuados de escorrentamiento en el sitio de interés, para determinar los parámetros necesarios en el diseño y operación de obras hidráulicas. Por lo general, los registros de precipitación se presentan con mayor frecuencia que los relacionados con el escorrentamiento, y no son afectados por cambios en la cuenca, como son construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por esta razón, es conveniente la utilización de métodos que permitan determinar el escorrentamiento de una cuenca a través de las características de la misma y la precipitación.

Las principales características (parámetros) que intervienen en un proceso de conversión de lluvia a escorrentamiento son las siguientes (Aparicio, 2004):

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

Estos modelos permiten calcular el escorrentamiento a partir de su causa directa, que es la precipitación.

Aún cuando es posible determinar las avenidas de diseño utilizando solamente los registros de escorrentamiento, en ocasiones esto puede conducir a resultados poco confiables (por ejemplo, cuando la muestra de datos es poco representativa, es decir pequeña estadísticamente, o que los gastos no hayan sido evaluados adecuadamente, o a la existencia de obras hidráulicas que almacenan sin las medidas adecuadas el escorrentamiento de los ríos, etc.). La determinación de las avenidas de diseño mediante métodos hidrometeorológicos, en los que se utilizan los modelos lluvia-escorrentamiento, tiene las siguientes ventajas.

- a) Los registros de precipitación son generalmente más antiguos que los de escurrimiento, por lo que los análisis estadísticos de los datos de precipitación resultan más confiables.
- b) Las características de las tormentas prácticamente no son afectadas por las modificaciones antrópicas causadas a la cuenca. Es por eso que el estudio de las tormentas, es conceptualmente más sencillo que el de las avenidas, por lo que se pueden determinar con mayor confianza a partir de los resultados, las condiciones que genera la precipitación máxima probable.

Por las razones expuestas, la tormenta de diseño puede determinarse sin tomar en cuenta las obras que se construyan dentro de la cuenca, aunque posteriormente se deban de considerar los efectos de éstas al determinar las relaciones lluvia-escurrimiento.

- c) Los modelos de lluvia-escurrimiento, permiten conocer la avenida de diseño y no solo el gasto máximo como ocurre con los métodos estadísticos, aplicados al análisis de los registros de escurrimiento.

Según Pereyra (1987), los modelos lluvia-escurrimiento se pueden clasificar en: empíricos, hidrológicos e hidráulicos. A continuación se describen brevemente las principales características de cada uno de ellos.

**Modelos empíricos.** Estos modelos se basan en relaciones empíricas, obtenidas en otros sitios y que relacionan las características más representativas de las tormentas y de los hidrogramas de las avenidas. Por ejemplo, relacionan el gasto máximo o el tiempo de pico del hidrograma con la intensidad media de la tormenta, el área de la cuenca, la pendiente media del cauce, etc. Se recomienda usarlos solamente cuando no sea posible utilizar alguno de los métodos hidrológicos e hidráulicos. En general todos los métodos empíricos se derivan de la “**fórmula racional**” (Chow, 1964). Uno

de los más conocidos en México es el desarrollado por Creager (Aparicio, 2004), que se expresa mediante la siguiente relación.

$$Q = 1.303C_C(0.386A)^\alpha \quad (2.5)$$

donde

$$\alpha = 0.936/A^{0.048}$$

siendo:

A = área de la cuenca en Km<sup>2</sup>.

C<sub>C</sub> = coeficiente de escurrimiento

Q = gasto máximo en m<sup>3</sup>/s.

El coeficiente de escurrimiento C<sub>C</sub> para las distintas regiones de la Republica Mexicana, lo determinó la Secretaría de Recursos Hidráulicos mediante estudios realizados en cada una de las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido el país (S.R.H., 1961). El valor del coeficiente de escurrimiento para la región del río Tecolutla es de 85.

Otro modelo empírico muy utilizado por su simplicidad, es el de Lowry (Aparicio, 2004), el cual se expresa mediante la siguiente relación.

$$q = C_L/(A + 259)^{0.85} \quad (2.6)$$

donde

A = área de la cuenca en Km<sup>2</sup>.

C<sub>L</sub> = coeficiente de escurrimiento

q = gasto máximo por unidad de área en m<sup>3</sup>/s/ Km<sup>2</sup>

El valor del coeficiente C<sub>L</sub> para la cuenca del río Tecolutla es de 2450 (Aparicio, 2004).

Debido a su simpleza, los modelos empíricos tienen gran difusión, pero como se ha mencionado anteriormente pueden conducir a grandes errores, ya que el proceso de escurrimiento es mucho más complejo como para simplificarlo en una fórmula de tipo directo, en la que se involucran el área de la cuenca y el coeficiente de escurrimiento.

Los resultados generados por los modelos empíricos de Creager y Lowry (Aparicio, 2004) para estimar los gastos máximos ( $Q_m$ ), que se pueden presentar en la cuenca del río Tecolutla, se presentan en la tabla 2.8.

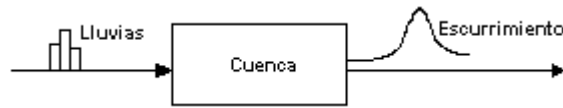
**Tabla 2.8.** Gastos máximos para la cuenca del río Tecolutla, según Creager y Lowry

<b>Modelo</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>C<sub>C</sub> y C<sub>L</sub></b>	<b>Envolvente</b>	<b>Q<sub>m</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>
Creager	7342	85	Regional	14197.3
Creager	7342	100	Mundial	16702.7
Lowry	7342	2450	Regional	9041.5
Lowry	7342	3512	Mundial	12960.7

**Modelos hidráulicos.** El desarrollo de estos modelos tiene un gran soporte en el manejo de la computadora, ya que se permite que se planteen técnicas de simulación del escurrimiento, en las que se puede incorporar un análisis detallado de las diferentes subáreas que componen la cuenca. Los modelos más representativos de esta idea son el de Stanford (Crawford y Linsley, 1966) y el del Departamento de Estudios Geológicos de Estados Unidos, U.S.G.S. (Chow, 1994)). Cabe aclarar que para calibrar estos modelos, se requiere conocer las características de los distintos tipos de suelos, que por lo general componen una cuenca grande.

**Modelos hidrológicos.** Estos modelos se utilizan para simular el fenómeno de transformación lluvia-escurrimiento que ocurre en la cuenca. A diferencia de los modelos empíricos pueden utilizarse con cualquier tipo de lluvia, tomando en cuenta sus variaciones en el tiempo. Para utilizarlos en el pronóstico se recomienda que se les calibre primero para la cuenca de interés, utilizando los datos de lluvia y escurrimiento observados.

Entre estos modelos se encuentran los derivados del concepto de hidrograma unitario, en los que se calcula una función que relaciona las entradas (lluvia) con las salidas (escurrimiento), haciendo caso omiso del fenómeno físico que ocurre en la cuenca como se muestra en la figura 2.9.

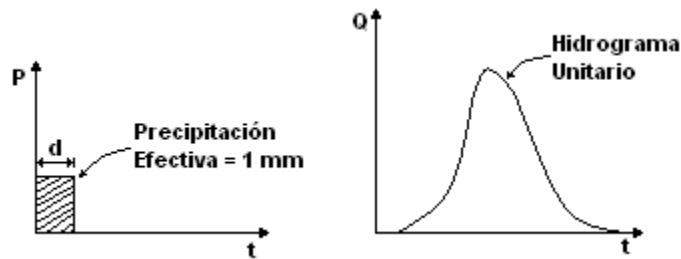


**Figura 2.9.** Aplicación del concepto de sistema a la relación lluvia-escurrimiento

#### 2.1.4. Hidrograma unitario (HU)

Los hidrogramas de escurrimiento directo permiten calcular hidrogramas unitarios que permitirán pronosticar el gasto máximo que se presentará ante una precipitación efectiva. Sin embargo, estos hidrogramas unitarios solamente servirán para calcular hidrogramas de escurrimiento directo cuando la duración de la precipitación efectiva sea igual a la del hidrograma unitario.

Según Chow *et al.*, (1994), consideraron que este hidrograma es la función de respuesta de periodicidad unitaria para un sistema hidrológico lineal. El hidrograma unitario es definido como la gráfica del escurrimiento directo resultante de 1 mm (aunque también puede ser de 1 pulgada, 1 cm, etc.) de lluvia en exceso que se genera, de manera uniforme, sobre un área de drenaje a razón constante durante el transcurso de una duración efectiva de precipitación (Figura 2.10) . El hidrograma unitario fue propuesto por primera vez en 1932 por Sherman, quién clasificó el escurrimiento en superficial y de agua subterránea, para definir el HU solamente del escurrimiento superficial.



**Figura 2.10.** Hidrograma Unitario

El HU es, como ya se mencionó, un modelo lineal simple que permite deducir el hidrograma resultante del exceso de lluvia para cualquier precipitación. Para la implementación de este modelo se hacen los siguientes supuestos (Aparicio 2004):

- a) *Tiempo base constante.* Para una cuenca dada, la duración total del escurrimiento directo o tiempo base es la misma para todas las tormentas con la misma duración de lluvia efectiva, independientemente del volumen total escurrido. Todo hidrograma unitario está ligado a una duración de la lluvia en exceso.
- b) *Linealidad y proporcionalidad.* Las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base, son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo, es decir, al volumen total de lluvia efectiva. Como consecuencia, las ordenadas de dichos hidrogramas son proporcionales entre sí.
- c) *Superposición de causas y efectos.* El hidrograma que resulta de un período de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de períodos lluviosos precedentes.

El HU así deducido sólo servirá para tormentas que tengan la misma duración en exceso. Cuando se necesita determinar el hidrograma del escurrimiento para una tormenta con duración en exceso diferente; el HU disponible deberá ajustarse mediante el método de la curva S (Springall, 1967 y Raudkivi, 1979).

### **2.1.5. Hidrograma unitario instantáneo (HUI)**

Para superar las limitaciones en donde se supone que la intensidad de la lluvia es constante en toda su duración, se han desarrollados métodos que, apoyados en los principios del HU, permiten que si se dispone de información confiable de las variaciones de la intensidad de la lluvia con el tiempo, estas variaciones sean tomadas en cuenta.

Supóngase que en una cuenca dada se dispone de información sobre la precipitación media para intervalos pequeños de tiempo  $\Delta t$  y que se conoce el HU asociado a una tormenta de la misma duración,  $\Delta t$ . De acuerdo con la teoría del HU, si se presentara una tormenta compleja se produciría un hidrograma como el de la figura 2.11 (Aparicio, 2004).



Sea el HU para duración en exceso  $d_e$  mostrado en la figura 2.11. Si se presenta una tormenta como la figura 2.11b, con varios periodos lluviosos, cada uno de ellos de duración en exceso  $d_e$ , entonces de acuerdo con el principio de superposición de causas y efectos, los hidrogramas producidos por cada barra del hietograma serán los mostrados en la figura 2.11c, d y e, y el hidrograma de la tormenta compleja será como el mostrado en la figura 2.11f.

Así, si  $U_i$  es la  $i$ -ésima ordenada del HU (figura. 2.11a) y  $P_j$  es la  $j$ -ésima lluvia del hidrograma (figura 2.11b), las ordenadas  $Q_i$  del hidrograma (figura 2.11f) son, en este caso,

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= P_1U_1 \\
 Q_2 &= P_1U_2 + P_2U_1 \\
 Q_3 &= P_1U_3 + P_2U_2 + P_3U_1 \\
 Q_4 &= \quad \quad P_2U_3 + P_3U_2 \\
 Q_5 &= \quad \quad \quad P_3U_3
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

En general, las  $k$ -ésimas ordenadas del hidrograma,  $Q_k$  es:

$$Q_k = \sum_{j=1}^k P_j U_{k-j+1}
 \tag{2.7a}$$

Considérese el problema inverso, es decir, en el que se conoce el hidrograma (figura 2.11f) y la precipitación (figura 2.11b) y se desea obtener un HU como el de la figura 2.11a.

Naturalmente, el sistema de ecuaciones 2.7 sigue siendo válido; este sistema se puede escribir como:

$$P\{U\}=\{Q\}
 \tag{2.8}$$

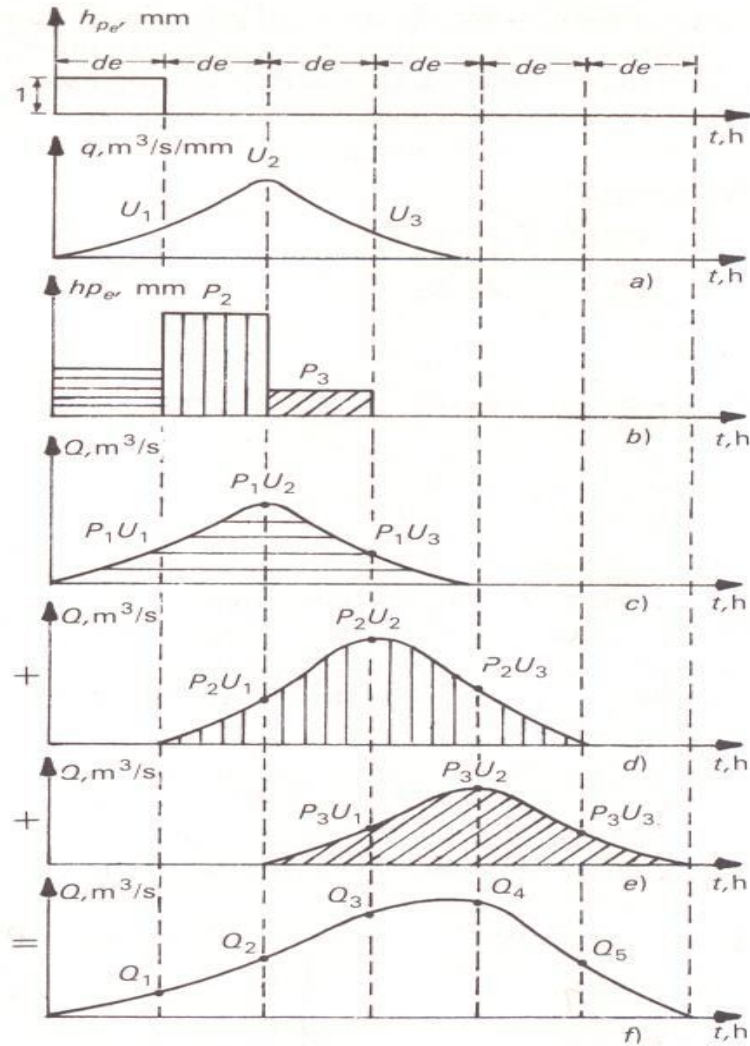


Figura 2.11 (Fuente: Aparicio, 2004)

donde:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 \\ P_2 & P_1 & 0 \\ P_3 & P_2 & P_1 \\ 0 & P_3 & P_2 \\ 0 & 0 & P_3 \end{bmatrix}; \quad \{U\} = \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix}; \quad \{Q\} = \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \end{Bmatrix}$$

La incógnita es entonces el vector  $\{U\}$ . Sin embargo, en el sistema 2.7 se tendrían cinco ecuaciones con tres incógnitas, por lo que el sistema es indeterminado y no existen valores de  $\{U\}$  que satisfagan simultáneamente las cinco ecuaciones. Así,

para tener una solución del sistema 2.8 es necesario aceptar un cierto error en cada uno de los componentes de  $\{U\}$ ; naturalmente, es deseable que dicho error sea el mínimo posible. Se puede demostrar que se comete el mínimo error en los valores de  $\{U\}$  si la ecuación 2.8 se multiplica por la matriz transpuesta de P:

$$P^T P\{U\} = P^T \{Q\} \quad (2.9)$$

Lo que en este caso resultaría:

$$\begin{bmatrix} P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 & P_1P_2 + P_2P_3 & P_1P_3 \\ P_1P_2 + P_2P_3 & P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 & P_1P_2 + P_2P_3 \\ P_1P_3 & P_1P_2 + P_2P_3 & P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 \end{bmatrix} x \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1Q_1 + P_2Q_2 + P_3Q_3 \\ P_1Q_2 + P_2Q_3 + P_3Q_4 \\ P_1Q_3 + P_2Q_4 + P_3Q_5 \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

El sistema 2.10 es ya un sistema determinado, con una solución única. Esta solución proporciona el valor del vector  $\{U\}$  buscado. Nótese que el caso del HUI, siempre debe especificarse la duración en exceso, que es la duración de las barras del hietograma de la figura 2.11b. Sin embargo, en contraposición con el HU tradicional, en el instantáneo se tiene una mayor flexibilidad en el manejo de esta duración en exceso, pudiéndose reducir tanto como se desee.

Asimismo, en todos los casos el número de ordenadas del hidrograma final  $N_Q$  está ligado con el número de barras del hietograma  $N_P$  y al número de ordenadas del HU  $N_u$  por medio de la ecuación:

$$N_Q = N_P + N_u - 1 \quad (2.11)$$

Con esta ecuación es posible saber de antemano el número de ordenadas que tendrá el HU y, por lo tanto, el orden de la matriz de coeficientes del sistema de ecuaciones.

También conviene hacer notar que, bajo ciertas circunstancias, la solución de un sistema como el 2.10 produce en algunas ocasiones ordenadas negativas del HU. Aunque existen procedimientos de optimización que evitan este tipo de problemas,

desde el punto de vista práctico podría ser suficiente obligar a que dichas ordenadas sean nulas, corrigiendo en consecuencia el volumen del HU pero respetando el valor del pico (Aparicio, 2004).

Este modelo es de los que requiere una mayor cantidad de datos, así como, registros continuos de escurrimiento y de precipitación de la cuenca en estudio, pero tiene la ventaja respecto a otros métodos que no permiten conocer el hidrograma de la avenida así como el gasto máximo.

Para aplicar este modelo a la cuenca del río Tecolutla, se requiere procesar los datos de lluvia y escurrimiento como se indica a continuación (**análisis de la información**):

1) Una vez seleccionadas las estaciones climatológicas y pluviométricas (tabla 2.1), así como, las tormentas severas en base a los gastos máximos (tabla 2.2), se trazaron los polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada pluviómetro, con la ayuda de un planímetro digital.

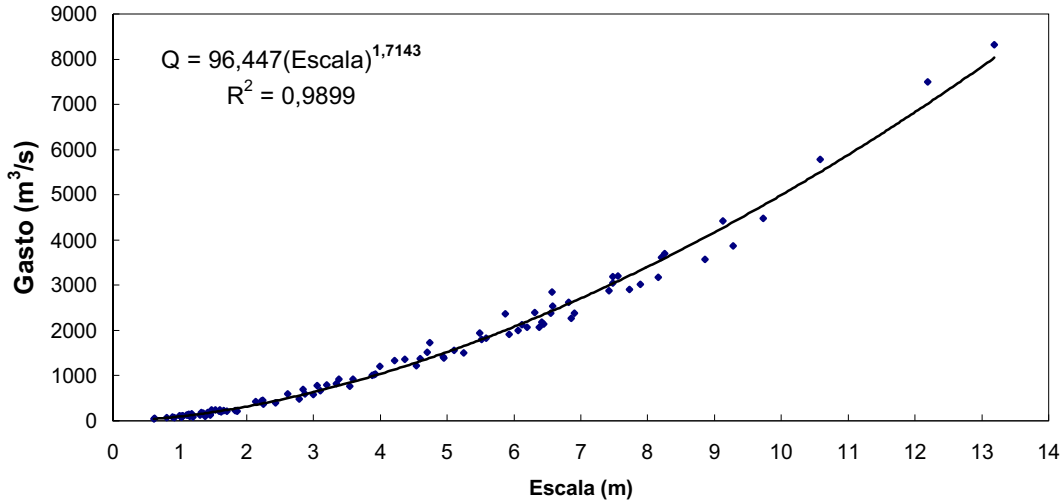
2) Se construyen los hietogramas de cada una de las tormentas seleccionadas como severas, aplicando la técnica de los Polígonos de Thiessen (apéndice A).

3) Construcción de la curva elevación-gasto (ecuación 2.12): Una curva elevación-gasto relaciona la elevación de la superficie libre del agua con el gasto que pasa por una sección de un río, y se construye con datos obtenidos de varios aforos. En general la sección de aforos del río no es una sección de control, por lo que la relación tirantes-gastos no es única. Se acostumbra ajustar los puntos medidos a una curva media que tiene por lo general una ecuación de la forma,

$$Q = C(Scala)^n \quad (2.12)$$

donde *Scala* es la elevación del tirante en metros y *C* y *n* son constantes que se determinan por regresión lineal (Aparicio, 2004).

Para el caso de la cuenca del río Tecolutla, después de haber revisado los boletines hidrométricos de la estación hidrométrica El Remolino (CFE) para el período 1960-1999, se obtuvo una curva elevación-gasto como la mostrada en la figura 2.12.



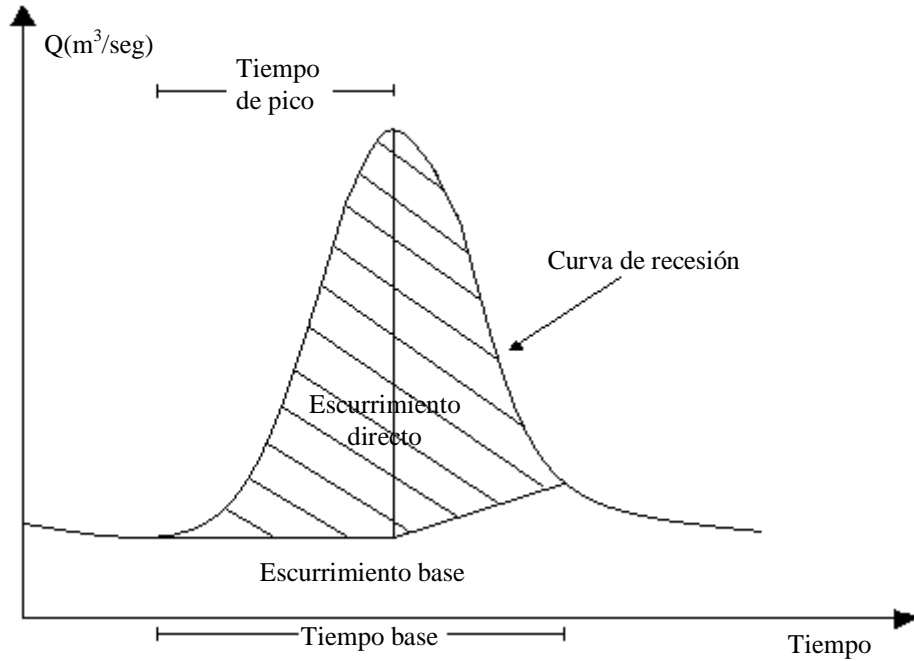
**Figura 2.12.** Curva elevación-gasto para la cuenca del Río Tecolutla.

4) Se elaboran los hidrogramas de escurrimiento de cada una de las tormentas elegidas como severas, a partir de los limnogramas (gráficas de niveles) generados por el limnigrafo de la estación El Remolino y de la curva elevación-gasto para la cuenca del río Tecolutla (apéndice A).

5) Separación del escurrimiento directo del base: para separar el escurrimiento directo del hidrograma de las tormentas de un solo pico se puede aplicar las siguientes técnicas (Raudkivi, 1979).

- Se traza una línea recta horizontal a partir del punto de levantamiento del hidrograma, que es inmediatamente después de iniciada una tormenta, hasta interceptar la curva de vaciado.
- O se trazan dos líneas rectas, una horizontal a partir del punto de levantamiento hasta el tiempo que ocurre el pico del hidrograma y otra línea desde éste punto hasta el punto de mayor curvatura de vaciado (figura 2.13).

Ninguno de los casos anteriores de separación es exacto; sin embargo se puede aceptar un error en la posición del final del escurrimiento directo, de una o dos veces la duración de la tormenta, pues el área bajo esta parte del hidrograma es, en general un pequeño porcentaje del volumen total escurrido (Raudkivi, 1979).



**Figura 2.13.** Hidrograma aislado.

6) Se calcula el volumen de escurrimiento directo con la ayuda de un planímetro digital o utilizando la ecuación:

$$V_{ed} = \Delta t \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.13)$$

donde  $V_{ed}$  es el volumen de escurrimiento directo en  $m^3$ ,  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en segundos;  $Q_i$  es el gasto de escurrimiento directo en el  $i$ -ésimo intervalo de tiempo en  $m^3/s$ . Para este estudio se utilizó la técnica del planímetro digital.

7) Se obtiene la altura de la lámina de escurrimiento directo  $L_e$  como:

$$L_e = (0.001) \frac{V_{ed}}{A_c} \quad (2.14)$$

donde  $L_e$  es la lámina de escurrimiento directo en mm, y  $A_c$  el área de la cuenca en  $km^2$  (Tabla 2.9).

**Tabla 2.9.** Parámetros de las tormentas registradas en el período 1960-1990, para la cuenca del río Tecolutla

No. de tormenta	Año	Gasto máximo (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>ed</sub> (m <sup>3</sup> )	Volumen de escurrimiento base (m <sup>3</sup> )	L <sub>e</sub> (mm)	Φ (mm/día)
1	1969	3952	544.596x10 <sup>6</sup>	726.128x10 <sup>6</sup>	74.18	13.573
2	1971	4258	391.68x10 <sup>6</sup>	268.8x10 <sup>6</sup>	53.35	38.575
3	1973	4415	263.75x10 <sup>6</sup>	242.65x10 <sup>6</sup>	35.92	34.29
4	1974	7491	727.56x10 <sup>6</sup>	414.305x10 <sup>3</sup>	99.1	77.2
5	1975	3049	496.483x10 <sup>6</sup>	545.857x10 <sup>6</sup>	67.62	34.227
6	1976	3188	174.62x10 <sup>6</sup>	114.17x10 <sup>6</sup>	23.78	52.52
7	1979	3198	257.842x10 <sup>6</sup>	181.038x10 <sup>6</sup>	35.19	51.81
8	1979	3621	373.61x10 <sup>6</sup>	326.91x10 <sup>6</sup>	50.89	10.95
9	1980	3467	395.624x10 <sup>6</sup>	302.536x10 <sup>6</sup>	53.89	38.237
10	1981	8321	966.28x10 <sup>6</sup>	352.41x10 <sup>6</sup>	131.61	32.173
11	1981	3031	197.5x10 <sup>6</sup>	197.5x10 <sup>6</sup>	26.9	34.55
12	1984	3024	354.996x10 <sup>6</sup>	286.488x10 <sup>6</sup>	48.35	27.975
13	1986	3447	235.08x10 <sup>6</sup>	172.39x10 <sup>6</sup>	32.02	17.58
14	1986	7755	488.891x10 <sup>6</sup>	121.013x10 <sup>6</sup>	66.59	31.985
15	1988	5782	388.397x10 <sup>6</sup>	269.903x10 <sup>6</sup>	52.9	27.7
16	1989	4481	285.272x10 <sup>6</sup>	296.244x10 <sup>6</sup>	38.855	43.545

8) Obtención del índice de infiltración  $\Phi$ . Este índice se calcula trazando una línea horizontal en el hietograma de la tormenta, de tal manera que la suma de las alturas de precipitación que quede por arriba de esa línea sea igual a  $L_e$ , por lo tanto, la altura de la línea horizontal sobre el hietograma representará a  $\Phi$ . El índice de infiltración que se considerará representativo de la cuenca del Tecolutla, será el promedio de los índices de infiltración de las tormentas seleccionadas en esta investigación (Tabla 2.9), siendo  $\bar{\phi} = 35.21$  mm/día.

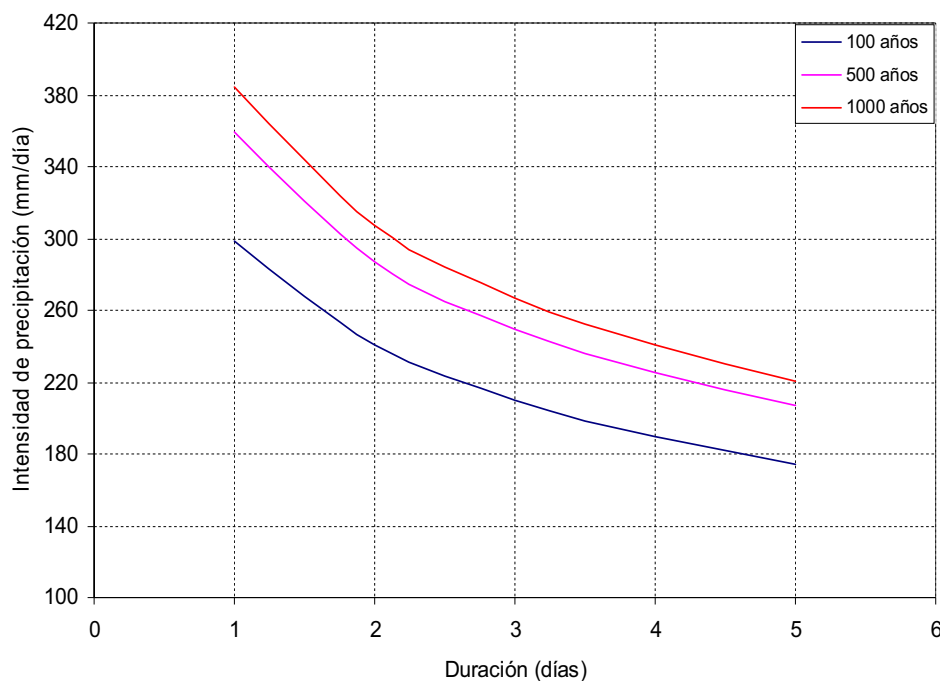
9) Elaboración de los hietogramas de precipitación efectiva (Apéndice B). Los hietogramas de precipitación efectiva se obtienen restando el índice de infiltración de cada tormenta, al hietograma de precipitación total.

### 2.1.6. Avenida de diseño aplicando el modelo del HUI

Para pronosticar la avenida de diseño, se aplicó el modelo hidrometeorológico denominado hidrograma unitario instantáneo (HUI) y se siguieron los pasos que a continuación se indican:

a) Obtención de las curvas intensidad-duración-periodo de retorno IDT. Campos (1998), define las curvas intensidad-duración-frecuencia como la relación que existe entre la intensidad de precipitación media y la frecuencia de ocurrencia (inverso del período de retorno); estas curvas son herramienta ampliamente utilizadas en ingeniería civil para fines de planeación, diseño y operación de proyectos hidráulicos, así como, para la protección de obras de ingeniería contra avenidas máximas.

Para la cuenca del río Tecolutla se construyeron las curvas IDT, con base en las precipitaciones máximas pronosticadas por el modelo de Gumbel, ajustado a los máximos anuales de precipitación observados en cada una de las estaciones consideradas en el estudio (Ecuación 2.4; Figura 2.14).



**Figura 2.14.** Curvas IDT para la cuenca del río Tecolutla.

b) Elaboración del hidrograma unitario. Del análisis de los hidrogramas de las 16 tormentas más desfavorables y que generaron las avenidas más grandes registradas sobre la cuenca del río Tecolutla (Apéndice A), se consideró la tormenta del 23 al 28 de agosto de 1981 como la más representativa para pronosticar una avenida de diseño cuya duración en exceso fue de 4 días (Tabla 2.10 y Apéndice B).



**Tabla 2.10.** Coordenadas del hietograma e hidrograma para la tormenta de agosto de 1981

Tiempo (días)	Precipitación (mm)	Escorrentamiento Directo (m <sup>3</sup> /s)	Precipitación Efectiva (mm)
23	11.5	0	0
24	37.2	0	5
25	61.3	200	29.1
26	75.5	1150	43.3
27	86.3	2550	54.1
28	22.7	7953	0
29	0	2050	0
30	0	900	0
31	0	480	0

Las columnas 3 y 4 de la tabla 2.10, muestran que  $N_Q=7$ ,  $N_P=4$  y  $N_U=4$ . Reemplazando estos valores en la ecuación 2.7a, se obtiene el sistema de ecuaciones 2.15.

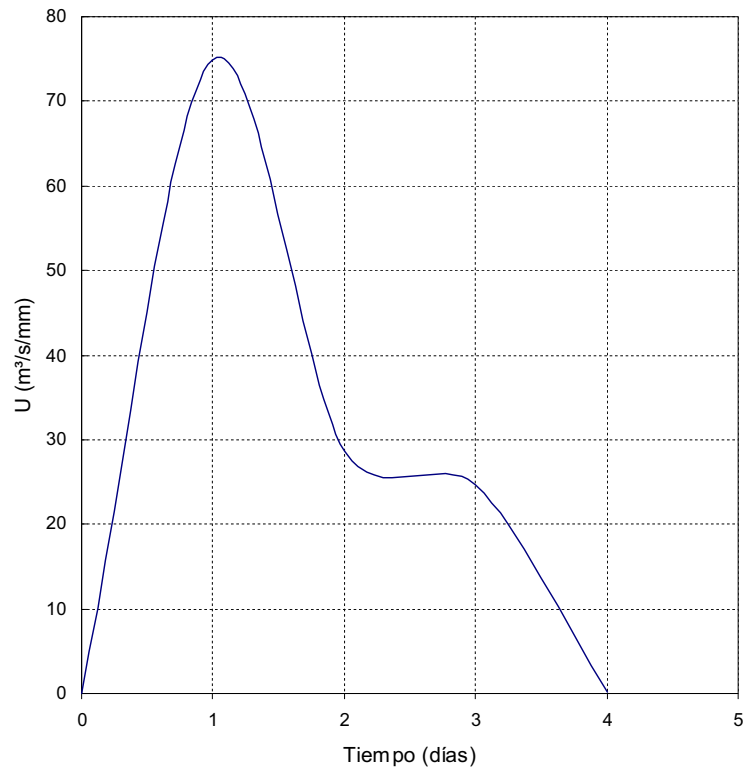
$$\begin{aligned}
 5631U_1 + 3714U_2 + 1781U_3 + 270U_4 &= 573462 \\
 3714U_1 + 5631U_2 + 3714U_3 + 1781U_4 &= 532379 \\
 1781U_1 + 3714U_2 + 5631U_3 + 3714U_4 &= 380137 \\
 270U_1 + 1781U_2 + 3714U_3 + 5631U_4 &= 163835
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

La solución del sistema 2.15 es  $U_1=74.94$ ,  $U_2=28.72$ ,  $U_3=24.69$  y  $U_4=0.14$ , las cuales representan las ordenadas del hidrograma unitario de la cuenca del río Tecolutla (Figura 2.15).

**c) Período de retorno.** Para escoger el período de retorno que se le asignó a la tormenta de diseño, se aplicó la siguiente expresión matemática (Springall, 1967):

$$p = 1 - (1-1/T_m)^n \quad ; \quad T_m > 1
 \tag{2.16}$$

donde



**Figura 2.15.** Hidrograma unitario de la tormenta de agosto de 1981.

$n$  = es la vida útil de una obra hidráulica, en años.

$P$  = probabilidad de que ocurra esa tormenta igual o una mayor, durante la vida útil de la obra.

$T_m$  = período de retorno de la tormenta, en años.

Si se desarrolla la ecuación (2.16) en forma binomial y se considera que  $T_m \gg 1$ , se obtiene (Pereyra *et al.*, 1984),

$$T_m = n/p \quad (2.17)$$

Considerando por ejemplo la vida útil de una obra de 50 años (Hernández, 1988) y una probabilidad de que se presente la tormenta de 0.5, 0.1 y 0.05, sustituyendo estos valores en la ecuación (2.17), se obtiene una tormenta de diseño con períodos de retorno de 100, 500 y 1000 años respectivamente.

**d)** Con base en la duración de las tormentas consideradas como severas en este trabajo, se supuso una duración de 5 días para la tormenta de diseño, considerando que las precipitaciones más intensas ocurren durante este período.

**e)** Con los períodos de retorno obtenidos en c) y la duración supuesta en d), se calculó la altura de precipitación diaria de la cuenca en base a las curvas IDT (Figura 2.14 y Apéndice C).

**f)** Con los datos del inciso anterior se obtuvieron los hietogramas de las tormentas de diseño (Apéndice C).

**g)** Con los datos de los hietogramas obtenidos en el paso anterior y con el índice de infiltración media,  $\bar{\phi}$ , obtenido en el inciso 8), se obtuvo la lluvia en exceso para periodos de retorno de 100 años de 695.75 mm, 500 años de 856.55 mm y 1000 años de 925.75 mm respectivamente, con una duración en exceso de 5 días para las tormentas de diseño (Apéndice C): para obtener la altura de precipitación en exceso, se restó el índice de infiltración media para la cuenca del Tecolutla a cada barra del hietograma de diseño y se sumaron los resultados.

**h)** Para conocer la avenida de diseño, para cada uno de los periodos de retorno seleccionados, se multiplicaron las ordenadas del hidrograma unitario por las alturas de la precipitación en exceso (Apéndice D). De las avenidas de diseño mostradas en el apéndice D, se observa que los gastos máximos pronosticados son de 26280.1 m<sup>3</sup>/s, 32649.8 m<sup>3</sup>/s y 35243.1 m<sup>3</sup>/s para los períodos de retorno de 100, 500 y 1000 años respectivamente. Estos gastos son aproximadamente cuatro veces más grandes que los que se han presentado en la estación hidrométrica de El Remolino, lo cual hace parecer que sea un poco exagerado el cálculo del diseño, pero no es así, si se toma en cuenta que la pendiente de la cuenca es grande, lo cual hace que el pico del hidrograma sea muy alto y por lo tanto se tenga un gasto máximo muy grande. Tomando en cuenta el área de captación hasta la salida al mar y la precipitación en exceso, para cada una de las tormentas de diseño, el volumen que llegaría al cauce principal sería de aproximadamente, 6098.8x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 7553.83x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> y 9052.08x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> respectivamente.

## 2.2. Hidrología Subterránea

Uno de los recursos más valiosos es el agua que tenemos bajo nuestros pies, algo que no podemos ver y posiblemente tampoco sabemos que se encuentra ahí. El agua subterránea se acumula en capas de tierra, arena y rocas conocidos como acuíferos. La velocidad a la que el agua se mueve depende del tamaño de los espacios en las capas y de la conexión entre éstos. Los acuíferos consisten típicamente de gravilla, arena, arenilla y piedra caliza. Estos materiales son permeables porque tienen poros grandes que permiten que el agua fluya con mayor rapidez (Figura 2.16).

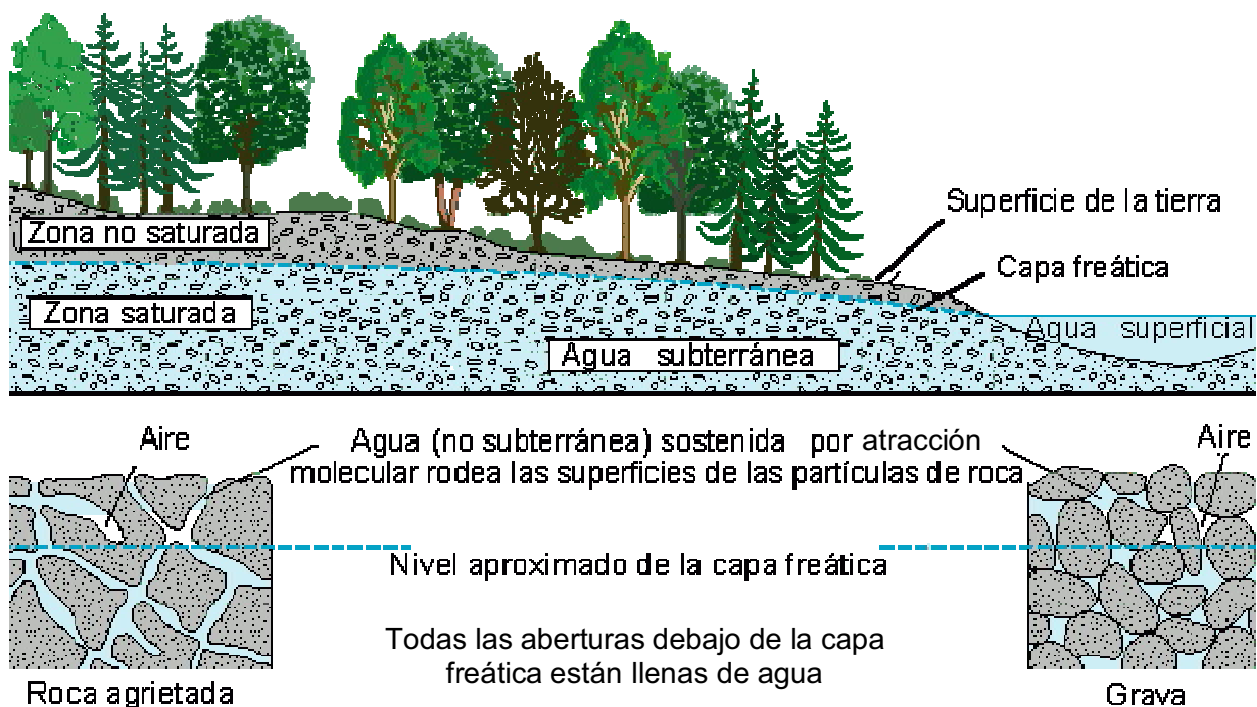


Figura 2.16. Agua subterránea (Fuente: <http://www.fortunecity.com>).

El agua subterránea llega a la superficie de forma natural por medio de manantiales, lagos y arroyos. El agua subterránea se puede extraer a través de un pozo que se conecta al acuífero; un pozo es una tubería que se conecta al acuífero y se llena con el agua subterránea y ésta se puede extraer por medio de una bomba. Los pozos que están a poca profundidad se pueden secar si el nivel freático está por debajo de los pozos. Los acuíferos o suministros de agua pueden recargarse o volverse a llenar por medio de la lluvia y en otros casos cuando se derrite la nieve. En algunas partes

del mundo hay problemas por falta de agua porque el agua subterránea se utilizó más rápido de lo que se recargó naturalmente; en otros lugares el agua no se puede usar porque se contaminó como resultado de actividades del ser humano (Chow *et al.*, 1994).

Cabe mencionar que la mayor parte de la literatura sobre agua subterránea y medio ambiente en su sentido amplio, trata sobre aspectos tecnológicos para reducir la contaminación del suelo y subsuelo, así como, para realizar acciones para remediar la calidad del agua subterránea y acuíferos cuando han sido contaminados; también describen los efectos de la consolidación del suelo y discuten aspectos inherentes a la recarga. Sin embargo, una identificación de la relación entre agua subterránea y las otras componentes del ciclo hidrológico no se establece con claridad (Chow *et al.*, 1994).

### **2.2.1. Agua subterránea en México**

México tiene una superficie de aproximadamente 2,000,000 km<sup>2</sup> y una población del orden de 100 millones de habitantes. La ubicación de la población y de los principales polos de desarrollo industrial están inversamente relacionados con la disponibilidad del agua. El clima en la parte norte de México es árida a semi-árida, y es en esta zona donde se encuentran las ciudades más grandes del país, así como, las principales concentraciones de actividad industrial y agrícola. Sin embargo, esta región apenas cuenta con menos de la tercera parte de los recursos hidráulicos del país. Por lo tanto, el agua subterránea juega un papel esencial en la economía de México, ya que para dos terceras partes de México, el agua subterránea es la principal fuente, y en ocasiones la única fuente de agua (Marín, 2002).

La Comisión Nacional del Agua<sup>6</sup> ha identificado 653 acuíferos en el Territorio Nacional. Aproximadamente 200 de estos acuíferos han sido sujeto de uno o más estudios, y los volúmenes disponibles para 188 acuíferos han sido publicados en el Diario Oficial de la Federación. Esto quiere decir que dos terceras partes de los

---

<sup>6</sup> <http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>; Consulta realizada en 2005

acuíferos de México no han sido cartografiados, y en los cuales no se conoce su geometría, volumen de agua disponible, y otra información básica. El agua subterránea proporciona el 70% del agua potable de los mexicanos, la tercera parte de la superficie bajo riego y el 50% de la industria (Marín, 2002).

El mayor uso del agua subterránea ocurre en las zonas áridas y semiáridas del centro, norte y noroeste de México, donde el balance extracción-recarga es negativo y refleja las condiciones de sobreexplotación en numerosos acuíferos. Este hecho amenaza la sustentabilidad de las actividades económicas apoyadas en estas fuentes de abastecimiento, ya que no sólo se agota el recurso sino que en algunas se ha afectado la calidad del agua y se encarece su aprovechamiento.

## **2.2.2. Agua subterránea en la Región Golfo Centro de CNA<sup>7, 8</sup>**

Según CNA (2002), se tienen identificados 21 acuíferos en la región, los cuales tienen una recarga media anual en conjunto de cerca de 3615 millones de m<sup>3</sup>. Localmente existen dos acuíferos sobreexplotados y los acuíferos costera de Veracruz y costera de Coatzacoalcos que presentan problemas de intrusión salina (Tabla 2.11).

**Acuífero Tecolutla**, ocupa una superficie de 540 km<sup>2</sup>. Es un acuífero libre, ubicando su área principal de explotación entre Gutiérrez Zamora y Tecolutla. Es alargado y está alojado en material areno-arcilloso del terciario-cuaternario. Presenta barreras laterales impermeables y su espesor es irregular, del orden de los 20 m, el cual va reduciéndose conforme se acerca a la línea costera, tiene una dirección del flujo subterráneo hacia el este.

La extracción es de 3.17 Mm<sup>3</sup>/año, mientras que su recarga es de 14.75 Mm<sup>3</sup>/año siendo ésta por la infiltración de lluvia y por el río Tecolutla. En este acuífero existen 108 pozos de los cuales 97 son para uso público-urbano, 8 para uso industrial, uno

---

<sup>7</sup>[http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Estadisticas/Central/Cap\\_3\\_EAM2005.pdf](http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Estadisticas/Central/Cap_3_EAM2005.pdf); Consulta realizada en 2005

<sup>8</sup> <http://www.csva.gob.mx/biblioteca/estudiosProyectos/terminados/ProgHPre/Cap4.pdf>; Consulta realizada en 2005

para uso agrícola y dos para otros usos; los caudales van desde 0.03 Mm<sup>3</sup>/año en uso agrícola hasta 2.74 Mm<sup>3</sup>/año en uso público-urbano, mientras que en otros usos se extraen 0.39 Mm<sup>3</sup>/año; el uso que se le da al agua es para servicios hoteleros principalmente, con aprovechamientos en su mayoría del tipo de noria. El caudal específico por pozo es de 3.0 l/s.

**Tabla 2.11.** Balance de Agua subterránea en la Región Golfo Centro de la CNA.

Consejo de Cuenca	Subregión	Nombre del Acuífero	Recarga (millones de m <sup>3</sup> /año)	Condición Geohidrológica
Tuxpan-Jamapa	Norte	Álamo-Tuxpan	45	Subexplotado
		Poza Rica	4	Subexplotado
		Tecolutla	15	Subexplotado
		Mtz. De la Torre-Nautla	73	Subexplotado
		Perote-Zalayeta	47	Subexplotado
	Centro	Valle de Actopan	400	Subexplotado
		Costera de Veracruz	508	Subexplotado
		Cotlaxca	163	Subexplotado
		Orizaba-Córdoba	110	Subexplotado
		Jalapa-Coatepec	S/D	Sobreexplotado
Papaloapan	La Cañada	Valle de Tehuacán	392	Subexplotado
		Cuautitlán	6	Sobreexplotado
	Bajo Papaloapan	Omealca-Huixcolotla	50	Subexplotado
		Costera de Papaloapan	180	Subexplotado
		Sierra de San Andrés Tuxtla	59	Subexplotado
		Los Naranjos	1102	Subexplotado
		Tuxtepec	92	Subexplotado
Cuenca Río Papaloapan	129	Subexplotado		
Coatzacoalcos	Coatzacoalcos	Soteapan-Hueyapan	24	Subexplotado
		Costera de Coatzacoalcos	172	Subexplotado
		Coatzacoalcos	54	Subexplotado
<b>Regional</b>			<b>3615</b>	

### III. LAS INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO TECOLUTLA

Dentro de la diversidad de calamidades, las de origen hidrometeorológico son las que más daños han acumulado a través del tiempo por su incidencia periódica en áreas determinadas del territorio nacional. Este tipo de fenómenos destructivos comprende: ciclones tropicales, **inundaciones**, nevadas, granizadas, sequías, lluvias torrenciales, temperaturas extremas, tormentas eléctricas, mareas de tempestad, etc.

Se considera **inundación** al flujo o a la invasión de agua por exceso de escurrimientos superficiales o por acumulación en terrenos planos, ocasionada por falta o insuficiencia de drenaje tanto natural como artificial (Figura 3.1). Las inundaciones generalmente son consecuencia directa de otros fenómenos hidrometeorológicos y, en ocasiones, son inducidas con fines técnicos y de beneficio económico-social: por ejemplo, desde el punto de vista técnico, las extracciones de



**Figura 3.1.** Población de Gutiérrez Zamora durante la inundación que se presentó en el mes de junio del año 2005, ocasionada por el desbordamiento del río Tecolutla.



control que se realizan a las presas de almacenamiento cuando presentan niveles extraordinarios, con el objeto de mantener la seguridad de la cortina y obras conexas (CENAPRED, 2001).

En cuanto a la parte de beneficio económico-social, la inundación inducida en áreas no productivas se realiza para evitar o disminuir los daños en centros de alto desarrollo urbano-industrial o agropecuario y también con el fin de recargar los depósitos de agua subterráneos. En general, la magnitud de una inundación provocada por calamidades de origen hidrometeorológico, depende de la intensidad de las lluvias, de su distribución en el espacio y tiempo, del tamaño de las cuencas hidrológicas afectadas, así como de las características del suelo y del drenaje natural o artificial de las mismas.

Las inundaciones pueden clasificarse por su origen en pluviales, fluviales y lacustres. Las pluviales se deben a la acumulación de la precipitación (lluvia, granizo y nieve, principalmente), que se concentra en terrenos de topografía plana (Figura 3.2) o en



**Figura 3.2.** Área inundada, ocurrida en la parte baja de la cuenca del río Tecolutla en el mes de octubre de 1999.

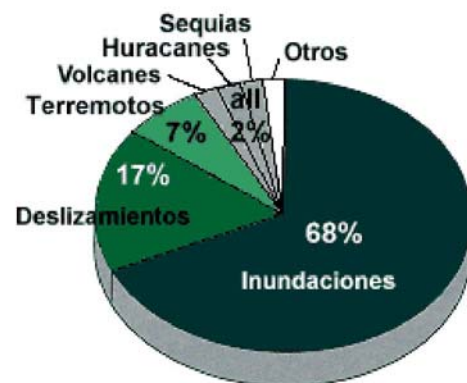
zonas urbanas con insuficiencia o carencia de drenaje. Las fluviales son aquellas que se originan cuando los escurrimientos superficiales son mayores a la capacidad de conducción de los cauces (Figura 3.1). Las lacustres se originan en los lagos o lagunas por el incremento de sus niveles y son peligrosas por el riesgo que representan para los asentamientos humanos cercanos a las áreas de embalse como se muestra en la figura 3.3.



**Figura 3.3.** Área inundada por el incremento del nivel de agua de una laguna en el Puerto de Veracruz, en el mes de junio de 2005.

### 3.1 Análisis del registro histórico de las inundaciones en la cuenca del río Tecolutla

De acuerdo con bases de datos recopilados por el CENAPRED (2001), las inundaciones constituyen los desastres naturales más frecuentes de México y Centroamérica. De los aproximadamente 850 eventos desastrosos registrados entre 1960 y 1995 en la región, más de dos tercios (68%) fueron causados por inundaciones (Figura 3.4).



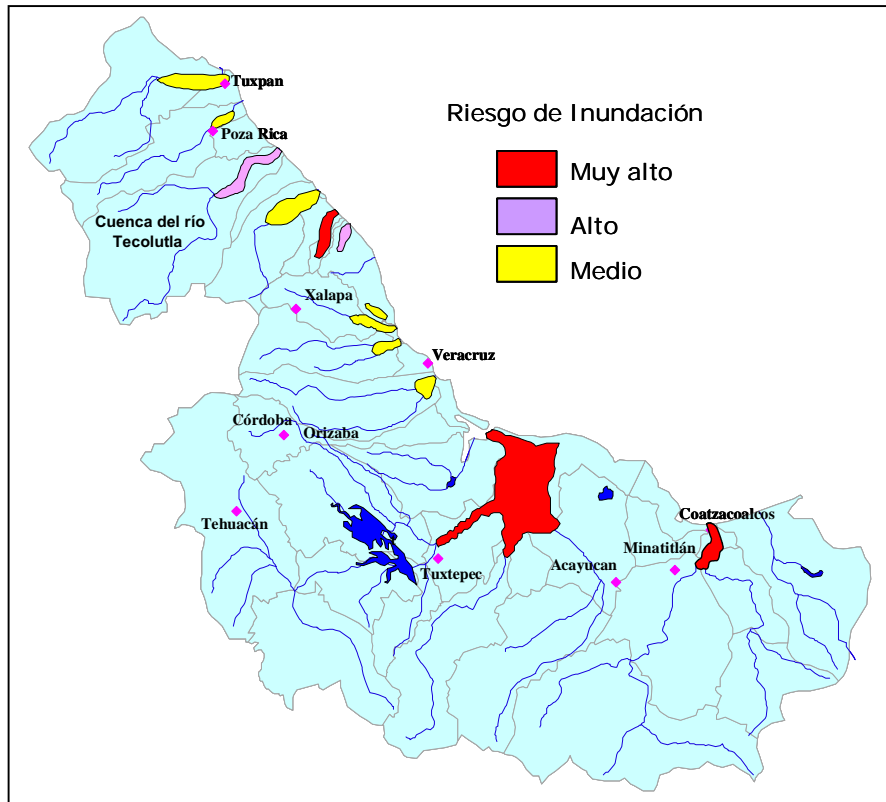
**Figura 3.4.**

Los daños producidos por inundaciones tienen inmensos costos sociales, económicos y ambientales. Si bien es muy difícil eliminarlos totalmente, es posible minimizarlos mediante programas, proyectos y actividades que apunten a reducir la vulnerabilidad de la infraestructura económica y social.

Zonas inundables de la Región Administrativa Golfo Centro de la CNA: Las áreas expuestas a inundación ante la presencia de huracanes, ondas tropicales, frentes fríos y lluvias torrenciales, las representan las cuencas bajas de los ríos: Tuxpan, Cazones, **Tecolutla**, Nautla, Misantla, Actopan, La Antigua, Jamapa, Papaloapan, Blanco, Coatzacoalcos y Tonalá (Figuras 3.5 y 3.6). Las principales localidades afectadas e inundadas son: Idolos, Mozomboa, La Antigua, Tlacotalpan, Cosamaloapan, Chacaltianguis, Tlacojalpan, Tuxpan, Cazones, Poza Rica, **Gutiérrez Zamora**, **Tecolutla**, Martínez de la Torre, San Rafael, Nautla, Misantla, Minatitlán, Agua Dulce, Las Choapas, Nanchital y Mundo Nuevo, principalmente.



**Figura 3.5.** Fenómenos hidrometeorológicos extremos que han impactado en los últimos años las costas del Golfo de México (Fuente: CONAGUA, 2001).



**Figura 3.6.** Zonas inundables de la Región Golfo Centro (Fuente: CONAGUA, 2001).

Fenómenos hidrometeorológicos extremos: En lo que respecta a la ubicación geográfica de la cuenca del río Tecoatl en las vertientes del Golfo de México, en promedio ocurren 10 eventos ciclónicos al año (huracanes, ondas tropicales, tormentas tropicales, frentes fríos y Nortes) y cada dos o tres años uno causa severos daños. Las lluvias intensas que estos fenómenos originan pueden causar **inundaciones** y deslaves no sólo en la zona costera sino también en la parte media y alta de dicha cuenca como se indica en la Tabla 3.1; según CONAGUA (2001), la frecuencia con que se presenta un huracán con riesgos de inundación en la región de estudio, es de uno en cuatro años con impactos en las zonas urbanas.



**Tabla 3.1.** Inundaciones relevantes registradas en la cuenca del río Tecolutla durante el período 1943-2005 (Fuente: CENAPRED).

MES-AÑO	EVENTO	REGIÓN AFECTADA	CONSECUENCIAS
Septiembre 4-6 de 1955	Huracán Gladys	Martínez de la Torre-Gutiérrez-Zamora-Tecolutla	Inundaciones parciales, con pérdidas materiales menores
Septiembre 30 de 1985	Lluvias Torrenciales	Papantla- Gutiérrez Zamora-Tecolutla-Nautla	Inundaciones parciales, con pérdidas materiales menores
Septiembre 14-17 de 1988	Huracán Gilberto	Gutiérrez Zamora-Tecolutla	Inundaciones parciales, con pérdidas materiales menores
Septiembre 17-21 de 1993	Huracán Gert	Sierra Norte de Puebla- Martínez de la Torre-Gutiérrez Zamora-Tecolutla	Inundaciones graves, con pérdidas materiales y humanas
Octubre 8-20 de 1995	Huracán Roxanne	Misantla- Martínez de la Torre-Gutiérrez Zamora-Tecolutla	Inundaciones graves, con pérdidas materiales
Octubre 1-7 de 1999	Depresión Tropical 11 y Frente Frío 4	Sierra Norte de Puebla-Papantla- Martínez de la Torre-Gutiérrez Zamora-Tecolutla	Inundaciones graves, deslizamiento de laderas, deslaves, con pérdidas materiales y humanas
Octubre 6 y 7 de 2000	Huracán Keith y Frente Frío 4	Gutiérrez Zamora-Tecolutla	Inundaciones aisladas sin pérdida de alguna índole
Septiembre 26-29 de 2003	Lluvias Torrenciales y Frente Frío 6	Martínez de la Torre-Gutiérrez Zamora-Tecolutla	Inundaciones parciales, con pérdidas materiales menores
Octubre 2-5 de 2005	Huracán Stan y Depresión Tropical 20	Sierra Norte de Puebla-Papantla- Martínez de la Torre-Gutiérrez Zamora-Tecolutla	Inundaciones graves, deslizamiento de laderas, deslaves, con pérdidas materiales y humanas

### 3.1.1 Causas generadoras de las inundaciones

Lluvias intensas: En períodos de lluvias intensas, regularmente se presenta el fenómeno de saturación de las corrientes naturales de agua, que exceden su cauce normal de conducción, afectando centros de población y áreas de producción. Esto se deriva principalmente de la baja capacidad de los ríos ante flujos extraordinarios, aunados a deficiencia de drenaje, saturación del suelo y acumulación de desperdicios, que disminuyen la capacidad hidráulica de los cauces. Este tipo de eventos se presenta regularmente en la parte media y alta de la cuenca del río Tecolutla, centrándose en el período lluvioso que comprende los meses de junio a octubre.

Ciclones tropicales: Las fuertes y abundantes precipitaciones que provocan los ciclones tropicales, la marea de tempestad ocasionada por los fuertes vientos que soplan hacia tierra, y la diferencia de presión atmosférica entre el huracán y los alrededores, genera grandes olas que inundan las costas y en consecuencia la parte baja y media de la cuenca del río Tecolutla.

Tormentas puntuales: Este tipo de precipitaciones comúnmente llamadas trombas, tornados, chubascos, etcétera, cubren áreas de entre 5 y 10 km de diámetro y se presentan acompañadas de descargas eléctricas, intensos vientos y, en ocasiones, de granizo.

Granizo: El granizo consiste en la lluvia helada que cae con fuerza en forma de granos y provoca taponamiento de las redes de alcantarillado, impidiendo el desalojo de las aguas en las zonas urbanas. En las áreas agrícolas destruye parcial o totalmente las cosechas y altera sus ciclos. También causa daños, por impacto y acumulación en edificaciones.

Nieve: Este fenómeno, que se registra en pocas zonas del país, se considera como agente de inundación debido a que, con el deshielo, ocasiona escurrimientos que se acumulan y alteran el desarrollo de las actividades.

Presas: Los ríos de la República Mexicana y las presas consideradas con mayor grado de riesgo, juegan un papel determinante en la ocurrencia de inundaciones. Una presa se considera riesgosa cuando aguas abajo de la misma, se localizan conglomerados de población, como lo es el caso de la presa La Soledad localizada en la parte media de la cuenca del Tecolutla; o bien, centros de elevada actividad industrial o áreas con un alto índice de productividad agrícola y/o explotación diversa. En la actualidad, las presas ya no son un muro o dique construido a través de un río con objeto de regular su caudal o almacenar agua, sino que se consideran como sistemas hidráulicos vitales para la población y para las actividades agrícolas y ganaderas circundantes. No obstante, una presa puede conformar un peligro para los sistemas existentes en su entorno, ya sea por la capacidad limitada de

almacenamiento ante la presencia de grandes avenidas de agua, por fallas estructurales, de diseño u operacionales propias. Lo anterior resulta de gran relevancia dado que, a lo largo y ancho del territorio nacional, fluye un número considerable de ríos y arroyos, en cuyos cauces y desembocaduras se ha construido infraestructura para el almacenamiento, uso y control de las aguas. En muchos casos, en las riberas y zonas bajas de las presas, existen asentamientos humanos, desarrollos agrícolas, ganaderos e industriales.

### **3.1.2 Daños causados por inundaciones**

Directos: Consisten principalmente en un deterioro físico de las propiedades y de la producción. Las actividades y bienes que en mayor medida pueden ser afectados por este tipo de daños son: la agricultura, la ganadería, la silvicultura, la industria, el comercio, las obras públicas y las edificaciones.

Indirectos: Son las pérdidas económicas de los productos y servicios de una región derivadas de la interrupción temporal de las actividades agropecuarias, forestales, industriales y de comercio. También se incluye dentro de este concepto, el gasto que se destina para la ayuda a los damnificados.

Intangibles: Dentro de este concepto se engloban los damnificados, los heridos y las pérdidas de vidas humanas.

### **3.1.3 Factores que favorecen la ocurrencia de una inundación**

- Lluvias en los meses más lluviosos comprendidos entre mayo y octubre, prolongándose en muchas ocasiones hasta el mes de noviembre.
- Alteración del cauce de los ríos (erosión, actividades humanas, etc.), disminuyendo su capacidad de conducción de las aguas.
- Avalanchas, deslizamientos, etc.

### **3.2 Consecuencias de la ocurrencia de la avenida máxima probable**

La ocurrencia de una avenida máxima probable, puede producir inundaciones de diferentes tipos, a saber:

- 1) Desbordes de ríos en zonas de llanura y litoral.
- 2) Desbordes de ríos en zonas montañosas.
- 3) Lluvias intensas en zonas de desagües inexistentes o insuficientes.
- 4) Inundaciones por sudestadas (viento con lluvia persistente que proviene del sudeste, del lado del mar).

### **3.3 Medidas que se llevan a cabo cuando hay inundaciones**

Dado que las inundaciones constituyen el fenómeno natural que más comúnmente se presenta en el territorio nacional, es de particular importancia estar preparados para enfrentar y responder adecuadamente ante una inundación.

#### **Antes de una posible inundación**

1. Identificar los lugares más altos de la región, que no puedan ser inundados, así como las rutas de acceso a los refugios temporales.
2. Tener a la mano un botiquín de primeros auxilios, lámpara de mano, radio portátil y las baterías respectivas.
3. Guardar los documentos personales (cartilla del servicio militar nacional, certificado de estudios, acta de nacimiento, etc.) en una bolsa de plástico, para evitar su pérdida o destrucción.
4. Tener a la mano un directorio con teléfonos de emergencia.
5. Evitar dejar solos a los niños, personas enfermas o con capacidades diferentes durante la época de lluvias. Si se hace, informarle a algún vecino.
6. En la temporada de lluvias mantener una reserva de agua potable, alimentos enlatados y ropa en lugares bien resguardados.
7. Si se vive en zonas bajas, casa de palma, carrizo o adobe, es preferible refugiarse en lugares más seguros, como la escuela, la iglesia o el palacio municipal (si están fuera de peligro).



8. Permanecer bien informado por las autoridades y los medios de comunicación.
9. Cuando se nos avise de que una inundación puede afectar la zona donde vivimos, desconectar los servicios de electricidad y gas.
10. Si la evacuación de la zona es necesaria ¡Prepárese y háganlo!. Lleve consigo sólo lo indispensable.

### **Durante cualquier inundación**

1. Conservar la calma e informarnos constantemente a través de un radio portátil.
2. Atender las indicaciones de las autoridades.
3. Evitar caminar y cruzar por sectores inundados. Aunque el nivel de agua sea bajo, puede aumentar rápidamente y alcanzar velocidades peligrosas, por lo que podemos ser arrastrados por la corriente o golpeados por árboles, piedras, o animales muertos que lleva la corriente.
4. No salir ni tratar de manejar a través de caminos inundados.
5. Si el vehículo se atasca al intentar cruzar una corriente, debe abandonarse inmediatamente y buscar la parte más alta en los alrededores.
6. Ser precavido especialmente durante la noche, ya que es más difícil identificar el incremento del nivel del agua en el cause.

### **Después de cualquier inundación**

1. Pasado el peligro, mantenerse informado y seguir las indicaciones de las autoridades.
2. Mantenerse alejado de las zonas de desastre. Nuestra presencia podría entorpecer el auxilio y la asistencia para las personas que han sido afectadas.
3. No regresar a la zona afectada hasta que las autoridades indiquen que no hay peligro, ni habitar las casas hasta estar plenamente seguros de que las condiciones en las que se encuentran son las adecuadas.
4. Evitar corrientes de agua.

5. No acercarnos a bardas o casas en peligro de derrumbarse. Alejarse de lugares donde puedan ocurrir deslaves.
6. No tomar agua ni consumir alimentos que hayan estado en contacto directo con aguas de la inundación. Utilizar las reservas de agua potable y alimentos previamente almacenados.
7. No pisar ni tocar cables eléctricos caídos.
8. Limpiar inmediatamente y con cuidado las sustancias inflamables, tóxicas, medicamentos u otros materiales que se hayan derramado.
9. No mover heridos. Reportar a las autoridades las emergencias que lo ameriten.
10. Desalojar el agua que haya quedado estancada para evitar plaga de mosquitos.

### **3.4 Recomendaciones**

Conocida la *precipitación máxima probable* y la *avenida de diseño*, se pueden poner en ejecución proyectos de reducción de la vulnerabilidad a las inundaciones y desarrollo de sistemas de alerta local en los diferentes asentamientos humanos que se localizan dentro de la cuenca. Tales proyectos deben ser multisectoriales, multidisciplinarios y de carácter participativo; deben incluir actividades en áreas temáticas tales como,

1. Análisis hidrológico: diseño del sistema de alerta y modelo de pronóstico de inundaciones a nivel de la cuenca.
2. Medición hidrológica: sistemas locales de monitoreo y alerta a inundaciones.
3. Análisis de la vulnerabilidad a inundaciones de la cuenca.
4. Planeación para la reducción de la vulnerabilidad e implementación de medidas de mitigación.
5. Preparación comunitaria, planes de emergencias, manejo de situaciones de inundación y rehabilitación.

#### **IV. CONCLUSIONES**

De los resultados obtenidos del análisis de la precipitación media de las tres tormentas más desfavorables (Tabla 2.2), además de la precipitación media anual de la cuenca del río Tecolutla (tablas 2.3 y 2.4), así como de las figuras 2.1-2.4, se concluye que existen dentro de la cuenca dos centros de alta precipitación, ubicados en las regiones de Jopala y Atexcaco, Puebla, aseveración que se confirma por lo expuesto, en la sección 1.5.3.1.

En lo que respecta a la precipitación máxima probable, el pronóstico que se muestra en las figuras 2.5 a 2.7 es similar con la distribución espacial del mapa de isoyetas medias anuales (Figura 2.4), de lo cual se concluye que las precipitaciones que se presentan en la zona de estudio son generalmente de tipo orográfico.

Para el análisis del escurrimiento superficial, el método del hidrograma unitario instantáneo HUI es una herramienta de análisis de mucha utilidad que complementa la teoría tradicional de los modelos lluvia-escurrimiento, ya que permite calcular los hidrogramas asociados a duraciones de lluvia en exceso (precipitación efectiva), describiendo el comportamiento espacial y temporal de una tormenta extraordinaria.

Por otro lado, debido a la poca información hidrométrica disponible en las cuencas de la Republica Mexicana, los modelos denominados de caja negra (típicamente el del hidrograma unitario) son los que más se adecuan a la información de las cuencas de México; sobre todo para los sitios donde se pretenda construir una obra hidráulica ya sea para la generación de energía eléctrica o para el control de escurrimientos extraordinarios, debido a que en sitios cercanos a ellos generalmente existen estaciones de aforo que registran las avenidas que servirán para hacer los estudios correspondientes.

El método del hidrograma unitario instantáneo (HUI) es sencillo ya que no toma en cuenta explícitamente las características fisiográficas de la cuenca. Los hidrogramas unitarios obtenidos por este método pueden ser utilizados en otras cuencas

hidrológicas vecinas, que presenten características fisiográficas y climáticas semejantes.

En lo que concierne a los gastos de diseño obtenidos por el método del HUI, son mayores a los obtenidos por los métodos de Creager y Lowry; esta discrepancia se debe a que éstos son métodos que se usan para tener una idea general del comportamiento del gasto máximo y no toman en cuenta en forma explícita la precipitación.

También se puede observar que de las figuras de los apéndice C y D, considerando el área de captación de la cuenca del río Tecolutla hasta la desembocadura en el Golfo de México, el volumen de escurrimiento pronosticado que llegaría al cauce principal generado por las tormentas con periodos de retorno de 100, 500 y 1000 años, sería de aproximadamente,  $6098.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,  $7553.83 \times 10^6 \text{ m}^3$  y  $9052.08 \times 10^6 \text{ m}^3$  respectivamente.

Así mismo, de las figuras del apéndice D, se puede concluir que la incidencia de agua a la corriente principal, tendría un pico pronosticado muy grande ( $26280.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $32649.8 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $35243.1 \text{ m}^3/\text{s}$  para periodos de retorno de 100, 500 y 1000 años respectivamente), pero a la vez desaparecerían en unas cuantas horas; Esta rapidez de drenaje de la cuenca del río Tecolutla se debe principalmente a la fuerte pendiente que tiene dicha cuenca en su parte alta y media. Por ello es recomendable que se construyan vertedores que puedan desalojar esos picos tan grandes de las avenidas de diseño, en caso de no tener capacidad de almacenamiento los principales afluentes que conforman la red hidrográfica de la región de estudio y de esta manera disminuir la incidencia de inundaciones por desbordamiento de los afluentes de dicha cuenca.

En vista de los daños ocurridos en las últimas décadas en cuanto a las inundaciones ocurridas en la cuenca del río Tecolutla, el cálculo y pronóstico de las avenidas de diseño para tal región utilizando el HUI, es de suma importancia para la toma de

decisiones en la prevención y disminución del riesgo de la población. Cabe mencionar que no se puede hacer un análisis de los impactos de una tormenta extrema o de escurrimientos súbitos, sin mencionar que las inundaciones provocadas por el desbordamiento de los ríos (Figuras 4.1-4.4), no necesariamente se debe a tormentas extraordinarias, sino que en primera instancia se debe a factores antropogénicos (como por ejemplo actividades agrícolas y ganaderas entre otras).



**Figura 4.1.** Inundación de octubre de 1999; a) zona de Gutiérrez Zamora, Ver. y b) zona de Tecolutla, Ver.



**Figura 4.2.** Inundación de octubre de 1999; a) Ciudad de Gutiérrez Zamora, Ver. y b) Ciudad de Tecolutla, Ver.





**Figura 4.3.** Inundación de junio de 2005; a) San Miguel Acayucan, Ver. y b) Ciudad de Veracruz, Ver.

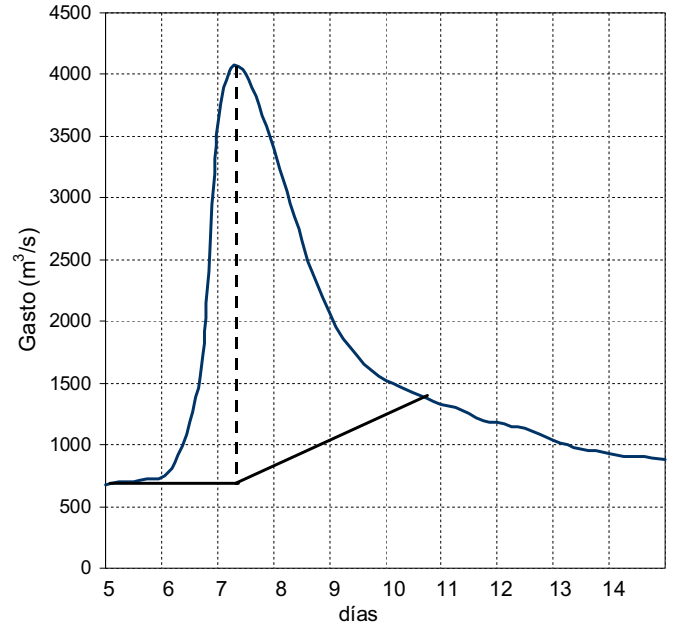
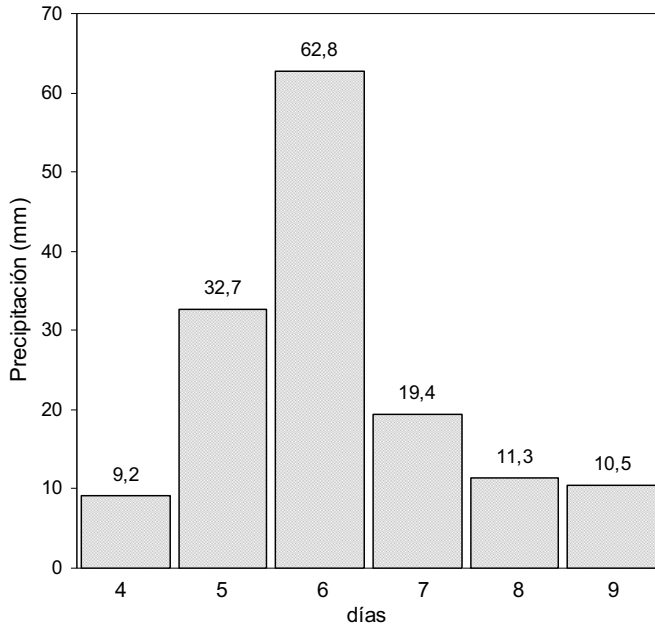


**Figura 4.4.** Inundación de junio de 2005, en la población de Naranjos, Ver.

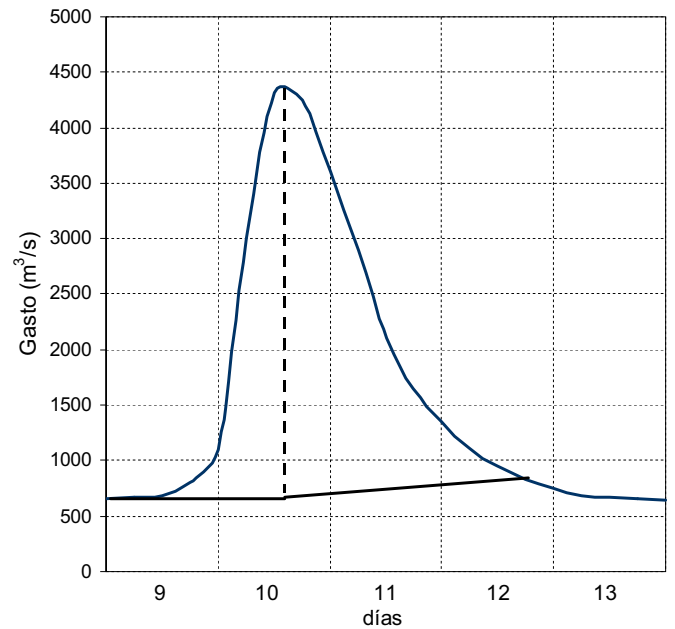
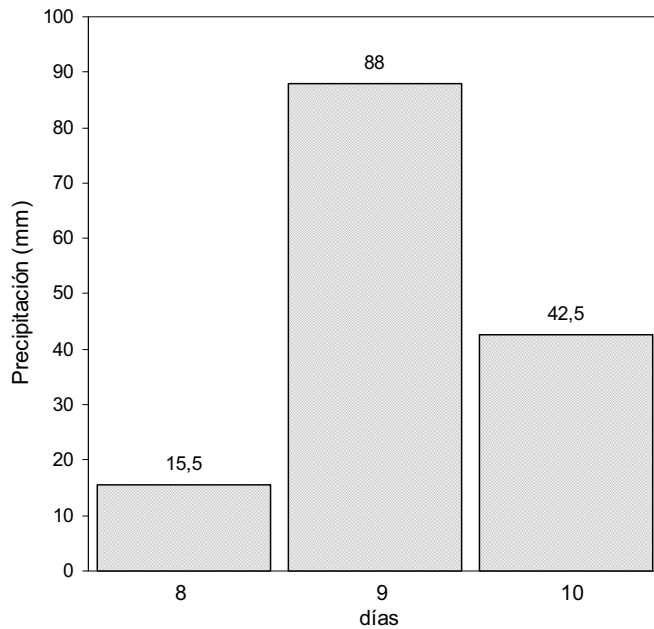
Por último, este tipo de estudios deben de realizarse y analizarse con mayor frecuencia, para ayudar a disminuir los impactos de las inundaciones, fenómeno natural que más afecta a la población de la cuenca.

## Apéndice A

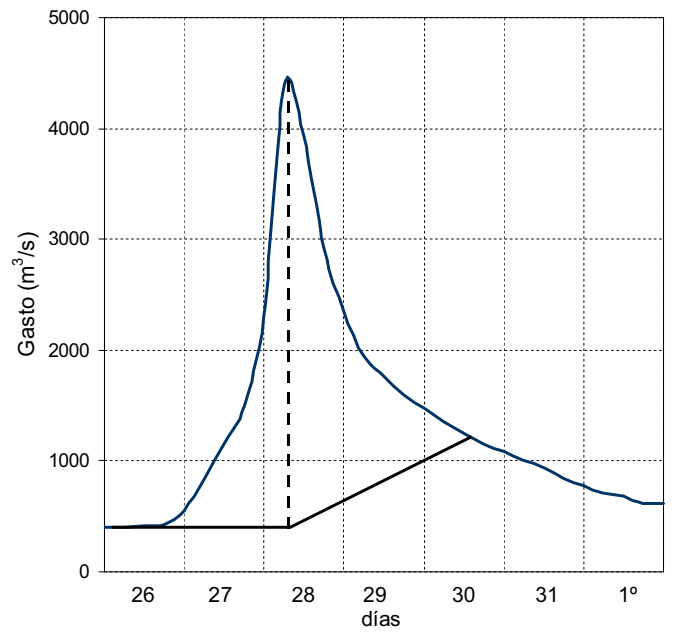
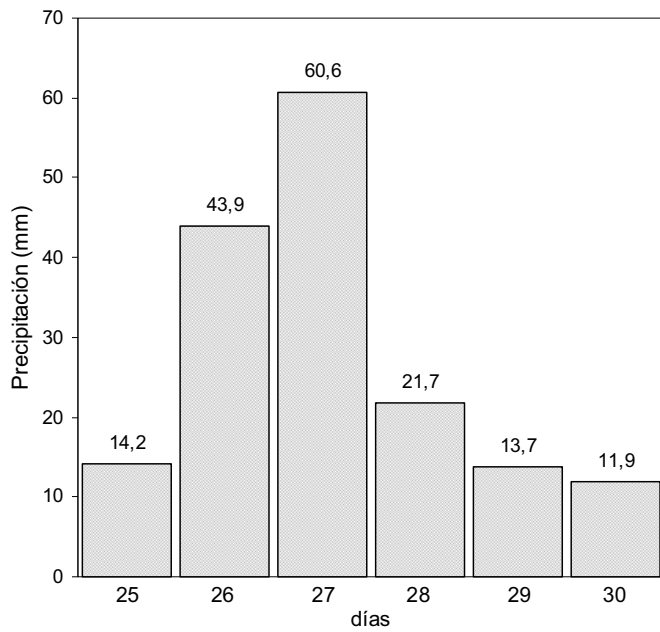
Hietogramas e hidrogramas de las tormentas severas registradas durante el período 1961-1990, en la cuenca del río Tecolutla.



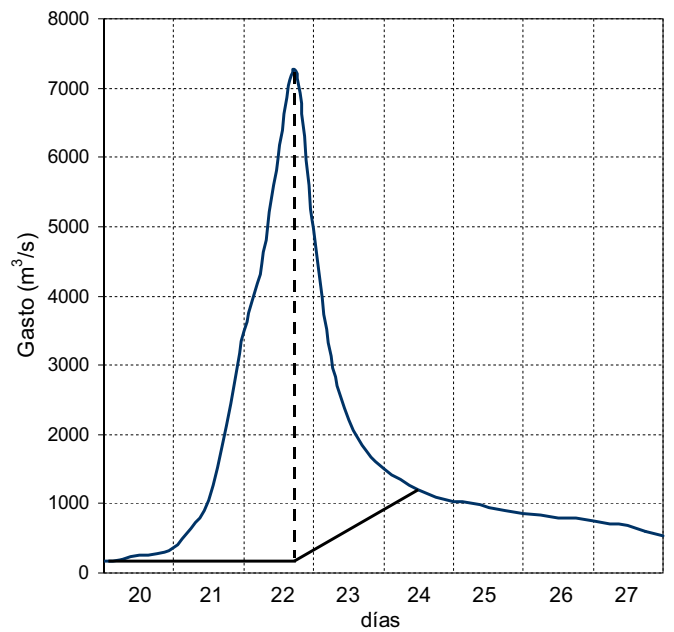
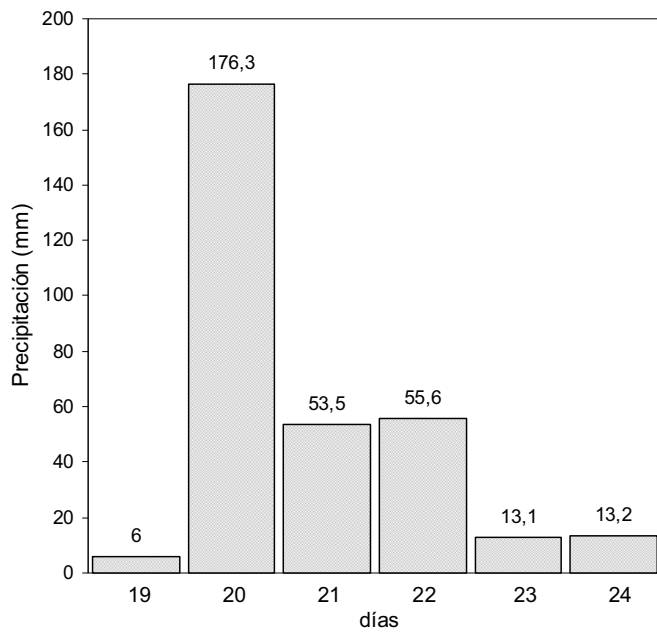
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 4 al 9 de septiembre de 1969.



Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 8 al 10 de octubre de 1971

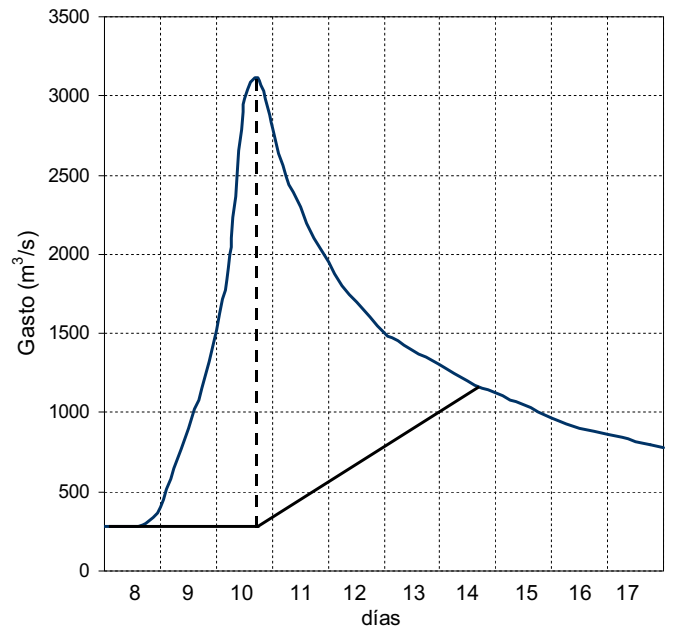
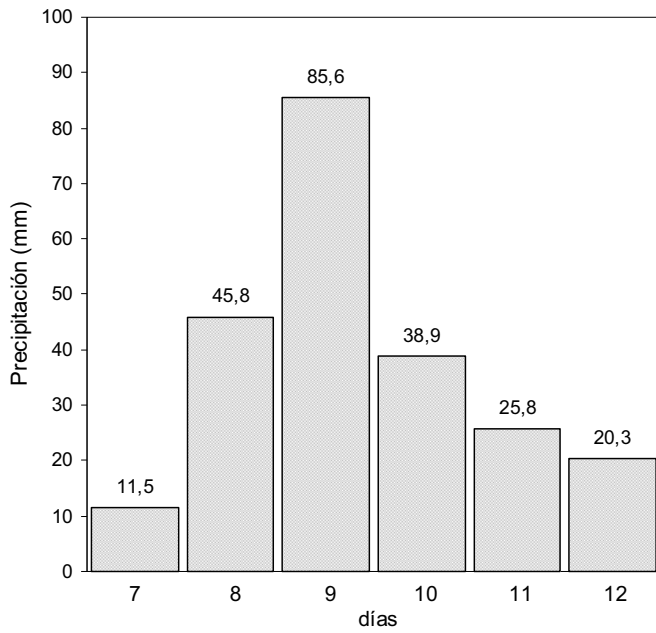


Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 25 al 30 de agosto de 1973

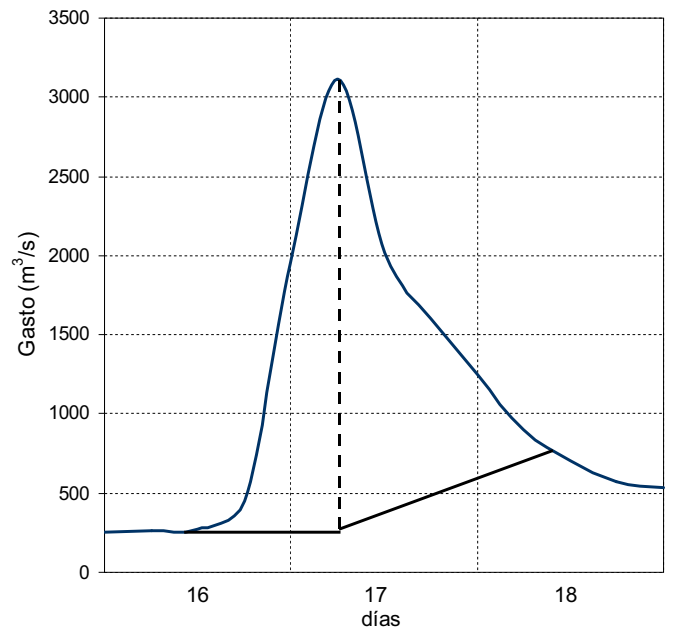
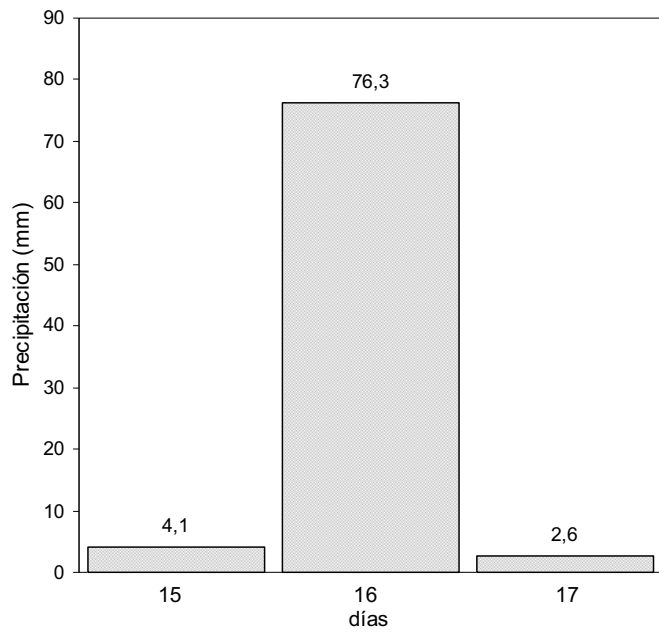


Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 19 al 24 de septiembre de 1974

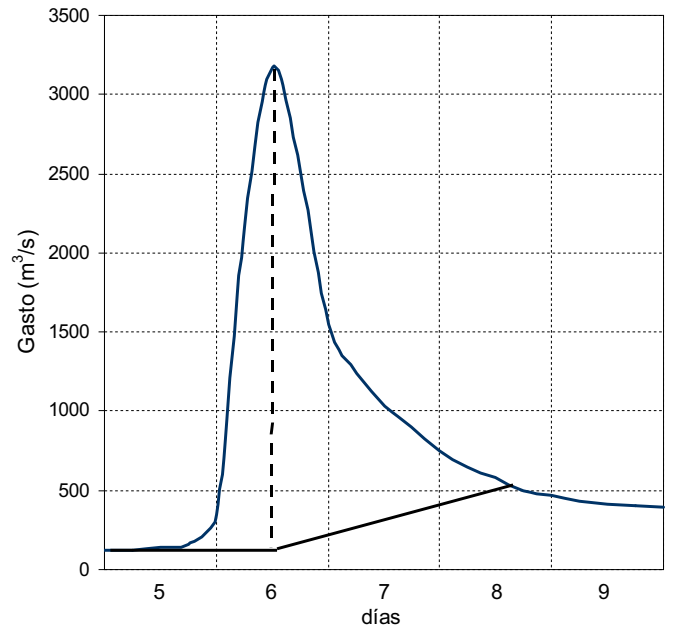
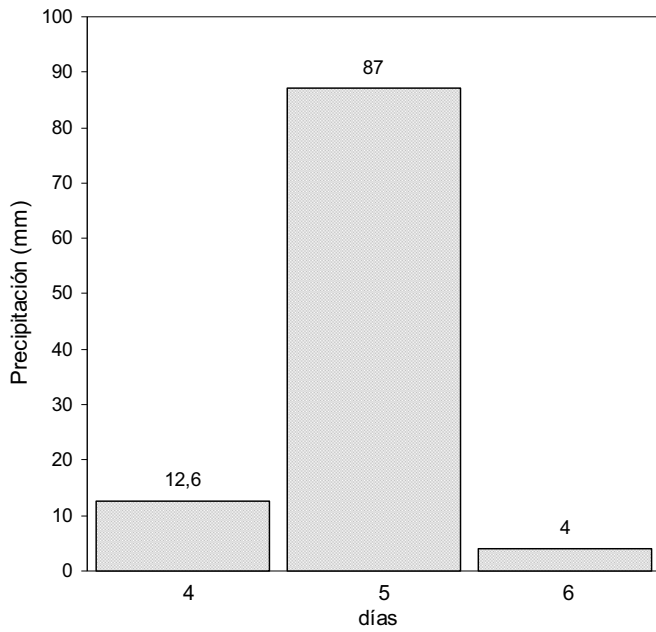




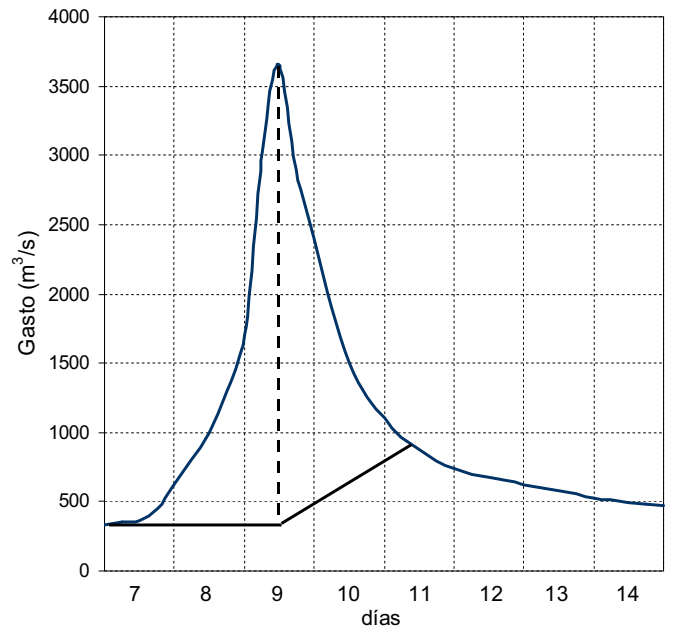
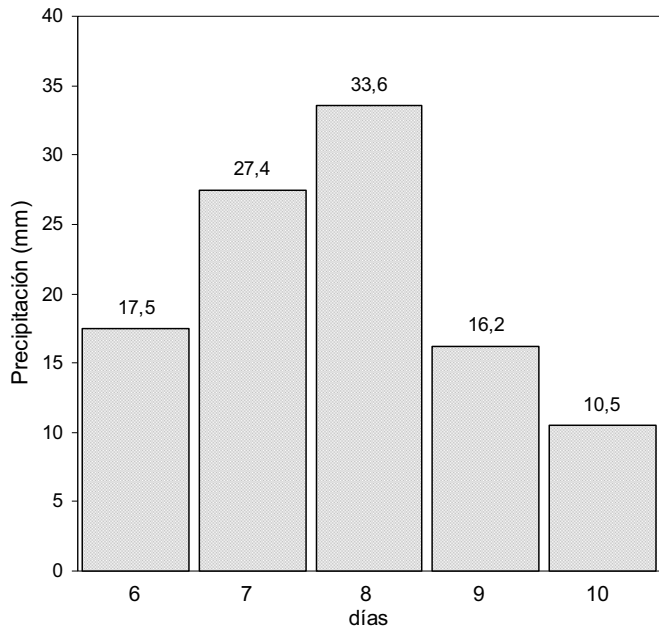
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 7 al 12 de septiembre de 1975



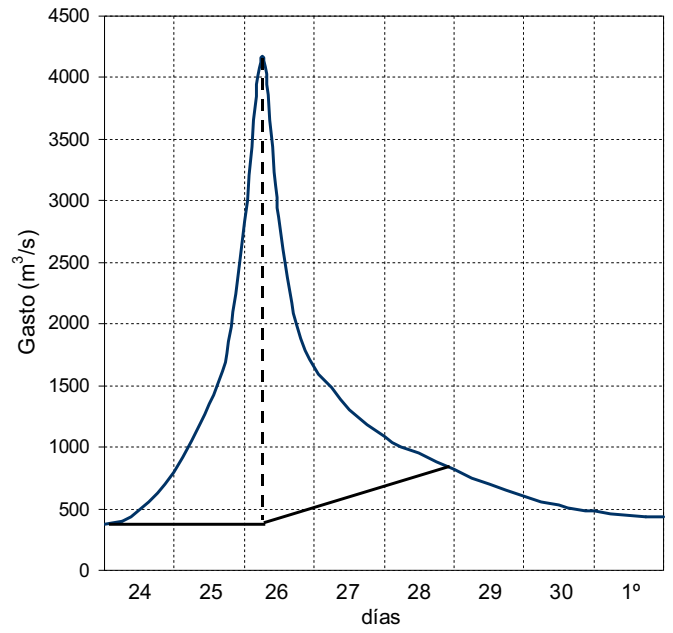
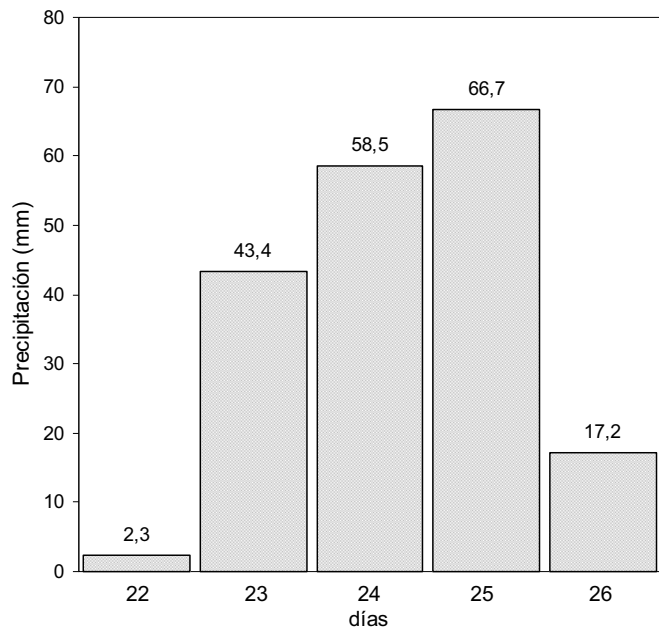
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 15 al 17 de octubre de 1976



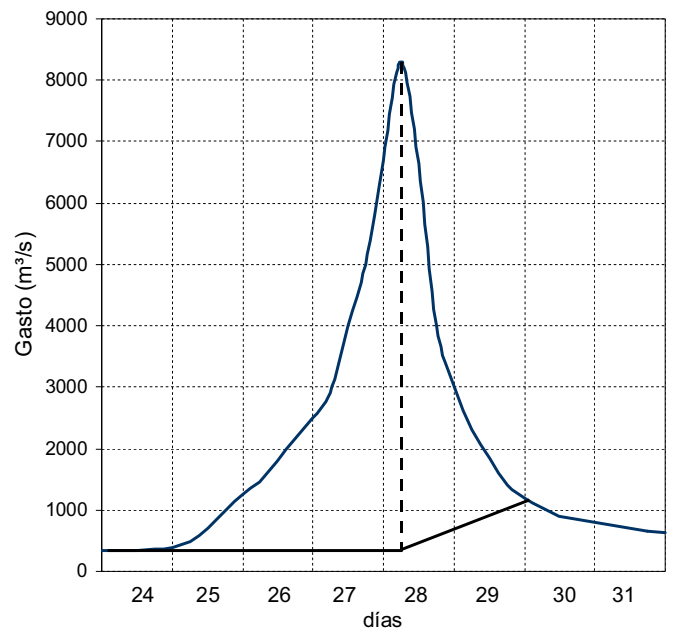
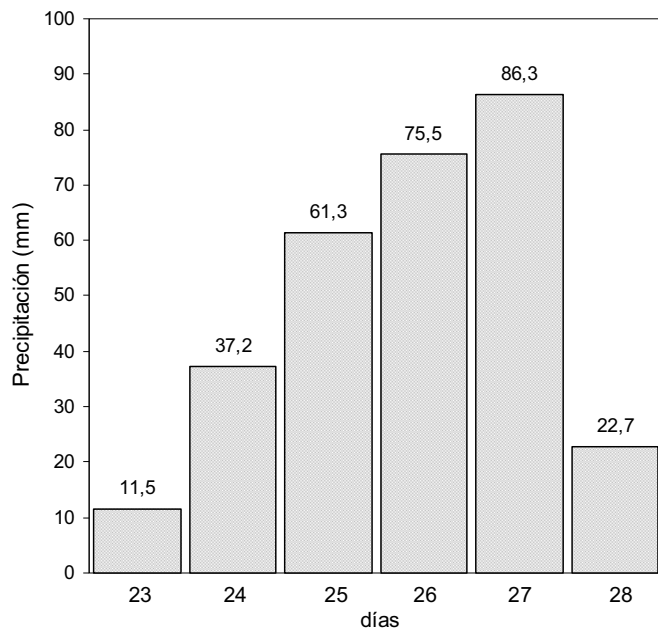
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 4 al 6 de agosto de 1976



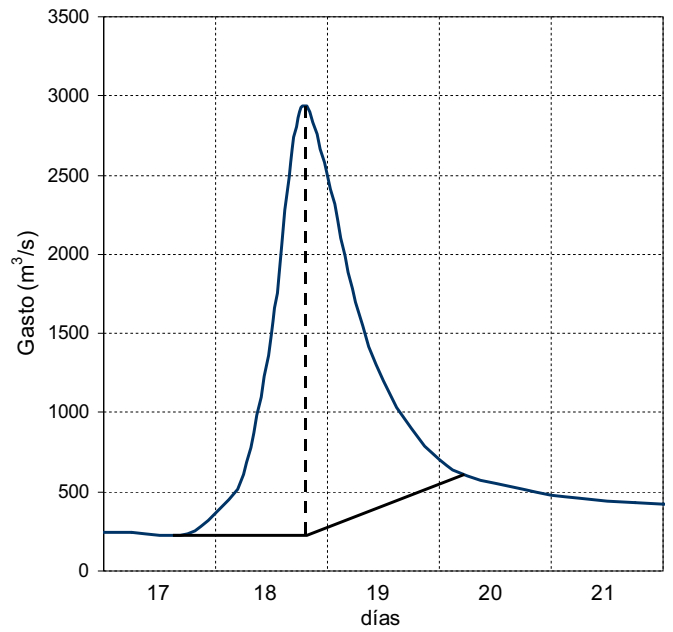
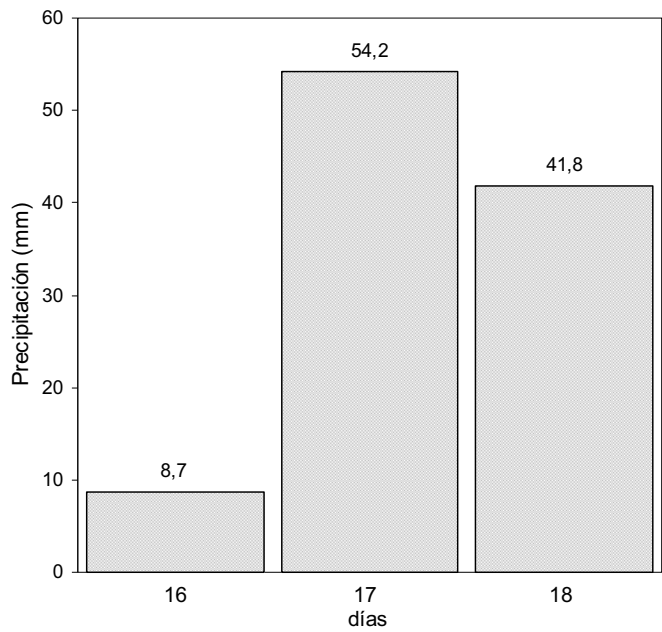
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 6 al 10 de septiembre de 1979



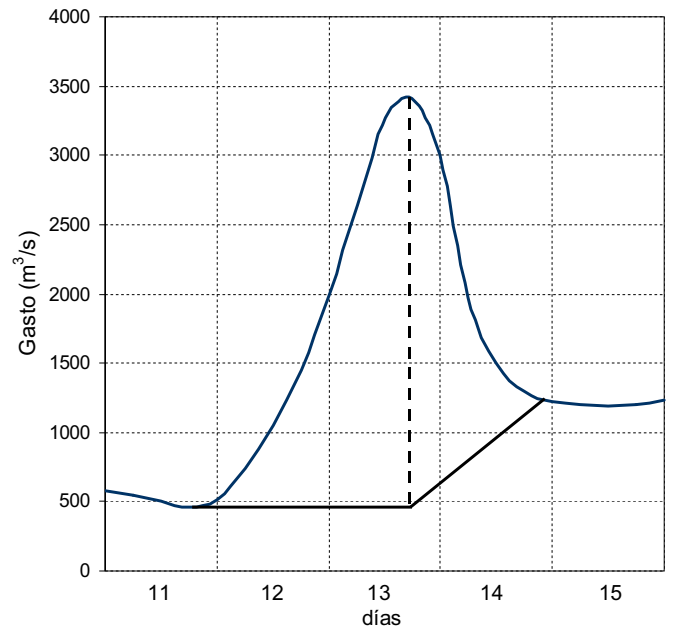
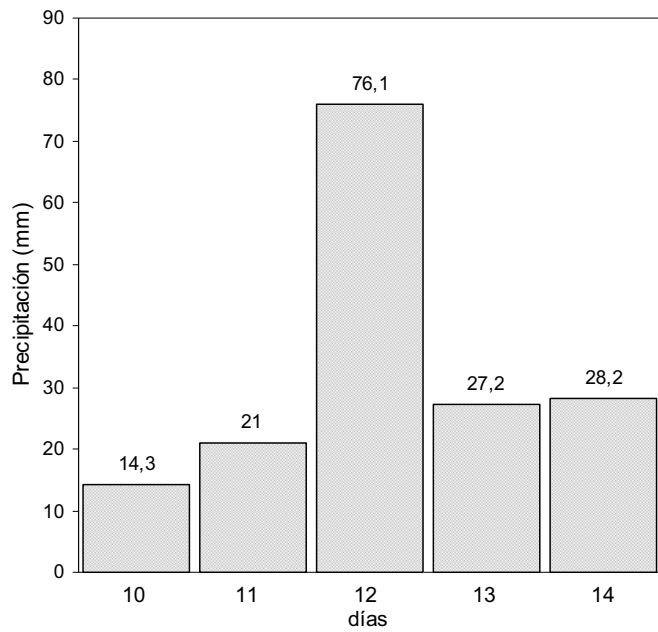
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 22 al 26 de septiembre de 1980



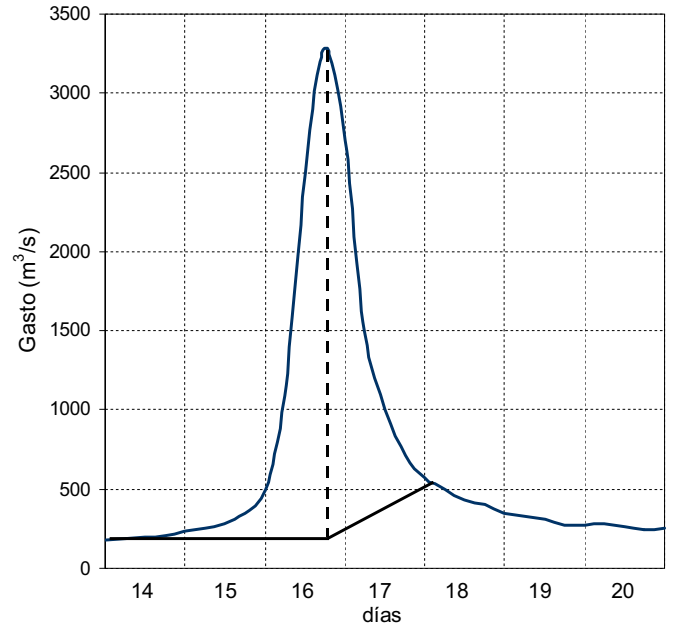
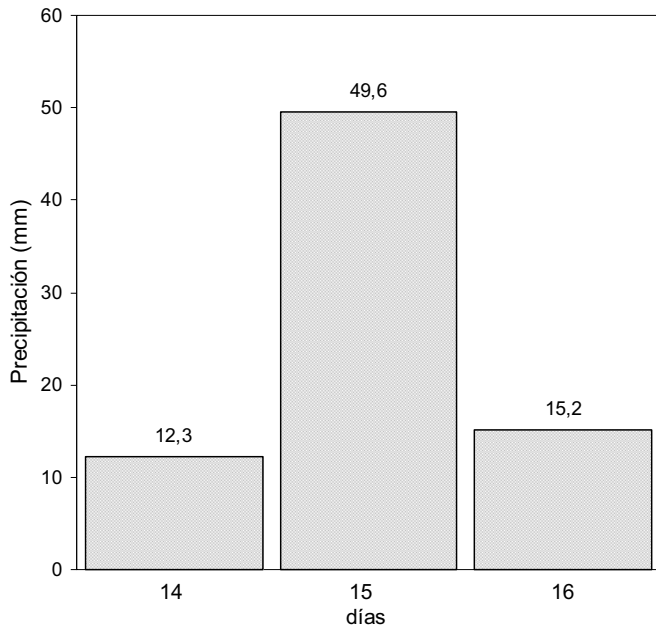
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 23 al 28 de agosto de 1981



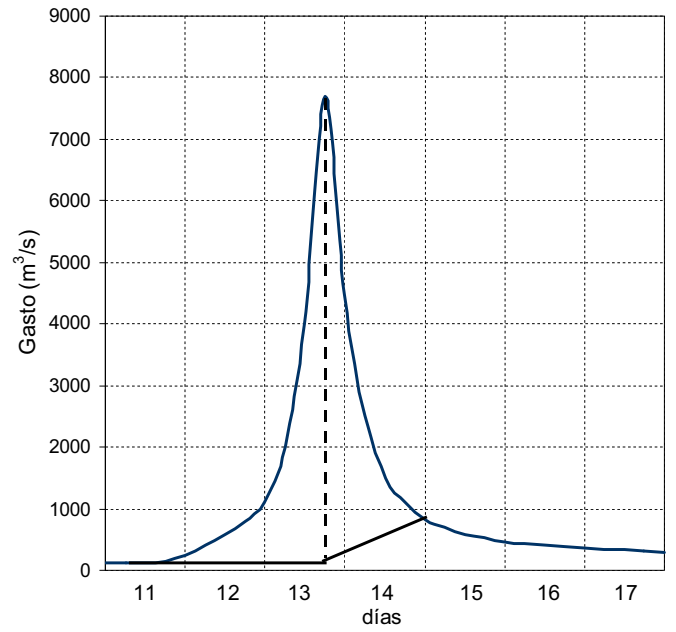
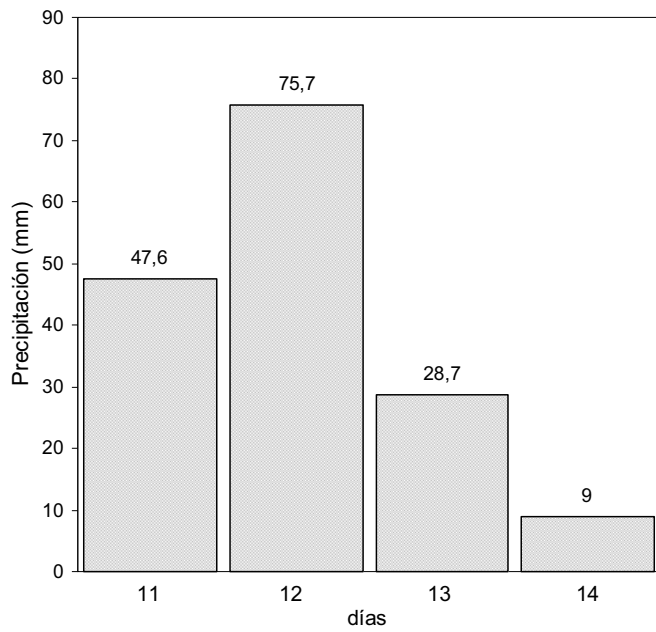
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 16 al 18 de septiembre de 1981



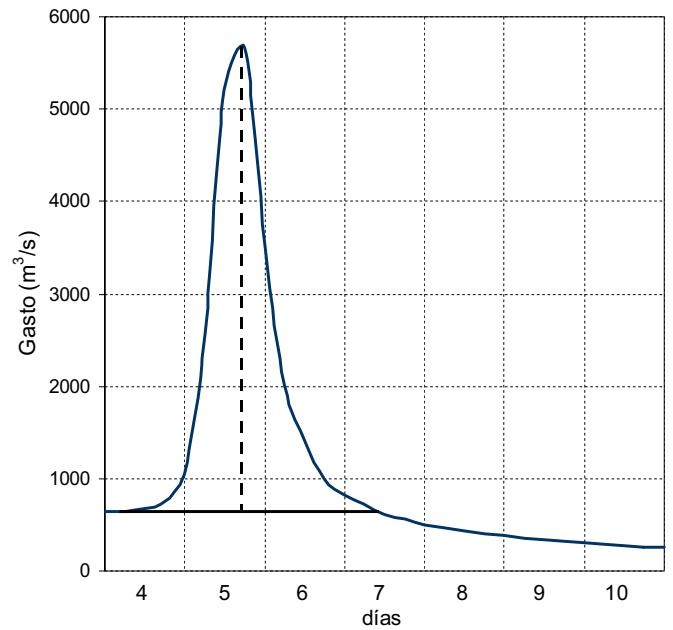
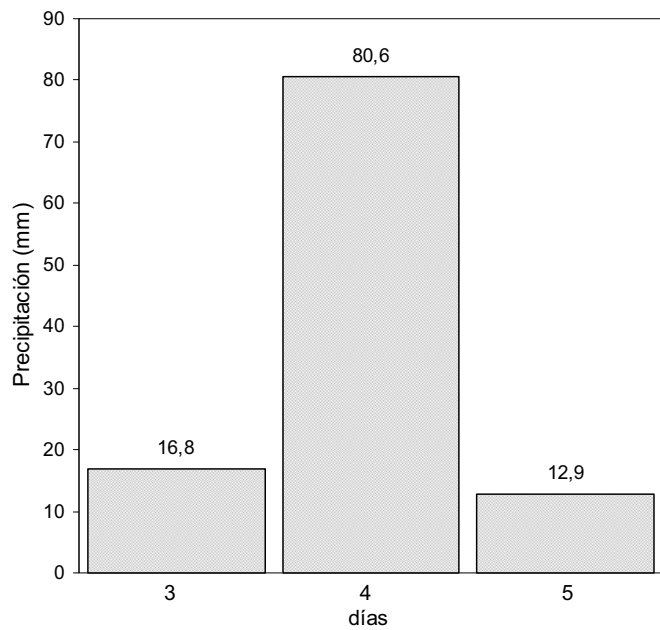
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 10 al 14 de septiembre de 1984



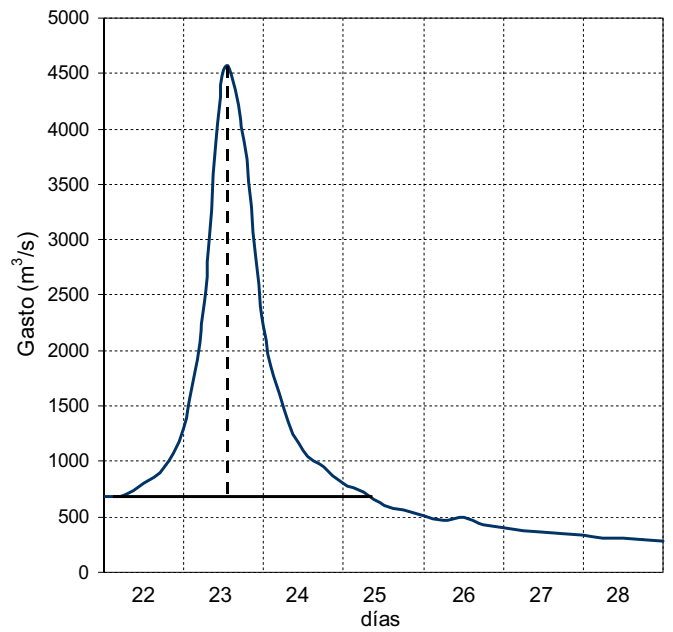
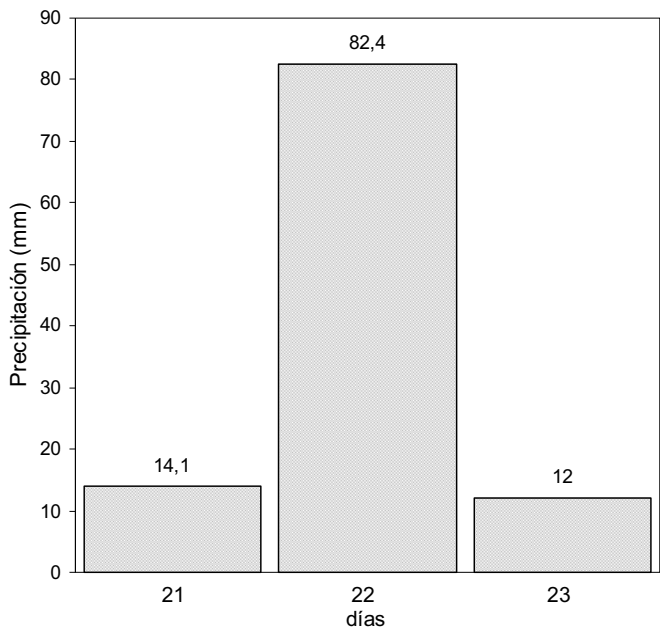
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 14 al 16 de octubre de 1986



Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 11 al 14 de noviembre de 1986



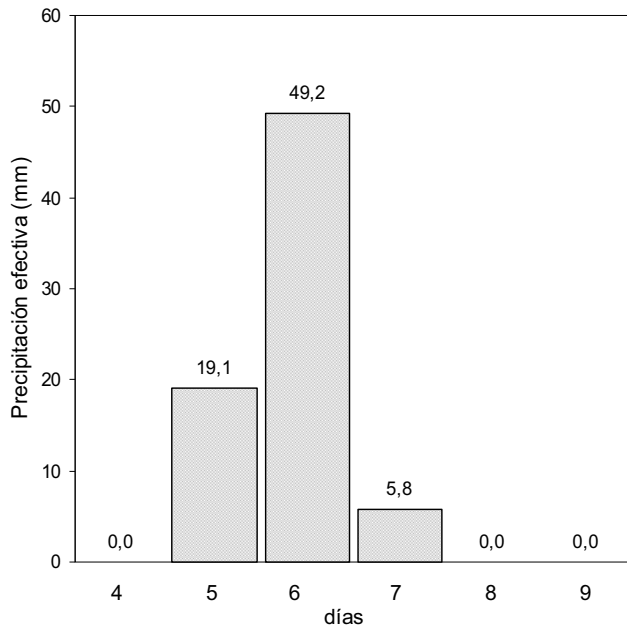
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 3 al 5 de septiembre de 1988



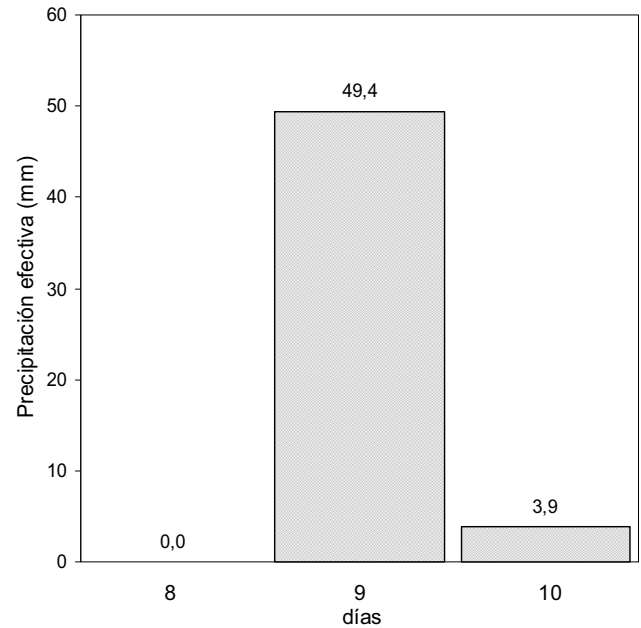
Hietograma e hidrograma de la tormenta registrada del 21 al 23 de septiembre de 1989

## Apéndice B

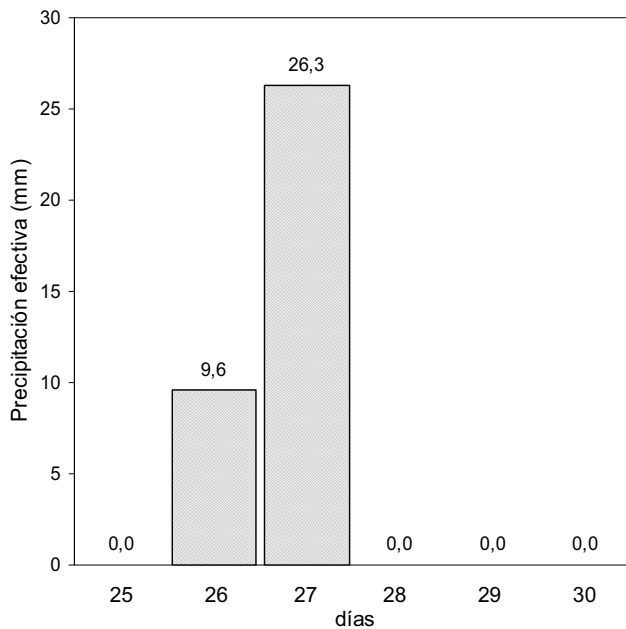
Hietogramas de precipitación efectiva para cada una de las dieciséis tormentas severas registradas durante el período 1961-1990, en la cuenca del río Tecolutla.



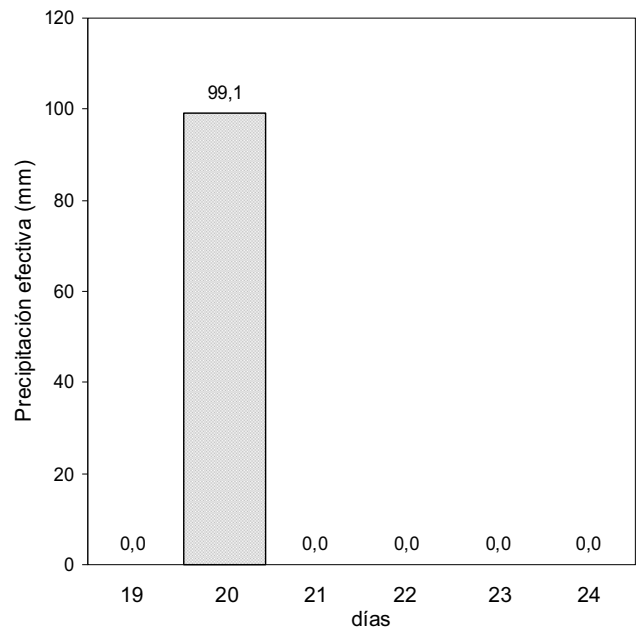
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 4 al 9 de septiembre de 1969, valido para una  $de = 72$  hrs y  $he =$



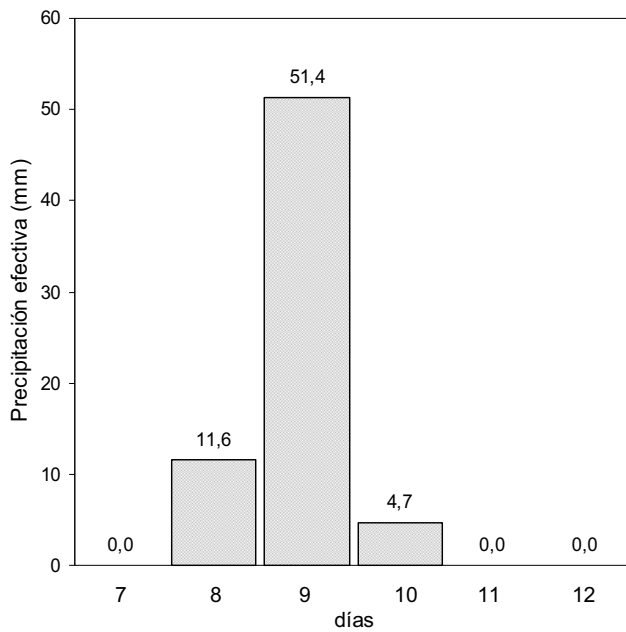
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 8 al 10 de octubre de 1971, valido para una  $de = 48$  hrs y  $he = 1$  mm.



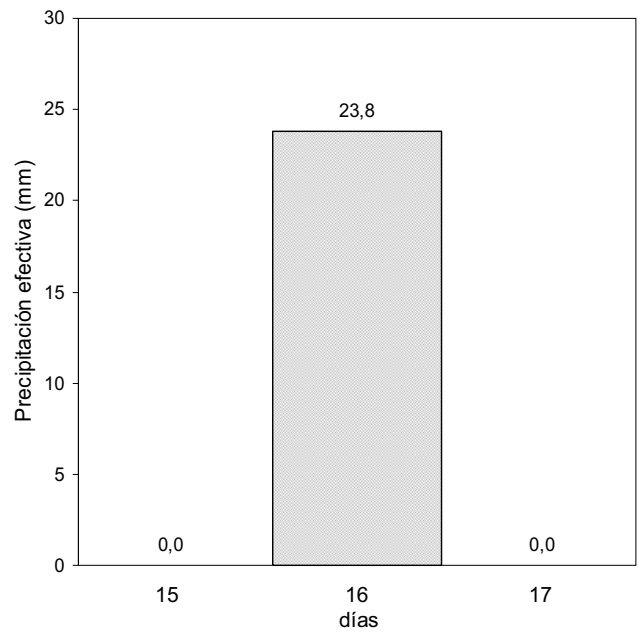
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 25 al 30 de agosto de 1973, valido para una  $de = 48$  hrs y  $he = 1$  mm.



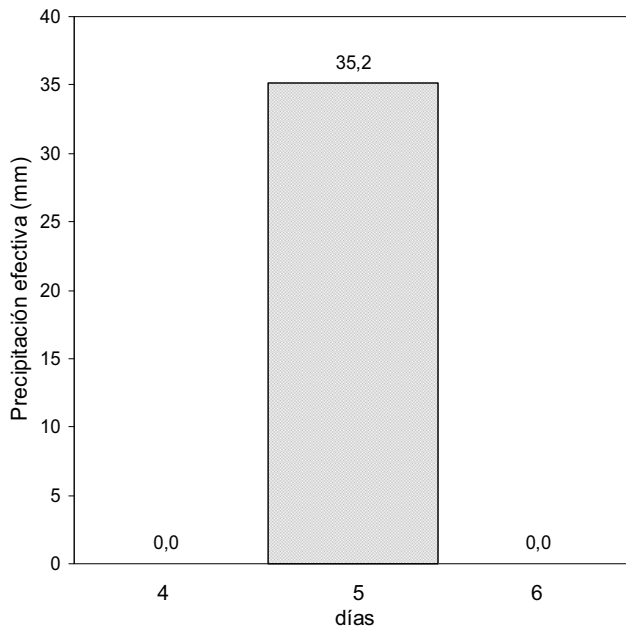
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 19 al 24 de septiembre de 1974, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.



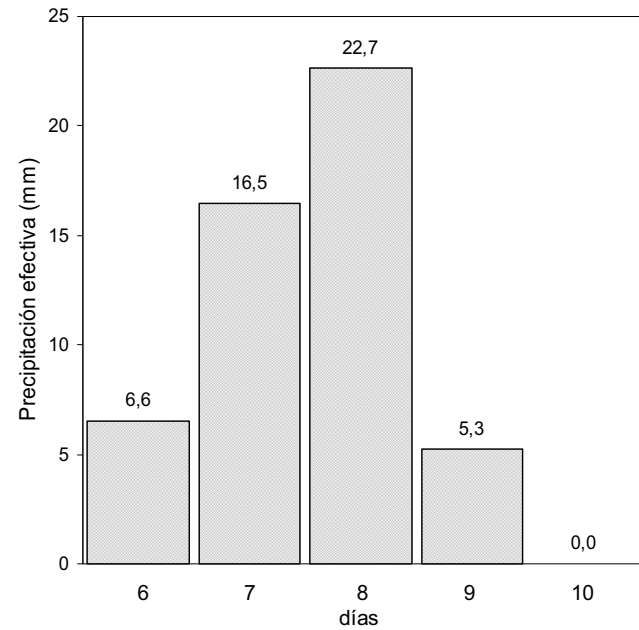
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 7 al 12 de septiembre de 1975, valido para una  $de = 72$  hrs y  $he = 1$  mm.



Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 15 al 17 de octubre de 1976, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.

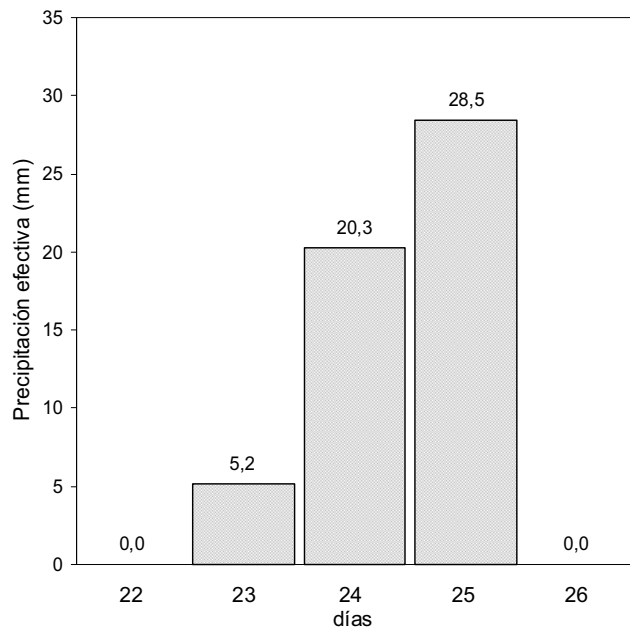


Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 4 al 6 de agosto de 1976, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.

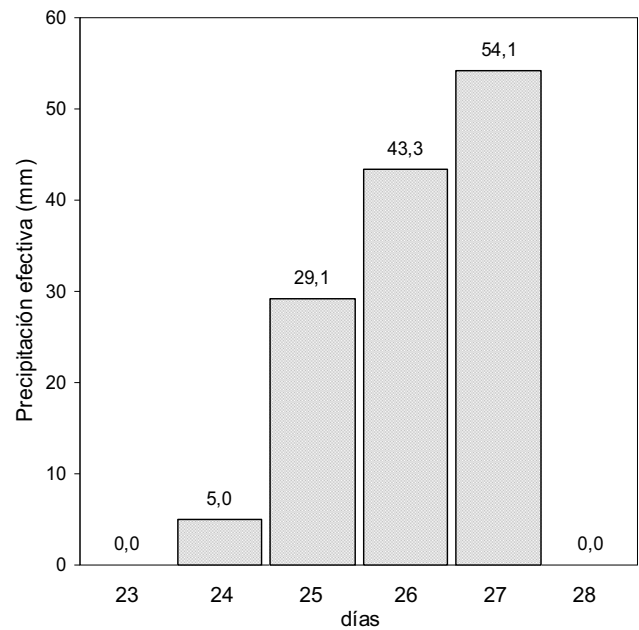


Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 6 al 10 de septiembre de 1979, valido para una  $de = 96$  hrs y  $he = 1$  mm.

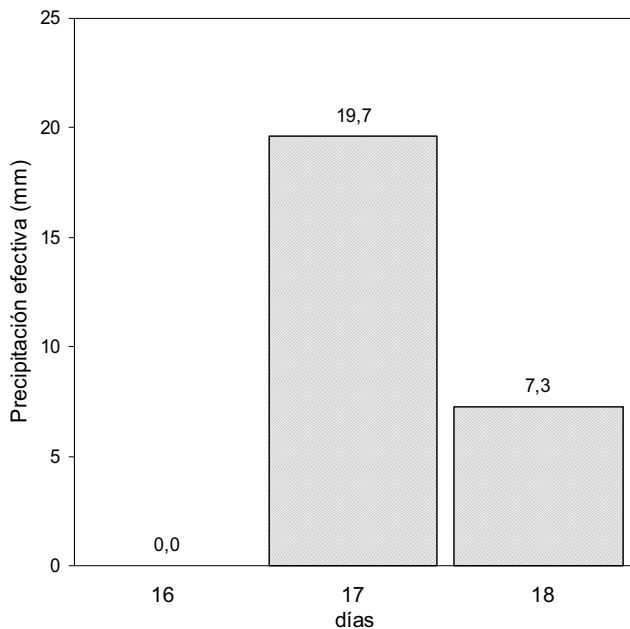




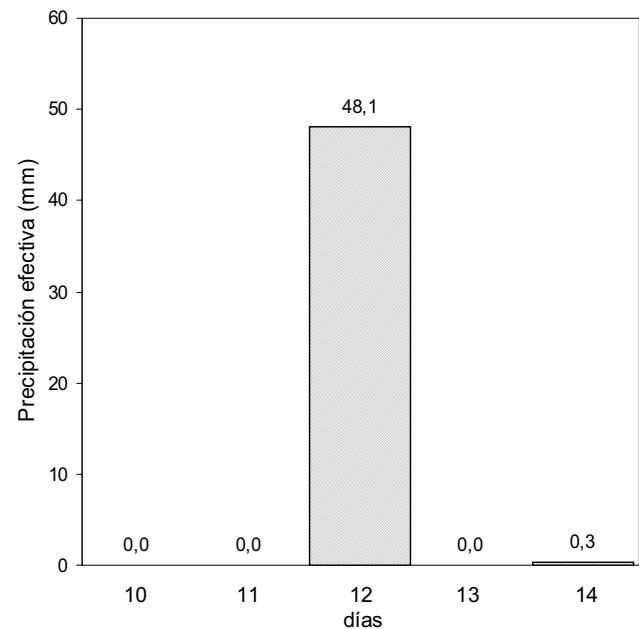
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 22 al 26 de septiembre de 1980, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.



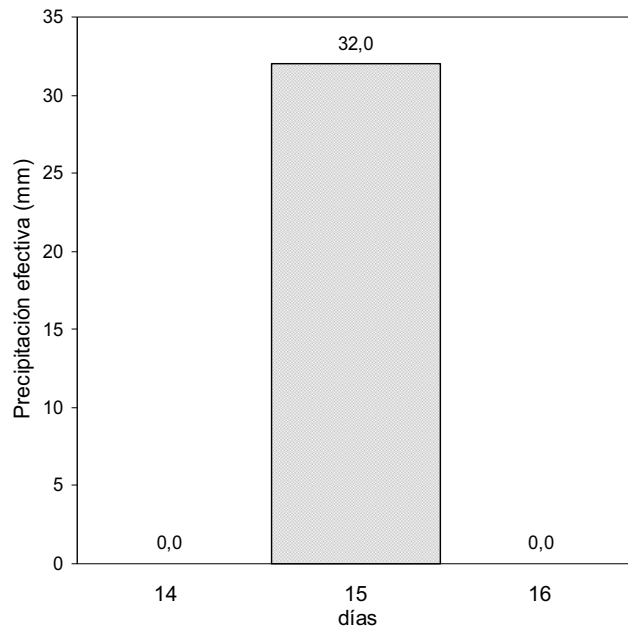
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 23 al 28 de agosto de 1981, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.



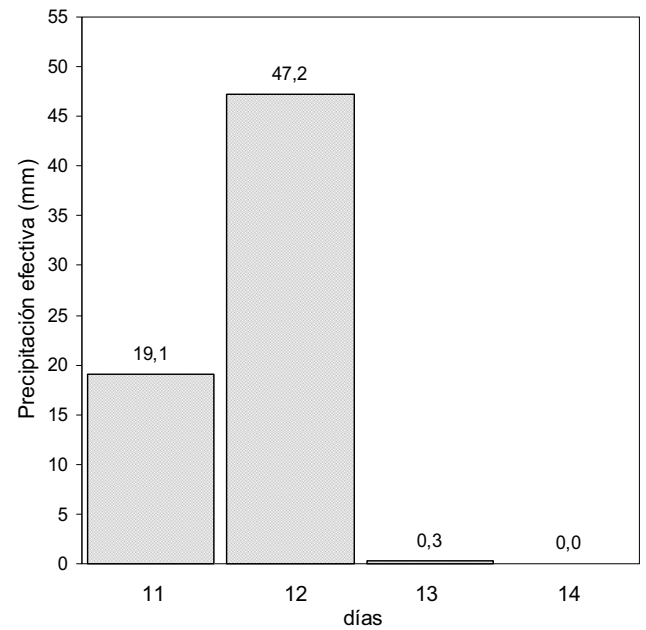
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 16 al 18 de septiembre de 1981, valido para una  $de = 48$  hrs y  $he = 1$  mm.



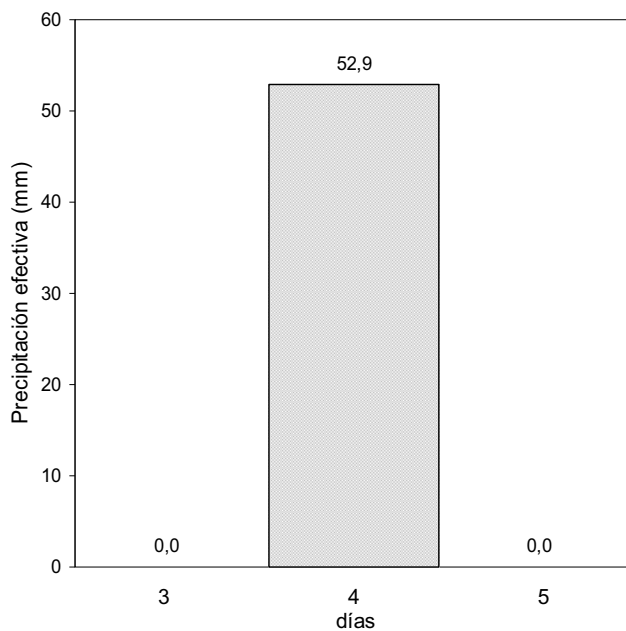
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 10 al 14 de septiembre de 1984, valido para una  $de = 48$  hrs y  $he = 1$  mm.



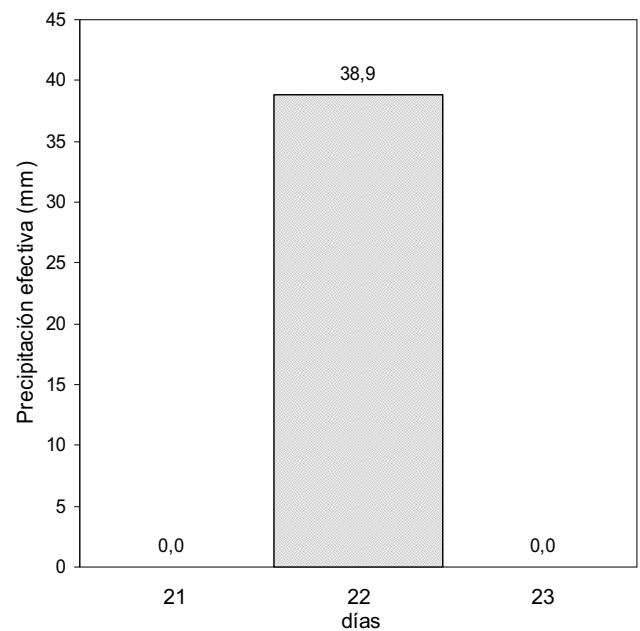
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 14 al 16 de octubre de 1986, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.



Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 11 al 14 de noviembre de 1986, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.



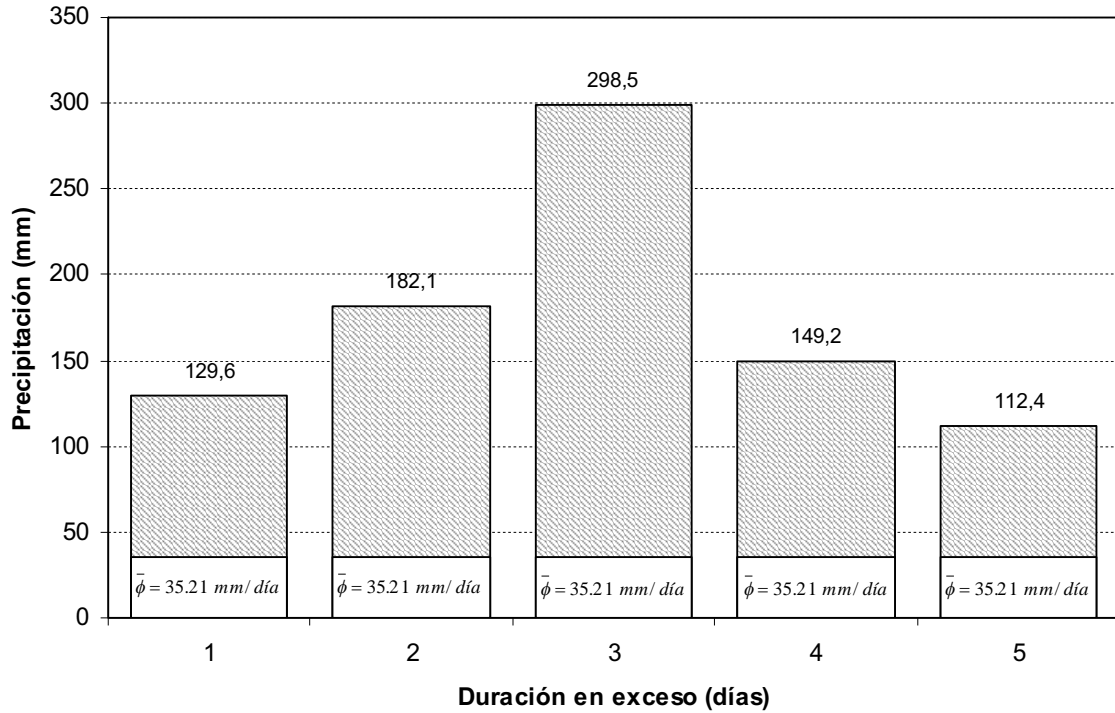
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 3 al 5 de septiembre de 1988, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.



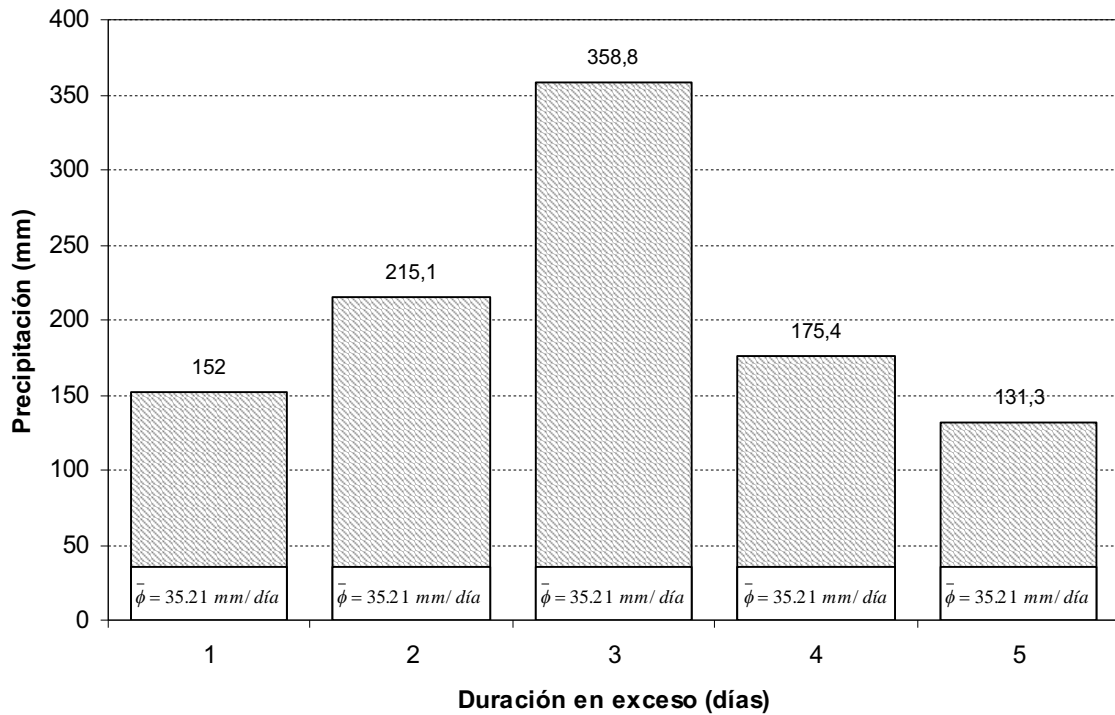
Hietograma de precipitación efectiva de la tormenta ocurrida del 21 al 23 de septiembre de 1989, valido para una  $de = 24$  hrs y  $he = 1$  mm.

## Apéndice C

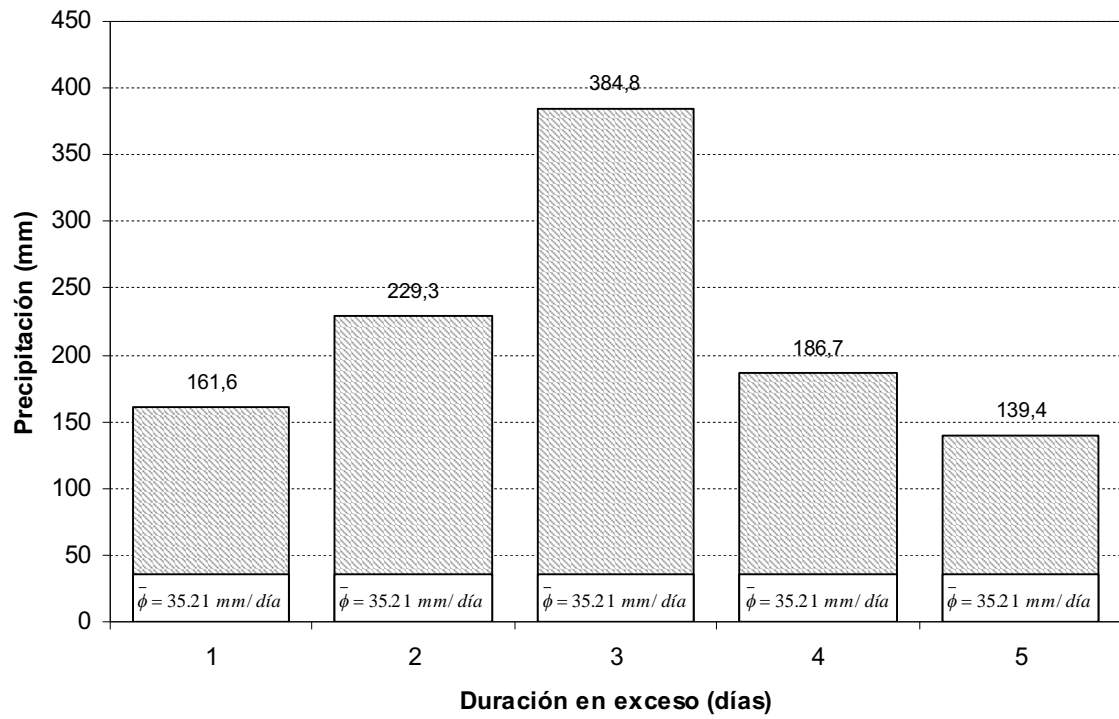
Hietogramas de las tormentas de diseño para períodos de retorno de 100, 500 y 1000 años.



Hietograma de la tormenta de diseño para un período de retorno de 100 años.



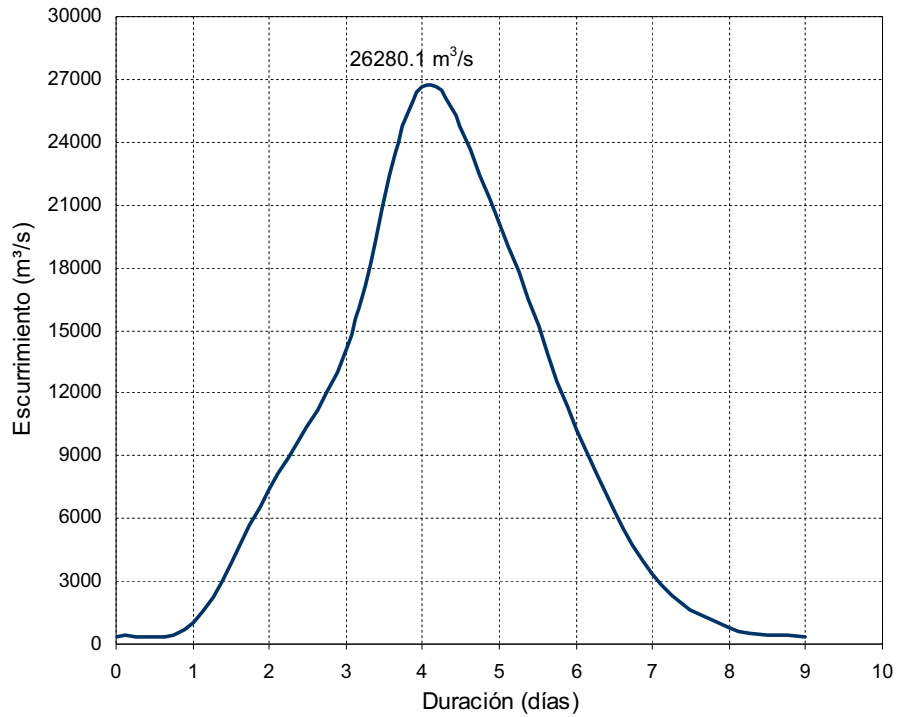
Hietograma de la tormenta de diseño para un período de retorno de 500 años.



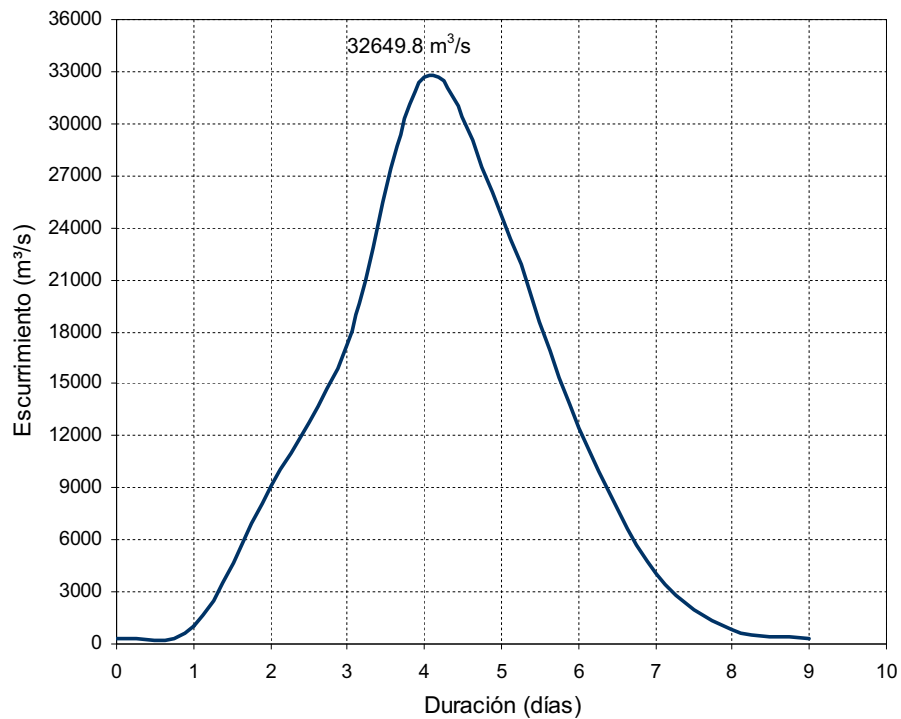
Hietograma de la tormenta de diseño para un período de retorno de 1000 años.

## Apéndice D

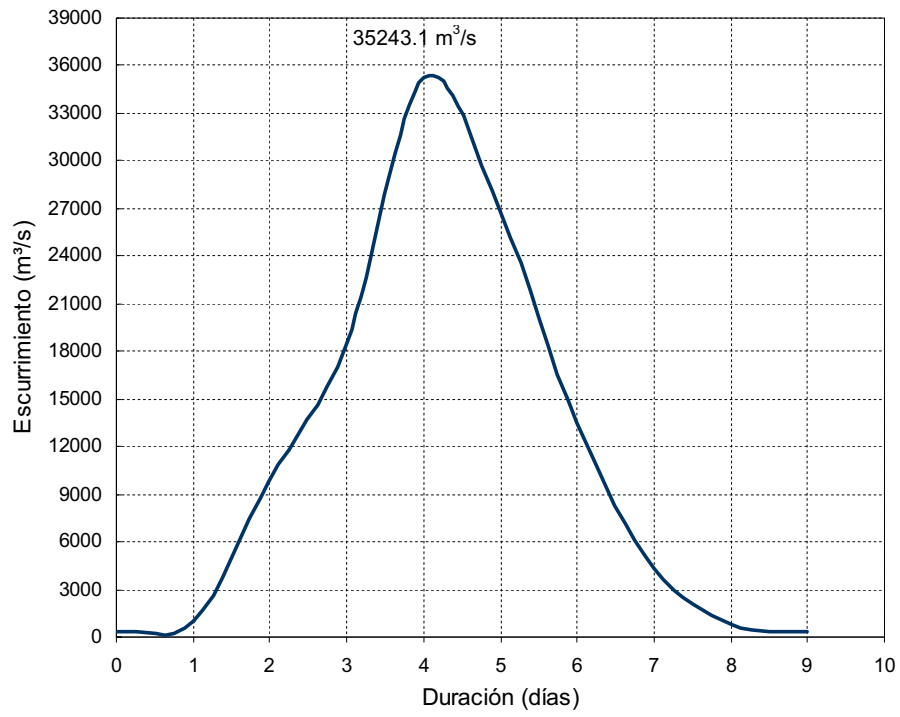
Hidrogramas de las tormentas de diseño para períodos de retorno de 100, 500 y 1000 años.



Hidrograma de la tormenta de diseño para un período de retorno de 100 años.



Hidrograma de la tormenta de diseño para un periodo de retorno de 500 años.



Hidrograma de la tormenta de diseño para un período de retorno de 1000 años.

## BIBLIOGRAFÍA

**Aparicio, M. F.**, (2004). "Fundamentos de hidrología de superficie". Limusa, México. 303 pp.

**Bá, K. M., C. Díaz, J. Llamas y H. Llanos**, (1995). "Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia-escurrimiento)". Ingeniería Hidráulica en México, X, 2, 21-31 pp.

**Campos, D. F.**, (1998). "Procesos del ciclo hidrológico". Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S. L. P., México.

**CENAPRED**, (2001). "Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México". Sistema Nacional de Protección Civil, Secretaría de Gobernación; Talleres Gráficos de México, 225 pp.

**C.F.E.**, (1977). "Cuenca del río Tecolutla". División Hidrométrica Golfo. Boletín hidrométrico No. 7.

**C.F.E.**, (1981-1998). "División Hidrométrica Golfo". Boletines hidrométricos No. 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 30, 33, 36, 37, 38 y 39.

**Chow, V. T.**, (1964). "Handbook of Applied Hydrology". McGraw-Hill.

**Chow, V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays**, (1994). "Hidrología Aplicada". McGraw-Hill, Colombia, 584 pp.

**CLICOM versión 2.0**, (1988). "Sistema para el manejo automático de base de datos climatológicos en computadoras personales: Base nacional de datos, edición 2004". CONAGUA, México.

**CONAGUA**, (2001). "Programa nacional hidráulico". Comisión Nacional del Agua. México, 177 pp.

**Crewford, N. H. y Finsley, R. K.**, (1996). "Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model", Rep. Tec. No. 39, Universidad de Stanford, California.

**Domínguez, M. R., Fuentes M. O. y V. Franco**, (1980). "Avenida de diseño". Manual de diseño de obras civiles. Sección hidrotecnia. C.F.E. México. 60 pp.

**Fernández, F.**, (1996). "Manual de climatología aplicada". Editorial Síntesis, S. A.. Madrid, España, 285 pp.

**Ferrer, F. J.**, (2000). "Recomendaciones para el cálculo hidrometeorológico de avenidas". CEDES, Madrid, 75 pp.

**Foroud, N. and R. S. Broughton**, (1981). "Flood hydrograph simulation model". Journal of hydrology, 49, 139-172.

**Fuentes M. O., Domínguez, M. R y V. Franco**, (1981). "Relación entre precipitación y escurrimiento". Manual de diseño de obras civiles. Sección hidrotecnia. C.F.E. México. 62 pp.

**Garnica, P. R. J. y I. Alcántara A.** (2004). "Riesgos por inundación asociados a eventos de precipitación extraordinaria en el curso bajo del río Tecolutla, Veracruz". Universidad Nacional Autónoma de México, Investigaciones Geográficas. 23-45 pp.

**GEV**, (1998). "Enciclopedia Municipal Veracruzana". Primera edición. Gobierno del estado de Veracruz, 362 pp.

**Hernández, T. A.**, (1988). "Cálculo de la avenida de diseño para el proyecto hidroeléctrico Espinal, Veracruz". Tesis de Licenciatura en Ciencias Atmosféricas. Facultad de Física. Universidad Veracruzana. 36 pp.

**Islas, O. R. M. y D. Pereyra D.**, (1990). "Aspectos físicos y recursos naturales del Estado de Veracruz III". Universidad Veracruzana, Colección Textos Universitarios, 29 pp.

**Jáuregui, E. y I. Zitácuaro**, (1995). "El impacto de los ciclones tropicales en el Golfo de México, en el estado de Veracruz". La Ciencia y el Hombre, Vol. VII No. 21, México, pags. 75-119.

**Maderey R.**, (1994). "El recurso del agua en la República Mexicana. Un breve análisis geográfico". Revista Geográfica, No. 119, 133-163 pp.

**Magaña, V. O.**, (1999). "Los impactos de El Niño en México". Secretaría de Gobernación, UNAM, IAI, SEP/CONACYT. México, 229 pp.

**Marín, S. E.**, (2002). "El agua en México: Retos y oportunidades". Instituto de Geofísica, UNAM, México, 22 pp.

**Miroslava, U.**, (1992). "The extremal value distribution of rainfall data at Belgrado, Yugoslavia. Atmósfera, 5, 47-56.

**McMahon, T. A. and R. Srikanthan**, (1981). "Log Pearson III distribution". Journal of hydrology, 52, 139-147.

**Mosiño, P.**, (1974). "Los climas de la Republica mexicana", en el escenario geográfico. Int. Nal. De Antrop. E Historia, México, 59-123 pp.

**Mosiño, P. and García, E.**, (1974). "The climate of Mexico". World Sourvey of Climatology. Vol. 11. 345-390 pp.



**OMM**, (1994). "Guía de practicas hidrológicas". Organización Meteorológica Mundial. No. 168, 655 pp.

**Pereyra, D., B. E. Palma y B. Silva**, (1984). "Gastos máximos en ríos del estado de Veracruz, México". Facultad de Física, Centro de Meteorología Aplicada, Universidad Veracruzana, México, 21 pp.

**Pereyra, D., B. E. Palma y A. Hernández T.**, (1986). "Frecuencia con que azotan los huracanes a los puertos de Alvarado y Veracruz, México", Facultad de Física, Centro de Meteorología Aplicada, Universidad Veracruzana, México, 40 pp.

**Pereyra, D. D., y A. Hernández T.**, (1987). "Avenida de diseño para el proyecto hidroeléctrico Espinal", Facultad de Física, Centro de Meteorología Aplicada, Universidad Veracruzana, México, 40 pp.

**Pereyra, D. D., y A. Hernández T.**, (1989). "Avenida de diseño: cuando no se tienen registros hidrométricos en el sitio del proyecto". GEOS, Bol. Unión Geofís. México, 9, 95-102.

**Pereyra, D., B. Palma G. y I. Zitacuaro C.**, (1992). "Correlation between Northers of Gulf of México and frosts at Las Vigas, Veracruz, México. *Atmósfera*, 5(2): 109-118.

**Pereyra, D.**, (1993). "Estimation of the design flood of Tecolutla river, México, using the probable maximum raifall". *Geofísica Internacional*, 32(1): 35-39.

**Raudkivi, A. J.**, (1979). "Hidrology: an advance introduction to hidrology processes and modelling. Pergamon Press, Great Britain, 479 pp.

**Sánchez, F.**, (2004). "El ciclo hidrológico". Dpto. Geología. Universidad de Salamanca, España, 1-9 pp.

**Shrader, M. L., W. Rawls, W. Snyder and R. McCuen**, (1981). "Flood peak regionalization using mixed-mode estimation of the parameters of the log normal distribution. *Journal of hydrology*, 52, 229-237.

**S.M.S.**, (1999). "Surfer Version 7". Surface Mapping Sytem, Goleen Software, Inc, USA.

**Springall, G. R.** (1967). "Esgurrimientos en cuencas grandes", Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

**Springall, G. R.** (1978). "Análisis estadístico y probabilístico de datos hidrológicos", Facultad de Ingeniería, UNAM, México.

**SRH**, (1976). "Atlas Nacional del Agua de la República Mexicana". Secretaría de Recursos Hidráulicos, México, 253 pp.

**SRH**, (1961). "Gastos máximos en las corrientes de la República Mexicana". Secretaría de Recursos Hidráulicos, México.

**Srikanthan, R. and T. A. McMahon**, (1981). "Log Pearson III –effect of dependence, distribution parameters and sample size on peak annual flood estimate". Journal of hydrology, 52, 149-157.

**StatSoft, Inc.**, (1999). "Statistica for Windows". Tulsa, OK 74104, USA.

**Tejeda, M. A., F. Acevedo R. y E. Jáuregui O.**, (1989). "Atlas climático del Estado de Veracruz. Universidad Veracruzana, Colección Textos Universitarios, 150 pp.

**Viessman, W., J. W. Knapp and G. L. Lewis**, (1977). "Introduction to hydrology". Harper and Row publishers, 704 pp.

**Yevjevich, V.**, (1972). "Probability and statistical in hydrology". Water resources publication, 302 pp.

**Páginas consultadas en Internet:**

<http://hispaqua.cedex.es/>

<http://www.libraries.psu.edu/>

<http://www.oas.org/dsd/Spanish/RecursosHidricos-Res-Proy.htm>

<http://www.inegi.gob.mx>

<http://sigc.cna.gob.mx/>

<http://www.csva.gob.mx>

<http://www.csva.gob.mx/biblioteca/estudiosProyectos/terminados/>

<http://www.consejosdecuenca.org.mx/>

<http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Directorio/Default.aspx>

<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones.html>

[http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Estadisticas/Central/Cap\\_3\\_EAM2005.pdf](http://www.cna.gob.mx/eCNA/Espaniol/Estadisticas/Central/Cap_3_EAM2005.pdf)

<http://www.csva.gob.mx/biblioteca/estudiosProyectos/terminados/ProgHPre/Cap4.pdf>

<http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/metadtaexplorer/index.html>

<http://www.geologia.unam.mx>

<http://www.igeograf.unam.mx>

[http://www.puc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/html/1e01.html](http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/html/1e01.html)

<http://www.fortunecity.com>