

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ACATLÁN**

**APLICACIÓN DEL MODELO LLUVIA - ESCURRIMIENTO
PARA EL DISEÑO DE LA OBRA DE DRENAJE
REQUERIDA EN EL RÍO ALTZAYANCA UBICADA EN EL
KM 48 + 626 DE LA CARRETERA AMOZOC - PEROTE,
TLAX.**

TESINA

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

AGUILAR GALINDO JOSÉ LUIS

ASESOR:

ING. FRANCISCO ANZURES ROSAS

OCTUBRE 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

DEDICATORIAS

A MIS PADRES:

POR HABERME DADO LA SATISFACCIÓN DE VIVIR Y CONTAR SIEMPRE CON ELLOS A TRAVÉS DE SUS CONSEJOS Y SU CARÍÑO.

A MIS HERMANOS:

ROSA Y JUAN PARA QUE SEA UN PRIMER PASO EN LA SUPERACIÓN PROFESIONAL DE LOS TRES.

A MARIA EDITH

GRACIAS POR APOYARME TANTO EN VARIAS OCASIONES DE MI VIDA Y POR ENSEÑARME A VALORAR EL TIEMPO Y EL ESFUERZO DE NUESTRA RELACION "TE AMO".

AGRADECIMIENTOS

A DIOS:

GRACIAS SEÑOR POR ENSEÑARME LA LUZ DE TU CAMINO Y POR SENTIR QUE EN CADA MOMENTO ESTAS CONMIGO.

A MI ASESOR:

ING. FRANCISCO ANZURES ROSAS.

A MIS AMIGOS Y PROFESORES

POR AYUDARME A COMPRENDER MIS ERRORES

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. GENERALIDADES	3
1.1. CONCEPTOS BÁSICOS DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL.....	3
1.1.1. <i>Características generales de una cuenca</i>	4
1.1.1.1. Área y Perímetro	4
1.1.1.2. Parámetros asociados a la longitud.....	4
1.1.1.3. La forma de la cuenca	5
1.1.1.4. Elevación, Pendiente media de la cuenca y del cauce principal.....	7
1.1.1.5. La red de drenaje.....	12
1.1.1.6. La estructura de la red de drenaje.....	13
1.1.1.7. Tiempo de concentración de una cuenca.....	13
1.1.2. <i>Medición de la precipitación y su análisis</i>	14
1.1.2.1. Pluviómetros	15
1.1.2.2. Pluviógrafos	15
1.1.2.3. Precipitación media	15
1.1.3. <i>Definición de Periodo de retorno (Tr)</i>	17
1.2. AJUSTE DE DATOS CON FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	20
1.2.1. <i>Conceptos teóricos de las técnicas de estimación de parámetros</i>	20
1.2.2. <i>Funciones y estimadores de distribuciones probabilísticas</i>	21
1.2.3. <i>Selección de la función de distribución de probabilidad</i>	23
1.3. DEFINICIÓN DE MODELOS LLUVIA – ESCURRIMIENTO	24
2. INFORMACIÓN GENERAL DEL PUENTE VEHICULAR.....	25
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA OBRA	25
2.2. LOCALIZACIÓN DEL PUENTE VEHICULAR	28
2.2.1. <i>Regiones Hidrológicas de la República Mexicana</i>	28
2.2.2. <i>Región Hidrológica número 18</i>	28
2.2.3. <i>Ubicación geográfica del puente vehicular</i>	29
2.3. DELIMITACIÓN Y CÁLCULO DE CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA CUENCA	30
2.3.1. <i>Delimitación de la cuenca</i>	31
2.3.2. <i>Cálculo de características principales de la cuenca</i>	32
2.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN	37
2.4.1. <i>Ubicación y determinación de las estaciones climatológicas por analizar en la cuenca</i>	38
2.4.2. <i>Extracción de las precipitaciones para las estaciones climatológicas seleccionadas, mediante el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC)</i>	39
2.4.3. <i>Ajuste de datos de las estaciones climatológicas a una función de probabilidad mediante la utilización del programa de computo AX</i>	46
2.4.1. <i>Determinación de la lluvia media aplicando el método de polígonos de Thiessen</i>	56
3. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE AVENIDAS DE DISEÑO	60
3.1. MÉTODO RACIONAL	60
3.1.1. <i>Número de escurrimiento</i>	60
3.1.2. <i>Determinación de la lluvia media de diseño</i>	62
3.1.3. <i>Determinación de la lluvia de exceso</i>	64
3.1.4. <i>Coefficiente de escurrimiento</i>	65
3.2. HIDROGRAMAS UNITARIOS SINTETICOS	67
3.2.1. <i>Hidrograma Unitario Triangular (HUT)</i>	67
3.2.2. <i>Método de Ven Te Chow</i>	70
CONCLUSIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA	75

INTRODUCCIÓN

El obtener el gasto de diseño asociado a un periodo de retorno para una corriente fluvial es de gran utilidad en el dimensionamiento de una obra hidráulica, si se toman en cuenta como factor principal, la seguridad de los habitantes de la zona. En tal caso tenemos como ejemplo las obras de drenaje requeridas sobre un río a través de la construcción de un puente carretero.

El presente trabajo muestra como obtener el gasto de diseño con información que se tiene de estaciones pluviométricas, para el dimensionamiento de un puente carretero que cruzará el río Altzayanca ubicado en el estado de Tlaxcala, dicha estructura formara parte de la carretera Amozoc-Perote en el kilómetro 48+626.

El trabajo esta compuesto básicamente de tres capítulos de los que en forma particular puede resumirse lo siguiente:

- Capítulo 1 "Generalidades"

Presenta en forma sencilla la teoría de la hidrología superficial como: definición y delimitación de una cuenca, características físicas (área, perímetro y pendiente de la cuenca), longitud y pendiente del cauce principal, etc.

Por otro lado se mencionan diferentes aparatos para medir la precipitación de una región conocidos generalmente como pluviómetros y pluviógrafos, las diferencias entre ellos radican en su forma de operar, ya que de los primeros solo se puede obtener la altura de precipitación de una tormenta sin saber exactamente cual fue la distribución de la misma en su tiempo de duración, mientras que de los segundos se obtiene una grafica que refleja las variaciones de la lluvia en toda su duración. Es evidente que estos aparatos solo miden lluvia puntual, es decir, solo miden la lluvia que cae en el sitio donde se encuentra ubicado el aparato, por lo que no se tiene idea exacta de lo que pasa en los alrededores, como solución a esto se recurre a métodos basados en obtener una lluvia media o promedio algo así como una ponderación de datos recolectados en varios pluviómetros o pluviógrafos. De esta manera los métodos descritos en este trabajo son: promedio aritmético, polígonos de Thiesen y el método de Isoyetas, cada uno con limitaciones diferentes de acuerdo a la precisión que se quiera obtener en los resultados.

Se mencionan de manera muy somera las funciones de probabilidad como la Normal, Exponencial, Gumbel, etc. El propósito fundamental de ajustar los registros de precipitación a una función de probabilidad, es asociarlos a un periodo de retorno, y encontrar el valor mas probable de precipitación para un periodo de retorno seleccionado previamente, lo cual servirá para calcular la avenida de diseño mediante un modelo lluvia- escurrimiento.

- Capítulo 2 "Información General y Disponible del Cruce Vehicular"

Se da una breve descripción de las regiones hidrológicas definidas en el país, para después tratar específicamente la región hidrológica No 18^a, también llamada Alto Balsas, en donde se ubica el cruce carretero con coordenadas geográficas de 97° 44.2', 19° 21.4' cuya intersección queda dentro del Estado de Tlaxcala.

Después de haber ubicado el sitio de cruce, la información arrojada por el programa de computo relacionado a Sistemas de Información Geográfica

denominado Arc View (imágenes de delimitación, área, perímetro y pendiente de la cuenca además de longitud y pendiente del cauce principal) se utilizará para determinar las características físicas de la cuenca como son factor de forma, índices de compacidad, etc., los que darán idea de la forma de la cuenca.

Con la ubicación del cruce carretero y con la ayuda del mapa de la región 18A (que tiene la ubicación de las estaciones pluviométricas existentes) se pueden determinar las estaciones vecinas que se utilizaran para calcular la lluvia media.

Las estaciones seleccionadas fueron Cuapixtla, Libres, Oriental, Huamantla, Sta. Maria Tocatlan y Colonia Temextla, algunas de las cuales están ubicadas en el Estado de Tlaxcala y otras en el de Puebla.

La información de precipitación de cada estación es obtenida del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC), los registros de precipitación o altura de lluvia arrojados por el programa están en milímetros y corresponden a todos los días de diferentes años, lo que ayuda a obtener las lluvias máximas por cada año y para cada una de las estaciones.

Posteriormente se realiza el ajuste a una función de probabilidad mediante la utilización del programa AX, diseñado por el CENAPRED, lo que llevará a estimar la lluvia media aplicando los polígonos de Thiesen.

- Capítulo 3 "Métodos para el calculo de avenidas de diseño"

El primer método utilizado para el calculo de la avenida de diseño es el método racional el cual bajo medidas conservadoras proporciona resultados o valores elevados lo que ayuda a obtener estructuras más seguras al tener dimensiones mayores. Los parámetros de coeficiente de escurrimiento e intensidad de lluvia utilizados en la ecuación del método racional, son obtenidos a través de la determinación del Número de escurrimiento, para calcularlo se necesita información del tipo de material que existe en el lugar y tablas que se presentan en este capítulo.

La lluvia media de diseño representa la lluvia con la que será determinada la avenida de diseño, es comúnmente llamada lluvia total y es el resultado del ajuste probabilístico de las lluvias máximas extraídas con ERIC II y de la aplicación de las ecuaciones propuestas por Emil Kuishiling y C.E. Gransky quienes consideran que la duración de la tormenta es igual al tiempo de concentración de la cuenca.

Los hidrogramas unitarios son otro método para determinar la avenida de diseño, que han resultado prácticos y menos laboriosos, entre estos se tienen el "Hidrograma Unitario Triangular (HUT)", el método del SCS "Soil Conservation Service" y el método de "Ven Te Chow". El objetivo de estos hidrogramas es representar en forma parcial el hidrograma correspondiente al gasto máximo en un tiempo llamado pico y obtenido con los resultados de la lluvia en exceso.

1. GENERALIDADES

1.1. *Conceptos básicos de Hidrología superficial*

Antecedentes

La hidrología como ciencia se puede referir a las obras de ingeniería en la antigüedad que servían para abastecer de agua a las ciudades o para regar campos de cultivo. Esta ciencia comienza formalmente en el año de 1930 en los países industrializados, en particular en los Estados Unidos, como una consecuencia de los grandes desarrollos agrícolas y de los emporios económicos industriales de la época, lo cual originó un crecimiento demográfico acelerado, y obligó a los ingenieros planificadores a considerar el problema habitual de la escasez de agua, de manera que las nuevas ciudades exigían volúmenes de agua cada vez mayores tanto para uso doméstico, como para el industrial (causado este principalmente por los grandes procesos que desarrollaban las máquinas en los cuales el agua era un factor determinante para lograr el producto).

Con este marco de referencia se realizaron estudios a conciencia sobre el recurso del agua con el fin de conocer sus volúmenes y su variabilidad espacio-tiempo, así como también sus características físico-químicas y biológicas para su consumo.

La solución a los problemas ocasionados por el escurrimiento superficial son el objeto principal de la hidrología para lo cual se requiere una adecuada planificación de los recursos hidráulicos, de un uso económico, seguro y eficaz del agua. Es entonces que la hidrología se presenta como una ciencia, en el momento en que se cuestiona la cantidad y la calidad del recurso del agua.

Definición de Hidrología.

La definición que se consideran más completa es la siguiente:

Según el Consejo Federal para la Ciencia y la Tecnología, hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia su circulación en la superficie terrestre, sus propiedades físicas y químicas y su relación con el medio ambiente incluyendo a los seres vivos.

La ingeniería civil aprovecha los conocimientos que se tiene de la hidrología para aplicarlos en actividades que le sirvan en el diseño y construcción de obras hidráulicas. Con base en esto último se llega a la hidrología aplicada que tiene como finalidad el proporcionar las bases científicas y meteorológicas para la elaboración de los estudios hidrológicos necesarios en el diseño de proyectos de aprovechamiento hidráulico que permitan el control y el paso a la avenida pluvial.

Definición de Cuenca

Existen varias definiciones de cuenca pero la más específica es la siguiente:

Cuenca:

Es la totalidad del área drenada por una corriente o sistema interconectado de cauces tales que el escurrimiento del agua

original de tal área es descargado en una única salida. La cuenca hidrológica funciona como un gran conductor de las precipitaciones transformándolas en escurrimiento.

1.1.1. Características generales de una cuenca

1.1.1.1. Área y Perímetro

Es un parámetro importante que se considera dentro de la hidrología pues determina varios fenómenos presentados en la cuenca, tales como el volumen del agua que ingresa por precipitación, la magnitud de los caudales, etc.

De forma rigurosa el área de la superficie real de la cuenca tendría que ser afectada por un ángulo de inclinación (ver ecuación 1-1). Esta área superficial real puede por simple lógica parecer una medida representativa del tamaño verdadero de la cuenca pero es una medida que se puede prestar a equivocaciones, por lo que es común considerarla totalmente horizontal.

$$A_s = \frac{A}{\cos i} \text{-----Ecuación 1-1}$$

Donde:

A_s : es el área de la superficie real.

A: es la superficie medida directamente en el plano topográfico.

i: es el ángulo que define la pendiente media de la cuenca.

La Comisión Nacional del Agua a través de su manual de ingeniería de ríos capítulo 3 correspondiente al "estudio hidrológico para obras de protección" clasifica a las cuencas con respecto a su tamaño, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tamaño de la cuenca, en km ²	Descripción
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-Pequeña
500 a 2500	Intermedia-Grande
2500 a 5000	Grande
>5000	Muy grande

Tabla 1-1; Clasificación de la cuenca con respecto a su tamaño (Comisión Nacional del Agua, Manual de ingeniería de ríos)

Perímetro

El perímetro (P) de una cuenca es la longitud de su límite exterior o parteaguas. Su magnitud depende de la superficie y de la forma de la cuenca.

1.1.1.2. Parámetros asociados a la longitud

Una cuenca tiene varios tipos de longitud que se obtienen generalmente midiéndolos sobre mapas topográficos; cuando el mapa está en papel se puede medir con un compás, una regla, o leyendo las coordenadas en los puntos de cambio de dirección y calculando las distancias entre los puntos coordenados conocidos o se recurre a la información de mapas digitalizados.

La Ilustración 1-1 muestra algunos de estos parámetros longitudinales, entre los que se encuentran:

- *Longitud de la cuenca*, es la longitud de una línea recta con dirección "paralela" al cauce principal.
- *Longitud del cauce principal*; es una magnitud característica útil cuyo efecto es importante en la respuesta hidrológica, ya que en un río corto los efectos de la precipitación dentro de la cuenca se hacen sentir más rápidamente que en un río largo.

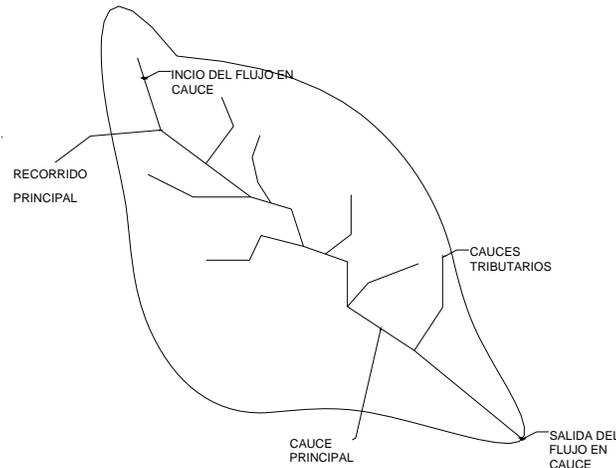


Ilustración 1-1. Longitud de la cuenca, Cauce principal y recorrido principal de la cuenca.

1.1.1.3. La forma de la cuenca

La forma de la cuenca es la configuración geométrica tal como esta proyectada sobre el plano horizontal. Se pensaba anteriormente que era de gran importancia y que podía incidir sensiblemente en el tiempo de respuesta de la cuenca, es decir, el tiempo de recorrido del agua a través de la red de drenaje, y, por consiguiente, a la forma del hidrograma resultante de una lluvia.

Para determinar la forma de una cuenca se utilizan varios índices asociados a la relación área-perímetro. Los más comunes son:

- **Índice o coeficiente de compacidad**

El índice o coeficiente de compacidad K_c (ecuación 1-4), es la relación entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que la cuenca.

$$K_c = \frac{P}{2\pi R} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \text{-----Ecuación 1-2}$$

Donde:

K_c , coeficiente de compacidad.

P , corresponde a un círculo de igual área de la cuenca.

R , radio del círculo de igual área de la cuenca.

A , área de la cuenca.

En cualquier caso, el coeficiente sería igual que la unidad si fuera completamente circular, y es igual a 1.128 en el caso de una cuenca cuadrada, pudiendo alcanzar valores próximos a 3 en cuencas muy alargadas.

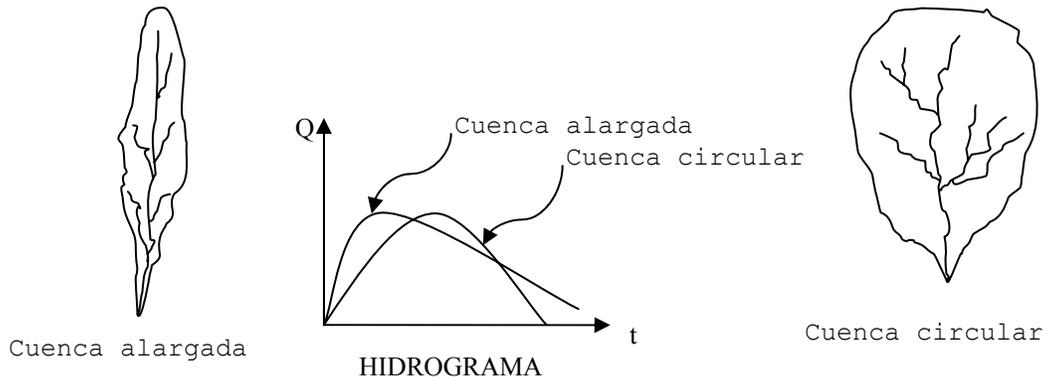


Ilustración 1-2 Comparación entre hidrogramas de una cuenca alargada y una circular.

- **Factor de forma (Rf)**

Este parámetro es el cociente entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud máxima, la longitud máxima es la distancia en línea recta entre el punto de salida de la cuenca y el punto más alejado de esta en dirección del cauce principal del río (ver Ilustración 1-1)

El rango de valores del factor de forma van de 0.6 a 1.0; los valores de Rf que van de 0.6 a 0.8 indicarán una topografía de fuertes relieves y pendientes del terreno pronunciadas, si el factor de forma es aproximadamente 1.0, los relieves serán bajos y las pendientes serán suaves.

$$R_f = \frac{A}{L_m^2} \text{-----Ecuación 1-3}$$

Donde:

- L_m: es la longitud máxima o recorrido principal de la cuenca.
- A: la superficie de la cuenca,
- R_f: el factor de forma

- **Radio o relación de elongación**

El radio o la relación de elongación R_e, es la relación entre el diámetro de un círculo que tenga la misma área de la cuenca y su longitud máxima (Ecuación 1-4). Un coeficiente de 1.0 pertenecerá a una cuenca llana y de 0.6 para los que tengan un relieve marcado.

$$R_e = \frac{D}{L_m} = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L_m} \text{-----Ecuación 1-4}$$

- **Radio o relación de circularidad (Rci).**

El radio o la relación de circularidad R_{ci} , es el cociente entre el área de la cuenca (A) y la del círculo cuyo perímetro (P) es igual al de la cuenca:

$$R_{ci} = \frac{A_{cuenca}}{A_{circulo}} = \frac{4\pi A}{P^2} \text{-----Ecuación 1-5}$$

Donde:

A y P: son el área y el perímetro de la cuenca respectivamente.

$A_{circulo}$: área de un círculo cuyo perímetro P, es igual al de la cuenca.

1.1.1.4.Elevación, Pendiente media de la cuenca y del cauce principal

La influencia del relieve sobre la respuesta hidrológica de la cuenca es importante, puesto que a mayores pendientes corresponden mayores velocidades en las corrientes y menor será el tiempo de concentración. Existen dos métodos muy conocidos para determinar la pendiente media de la cuenca, el método de Alvord y el de Horton.

- Método de Alvord

En este criterio se analiza la pendiente que existe entre curvas de nivel analizando una faja o franjas definidas por las líneas medias que pasan entre las curvas de nivel (ver Ilustración 1-3), de donde se obtiene la pendiente para cada una de las franjas con la siguiente ecuación:

$$Sm_i = \frac{D_i}{W_i} \text{-----Ecuación 1-6}$$

Donde:

D_i : es el desnivel entre las líneas medias.

W_i : ancho de la franja.

Si W_i es el ancho de la franja entonces se tendrá:

$$a_i = W_i \times l_i \quad \therefore \quad W_i = \frac{l_i}{a_i} \text{-----Ecuación 1-7}$$

Donde:

a_i : área de la franja en km^2

l_i : longitud de la curva de nivel en km

De esta manera la pendiente de la cuenca será el promedio de la pendiente de cada franja o faja en relación a su área total, si consideramos n fajas o franjas se tiene:

$$Sm_c = \frac{D_1 a_1}{W_1 A} + \frac{D_2 a_2}{W_2 A} + \dots + \frac{D_n a_n}{W_n A} \text{-----Ecuación 1-8}$$

Considerando que el desnivel entre curvas de nivel es constante y ordenando términos.

$$Sm_c = \frac{D}{A} (l_1 + l_2 + \dots + l_n) \text{-----Ecuación 1-9}$$

Por lo que

$$Sm_c = \frac{D}{A} \sum_{i=1}^n l \text{-----Ecuación 1-10}$$

Donde:

- Sm_c: es la pendiente media de la cuenca.
- D: desnivel entre dos curvas de nivel.
- A: la superficie total del área de la cuenca.
- n: número total de franjas.
- l: longitud de la curva de nivel para cada franja dentro de la cuenca.

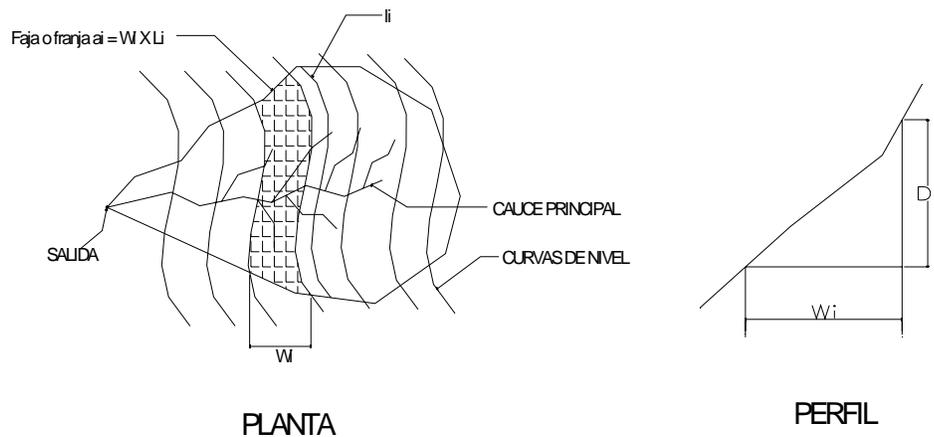


Ilustración 1-3 Estimación de la pendiente media de la cuenca por el método de Halvord

- Método de Horton

En este método se debe trazar una malla sobre el área de la cuenca en estudio, la cual se orienta en el sentido de la corriente principal. El número mínimo de intersecciones en la malla es 100, con lo cual se tendrá una buena aproximación de la pendiente.

Una vez definida la malla, se mide la longitud de cada línea comprendida dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada una de estas con las curvas de nivel. La pendiente media de la cuenca en cada dirección de la malla se determina con las ecuaciones que se encuentran a continuación.

$$S_x = \frac{N_x D}{L_x} \quad y \quad S_y = \frac{N_y D}{L_y} \text{-----Ecuaciones 1-11}$$

Donde:

- D: Desnivel constante entre curvas de nivel en km
- L_x: Longitud total en km de las líneas de la malla en la dirección x, comprendidas dentro de la cuenca.
- L_y: Longitud total en km de las líneas de la malla en la dirección y, comprendidas dentro de la cuenca.
- N_x: Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección x, con las curvas de nivel.
- N_y: Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección y, con las curvas de nivel.
- S_x: Pendiente de la cuenca en dirección x, adimensional.
- S_y: Pendiente de la cuenca en dirección y, adimensional.

La pendiente media de la cuenca se determina con la ecuación siguiente

$$Sm_c = \frac{ND \sec \theta}{L} = \frac{(N_x + N_y) D \sec \theta}{(L_x + L_y)} \text{----- Ecuación 1-12}$$

Donde:

θ: es el ángulo entre las líneas de la malla y las curvas de nivel.

Como resulta demasiado laborioso determinar la sec θ de cada intersección. Horton sugiere utilizar un valor promedio de 1.57. En la practica resulta igualmente eficaz ignorar el termino sec θ, o bien considerar el promedio aritmético (ver ecuación 1-13) o el geométrico (ver ecuación 1-14) de las pendientes S_x y S_y como pendiente de la cuenca.

$$Sm_c = \frac{S_x + S_y}{2} \text{-----Ecuación 1-13}$$

$$Sm_c = \sqrt{S_x \times S_y} \text{-----Ecuación 1-14}$$

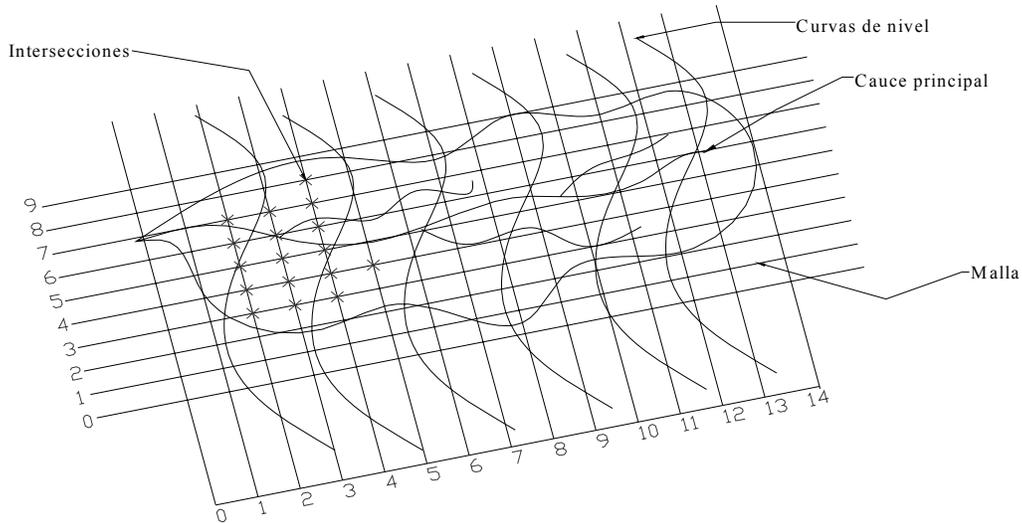


Ilustración 1-4 Estimación de la pendiente media de la cuenca por el método de Horton

La elevación media de la cuenca se obtiene fácilmente mediante una malla generada sobre el plano topográfico del sitio en estudio. Para cada una de las intersecciones dentro de la cuenca se obtiene el valor de la elevación E_i , por lo que solo se requiere obtener el promedio de al menos 100 puntos de la malla para determinar la pendiente media utilizando la ecuación 1-15.

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \text{----- Ecuación 1-15}$$

Donde:

- Em: es la elevación media
- E: elevación de la intersección
- n: número total de intersecciones

Uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca a una tormenta es la pendiente del cauce principal, dicha pendiente puede ser evaluada por criterios como los siguientes:

- **Criterios simplificados:** El primero consiste en obtener la relación que hay entre el desnivel total del cauce (H) y la longitud (L) del mismo, de acuerdo al valor obtenido se puede clasificar la topografía del terreno como indica la tabla 1-2. El segundo criterio es llamado **del 10% y 15%**, que consiste en asimilar a la pendiente media como la pendiente trazada entre dos puntos que se encuentran al 85% y 10% de la distancia a partir del punto más alejado y el punto de desagüe siguiendo el curso principal de la corriente, de esta manera la pendiente media será calculada mediante la ecuación 1-16.

Pendiente (S) en porcentaje	Tipo de terreno
2	Llano
5	Suave

10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente Accidentado
50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Tabla 1-2 Clasificación de las pendientes de acuerdo a la topografía del terreno.

$$S = \frac{H}{75L} \text{----- Ecuación 1-16}$$

- Criterio de la pendiente compensada, propone calcular la pendiente media como una línea recta que apoyándose en el extremo de aguas abajo de la corriente, hace que se tengan áreas iguales entre el perfil del cauce y la línea recta (Ilustración 1-5)

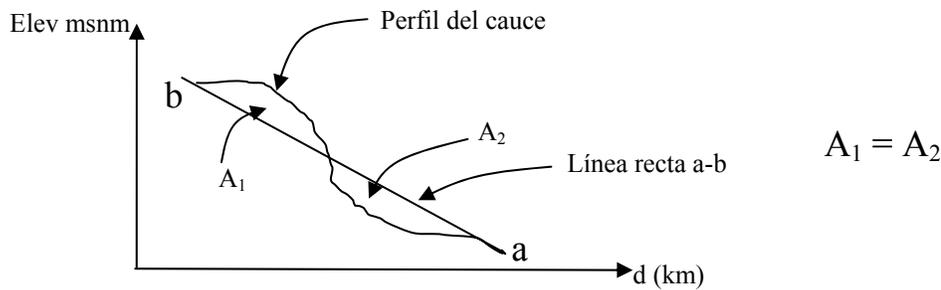


Ilustración 1-5 Pendiente media del cauce principal mediante el criterio de la pendiente compensada

- Criterio de Taylor - Schwarz, este propone calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión. De forma general la aplicación de las ecuaciones obtenidas mediante este criterio están basadas en dividir al cauce principal en "m" tramos (se recomienda m>5) de igual longitud (Δ_x) ver Ilustración 1-6, de donde se obtiene la ecuación 1-17. Si se varían las longitudes de los "m" tramos, la pendiente media se obtendrá con la ecuación 1-18.

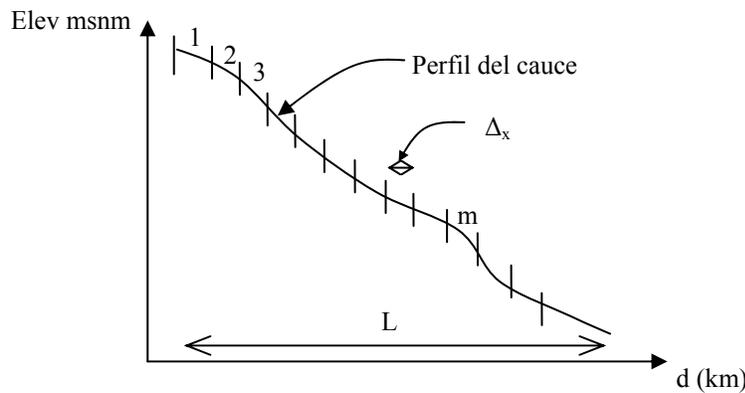


Ilustración 1-6 Pendiente media del cauce principal propuesta por Taylor-Schwarz

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \text{-----Ecuación 1-17}$$

$$S = \left[\frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \text{-----Ecuación 1-18}$$

Donde:

- m: Número de tramos en los que esta dividido el perfil del cauce
- L: Longitud total del cauce
- S₁, S₂, ... S_m: Pendientes para cada tramo
- l₁, l₂, ... l_m: Longitudes variadas de los "m" tramos

1.1.1.5. La red de drenaje

- Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (D) de una cuenca es el cociente entre la longitud total (L_T) de los canales de flujo pertenecientes a su red de drenaje y la superficie (A) de la cuenca:

$$D = \frac{L_T}{A} \text{-----Ecuación 1-19}$$

Este parámetro es, en cierto modo, un reflejo de la dinámica de la cuenca, de la estabilidad de la red hidrográfica y del tipo de escurrimiento superficial, así como de la respuesta de la cuenca a un chubasco.

- Constante de estabilidad del río

La constante de estabilidad de un río, es conocida como el valor inverso de la densidad de drenaje:

$$C = \frac{A}{L_T} = \frac{1}{D} \text{-----Ecuación 1-20}$$

Representa físicamente la superficie de cuenca necesaria para mantener condiciones hidrológicas estables en una unidad de longitud de canal. Así, regiones con suelo rocoso muy resistente, o con suelos altamente permeables que implican una elevada capacidad de infiltración, o regiones con densa cobertura vegetal, tienen valores bajos de la constante de estabilidad y altos en la densidad de drenaje.

- Densidad hidrográfica

Se define como el cociente entre el número de segmentos de canal de la cuenca y la superficie (A) de la misma:

$$F = \frac{N_T}{A} \text{-----Ecuación 1-21}$$

Donde N_T es la suma de todos los segmentos de canal que forman la red hidrográfica de la cuenca, entendiendo como tales a todo tramo de canal que no sufre aporte alguno de otro canal.

1.1.1.6. La estructura de la red de drenaje

La red hidrográfica esta integrada por una corriente principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden hacia las partes más altas de la cuenca. El análisis cuantitativo de la red se basa en el método de clasificación de la red de canales de Horton-Strahler.

Las redes de drenaje pueden ser modeladas o representadas como árboles, los cuales están conformados por un conjunto de *nodos* conectados unos a otros por *los tributarios* de manera que cada nodo tiene solo una ruta hacia la *salida*.

En la Ilustración 1-7, se muestra un sencillo ejemplo de ordenación de una red hidrográfica según el criterio de Horton-Strahler.

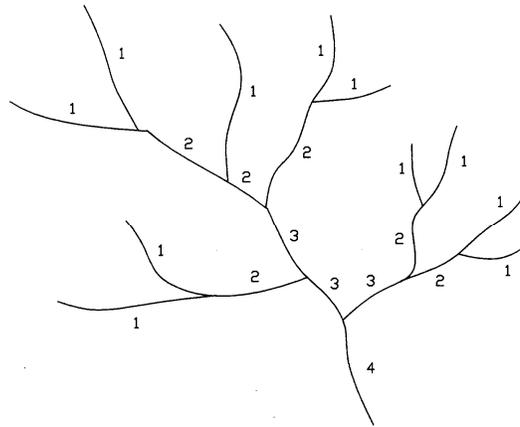


Ilustración 1-7. Ordenación de una red de canales según Strahler.

Debe mencionarse que para determinar con precisión el orden de una cuenca, la escala del plano juega un papel importante; se recomienda que sean escalas pequeñas para que puedan apreciarse la mayoría de los ríos.

1.1.1.7. Tiempo de concentración de una cuenca

Se atribuye muy comúnmente el tiempo de concentración al tiempo que tarda una partícula de agua en llegar al punto de salida de la cuenca. También es denominado tiempo de respuesta o de equilibrio, definido así como el tiempo requerido para que durante un aguacero uniforme se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe.

A continuación se presentan algunas formulas para la determinación del tiempo de concentración:

- Formula de Rowe

$$T_c = \left[\frac{0.87L^3}{H} \right]^{0.385} \text{-----Ecuación 1-22}$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración de la cuenca en hrs.
 L: Es la longitud del colector principal en km.
 H: Es el desnivel entre el punto más alejado y la salida de la cuenca, medido sobre el cauce principal en m.

- Formula de Kirpich

$$T_c = 0.0003245 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \text{----- Ecuación 1-23}$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración de la cuenca en hrs.
 L: Longitud del colector principal en metros.
 S: Pendiente media del colector principal.

- Formula del Servicio de Conservación del Suelo de E.U. (SCS)

$$T_c = \frac{L^{1.15}}{3085H^{0.38}} \text{-----Ecuación 1-24}$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración en hrs.
 H: Desnivel máximo sobre el colector principal en metros.
 L: Longitud del cauce principal en metros.

1.1.2. Medición de la precipitación y su análisis

La medición de la precipitación se lleva a cabo mediante la utilización de pluviómetros y pluviógrafos. La diferencia entre estos es que el primero es un recipiente con una escala visual que indica la altura de precipitación, mientras que el segundo esta constituido por un sistema de flotación que tiene como fin dibujar en un papel la altura de lluvia por medio de una plumilla y un tambor giratorio que se encuentra adaptado a un sistema de reloj. Ambos aparatos son de gran utilidad sin embargo, se ha tenido preferencia por la utilización de los pluviómetros debido a su bajo costo de mantenimiento, ya que las mediciones se hacen por lo regular cada 24 hrs. Para el caso del análisis hidrológico, es mucho mejor la información obtenida con pluviógrafos por la cantidad de datos que se pueden recabar durante un día completo o una tormenta.

Cabe mencionar que México cuenta con 5044 estaciones pluviométricas y 425 pluviográficas. Es por esto que la información pluviométrica disponible es mucho mayor que la pluviográfica, por lo que es conveniente utilizar

métodos que relacionen este tipo de información como es el caso de los modelos lluvia - escurrimiento.

1.1.2.1. Pluviómetros

El pluviómetro en su forma usual consiste en un recipiente de lámina en forma cilíndrica que está graduado y cuya sección es diez veces menor que la de un embudo receptor y que es usado muy comúnmente en México. La boca del pluviómetro o embudo receptor tiene un diámetro de 226 mm y el correspondiente al recipiente de lámina o vaso medidor es de 72 mm con una altura de 61 mm, esto es con el objeto de poder leer a simple vista la cantidad de lluvia precipitada, de esta forma un milímetro en el embudo receptor será un centímetro en la probeta de lámina, con lo que se logra tener una aproximación de hasta décimos de milímetros en la lectura de la altura de lluvia. Generalmente se acostumbra hacer una lectura cada 24 hrs a las 8:00 de la mañana.

1.1.2.2. Pluviógrafos

Por medio del pluviógrafo se lleva un registro de altura de lluvia contra tiempo. El más utilizado en México es el de sistema Hellmann el cual tiene un flotador cuyo ascenso es producido por el aumento de la lluvia captada. El recipiente que contiene al flotador está ligado a un sistema de reloj que origina el movimiento de una aguja o plumilla la cual dibuja sobre un papel registrador que se encuentra montado sobre un tambor giratorio; al llegar a la máxima capacidad de lluvia captada (10 mm) en el recipiente, el vaciado es automático y es efectuado por un sistema de sifón Autocebante.

1.1.2.3. Precipitación media

La altura de lluvia que cae en un sitio dado difiere de la que cae en los alrededores aunque sea en sitios cercanos; los pluviómetros y pluviógrafos registran solamente la lluvia puntual, pero no indican la precipitación representativa o media de una tormenta, para ello se requiere de mediciones en varias estaciones localizadas tanto dentro de la cuenca como en su vecindad. Una estación se considera vecina siempre y cuando la distancia al parteaguas sea pequeña, se recomienda que esta no exceda de 80 km. Existen varios métodos para el cálculo de la lluvia media los más conocidos son los siguientes:

a) Promedio Aritmético

Es igual a la media aritmética de las alturas de precipitación (ver ecuación 1-41) es decir, consiste en sumar la altura de precipitación registrada en cada una de las estaciones y dividirla entre el número total de estas

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \text{ -----Ecuación 1-25}$$

Donde:

P: precipitación media en mm

P_i : precipitación registrada en la estación i , en mm

n: número de estaciones

Este método no considera la distribución de estaciones en la cuenca por lo que resulta limitado en su uso, sobre todo cuando no se dispone de muchas estaciones.

b) Polígonos de Thiesen

Para la aplicación de este criterio se requiere señalar la ubicación de las estaciones en la cuenca (ver Ilustración 1-8a), ya sea en forma manual sobre algún plano o en un Sistema de Información Geográfica mediante el uso de una computadora. El propósito específico de este método es encontrar la precipitación media a través de polígonos trazados con las estaciones pluviométricas o pluviográficas más cercanas a la cuenca; de esta manera los polígonos formaran áreas de influencia para cada una de las estaciones, la metodología para trazar estos polígonos es la que se muestra a continuación:

1. Unir mediante líneas rectas las estaciones más próximas entre sí, con ello se formarán triángulos en cuyos vértices están las estaciones.
2. Trazar las mediatrices correspondientes a cada lado del triángulo, de esta manera los segmentos dibujados convergerán en un solo punto.
3. El área de influencia que corresponde para cada estación será el polígono que se forme después de haber trazado las mediatrices correspondiente a cada triángulo, en algunos casos los polígonos quedarán formados por las mediatrices y el parteaguas (ver Ilustración 1-8b).
4. La lluvia media se calcula entonces como un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente.

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i a_i)}{A_T} \text{-----Ecuación 1-26}$$

Donde:

- P_i: precipitación en la estación i, en mm
- a_i: área de influencia para la estación i, en km²
- A_T: área total de la cuenca, en km²

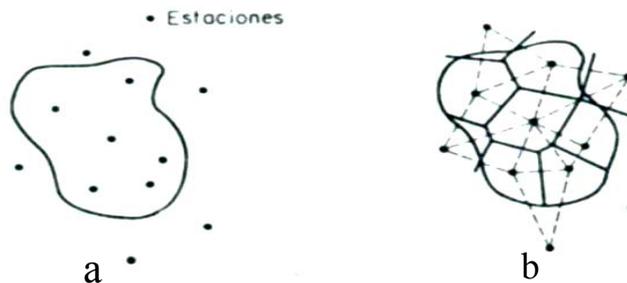


Ilustración 1-8 Polígonos de Thiesen

Este criterio intenta tomar en cuenta la distribución de la lluvia en la cuenca, pero puede tener limitaciones si las estaciones no están bien repartidas en toda la cuenca.

c) Método de Isoyetas

Para la aplicación de este método se requiere un plano con la localización de las estaciones. En cada una de ellas se anota el valor de la precipitación y se trazan las curvas de igual precipitación, denominadas isoyetas (ver Ilustración 1-9). El dibujo de las isoyetas es semejante al que se realiza en topografía para definir las curvas del nivel del terreno. Para encontrar la precipitación media mediante este método se utiliza la ecuación 1-27.

$$\bar{P} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (P_i a_i) \text{-----Ecuación 1-27}$$

Donde:

- P_i: precipitación promedio entre dos isoyetas consecutivas en mm.
- a_i: área limitada entre dos isoyetas consecutivas o entre una isoyeta y el parteaguas de la cuenca, en km².
- A_T: área total de la cuenca, en km²

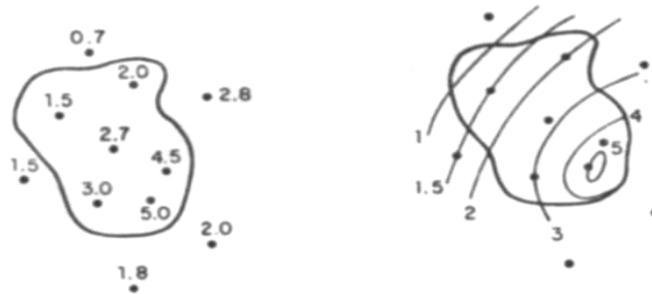


Ilustración 1-9 Plano de Isoyetas

Este método es el más preciso ya que toma en cuenta la distribución espacial de la lluvia en la cuenca, si las isoyetas son trazadas de manera correcta y por alguien con experiencia puede ser de gran utilidad, si no, equivaldrá solamente a obtener resultados parecidos a los polígonos de Thiessen.

1.1.3. Definición de Periodo de retorno (Tr)

El periodo de retorno Tr, expresado en años, se define como el número promedio de años en que un evento puede ser igualado o excedido.

Por otra parte la probabilidad de que un evento con un periodo de retorno Tr ocurra en cualquier año es igual a:

$$P = \frac{1}{Tr} \text{-----Ecuación 1-28}$$

Cuando se tienen datos de gastos o lluvias máximas anuales, para un cierto periodo y se desea aplicar algún método estadístico para extrapolar dichos datos a periodos de retorno mayores al de las mediciones, es necesario asignar un valor de Tr a cada dato registrado, el cual puede ser estimado

por la fórmula de Weibull (ecuación 1-29). Esta formula es considerada como la más eficiente para calcular la posición gráfica de los datos para cualquier función de distribución de probabilidad y es la más comúnmente usada en hidrología.

$$Tr = \frac{n+1}{m} \text{-----Ecuación 1-29}$$

Donde:

m: es el número de orden en una lista de mayor a menor de los datos
 n: es el número total de datos

Para eventos máximos anuales los datos se ordenan de mayor a menor y el lugar que ocupa dentro de la lista, cada uno de ellos, corresponde al valor de m; así por ejemplo, el valor mayor tiene una m=1, mientras que en el más pequeño m=n.

La expresión de Weibull no toma en cuenta el número de elementos del conjunto es decir, la longitud del registro. Una fórmula que si lo hace es la propuesta por Gringorten (ecuación 1-30).

$$Tr = \frac{n+1-2a}{m-a} \text{-----Ecuación 1-30}$$

En donde el valor de la variable "a" que esta comprendido ente 0 y 1, depende del valor de "n" y se encuentra en tabla 1-3

n	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
a	0.448	0.443	0.442	0.441	0.440	0.440	0.440	0.440	0.439	0.439

Tabla 1-3 Valores de la fórmula de Gringorten

Cuando se tiene un conjunto de eventos mínimos los valores que lo forman se ordenan del más pequeño hasta el más grande, en este caso el periodo de retorno debe entenderse como en número promedio de años en que el evento tiene valores menores o iguales a él.

El periodo de retorno con el cual debe calcularse la avenida de diseño para una estructura se define de acuerdo con lo establecido en la Tabla 1-4, Tabla 1-5 y Tabla 1-6.

Por otra parte en la selección de la avenida de diseño se deben considerar los beneficios que se esperan obtener con la construcción de la obra, particularmente en la protección de zonas agrícolas y/o urbanas, y los beneficios por la disminución en las pérdidas materiales y humanas.

No obstante, de que en la selección final del periodo de retorno para una estructura en particular interviene el criterio del ingeniero, es recomendable tener en cuenta lo siguiente:

- Importancia de la obra
- Magnitud de la estructura, por ejemplo la altura de los bordos, la capacidad del cauce, etc.
- Posible daño a propiedades adyacentes
- Costo de mantenimiento
- Costos de reparaciones a la obra

- Amortización del costo de la estructura de la obra
- Inconvenientes por suspensión de su operación
- Afectación de actividades económicas y vidas humanas en caso de falla

Características de la zona por proteger	Periodo de retorno en años
Parcelas agrícolas aisladas, sin posibles pérdidas de vidas humanas	5
Distritos de riego, sin riego de perdidas de vidas humanas	25
Zonas agrícolas poco pobladas	50
Zonas agrícolas con poblados	100
Zona industrial y urbana	500
Zona densamente poblada	1000
Ciudades	1000

Tabla 1-4 Periodo de retorno en función de la obra por proteger.

Tipo de estructura	Periodo de retorno, en años
Bordos	2 a 50
Zanja para drenaje	5 a 50
Drenaje de aguas pluviales	2 a 10
Drenaje en aeropuertos	5
Drenaje en carreteras	50
Puentes Grandes	100
Puentes pequeños	50
Alcantarillas	25

Tabla 1-5 Periodo de retorno para estructuras menores

Categoría	Almacenamiento en m ³	Altura en m	Perdidas de vidas	Daños	Avenidas de diseño
Grande	>61.7	>18.3	Considerable	Excesivos	Relación lluvia - escurrimiento usando la precipitación máxima probable
Intermedia	1.23 a 61.7	12.2 a 30.5	Posible, pero pocas	5 a 10 veces el costo de la presa	Relación lluvia- escurrimiento basada en la tormenta más severa registrada en el pasado, maximizada por punto de rocío o periodo de retorno de 1000 años
Pequeña	<1.23	<15.2	Ninguna	Mismo orden de magnitud que el costo de la presa	Periodo de retorno de 50 a 100 años

Tabla 1-6 Selección del periodo de una avenida de diseño en función de la altura de la cortina

1.2. Ajuste de datos con funciones de distribución de probabilidad

Para pronóstico de eventos cuyo tiempo de ocurrencia o magnitud no pueden determinarse, se debe recurrir a estudios de probabilidad para conocer la frecuencia con la cual un determinado fenómeno, puede ser igualado o excedido, dicha frecuencia se puede llevar a cabo con una serie anual es decir una serie de valores que consisten en el evento más grande por cada año.

Uno de los principales problemas que existe para la estimación de la lluvia de diseño es la inexistencia de registros de precipitación para periodos muy cortos. Si se grafican los eventos medidos se podrá utilizar un modelo aparente, un modelo en que se puedan extender en el tiempo los datos disponibles y así estimar el evento de diseño.

Al graficar lo eventos medidos se ajustarán a una función de distribución de frecuencias seleccionada mediante un método adecuado para obtener el error mínimo en la relación que existe entre los datos reales y los estimados. Dicha función será empleada para extrapolar los eventos de diseño, ya sea por medio de la graficación de la muestra o por medio de la estimación de sus parámetros.

1.2.1. Conceptos teóricos de las técnicas de estimación de parámetros

Existen varias técnicas de estimación de los parámetros de las distribuciones de probabilidad, para los modelos hidrológicos, como pueden ser el método de momentos, estimación de máxima verosimilitud, momentos de probabilidad pesada, mínimos cuadrados, los momentos L, principio de máxima entropía, etc. Para el propósito de este trabajo solo se verán los aspectos básicamente teóricos de los dos primeros.

- Método de Momentos

El método de los momentos es un procedimiento muy sencillo para encontrar un estimador de uno o más parámetros poblacionales. Consiste básicamente en plantear un sistema de ecuaciones, cuyo tamaño depende del número de parámetros a estimar. Esto se hace al igualar los momentos poblacionales con los muestrales.

- Método de estimación de máxima verosimilitud

El método de máxima verosimilitud estima los parámetros desconocidos al maximizar L (ecuación 1-31).

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m) \text{ -----Ecuación 1-31}$$

Donde: a_i , $i=1,2,\dots,m$, son desconocidos.

1.2.2. Funciones y estimadores de distribuciones probabilísticas

Si se grafican los eventos estimados en las estaciones, en dado caso de haber utilizado algún modelo de extensión de registros, o si se graficasen los eventos medidos reales en las estaciones, se podrá utilizar un modelo aparente, un modelo que contendrá los datos disponibles y/o estimados y así determinar el evento de diseño.

Se presentan a continuación las funciones de distribución de probabilidad y sus estimadores.

a) Distribución normal

Una distribución se dice que es normal si una variable puede tomar cualquier valor de $-\infty$ a $+\infty$ y la función de distribución se define de la siguiente manera:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2} dx \text{ -----Ecuación 1-32}$$

Donde:

μ : es la media o parámetro de ubicación

σ : desviación estándar o parámetro de escala

Para esta distribución el valor del coeficiente de asimetría debe ser igual a cero y el valor de la curtosis es igual a tres.

Los estimadores para los parámetros por el método de momentos son:

$$\mu = \bar{x}$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \text{ -----Ecuaciones 1-33}$$

b) Distribución exponencial con dos parámetros.

La función de distribución se presenta de la siguiente forma:

$$F(x) = 1 - e^{-\left[\frac{x-x_0}{\beta}\right]} \text{ -----Ecuación 1-34}$$

Donde:

x_0 : es el parámetro de ubicación

β : parámetro de escala

Los estimadores para los parámetros por el método de los momentos son:

$$\beta = S$$

$$x_0 = \bar{x} - S \text{ -----Ecuaciones 1-35}$$

c) Distribución lognormal con tres parámetros.

La función de distribución de probabilidad estará dada por:

$$F(x) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \text{ -----Ecuación 1-36}$$

Donde:

$$t = \frac{\ln(x - x_0) - \mu_y}{\sigma_y}$$

Los estimadores para los parámetros por el método de los momentos son:

$$\begin{aligned} x_0 &= \bar{x} \left(1 - \frac{n_x}{n_z} \right) \\ \mu_y &= \ln \left(\frac{S}{n_z} \right) - \frac{1}{2} \ln(n_z^2 + 1) \\ \sigma_y &= [\ln(n_z^2 + 1)]^{1/2} \end{aligned}$$

Ecuaciones 1-37

Donde:

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{S}{\bar{x}} \\ n_z &= \frac{1 - w^{2/3}}{w^{1/3}} \Rightarrow w = \frac{(g_{insesg}^2 + 4)^{1/2} - g_{insesg}}{2} \end{aligned}$$

d) Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel)

La función de distribución de probabilidad quedará definida por:

$$F(x) = e^{-e^{-\left[\frac{x-\mu}{\alpha}\right]}} \quad \alpha > 0, x > 0 \text{ -----Ecuación 1-38}$$

Donde:

- μ: es el parámetro de ubicación.
- α: es el parámetro de escala.

Los estimadores para los parámetros por el método de los momentos son:

$$\begin{aligned} \mu &= \bar{x} - 0.45S \\ \alpha &= \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78S \end{aligned} \text{ -----Ecuaciones 1-39}$$

e) Distribución Doble Gumbel o Gumbel Mixta

Algunas zonas del país son afectadas por ciclones y como consecuencia las avenidas se presentan de dos tipos, el primero que corresponde a los valores ordinarios de la temporada de lluvia y el segundo es provocado por las precipitaciones medidas por esos meteoros. Esto trae como consecuencia que se tenga dos poblaciones de eventos, cada una de ellas con diferentes características. En tales eventos se considera que el gasto pico de la avenida de diseño se debe analizar mediante una función de distribución especial conocida como de varias poblaciones, mixta o mezclada.

Para el análisis de gastos máximos anuales, se han utilizado diferentes funciones de distribución de probabilidad. Dentro de este grupo de funciones de distribuciones de probabilidad, se destaca la muy conocida Doble Gumbel o Gumbel Mixta, cuya función de distribución de probabilidad estará dada por la siguiente expresión:

$$F_m(x) = pe^{-e^{-\frac{x-\mu_1}{\alpha_1}}} + (1-p)e^{-e^{-\frac{x-\mu_2}{\alpha_2}}}; \quad x > 0, \quad \alpha_i > 0, \quad 0 < p < 1 \text{ ---Ecuación 1-40}$$

Donde:

- μ_1 : parámetro de ubicación de la primera población
- α_1 : parámetro de escala de la primera población
- μ_2 : parámetro de ubicación de la segunda población
- α_2 : parámetro de escala de la segunda población
- p: parámetro de asociación

Los estimadores para los parámetros dentro de esta distribución son generalmente obtenidos por medio por la maximización de la función logarítmica, ajustada de acuerdo a los cinco parámetros, es decir:

$$\ln L = \ln \prod_{i=1}^n f(x_i; \mu_1, \alpha_1, \mu_2, \alpha_2, p) \text{----- Ecuación 1-41}$$

1.2.3. Selección de la función de distribución de probabilidad

Un primer método que se usa para seleccionar la función consiste simplemente en inspeccionar una gráfica donde se haya dibujado cada una de las diferentes funciones junto con los punto medidos. La función de distribución de probabilidad será la que se apegue visualmente mejor a los datos medidos.

El método del error cuadrático mínimo es menos subjetivo que el anterior. Consiste en calcular para cada función de distribución el error cuadrático con la siguiente expresión:

$$C = \left[\sum_{i=1}^n (X_{ei} - X_{oi})^2 \right]^{1/2} \text{----- Ecuación 1-42}$$

Donde:

- X_{ei} : es el dato medido
- X_{oi} : es el dato calculado con la función de distribución de la muestra.

Otro método es el llamado de error estándar de ajuste, es muy parecido al cuadrático, solo que este toma en consideración los parámetros estadísticos a utilizar. Siendo su expresión la siguiente:

$$Ees = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Xc - Xr)^2}{a - 1} \right]^{1/2} \text{-----Ecuación 1-43}$$

Donde:

- Ees: error estándar de ajuste
- Xc : datos calculados
- Xr : datos reales
- a : número de parámetros a utilizar

1.3. Definición de Modelos Lluvia – Esguerrimiento

Los aparatos que existen en México para medir la precipitación, en su mayoría son los pluviómetros, debido a esto se han tenido que buscar metodologías o modelos que evalúen las avenidas de diseño con estos aparatos, utilizando las características de la cuenca y asociándola con la precipitación, con ello surgió la idea de relacionar la precipitación y el esguerrimiento o también conocido como modelo lluvia-esguerrimiento.

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a esguerrimiento son los siguientes:

1. Área de la cuenca
2. Altura total de precipitación
3. Características generales o promedio de la cuenca
4. Distribución de la lluvia en el tiempo
5. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca

Existen en la actualidad varios métodos para el análisis de los modelos lluvia - esguerrimiento como los empíricos, los de hidrogramas unitarios y los de simulación del esguerrimiento de la cuenca. El tercer método utiliza de forma general modelos matemáticos extensos y una amplia cantidad de información de la cuenca que en ocasiones solamente es capaz de ser analizada por una computadora.

2. INFORMACIÓN GENERAL DEL PUENTE VEHICULAR

2.1. Descripción general de la obra

La carretera Amozoc-Perote, tiene una longitud aproximada de 103 km, 2 carriles de circulación, un ancho de corona de 12 m, una velocidad máxima de proyecto de 110 km/h, y un costo total de 1500 millones de pesos, por lo que forma parte importante de infraestructura carretera en México, el objetivo principal de su construcción es tener una conexión directa al centro del país desde Xalapa y el puerto de Veracruz. Esta carretera forma parte del los proyectos de concesionamiento definidos por la SCT para el mejoramiento económico del país.

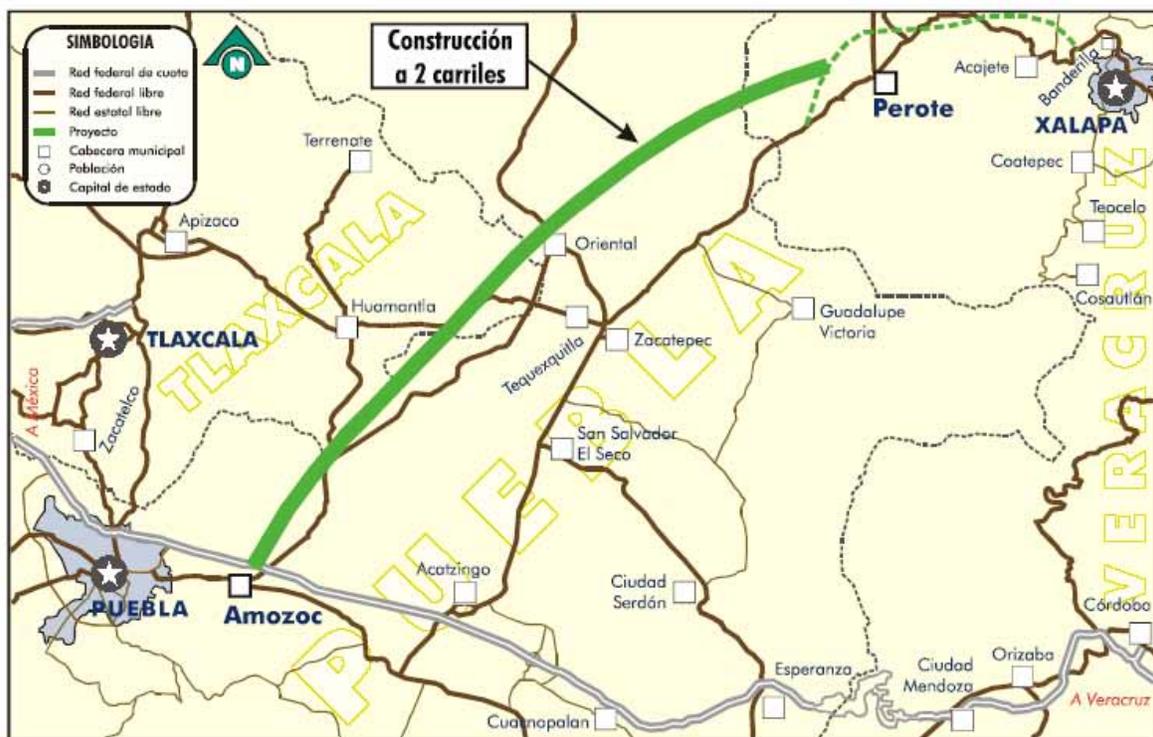


Ilustración 2-1 Croquis de trayecto de la carretera Amozoc-Perote

En el kilómetro 48+626 de esta carretera se localizará el puente Alzayanca para cruzar al río que lleva el mismo nombre, dicha estructura tendrá una longitud de 113 metros, que van del kilómetro 48+560 al 48+720, de forma general la estructura esta conformada de la siguiente manera:

- 4 claros de 28 metros cada uno (ver ilustración 2-2 y 2-4)
- Cimentación a base de pilotes, su profundidad promedio es de 15 m.
- Las losas son realizadas con prefabricados de vigas "T" (ver ilustración 2-3)

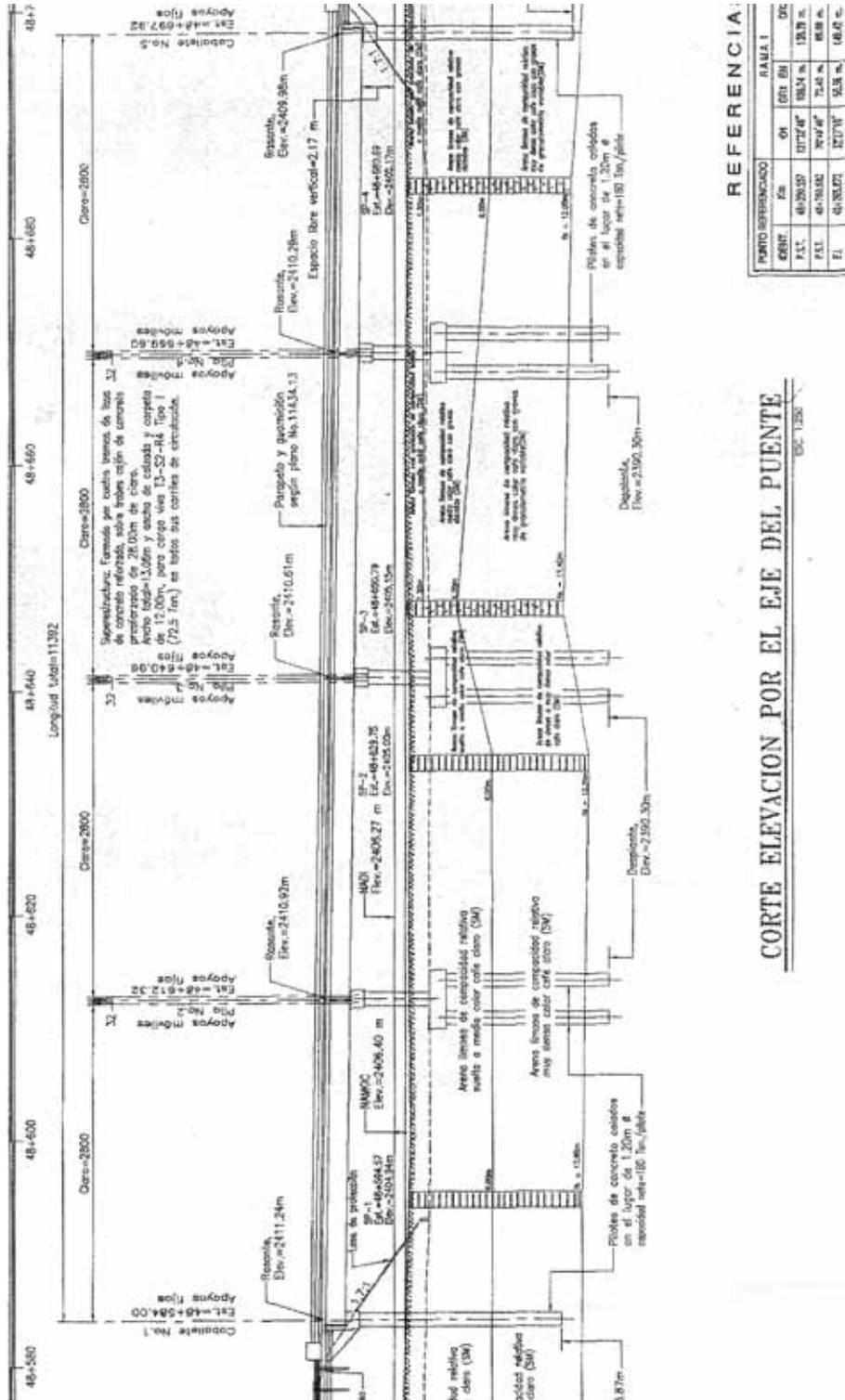


Ilustración 2-2 Corte elevación por el eje del puente Altzayanca

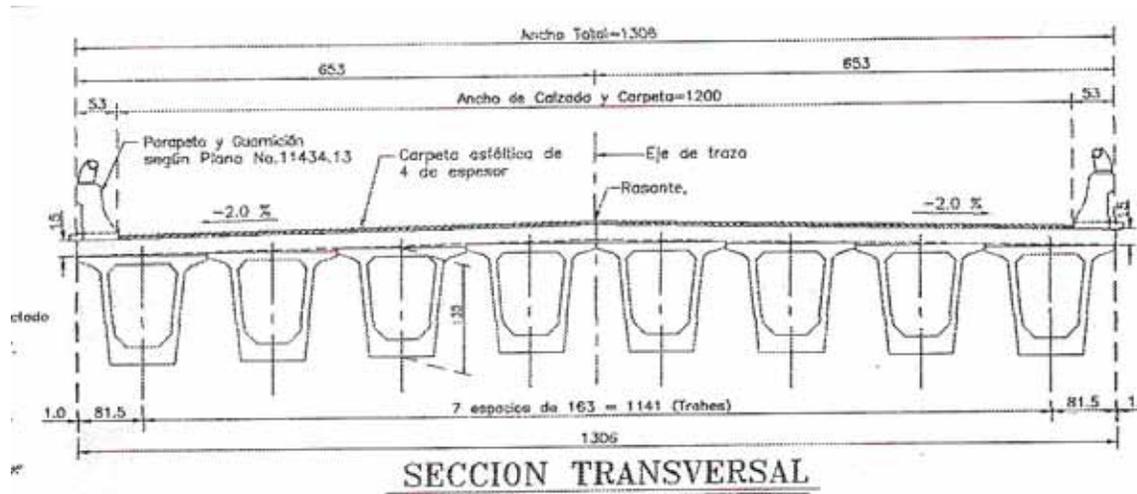


Ilustración 1-11 Sección Transversal del Puente Altzayanca

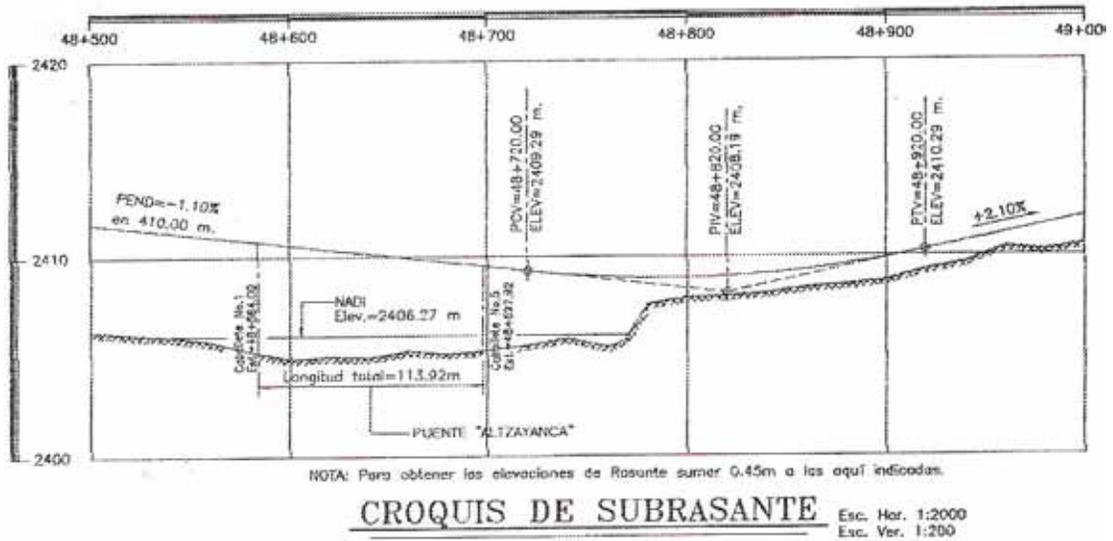
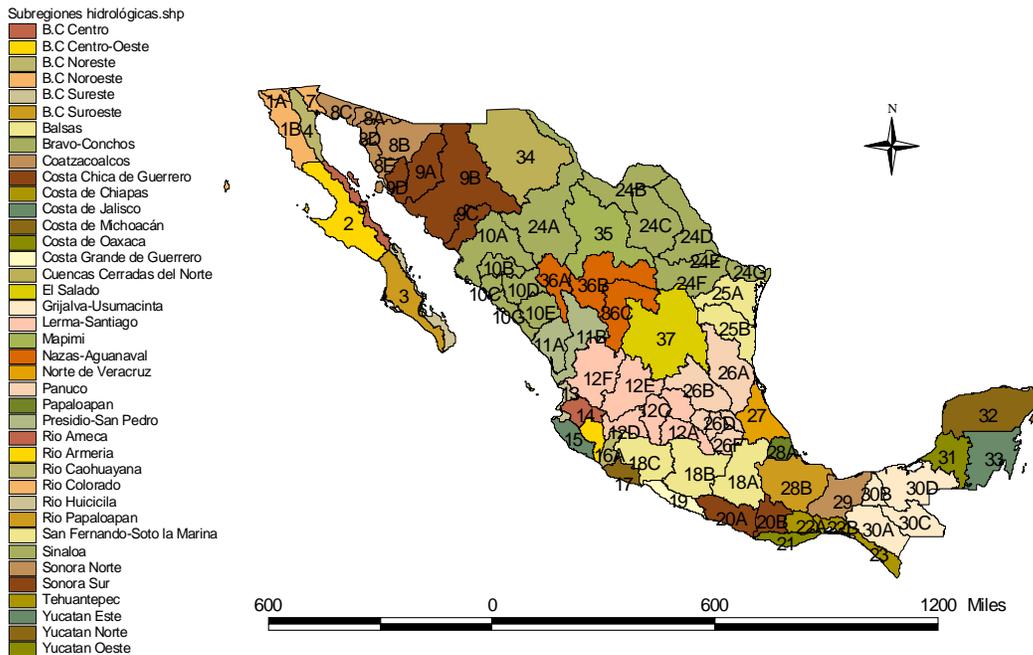


Ilustración 1-12 Perfil longitudinal del puente

2.2. Localización del puente vehicular

2.2.1. Regiones Hidrológicas de la República Mexicana

La república mexicana cuenta con un área total de 1,956,413.68 km², la cual para estudios hidrológicos se encuentra dividida en 37 regiones hidrológicas conformadas en su mayoría por ríos terminales que desembocan en el mar. Para efectos de planeación se optó por hacer una subdivisión a las regiones hidrológicas como la que se puede observar en la Ilustración 2-5, la cual está basada en asignarle una letra y un nombre a cada número de cuenta, por ejemplo, la región hidrológica número 18 llamada Balsas se encuentra subdividida en alto, medio y bajo balsas con claves de 18A, 18B, 18C respectivamente.



Ilust

Ilustración 2-5 Subdivisión de las regiones Hidrológicas de la República Mexicana

2.2.2. Región Hidrológica número 18.

La Región hidrológica número 18 ocupa aproximadamente al 6% del territorio nacional, incluye en su totalidad al estado de Morelos y parcialmente a los estados de Tlaxcala, Puebla, México, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, con un total de 422 municipios. Para efectos de planeación se ha dividido en tres subregiones: Alto Balsas (51,412 km²), Medio Balsas(29,290 km²) y Bajo Balsas (38,517 km²).

El siguiente cuadro muestra la cantidad de municipios, área municipal e hidrológica y número de cuencas correspondientes a cada subregión.

Subregión	Número de municipios	Superficie (km ²)		Número de cuencas
		Municipal	Hidrologica	
Alto Balsas	334	51412	32474.6	6
Medio Balsas	49	29290	43136.3	2
Bajo Balsas	39	38517	42466.1	4
Total	422	119219	118077	12

Tabla 2-1 Estructura administrativa y poblacional de la región 18

Como condición climática promedio, se dice que en la Región predomina un clima semicálido-subhúmedo (Ver Ilustración 2-6), con temperatura media anual entre 18 y 22°C, con poca oscilación en la temperatura media mensual entre 5 y 7°C.



Ilustración 2-6 Climas de la región 18 (Balsas)

2.2.3. Ubicación geográfica del puente vehicular

En la subregión 18A con coordenadas 97° 44.2' y 19° 21.4' misma que se observa en la Ilustración 2-7, se construirá el puente que cruzará al río Alzayanca ubicado en el municipio de Alzayanca, Edo. de Tlaxcala, en el km 48+626 de la carretera Amozoc-Perote.

El estado de Tlaxcala tiene como capital a *Tlaxcala de Xicohténcatl* y cuenta con una superficie total que representa el 0.2% del territorio

nacional del país y tiene colindancia al norte con Hidalgo y Puebla, al este y sur con Puebla, al oeste con México, Hidalgo y Puebla.

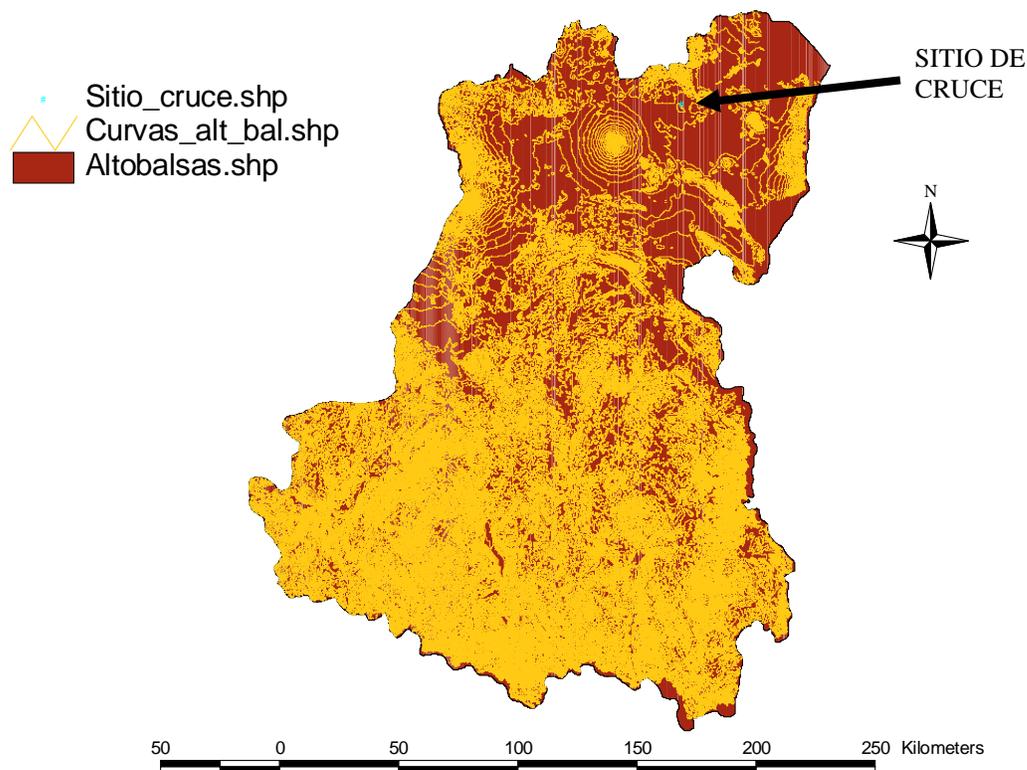


Ilustración 2-7 Sitio de cruce dentro de la Región hidrológica No. 18, Subregión del Alto Balsas con curvas de nivel @ 100 m.

2.3. Delimitación y cálculo de características principales de la cuenca

En la actualidad se utiliza una gran cantidad de software de computo relacionado a los Sistemas de Información Geográfica (GIS) cuyo objetivo general es manejar información geográfica a través de imágenes. Arc-View es un programa enfocado para el manejo de este tipo de información y mediante el, se obtienen las características principales de la cuenca.

2.3.1. Delimitación de la cuenca

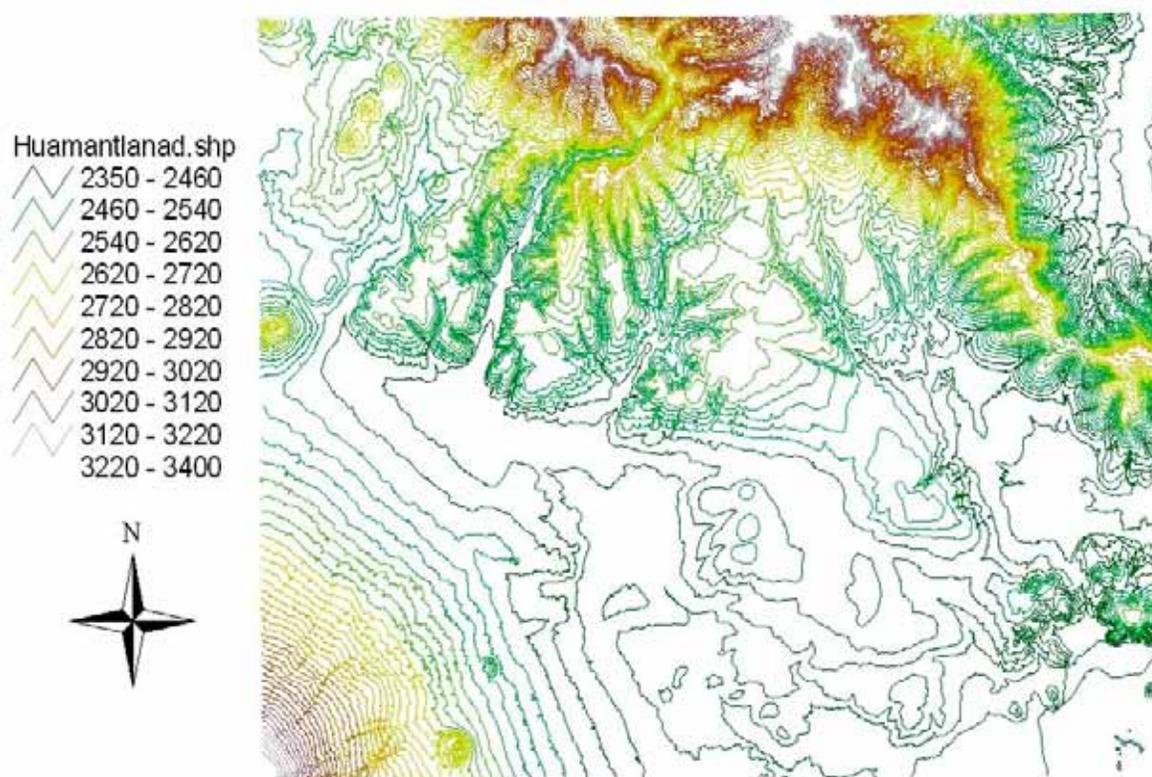


Ilustración 2-8 Carta topográfica de “Huamantla-E14B34” con rangos de elevación

En Arc View la delimitación de la cuenca (ver Ilustración 2-9), se lleva a cabo mediante una extensión llamada "basin1", la cual procesa la información que se tiene de las elevaciones, en este caso de las curvas de nivel de la carta topográfica (digitalizada) editada por el INEGI y cuyo nombre es "Huamantla - E14B34" proyectada a una escala 1:50,000 y con equidistancia vertical entre curvas de nivel correspondiente a 20 m (Ilustración 2-8).



Ilustración 2-9 Delimitación de la cuenca del río Altzayanca para el sitio de cruce vehicular mediante el programa Arc-View

2.3.2. Cálculo de características principales de la cuenca

De Arc-View se obtienen directamente algunos parámetros importantes de la cuenca como: área, perímetro, altitud máxima, pendiente, etc. Esta información se presenta en la siguiente tabla.

Area_km2	Perimet_km	Sl_min_prc	Sl_max_prc	Sl_ave_prc	El_min_m
99.92	53.23	0	64.844	12.77	2412.01
El_max_m	El_ave_m	El_stdev	L_max_km	L_eqv_km	L_rel
3389.34	2662.53	215.419	21.517	22.092	2.153

Tabla 2-2 Características principales de la cuenca obtenidas con Arc-View

Significado de encabezados de la tabla anterior:

- Area_km2** - Área de la cuenca en km²
- Perimet_km** - Perímetro de la cuenca en km
- Sl_min_prc** - Pendiente mínima de la cuenca expresada en porcentaje
- Sl_max_prc** - Pendiente máxima de la cuenca expresada en porcentaje
- Sl_ave_prc** - Pendiente media de la cuenca expresada en porcentaje
- El_min_m** - Elevación mínima de la cuenca expresada en metros
- El_max_m** - Elevación máxima de la cuenca expresada en metros
- El_ave_m** - Elevación media de la cuenca expresada en metros
- El_stdev** - Desviación estándar para las elevaciones de la cuenca
- L_max_km** - Longitud del cauce principal en km.
- L_eqv_km** - Longitud equivalente de la cuenca en km.
- L_rel** - Longitud relativa del cauce.

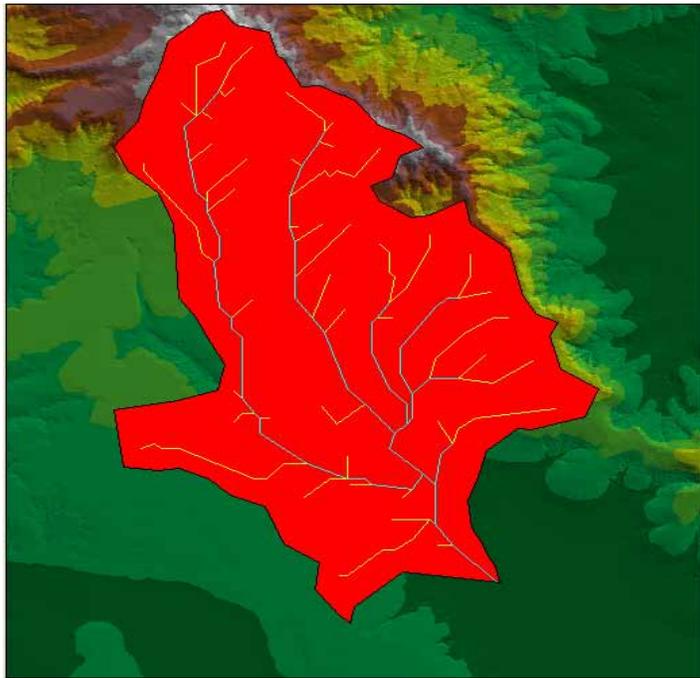
Por otro lado el orden de la cuenca que en este caso corresponde a 3 se puede observar en la Ilustración 2-10, la longitud por tramos de los ríos

es igual a 91.816 km y los canales de orden 1 o los que no reciben aportación son 42 y pueden observarse en la Ilustración 2-11.



Shape	Area	Order	From node	To node	Length km
PolyLine	457	3	471	515	1.949
PolyLine	48	1	37	66	1.424
PolyLine	53	1	67	66	0.487
PolyLine	62	2	66	82	0.689
PolyLine	63	1	78	84	0.487
PolyLine	64	1	31	84	2.366
PolyLine	65	2	82	84	0.195
PolyLine	66	1	85	82	0.292
PolyLine	74	1	71	96	1.449
PolyLine	75	1	91	96	0.292
PolyLine	79	2	96	105	0.308
PolyLine	82	1	109	105	0.371
PolyLine	97	2	84	123	1.364
PolyLine	98	1	108	123	0.682
PolyLine	102	1	125	129	0.292
PolyLine	103	2	105	129	0.804
PolyLine	122	2	129	149	0.872
PolyLine	123	1	113	149	2.881
PolyLine	125	2	123	152	1.228
PolyLine	126	1	124	152	1.543
PolyLine	137	2	152	164	0.276
PolyLine	138	1	145	164	0.877
PolyLine	149	2	149	177	0.827
PolyLine	150	1	178	177	0.207
PolyLine	163	2	177	197	0.436
PolyLine	164	1	179	197	0.786
PolyLine	180	1	128	216	3.258
PolyLine	181	2	164	216	1.488
PolyLine	192	2	197	230	0.965
PolyLine	193	1	180	230	1.952
PolyLine	214	1	211	253	1.237
PolyLine	215	1	248	253	0.770
PolyLine	216	1	202	255	1.741
PolyLine	217	1	190	255	2.162

Ilustración 2-10 Orden de la cuenca (mostrado en la tabla del lado derecho y resaltado en el mismo extremo.)



Shape	Area	Order	From node	To node	Length km
PolyLine	457	3	471	515	1.949
PolyLine	48	1	37	66	1.424
PolyLine	53	1	67	66	0.487
PolyLine	62	2	66	82	0.689
PolyLine	63	1	78	84	0.487
PolyLine	64	1	31	84	2.366
PolyLine	65	2	82	84	0.195
PolyLine	66	1	85	82	0.292
PolyLine	74	1	71	96	1.449
PolyLine	75	1	91	96	0.292
PolyLine	79	2	96	105	0.308
PolyLine	82	1	109	105	0.371
PolyLine	97	2	84	123	1.364
PolyLine	98	1	108	123	0.682
PolyLine	102	1	125	129	0.292
PolyLine	103	2	105	129	0.804
PolyLine	122	2	129	149	0.872
PolyLine	123	1	113	149	2.881
PolyLine	125	2	123	152	1.228
PolyLine	126	1	124	152	1.543
PolyLine	137	2	152	164	0.276
PolyLine	138	1	145	164	0.877
PolyLine	149	2	149	177	0.827
PolyLine	150	1	178	177	0.207
PolyLine	163	2	177	197	0.436
PolyLine	164	1	179	197	0.786
PolyLine	180	1	128	216	3.258
PolyLine	181	2	164	216	1.488
PolyLine	192	2	197	230	0.965
PolyLine	193	1	180	230	1.952
PolyLine	214	1	211	253	1.237
PolyLine	215	1	248	253	0.770
PolyLine	216	1	202	255	1.741
PolyLine	217	1	190	255	2.162

Ilustración 2-11 Visualización de los canales de “orden 1”, marcados en la figura y en la tabla

Para determinar la pendiente del cauce principal se utilizan las ecuaciones 1-17 y 1-18, los datos necesarios para su evaluación se obtienen de la tabla 2-3 en la cual se concentran las longitudes y elevaciones de los tramos que comprenden el recorrido del cauce, con lo que se genera el perfil y se determinan los datos de elevación requeridos en las ecuaciones.

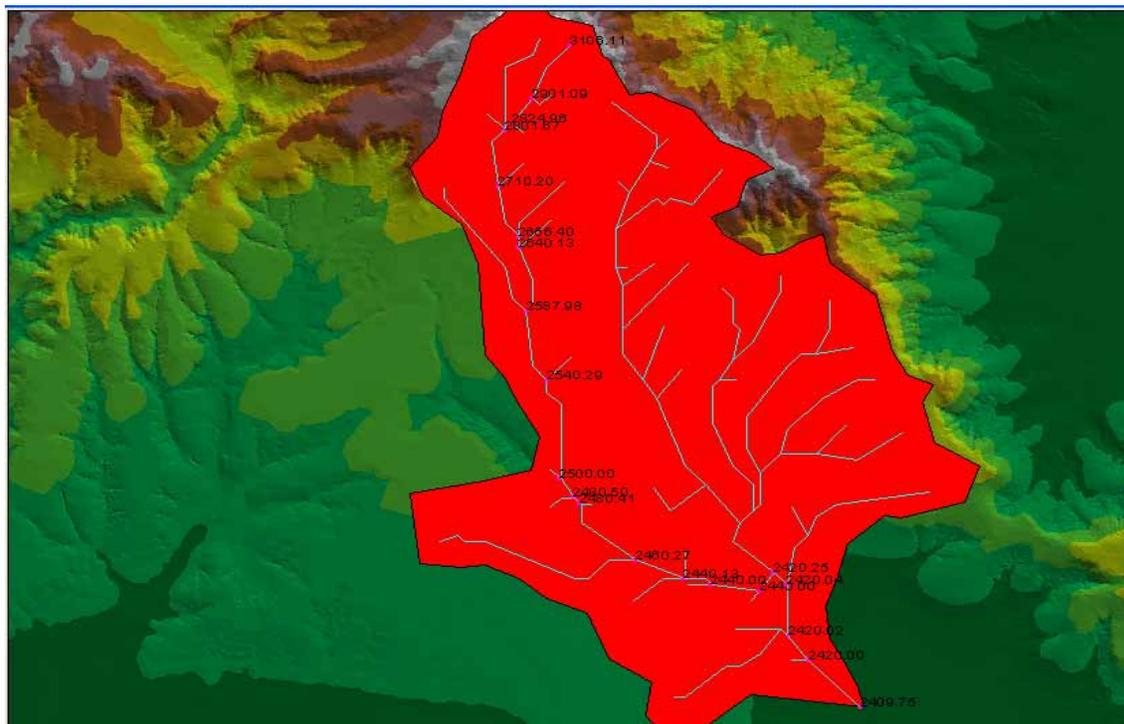


Ilustración 2-12 Determinación de las elevaciones de cada uno de los tramos que componen el cauce principal

Tramo	Longitud de los tramos (m)	Longitud acumulada de los tramos (m)	Elevación de los tramos (m)
1	0.00	0.00	3106.11
2	1424.00	1424.00	2901.09
3	689.00	2113.00	2824.96
4	195.00	2308.00	2801.67
5	1364.00	3672.00	2710.20
6	1228.00	4900.00	2656.40
7	276.00	5176.00	2640.13
8	1488.00	6664.00	2587.98
9	1638.00	8302.00	2540.29
10	2319.00	10621.00	2500.00
11	497.00	11118.00	2480.05
12	195.00	11313.00	2480.41
13	1792.00	13105.00	2460.27
14	1050.00	14155.00	2440.13
15	608.00	14763.00	2440.00
16	975.00	15738.00	2440.00
17	497.00	16235.00	2420.25
18	390.00	16625.00	2420.04
19	1103.00	17728.00	2420.02
20	689.00	18417.00	2420.00
21	3100.00	21517.00	2409.75

Tabla 2-3 Datos de elevación y longitud para la obtención del perfil del cauce principal

Perfil del cauce principal

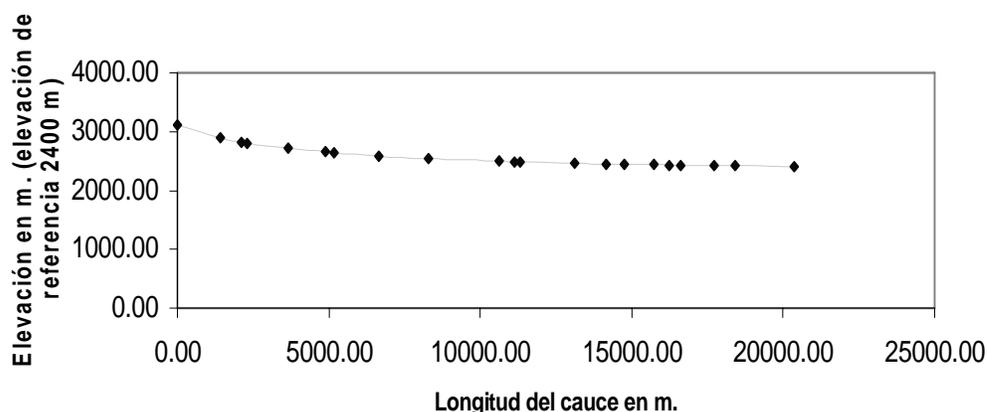


Ilustración 2-13 Perfil longitudinal del cauce principal

Para aplicar la ecuación 1-17, se deben de tener m tramos iguales por lo que se establece que $m = 5$, siendo entonces $l = 21517.00/5 = 4303.4$ m, con lo cual se obtiene:

PENDIENTE CON LONGITUDES CONSTANTES	
Numero de tramos iguales	5
Longitud de los tramos en metros	4,303.4

	1	2	3	4	5	
Elevación	3106.11	2690	2531	2466	2422	

Stotal =	0.01155012
-----------------	------------

Tabla 2-4 Calculo de pendiente del cauce principal con longitudes constantes (criterio de Taylor-Schwarz)

Considerando que las longitudes varían y utilizando la ecuación 1-18, se llega a la tabla que se presenta a continuación.

PENDIENTE VARIANDO LONGITUDES	
-------------------------------	--

$L_{(TOTAL)} =$	21517	m.
-----------------	-------	----

	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
l (m)	5000	7500	2500	4000	2517

	1	2	3	4	5	6
Elev n	3106.11	2610	2460	2450	2418	2409.75

Stotal =	0.0119152
-----------------	-----------

Tabla 2-5 Calculo de la pendiente del cauce principal variando longitudes (criterio de Taylor-Schwarz)

La pendiente a utilizar será considerada como el promedio obtenido en las tablas 2-7 y 2-8, por lo tanto $S_{total} = 0.011733$.

Generalmente cuando se hace un análisis hidrológico para un cruce vehicular es importante determinar las características en cuanto a la forma de la cuenca, la red de ríos, la estabilidad del cauce, densidad hidrografica y tiempo de concentración, dichas características se presentan en la siguiente tabla.

FACTORES DE FORMA
Indice o coeficiente de compacidad

Ecuación utilizada	parámetros		Kc
	Perímetro	Área	
Ecuación 1-6	53.23	99.92	1.49

Factor de forma

Ecuación utilizada	parámetros		Rf
	Área	Longitud	
Ecuación 1-7	99.92	21.52	0.22

Radio o relación de elongación

Ecuación utilizada	parámetros		Re
	A	L	
Ecuación 1-11	99.92	21.52	0.52

Radio o relación de circularidad

Ecuación utilizada	parámetros		Rci
	Área	Perímetro	
Ecuación 1-16	99.92	53.23	0.44

LA RED DE DRENAJE

Densidad de drenaje

Ecuación utilizada	parámetros		D
	Área	Lt de los canales de flujo	
Ecuación 1-32	99.92	91.82	0.92

Constante de estabilidad del río

Ecuación utilizada	parámetros		C
	Área	Lt de los canales de flujo	
Ecuación 1-35	99.92	91.82	1.09

Densidad Hidrográfica

Ecuación utilizada	parámetros		F
	Área	Numero de canales de orden 1	
Ecuación 1-36	99.92	42.00	0.42

Tiempo de concentración de la cuenca				
Ecuación utilizada	Parámetros			Tc (hrs)
	L (km)	H (m)	S	
Ecuación 1-38	21.517	696.36	---	2.64
Ecuación 1-39	21.517	---	0.011733	3.90
Ecuación 1-40	21.517	696.36	---	2.59
Tc seleccionado : 2.59 hrs				

Tabla 2-6 Características en cuanto a la forma de la cuenca y a su red drenaje

2.4. Análisis de los datos de precipitación

Algunas dependencias de gobierno como son CNA y CFE, han tratado de obtener información sobre eventos de tipo climatológico, de almacenamiento, registros de escurrimiento sobre los ríos con estaciones hidrométricas, etc. Los eventos de tipo climatológico que con mayor frecuencia son medidos corresponden a los de precipitación con pluviógrafos (ideales para hacer un análisis de tipo hidrológico) y pluviómetros que en la actualidad son los más utilizados debido a la mayor cantidad de información climatológica registrada de ellos.

2.4.1. Ubicación y determinación de las estaciones climatológicas por analizar en la cuenca.

Al rededor de la cuenca en estudio existen varias estaciones pluviométricas que pueden ser útiles para el análisis hidrológico. En la Ilustración 2-14 tomada de los boletines hidrológicos de la SARH, pueden observarse las estaciones existentes en la región hidrológica No.18A correspondiente al alto balsas.

De acuerdo con la ubicación geográfica del cruce vehicular las estaciones más cercanas a la cuenca son Cuapiaxtla, Libres, Oriental, Huamantla, Sta. Maria Tocatlan y Colonia Temextla observados en la Ilustración 2-15.

Teóricamente no es conocido un parámetro para saber la cantidad de estaciones que ejercen influencia dentro de una cuenca, bien podría establecerse como parámetro empírico uno que se ha generado con la experiencia de ingenieros hidrólogos u otros profesionistas afines al tema y es el de establecer que las estaciones con más influencia sobre una región en estudio están ubicadas a una distancia no mayor de 80 km del sitio de cruce.

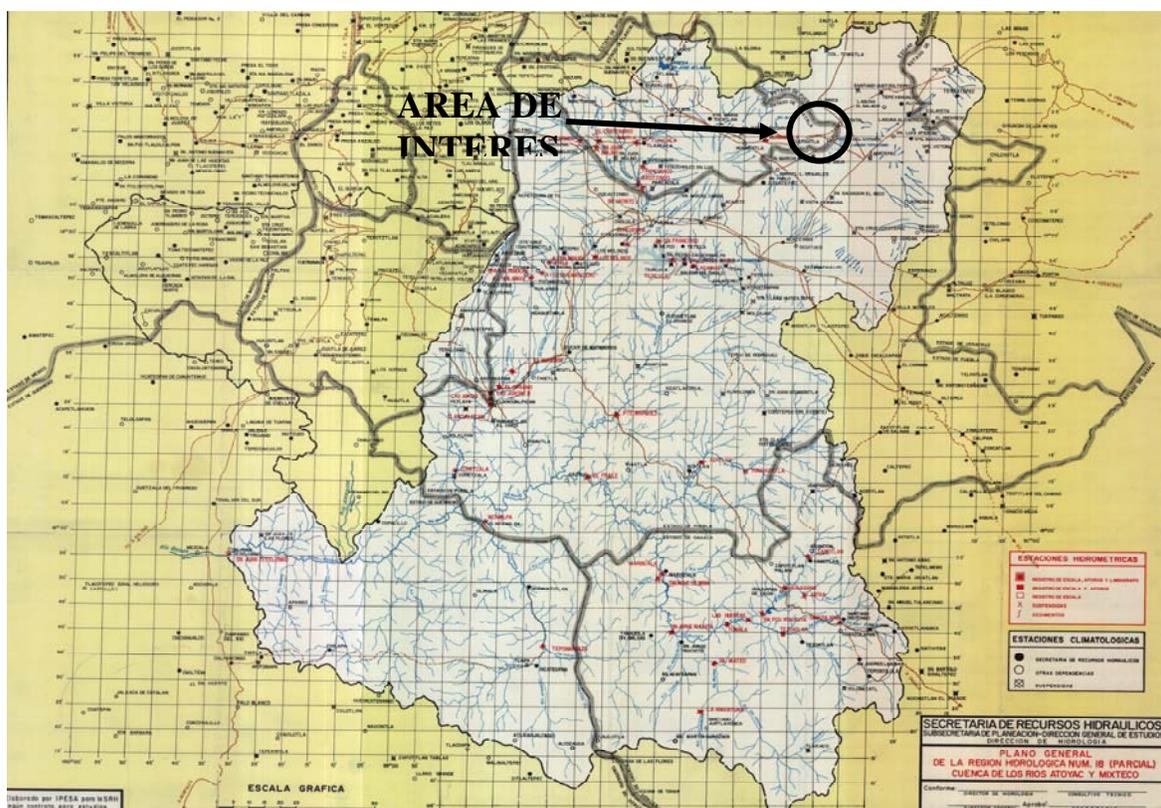


Ilustración 2-14 Estaciones pluviométricas existentes en la región hidrológica 18 del alto balsas

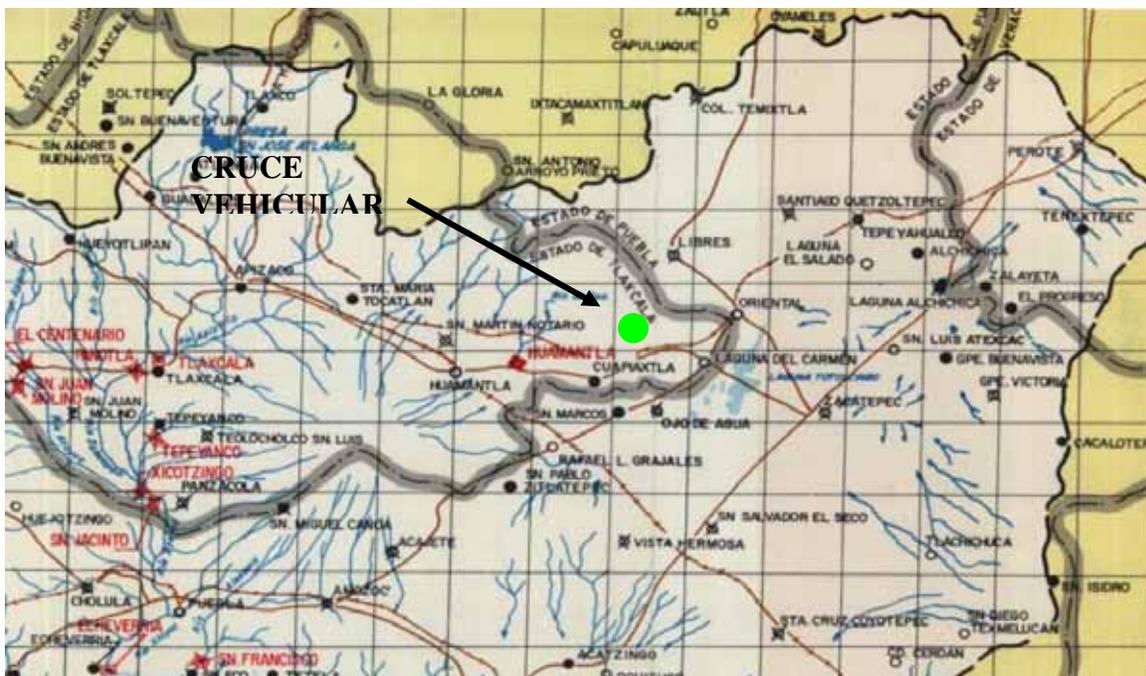


Ilustración 2-15 Estaciones pluviométricas existentes para la cuenca generada por el cruce vehicular

Con la ayuda de la Ilustración 2-15 se procedió a medir las distancias que hay, a las estaciones anteriormente mencionadas, obteniéndose que todas tienen una distancia menor de 80 km, por lo que serán utilizadas para el estudio de la cuenca del río Altzayanca.

2.4.2. Extracción de las precipitaciones para las estaciones climatológicas seleccionadas, mediante el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC).

La comisión Nacional del Agua (CNA) a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) propuso hacer una recopilación de variables o registros climatológicos entre ellos los de precipitación, temperatura, etc., provenientes de varias instituciones como Comisión Federal de Electricidad, Servicio Meteorológico Nacional y la misma Comisión Nacional del Agua, datos que servirán para llevar a cabo estudios de tipo hidrológico, climatológico y de prevención. Para ello se recurrió a la creación de un sistema programado de búsqueda llamado ERIC (Extractor Rápido de Información Climatológica), el cual a través de una interfaz sencilla (ver Ilustración 2-16) busca información de acuerdo a la región o estado del país que se pretenda.

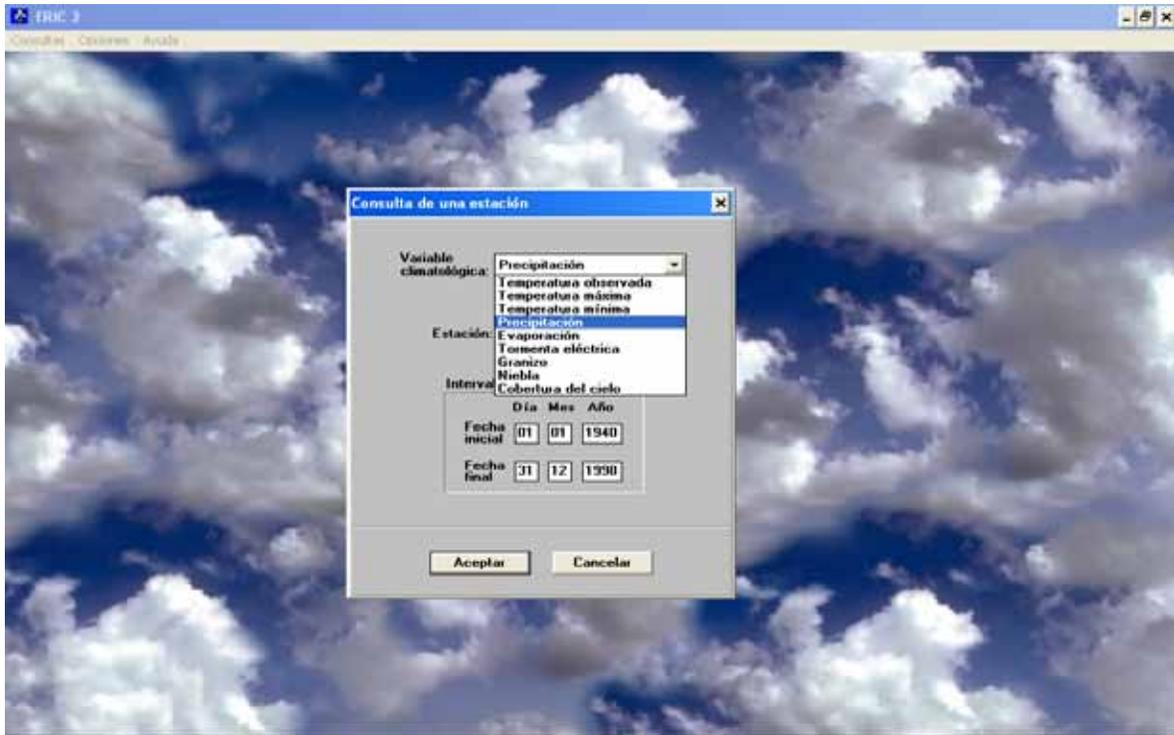


Ilustración 2-16 Vista general del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC)

Los datos de precipitación para cada una de las estaciones se muestra en las tablas 2-7 a 2-12, algunas contienen las precipitaciones para cada año consecutivo o por el contrario hay otras que presentan datos solo para algunos años. Comúnmente para ajustar los datos a una función de probabilidad se utilizan como mínimo diez consecutivos, por lo que la información de las tablas es suficiente para realizar el ajuste.

ESTACIÓN CUAPIAXTLA, CARRETERA AMOZOC-PEROTE, RÍO ALTZAYANCA

Clave	lat=	long=	Numero de dato	Año	Precipitación Máx. (mm)
29005	19.32	97.77	1	1962	18.7
			2	1963	71
			3	1964	25
			4	1965	40
			5	1966	45
			6	1967	45
			7	1968	26
			8	1969	40.7
			9	1970	38.7
			10	1971	30.3
			11	1972	30.6
			12	1973	31
			13	1974	33.7
			14	1975	39.7
			15	1976	32.9
			16	1977	48.5
			17	1978	37.7
			18	1979	44.1
			19	1980	76.8
			20	1981	45.1
			21	1982	47
			22	1983	34.5
			23	1984	40
			24	1985	43
			25	1986	17.08
			26	1988	3.5
			27	1989	46.5
			28	1990	41.5

Tabla 2-7 Estación climatológica (Pluviométrica) ubicada en Tlaxcala, cuenta además con una elevación de 2483 msnm.

ESTACIÓN LIBRES, CARRETERA AMOZOC-PEROTE, RÍO ALTZAYANCA

Clave	Lat=	long=	Número de dato	Año	Precipitación Máx. (mm)
21119	19.5	97.75	1	1961	31
			2	1962	38
			3	1968	25
			4	1976	34
			5	1977	28
			6	1978	48
			7	1980	13
			8	1981	45
			9	1982	32
			10	1983	22
			11	1984	30
			12	1985	29
			13	1986	36
			14	1987	0
			15	1991	31.1
			16	1992	35
			17	1993	33
			18	1994	54
			19	1995	44
			20	1996	49
			21	1997	35

Tabla 2-8 Estación climatológica (Pluviómetrica) ubicada en Puebla, cuenta además con una elevación de 2114 msnm. y pertenece al Servicio Meteorológico Nacional

ESTACIÓN ORIENTAL, CARRETERA AMOZOC-PEROTE, RÍO ALTZAYANCA

Clave	lat=	long=	Número de dato	Año	Precipitación Máx. (mm)
21122	19.37	97.62	1	1944	88
			2	1945	52
			3	1946	37.5
			4	1947	1.5
			5	1948	80
			6	1949	80
			7	1950	45
			8	1951	70
			9	1952	38
			10	1953	32
			11	1954	42.5
			12	1955	42
			13	1956	53
			14	1957	60
			15	1958	58.5
			16	1959	40
			17	1960	40
			18	1962	137
			19	1963	26.5
			20	1964	48.5
			21	1965	50
			22	1966	40.4
			23	1967	21.3
			24	1973	33.4
			25	1974	39

Tabla 2-9 Estación climatológica (Pluviométrica) ubicada en Puebla, cuenta además con una elevación de 2345 msnm. y pertenece al Servicio Meteorológico Nacional

ESTACIÓN HUAMANTLA, CARRETERA AMOZOC-PEROTE, RÍO ALTZAYANCA

Clave	lat=	long=	Número de dato	Año	Precipitación Máx. (mm)
29011	19.32	97.93	1	1961	37.5
			2	1962	26.5
			3	1963	64
			4	1964	50
			5	1965	67
			6	1966	41
			7	1967	33
			8	1968	13
			9	1969	32
			10	1970	53
			11	1971	23
			12	1972	38
			13	1973	42
			14	1974	43
			15	1976	38
			16	1977	41.5
			17	1978	33
			18	1979	48
			19	1980	57
			20	1981	60
			21	1982	40
			22	1983	32
			23	1984	32
			24	1985	49
			25	1986	1
			26	1987	46
			27	1988	90
			28	1989	62
			29	1990	31
			30	1991	43.5
			31	1992	42.5
			32	1993	40.7
			33	1994	47.7
			34	1995	40.2
			35	1996	6.2

Tabla 2-10 Estación climatológica (Pluviométrica) ubicada en Tlaxcala, cuenta además con una elevación de 2553 msnm.

ESTACIÓN COLONIA TEMEXTLA, CARRETERA AMOZOC-PEROTE, RÍO ALTZAYANCA

Clave	lat=	long=	Número de dato	Año	Precipitación Máx. (mm)
21029	19.62	97.67	1	1966	20
			2	1967	20
			3	1968	12.3
			4	1969	20
			5	1970	10.1
			6	1971	15.1
			7	1972	66.3
			8	1973	30.5
			9	1974	35.2
			10	1975	18
			11	1976	18.3
			12	1977	15.3
			13	1978	12
			14	1979	22.3
			15	1980	58
			16	1981	28.6
			17	1982	20
			18	1983	16.2
			19	1984	32
			20	1985	35
			21	1986	23.3
			22	1987	36
			23	1988	45.2

Tabla 2-12 Estación climatológica (Pluviométrica) ubicada en Puebla, cuenta además con una elevación de 2310 msnm.

2.4.3. Ajuste de datos de las estaciones climatológicas a una función de probabilidad mediante la utilización del programa de computo AX.

El ajuste de los registros o bien obtener los datos de diseño para alguna obra hidráulica con un periodo de retorno, es sin duda un paso fundamental para el análisis de eventos futuros o de diseño. En la actualidad existen programas de computo que simplifican el trabajo de realizar los ajustes a una función de probabilidad; entre ellos se encuentra el "AX" (ver Ilustración 2-17) desarrollado por el CENAPRED, el que de forma general puede ajustar los registros de una estación a una o mas funciones probabilísticas.

En "AX" se proporcionan los registros en orden descendente para la estación en estudio, se ejecuta el programa para realizar el ajuste y se pueden visualizar las tablas resumen como son: de errores mínimos estándar, graficación de los datos (periodo de retorno **vs** registros calculados), valores de los parámetros estadísticos ajustados y por ultimo la extrapolación de los registros con periodos de retorno previamente especificados.

ESTACIÓN SANTA MARIA TOCATLAN, CARRETERA AMOZOC-PEROTE, RÍO ALTZAYANCA

Clave	lat=	long=	Número de dato	Año	Precipitación Máx. (mm)
29027	19.4	98.03	1	1966	48
			2	1967	36
			3	1968	27.6
			4	1969	25
			5	1970	55
			6	1971	36.9
			7	1972	49.2
			8	1973	63
			9	1974	44
			10	1975	33
			11	1976	26
			12	1977	40.5
			13	1978	40
			14	1979	56
			15	1980	32
			16	1981	49
			17	1982	40
			18	1983	23
			19	1984	54.5
			20	1985	27.5
			21	1986	35.5
			22	1987	39
			23	1988	66
			24	1992	71
			25	1993	49
			26	1994	51
			27	1995	34.5
			28	1996	7

Tabla 2-11 Estación climatológica (Pluviométrica) ubicada en Tlaxcala, cuenta además con una elevación de 2460 msnm.

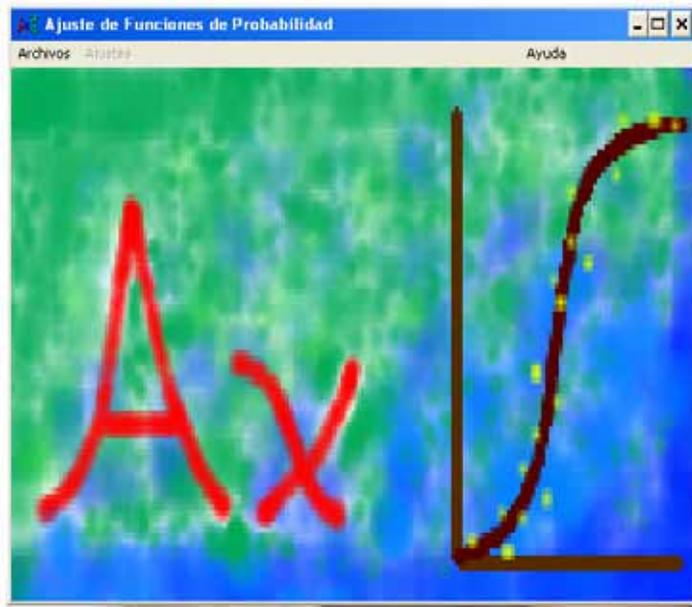


Ilustración 2-17 Programa AX (Ajuste de Funciones Probabilísticas)

Los ajustes mediante "AX" para cada una de las estaciones climatologicas en estudio se presentan a continuación:

- **Estación Cuapixtla**

Clave	lat=	long=	Numero de dato	Año	Precipitación Max.(mm)	Orden Descendente
29005	19.32	97.77	1	1962	18.7	76.8
			2	1963	71	71
			3	1964	25	48.5
			4	1965	40	47
			5	1966	45	46.5
			6	1967	45	45.1
			7	1968	26	45
			8	1969	40.7	45
			9	1970	38.7	44.1
			10	1971	30.3	43
			11	1972	30.6	41.5
			12	1973	31	40.7
			13	1974	33.7	40
			14	1975	39.7	40
			15	1976	32.9	39.7
			16	1977	48.5	38.7
			17	1978	37.7	37.7
			18	1979	44.1	34.5
			19	1980	76.8	33.7
			20	1981	45.1	32.9
			21	1982	47	31
			22	1983	34.5	30.6
			23	1984	40	30.3
			24	1985	43	26.1
			25	1986	17.08	26
			26	1987	26.1**	25
			27	1988	3.5	18.7
			28	1989	46.5	17.08
			29	1990	41.5	3.5

Tabla 2-13 Registros de la estación en orden descendente para ser capturados en AX (registro Interpolado linealmente)**

Función	Momentos		Maxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	4.609	-----	4.609	-----
Lognormal	4.953	4.663	7.876	9.394
Gumbel	4.786	-----	5.171	-----
Exponencial	6.077	-----	20.380	-----
Gamma	4.814	4.688	5.130	11111.000
Doble Gumbel	5.543			
Mínimo error estándar : 4.609				
Función seleccionada : Normal 2 parámetros				

Extrapolación de valores para la función seleccionada	
Tr	Dato calculado hp (mm)
20	61.54
50	67.42
100	71.35
200	74.93

• Estación Libres

Clave	lat=	long=	Numero de dato	Año	Precipitación Max. (mm)	Orden descendente
21119	19.5	97.75	1	1976	34	48
			2	1977	28	45
			3	1978	48	36
			4	1979	30.5**	34
			5	1980	13	32
			6	1981	45	30.5**
			7	1982	32	30
			8	1983	22	29
			9	1984	30	28
			10	1985	29	22
			11	1986	36	13

Tabla 2-14 Registros de la estación en orden descendente para ser capturados en AX (** registro Interpolado linealmente)

Función	Momentos		Maxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	2.895	-----	2.895	-----
Lognormal	3.476	-----	3.153	-----
Gumbel	3.418	-----	2.89	-----
Exponencial	4.386	-----	16.263	-----
Gamma	3.257		3.071	
Doble Gumbel	-----			
Minimo error estándar : 2.895				
Función seleccionada : Normal 2 parámetros				

Extrapolación de valores para la función seleccionada	
Tr	Dato calculado hp (mm)
20	47.5
50	51.46
100	54.1
200	56.52

• Estación Oriental

Clave	lat=	Long=	Numero de dato	Año	Precipitación Max. (mm)	Orden Descendente
21122	19.37	97.62	1	1944	88	137
			2	1945	52	88.5**
			3	1946	37.5	88
			4	1947	1.5	80
			5	1948	80	80
			6	1949	80	70
			7	1950	45	60
			8	1951	70	58.5
			9	1952	38	53
			10	1953	32	52
			11	1954	42.5	50
			12	1955	42	48.5
			13	1956	53	45
			14	1957	60	42.5
			15	1958	58.5	42
			16	1959	40	40.4
			17	1960	40	40
			18	1961	88.5**	40
			19	1962	137	38
			20	1963	26.5	37.5
			21	1964	48.5	32
			22	1965	50	26.5
			23	1966	40.4	21.3
			24	1967	21.3	1.5

Tabla 2-15 Registros de la estación en orden descendente para ser capturados en AX (** registro Interpolado linealmente)

Función	Momentos		Maxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	9.830	-----	9.830	-----
Lognormal	7.133	7.157	6.931	6.808
Gumbel	7.149	-----	8.172	-----
Exponencial	7.151	-----	20.068	-----
Gamma	7.447	7.065	8.213	7.630
Doble Gumbel	6.396			
Mínimo error estándar : 6.396				
Función seleccionada : Doble Gumbel				

Extrapolación de valores para la función seleccionada	
Tr	Dato calculado hp (mm)
20	112.72
50	132.69
100	147.17
200	161.42

• Estación Huamantla

Clave	lat=	long=	Numero de dato	Año	Precipitación Max. (mm)	Orden Descendente
29011	19.32	97.93	1	1961	37.5	90
			2	1962	26.5	67
			3	1963	64	64
			4	1964	50	62
			5	1965	67	60
			6	1966	41	57
			7	1967	33	53
			8	1968	13	50
			9	1969	32	49
			10	1970	53	48
			11	1971	23	47.7
			12	1972	38	46
			13	1973	42	43.5
			14	1974	43	43
			15	1975	40.5**	42.5
			16	1976	38	42
			17	1977	41.5	41.5
			18	1978	33	41
			19	1979	48	40.7
			20	1980	57	40.5**
			21	1981	60	40.2
			22	1982	40	40
			23	1983	32	38
			24	1984	32	38
			25	1985	49	37.5
			26	1986	26.90**	33
			27	1987	46	33
			28	1988	90	32
			29	1989	62	32
			30	1990	31	32
			31	1991	43.5	31
			32	1992	42.5	26.90**
			33	1993	40.7	26.5
			34	1994	47.7	23
			35	1995	40.2	13
			36	1996	6.2	6.2

Tabla 2-16 Registros de la estación en orden descendente para ser capturados en AX (** registro Interpolado linealmente)

Función	Momentos		Maxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	4.146	-----	4.146	-----
Lognormal	4.052	3.912	5.231	6.603
Gumbel	3.930	-----	4.187	-----
Exponencial	5.377	-----	22.816	-----
Gamma	3.983	8.925	8.529	11111.00
Doble Gumbel	4.944			
Mínimo error estándar : 3.912				
Función seleccionada : Lognormal (Momentos - 3 parámetros)				

Extrapolación de valores para la función seleccionada	
Tr	Dato calculado hp (mm)
20	69.37
50	77.98
100	84.08
200	89.94

• Estación Santa Maria Tocatlan

Clave	lat=	long=	Numero de dato	Año	Precipitación Max. (mm)	Orden Descendente
29027	19.4	98.03	1	1966	48	66
			2	1967	36	63
			3	1968	27.6	56
			4	1969	25	55
			5	1970	55	54.5
			6	1971	36.9	49.2
			7	1972	49.2	49
			8	1973	63	48
			9	1974	44	44
			10	1975	33	40.5
			11	1976	26	40
			12	1977	40.5	40
			13	1978	40	39
			14	1979	56	36.9
			15	1980	32	36
			16	1981	49	35.5
			17	1982	40	33
			18	1983	23	32
			19	1984	54.5	27.6
			20	1985	27.5	27.5
			21	1986	35.5	26
			22	1987	39	25
			23	1988	66	23

Tabla 2-17 Registros de la estación en orden descendente para ser capturados en AX

Función	Momentos		Maxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	2.323	-----	2.323	-----
Lognormal	2.182	2.027	2.078	2.092
Gumbel	2.383	-----	2.022	-----
Exponencial	3.753	-----	23.119	-----
Gamma	1.958	2.00	2.088	2.043
Doble Gumbel	2.103			
Mínimo error estándar : 1.958				
Función seleccionada : Gamma (Momentos – 2 parámetros)				

Extrapolación de valores para la función seleccionada	
Tr	Dato calculado hp (mm)
20	62.29
50	68.86
100	73.20
200	77.30

• Estación Colonia Temextla

Clave	lat=	long=	Numero de dato	Año	Precipitación Max. (mm)	Orden descendente
21029	19.62	97.67	1	1966	20	66.3
			2	1967	20	58
			3	1968	12.3	45.2
			4	1969	20	36
			5	1970	10.1	35.2
			6	1971	15.1	35
			7	1972	66.3	32
			8	1973	30.5	30.5
			9	1974	35.2	28.6
			10	1975	18	23.3
			11	1976	18.3	22.3
			12	1977	15.3	20
			13	1978	12	20
			14	1979	22.3	20
			15	1980	58	20
			16	1981	28.6	18.3
			17	1982	20	18
			18	1983	16.2	16.2
			19	1984	32	15.3
			20	1985	35	15.1
			21	1986	23.3	12.3
			22	1987	36	12
			23	1988	45.2	10.1

Tabla 2-18 Registros de la estación en orden descendente para ser capturados en AX

Función	Momentos		Maxima Verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	5.683	-----	5.683	-----
Lognormal	3.700	3.769	4.272	4.898
Gumbel	3.863	-----	5.202	-----
Exponencial	3.315	-----	8.252	-----
Gamma	3.837	3.514	4.736	3.171
Doble Gumbel	2.769			
Mínimo error estándar : 2.769				
Función seleccionada : Doble Gumbel				

Extrapolación de valores para la función seleccionada	
Tr	Dato calculado hp (mm)
20	58.59
50	68.98
100	76.48
200	83.85

2.4.1. Determinación de la lluvia media aplicando el método de polígonos de Thiesen.

Las coordenadas geográficas de las estaciones en estudio, ubicadas dentro de Arc-View (Ilustración 2-18) ayudaran a trazar los polígonos de Thiesen para determinar la precipitación media.

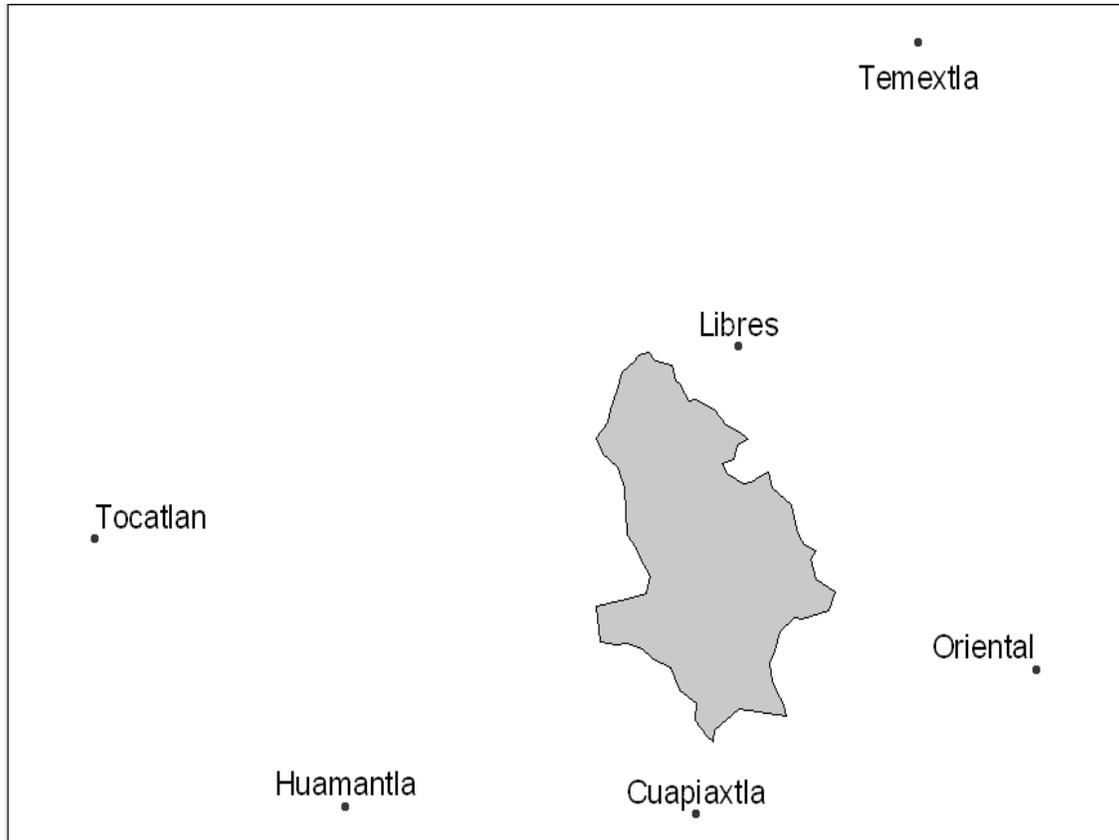


Ilustración 2-18 Ubicación de las estaciones mediante el programa Arc-View

La triangulación para las estaciones de la cuenca se muestra en la Ilustración 2-19, donde cada triángulo es llamado T_1 , T_2 , T_3 , T_4 y T_5 . Los polígonos de Thiesen para cada uno de los triángulos se presentan en la ilustración 2-20 y 2-21, donde puede observarse el área de influencia para cada una de las estaciones.

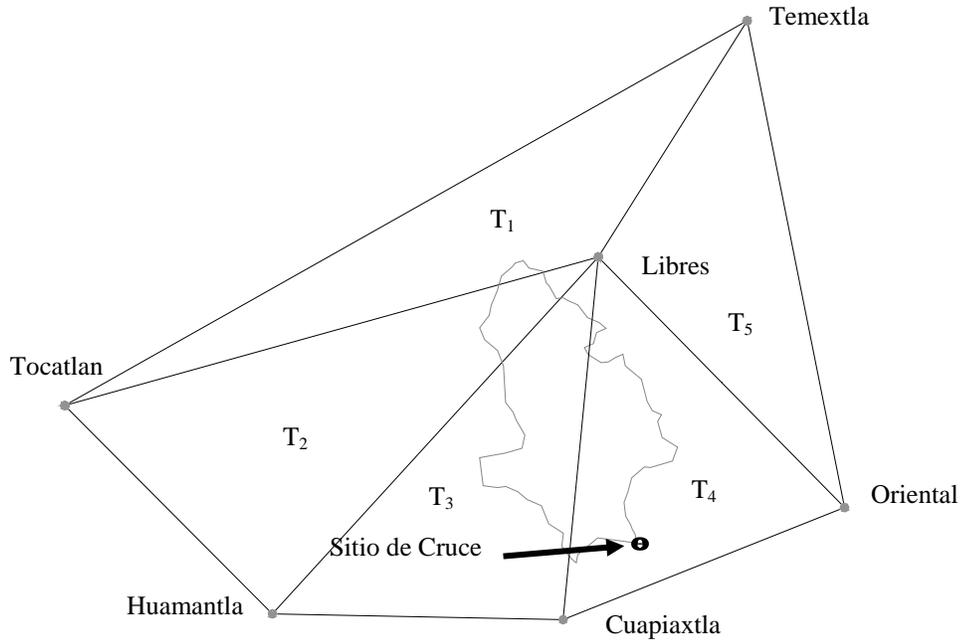


Ilustración 2-19 Triangulación de las estaciones utilizadas para determinar la precipitación media a través de los polígonos de Thiesen.

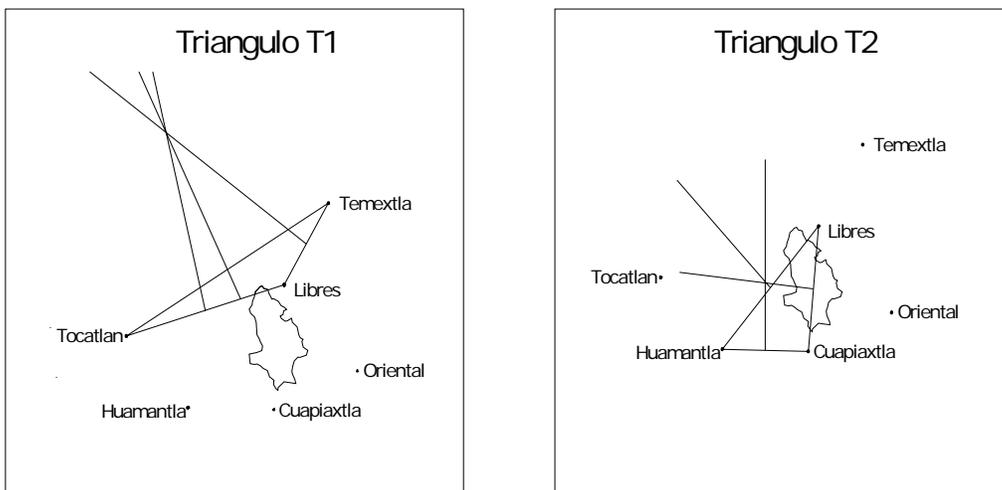


Ilustración 2-20 Polígonos de Thiesen para los cinco triángulos

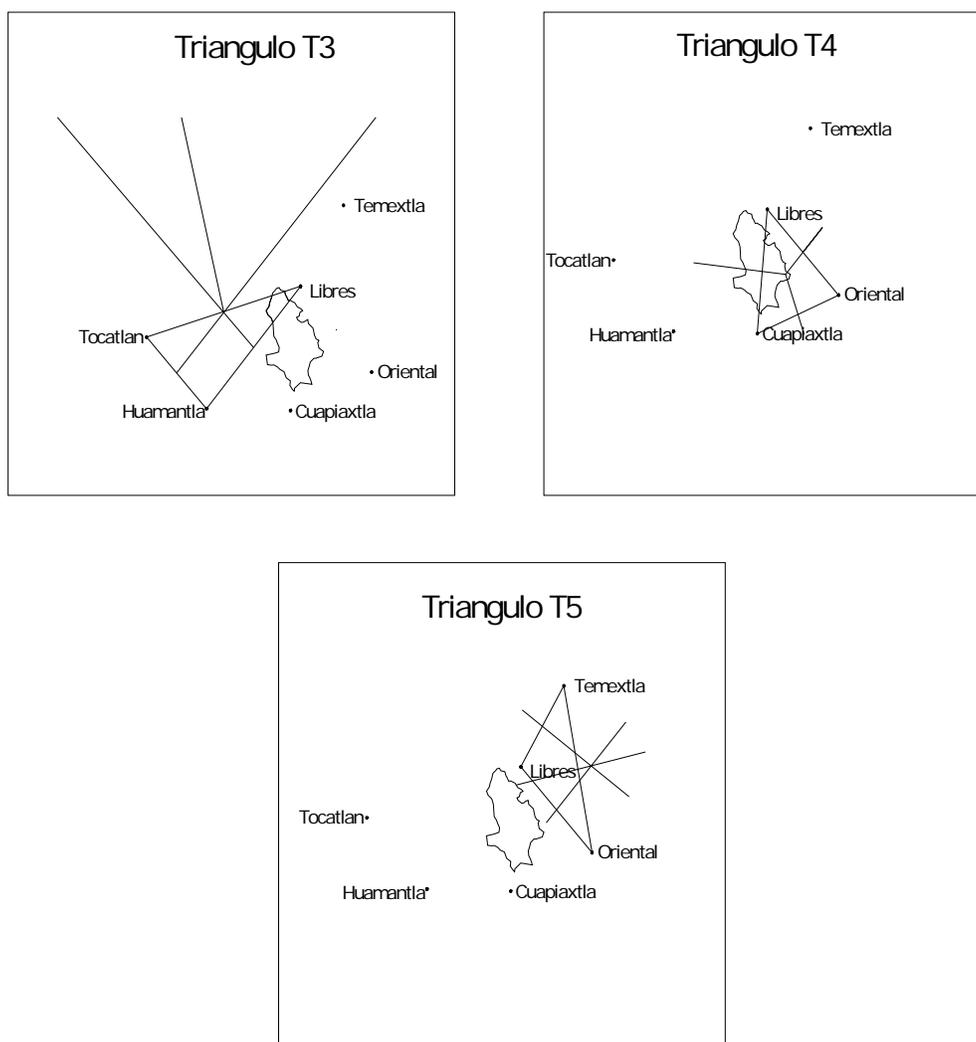


Ilustración 2-21 Polígonos de Thiesen para los cinco triángulos

De esta manera el resumen de áreas de influencia para cada una de las estaciones se muestran en la siguiente tabla:

Nombre de la estación	Area de Influencia (km ²)					Suma
	T1	T2	T3	T4	T5	
Cuapiaxtla	---	---	19.238	20.573	---	39.811
Libres	1.444	11.856	28.684	17.422	0	59.406
Oriental	---	---	---	0.707	0	0.707
Huamantla	---	0	0	---	---	0
Sta. Maria Tocatlan	0	0	---	---	---	0
Colonia Temextla	0	---	---	---	0	0
Suma	1.444	11.856	47.922	38.702	0	99.924

Tabla 2-19 Resumen de áreas de influencia para cada una de las estaciones (las celdas con rayas discontinuas representa a estaciones no correspondientes a T_n)

Para obtener la lluvia media se utiliza la ecuación 1-26 y tomando en cuenta que la estructura a realizar es un puente vehicular se tiene un

periodo de retorno $Tr = 100$ años como lo especifica la Tabla 1-5, los resultados se muestran en las siguientes tablas:

NOMBRE	An	%
CUAPIAXTLA	39.811	0.399
LIBRES	59.406	0.595
ORIENTAL	0.707	0.0071

RESULTADOS DEL ANALISIS PROBABILISTICO PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES CLIMATOLOGICAS			
Tr	CUAPIAXTLA	LIBRES	ORIENTAL
	Hp ₁ (mm)	Hp ₂ (mm)	Hp ₃ (mm)
20	61.54	47.5	112.72
50	67.42	51.46	132.69
100	71.35	54.1	147.17
200	74.93	56.52	161.42

LLUVIA MEDIA DE LAS "N" ESTACIONES MEDIDAS	
Tr	hp media mm (24 hrs)
20	53.56
50	58.39
100	61.62
200	64.60

Tabla 2-20 Lluvia media para una duración de 24 hrs. (asociada a un periodo de retorno)

3. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE AVENIDAS DE DISEÑO

3.1. Método Racional

El gasto que se determina con el método racional se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$Q = 0.278CIA_c \dots\dots\dots\text{Ecuación 3-1}$$

Donde:

- C: coeficiente de escurrimiento adimensional
- I: intensidad de lluvia (mm/hr)
- A_c: área de la cuenca (km²)

Una de las hipótesis básicas de este método es que la tormenta tiene una duración suficientemente grande para permitir que cualquier gota de agua llegue hasta la salida de la misma. La mínima duración para la intensidad de lluvia calculada será igual al tiempo de concentración t_c.

3.1.1. Número de escurrimiento

El valor del número de escurrimiento "N" ayudará a determinar la lluvia de exceso utilizando la ecuación establecida por el Servicio de la Conservación de Suelos (SCS) de E.U.A. Este número depende del uso, tipo y composición del suelo, cobertura vegetal, pendiente y estado de humedad del terreno, entre otros factores, además de ser un indicador generalmente de la retención de agua por parte de las plantas y de los cultivos e indirectamente de la capacidad de infiltración del agua a través del suelo. En la Tabla 3-1 se muestra la clasificación de los suelos en función de los materiales que la componen, mientras que en la Tabla 3-2, se puede obtener el valor "N" de acuerdo al tipo y uso de suelo. Generalmente cuando se tienen superficies de terreno bastante grandes el número de escurrimiento tiene diferentes valores, y es común que en estos casos el promedio pesado pueda calcularse con la Ecuación 3-2.

Tipo	Características
Tipo A	Arenas con poco limo y arcilla de tamaño medio (escurrimiento mínimo)
Tipo B	Arenas finas y limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de ambos
Tipo C	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla.
Tipo D	Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con sub horizontes casi impermeables (escurrimiento máximo)

Tabla 3-1 Clasificación de Suelos

Uso de la Tierra o Cobertura	Condición de la Superficie	Pendiente del terreno en %	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, bajo transpiración	---	45	66	77	83
	Normal Transpiración media	---	36	60	73	79
	Espeso o alta transpiración	---	25	55	70	77
Caminos	De tierra	---	72	82	87	89
	Superficie dura	---	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo o bajo transpiración	---	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	---	46	68	78	84
	Normal, Transpiración medio	---	36	60	70	78
	Espeso, alta transpiración	---	26	52	62	69
	Muy espeso, alta transpiración	---	15	44	54	61
Descanso (sin cultivo)	Surcos rectos	---	77	86	91	94
Cultivos en surco	Surcos rectos	>1	72	81	88	91
	Surcos rectos	<1	67	78	85	89
	Surcos en curvas de nivel (contorneo)	>1	69	79	84	88
	Surcos en curvas de nivel (contorneo)	<1	65	75	82	86
	Terrazas	>1	66	74	80	82
	Terrazas	<1	62	71	78	81
Leguminosas (sembradas con maquinaria o voleo) o praderas con rotación	Surcos rectos	>1	66	77	85	89
	Surcos rectos	<1	58	72	81	85
	Surcos en curvas de nivel	>1	64	75	83	85
	Surcos en curvas de nivel	<1	55	69	78	83
	Terrazas	>1	63	73	80	83
	Terrazas	<1	51	67	76	80
Pastizales	---	>1	68	79	86	89
	---	<1	39	61	74	80
	Contorneo	>1	47	67	81	88
	Contorneo	<1	6	65	70	79
Potrero permanente	---	---	30	58	71	78
Cereales	Surcos rectos	>1	65	76	84	88
	Surcos rectos	<1	63	75	83	87
	Contorneo	>1	63	74	82	85
	Contorneo	<1	61	73	81	84
	Terrazas	>1	61	72	79	82
	Terrazas	<1	59	70	78	81
Superficie impermeable	---	---	100	100	100	100

Tabla 3-2 Valor del número de escurrimiento N, de acuerdo al tipo y uso de suelo

$$N = \frac{N_1 A_1 + N_2 A_2 + \dots + N_n A_n}{A_c} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-2}$$

Donde:

- N_n: Número de escurrimiento del área n.
- A_n: Área proporcional de la cuenca con diferentes tipos de superficie km².
- A_c: Área total de la cuenca en km².

De acuerdo a las cartas de uso y tipo de suelo "Huamantla E14B34", la cuenca se encuentra dividida predominantemente en cuatro áreas, su clasificación y su correspondiente número de escurrimiento para cada una de estas, de acuerdo a la tabla 3-1 y 3-2 se puede observar en la Tabla 3-3. Al aplicar los valores de "N" en la ecuación 3-2, para obtener el Número de escurrimiento general de la cuenca del río Altzayanca, se concluye que N = 78.

Uso de suelo	Tipo	Area (km ²)	N
Agricultura Temporal con cultivos anuales.	A	9.94	45
Agricultura temporal con cultivos anuales y erosión.	B	14.99	60
Pastizales con poca erosión.	D	29.98	88
Bosques de pino y encino con vegetación secundaria.	D	44.99	84

Tabla 3-3 Clasificación del tipo y uso de suelo para la cuenca del río Altzayanca

3.1.2. Determinación de la lluvia media de diseño

Para obtener la lluvia media de diseño se aplican las ecuaciones 3-3 y 3-4 propuestas por Emil Kuishiling y C.E Gransky quienes consideran que la duración de la tormenta es igual al tiempo de concentración de la cuenca. La ecuación es simplemente el resultado del análisis de varias tormentas para la creación de un modelo general que se apegue a las curvas de máxima intensidad, es decir cuando la lluvia es más densa.

$$Hp = \frac{KTc^{1-e}}{1-e} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-3}$$

Despejando el factor K, se obtiene:

$$K = \frac{Hp(1-e)}{Tc^{1-e}} = \frac{Hp(1-e)}{(d_{24})^{1-e}} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-4}$$

Donde:

K: Factor que depende de las características de la muestra y de la distribución de probabilidad empleada.

Tc: tiempo de concentración de la cuenca (hr).

e: Factor adimensional que depende del tiempo de concentración de la cuenca y cuyo valor puede ser obtenido con la ayuda de la gráfica de la Ilustración 3-1.

Hp: Lluvia media en mm. de la Tabla 2-20

Coeficiente "e" de Kuishling

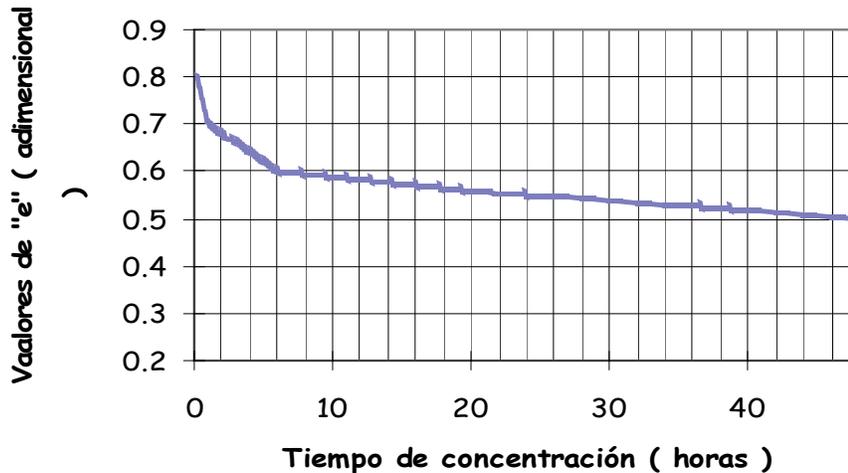


Ilustración 3-1 Coeficiente "e" de Kushiling

Sustituyendo los valores de Hp (lluvia media encontrada con los polígonos de Thiesen) y Tc (tiempo de concentración igual a 24 hrs) en la ecuación 3-4, se obtiene el factor K el cual apegará la distribución a la curva de máxima intensidad de la tormenta. Realizado lo anterior se aplica la ecuación 3-3 con "K" obtenido y con el tiempo de concentración "Tc" calculado en la tabla Tabla 2-6, lo que dará finalmente la lluvia media de diseño.

La intensidad de lluvia a partir de los factores K, e y Tc, se obtienen con la siguiente ecuación.

$$I = \frac{K}{(1 - e)Tc^e} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-5}$$

Donde:

- I : intensidad (mm/hr)
- e : coeficiente e de Kuishling (adimensional)
- Tc: tiempo de concentración de la cuenca en hrs.

Tr (años)	Hp media (24 hrs) mm	Factor "e"	Tc (hrs) = Duración máxima de la tormenta	K	Tc (hrs)	Hp media de diseño (mm)	I (mm/hr)
20	53.56	0.68	24.00	6.20	2.59	26.27	10.14
50	58.39			6.76		28.64	11.06
100	61.62			7.13		30.22	11.67
200	64.60			7.48		31.68	12.23

Tabla 3-4 Calculo de la lluvia media de diseño para la cuenca del Río Altzayanca

3.1.3. Determinación de la lluvia de exceso

La parte de precipitación que queda atrapada en la vegetación más la interceptada en la superficie del suelo y la que se infiltra se conoce como pérdida de precipitación. Ante la dificultad de evaluar cada uno de los conceptos por separado y por ser el tercero de ellos el más grande se considera que los tres corresponden a la infiltración.

A la altura de precipitación que resulta de restar a la total la debida a las pérdidas se le conoce como altura de precipitación en exceso o efectiva y es la que da origen al gasto directo como se puede observar en la Ilustración 3-2, donde se muestra el hidrograma de una estación hidrométrica, en el se puede observar que el gasto correspondiente al escurrimiento directo y a la lluvia de exceso comienza regularmente tiempo después del inicio de la tormenta, mientras que el escurrimiento base es continuo y empieza en el tiempo t_0 es decir, los primeros minutos de lluvia generalmente se infiltran a el subsuelo.

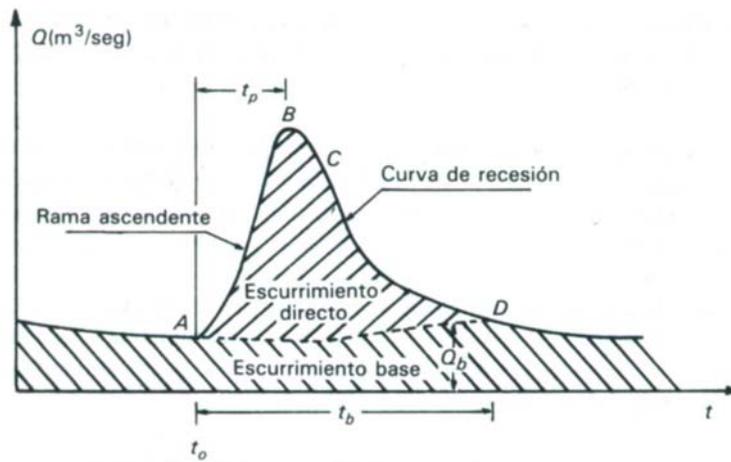


Ilustración 3-2 Hidrograma perteneciente a una estación hidrométrica

Otra manera de calcular la lluvia de exceso es la propuesta por el Servicio de Conservación de Suelos de E.U.A (SCS) quien relaciona la altura de lluvia media de diseño P con la altura de lluvia efectiva Pe a través de la Ecuación 3-6.

$$Pe = \frac{\left[P - \frac{508}{N} + 5.08 \right]^2}{P + \frac{2032}{N} - 20.32} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-6}$$

Donde:

- P : altura total de precipitación o lluvia media de diseño en mm.
- Pe: lluvia de exceso o efectiva en mm.
- N : número de escurrimiento.

Aplicando la ecuación 3-6 para obtener la lluvia de exceso en la cuenca del río Alzayanca se tienen los siguientes valores.

Tr (años)	Hp media de diseño (cm)	N	Pe (cm)
20	2.627	78	0.171
50	2.864		0.238
100	3.022		0.289
200	3.168		0.338

Tabla 3-5 Determinación de la lluvia en exceso o efectiva

3.1.4. Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento "C" representa la fracción de lluvia que escurre en forma directa y es igual al cociente del volumen de escurrimiento directo entre el volumen total de la lluvia (Ecuación 3-7), por lo que toma valores entre 0 y 1 y varía de una cuenca a otra y de una tormenta a otra. El valor de "C" es tomado en varias ocasiones como un factor de infiltración al igual que el número de escurrimiento, solo que en este caso el valor de el dependerá de la permeabilidad del material o del tipo de zona que exista en la cuenca como los que se mencionan en la Tabla 3-6, en donde los valores para "C" son representativos y se han tomado de acuerdo a ciertas características de varias cuencas. En casos en donde se presenten diferentes tipos de zonas y/o cubiertas superficiales se recomienda calcular el coeficiente de escurrimiento como un promedio pesado en función de la porción del área cubierta por cada una de ellas mediante la ecuación 3-8.

$$C = \frac{V_e}{V_T} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-7}$$

Donde:

- Ve: Volumen de escurrimiento directo
- V_T: Volumen total de escurrimiento

$$C = \frac{C_1A_1 + C_2A_2 + C_3A_3 + \dots + C_nA_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-8}$$

Por otro lado el coeficiente de escurrimiento en función del área total de la cuenca estaría dado por la ecuación 3-9, en donde Pe corresponde a la lluvia en exceso o efectiva y P_T a la lluvia media de diseño.

$$C = \frac{P_e \times A_T}{P_T \times A_T} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-9}$$

Tipo de área drenada	Coeficiente de escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
Zonas comerciales		
Zona comercial	0.70	0.95
Vecindarios	0.50	0.70
Zonas Residenciales		
Unifamiliares	0.30	0.50

Multifamiliares, espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
Zonas Industriales		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios, Parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de Ferrocarril	0.20	0.40
Zonas suburbanas	0.10	0.30
Calles:		
Asfatadas	0.70	0.95
De concreto hidráulico	0.70	0.95
Adoquinadas	0.70	0.85
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas		
Suelos arenosos planos (pendiente 0.02 o menos)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 o más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 o menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02- 0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 o más)	0.25	0.35

Tabla 3-6 Valores del coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno mediante la ecuación 3-9 de la cuenca Altzayanca se muestra en la siguiente tabla.

Tr (años)	Hp media de diseño (mm)	Pe (mm)	Coeficiente de escurrimiento "C"
20	26.27	1.71	0.065
50	28.64	2.38	0.083
100	30.22	2.89	0.100
200	31.68	3.38	0.107

Tabla 3-7 Coeficiente de escurrimiento para diferentes periodos de retorno

Los Gastos obtenidos por el método racional se muestran en la siguiente tabla:

Tr (años)	Hp media de diseño (mm)	He (mm)	I (mm / hr)	Coeficiente de escurrimiento "C"	Ac (km2)	Qmáx (m3/seg)
20	26.27	1.71	10.14	0.065	99.92	18.31
50	28.64	2.38	11.06	0.083		25.50
100	30.22	2.89	11.67	0.100		32.42
200	31.68	3.38	12.23	0.107		36.35

Tabla 3-8 Gastos obtenidos por el método racional

3.2. Hidrogramas Unitarios Sintéticos

Estos hidrogramas están basados principalmente en las características físicas de la cuenca y son utilizados muy comúnmente cuando no se tiene información de las precipitaciones o los escurrimientos en las estaciones. Se denominan sintéticos debido a que son el resultado de comparar varios hidrogramas correspondientes a cuencas con características semejantes.

Algunos de estos hidrogramas se listan a continuación:

- Hidrograma Unitario Triangular
- Hidrograma Unitario del SCS
- Método de Ven Te Chow

3.2.1. Hidrograma Unitario Triangular (HUT)

La forma adoptada por el Hidrograma Unitario Triangular se muestra en la Ilustración 3-3 cuyas características pueden ser calculadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$T_p = 0.6T_c + \frac{\Delta T}{2} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3-10}$$

$$Q_p = 0.556 \frac{P_e \times A}{n \times T_p} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3-11}$$

$$T_b = nT_p \dots\dots\dots\text{Ecuación 3-12}$$

$$q_p = \frac{Q_p}{P_e} = \frac{0.556A}{n T_p} \dots\dots\dots\text{Ecuación 3-13}$$

Donde:

- T_p : tiempo pico en hrs.
- T_c : tiempo de concentración en hrs.
- ΔT : intervalo de análisis en horas, generalmente igual a T_c
- Q_p : gasto pico, en m³/s
- q_p : gasto pico unitario m³/s/mm
- P_e : Lluvia en exceso del intervalo, en mm.
- A : área de la cuenca en km²
- T_b : tiempo base del hidrograma en hrs.
- n : parámetro que se considera igual a 2 o puede ser calculado mediante la siguiente ecuación $n = 2 + \frac{A - 250}{1583.33}$; donde A es el área de la cuenca en km².

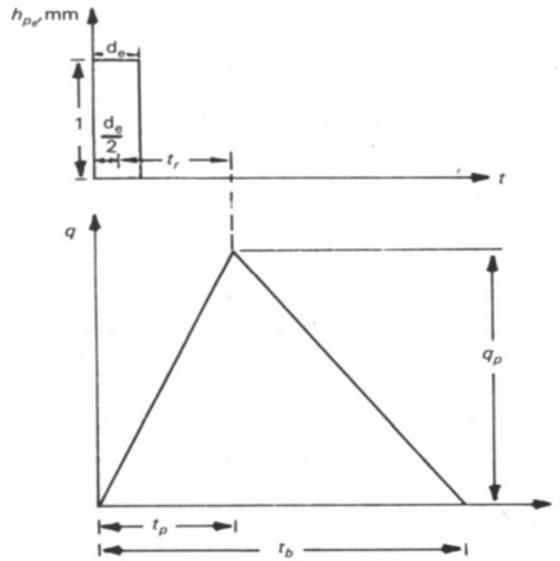


Ilustración 3-3 Características del Hidrograma Unitario Triangular

Sustituyendo los valores en las ecuaciones anteriores se obtiene la Tabla 3-9 y la ilustración 3-4 que representa el hidrograma propio de la cuenca del río Alzayanca.

A (km ²)	Tc (hrs)	Tr (años)	Pe (mm)	Tp (hrs)	n	Qp (m ³ /s)	Tb (hrs)	q _p (m ³ /s/mm)
99.92	2.59	20	1.71	2.85	1.905	17.50	5.43	10.23
		50	2.38			24.35		
		100	2.89			29.57		
		200	3.38			34.59		

Tabla 3-9 Cálculo del gasto pico para la cuenca del río Alzayanca mediante el método de los hidrogramas unitarios

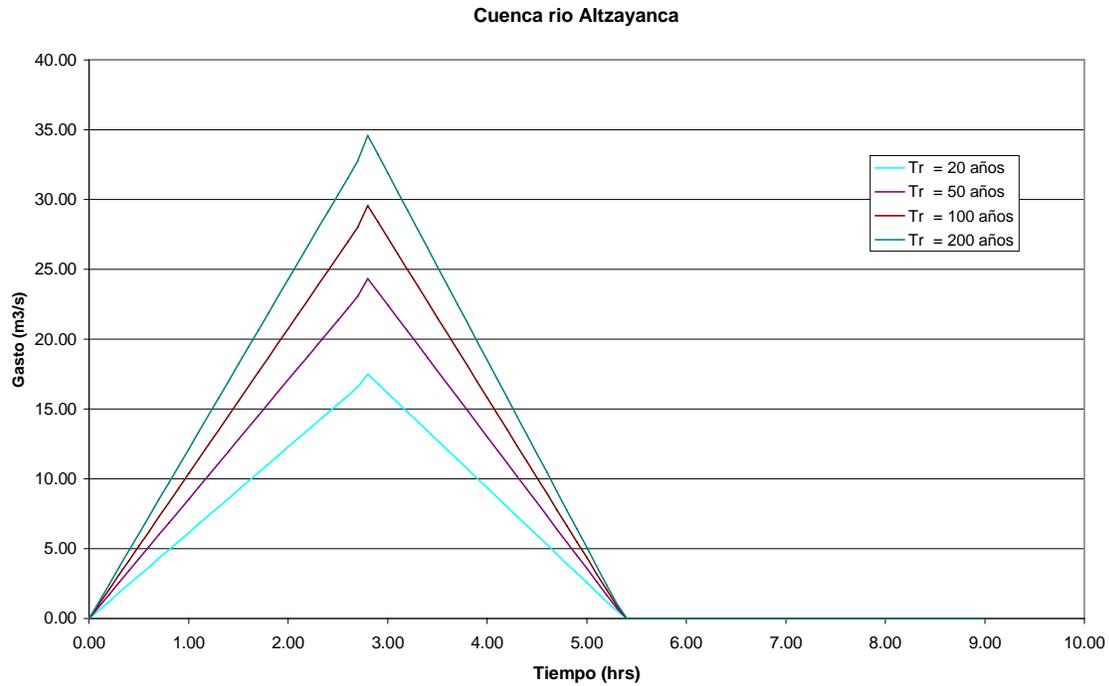


Ilustración 3-4 Hidrograma Triangular de la cuenca del río Altzayanca

El Soil Conservation Service de los Estados Unidos propone utilizar un hidrograma unitario adimensional usando las ecuaciones y resultados del hidrograma unitario triangular, dicho hidrograma se muestra en la Ilustración 3-5, y el hidrograma resultante del SCS para la cuenca Altzayanca en la Ilustración 3-6.

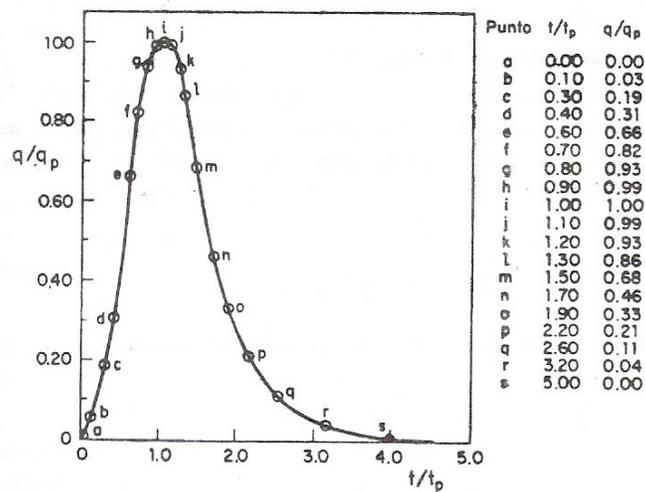


Ilustración 3-5 Hidrograma Unitario del SCS

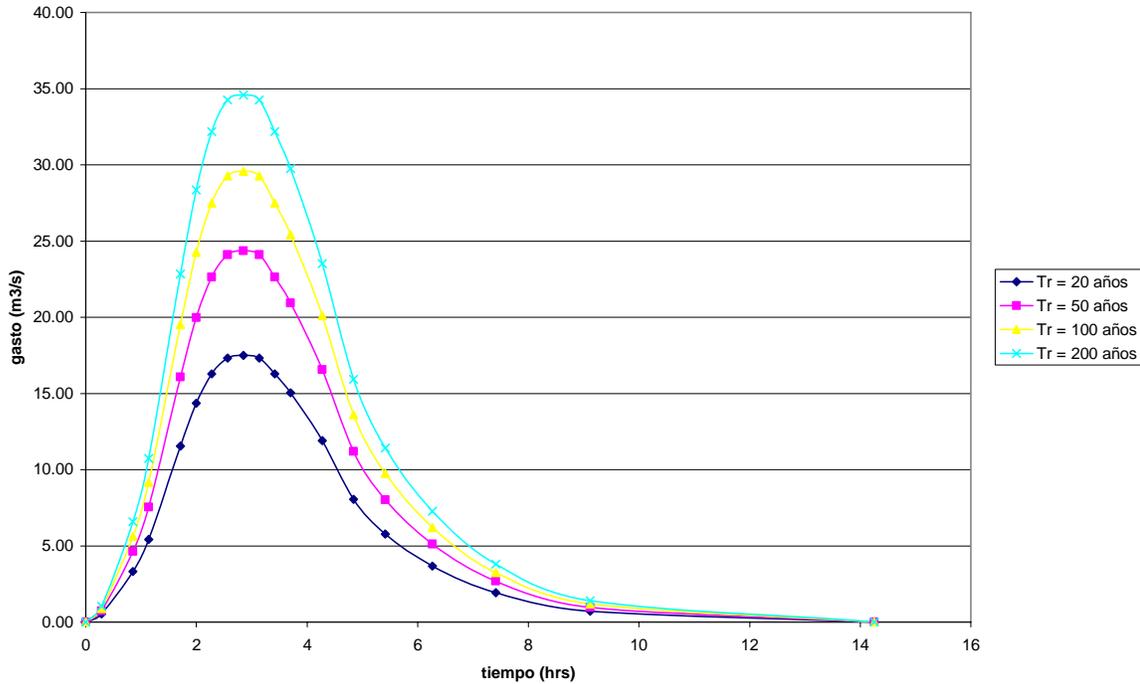


Ilustración 3-6 Hidrograma del SCS para la cuenca del río Altzayanca

3.2.2. Método de Ven Te Chow

El modelo propuesto por Ven Te Chow se basa en el concepto del hidrograma sintético y es aplicable a una cuenca en la cual el escurrimiento es sensible a lluvias intensas y de corta duración y donde predominan las características físicas de la cuenca con respecto a las del cauce. El flujo del cauce esta gobernado por la siguiente ecuación.

$$Q_p = \frac{0.278 \times Pe \times Ac}{d_e} \times Z$$

Donde:

Pe: Lluvia efectiva en mm.

Ac: Área de la cuenca en km²

d_e: Duración de la tormenta igual al tiempo de concentración

Z : Factor de reducción el cual se describe a continuación.

- Factor de reducción del pico "Z"

El factor Z, es la relación entre el gasto pico de un hidrograma unitario debido a una lluvia de duración dada "d" y el escurrimiento de equilibrio, o sea el escurrimiento de la misma intensidad de lluvia pero de duración infinita.

El valor de "Z" se puede determinar como una función de la relación, entre la duración de la tormenta "d" y el tiempo de retraso "tr", el cual se define como el intervalo de tiempo medido del centro masa de un bloque de

intensidad de lluvia, al pico resultante del hidrograma (ver Ilustración 3-7). Para un hidrograma unitario instantáneo, o sea un hidrograma hipotético, cuya duración de lluvia en exceso se aproxima a cero como un límite, mientras se mantiene fija la cantidad de lluvia en exceso igual a 1 cm., el tiempo de retraso es igual al tiempo de pico del escurrimiento. El tiempo de retraso no corresponde exactamente al tiempo de concentración, o sea el requerido por el escurrimiento superficial, para llegar de la parte más remota de la cuenca al punto en estudio.

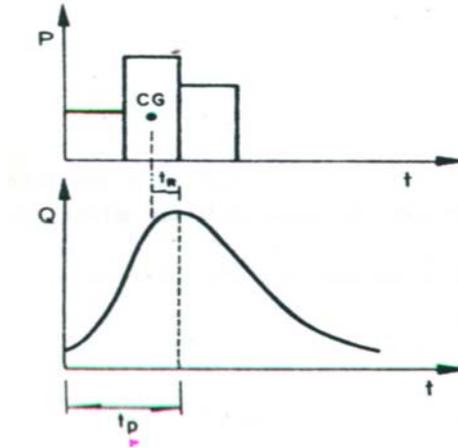


Ilustración 3-7 Definición de tiempo de retraso

El tiempo de retraso depende principalmente de la forma del hidrograma y de las características físicas y geométricas de la cuenca y es independiente de la duración de la lluvia. Chow encontró que el tiempo de retraso se puede calcular por:

$$tr = 0.00505 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.64} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3-14}$$

- Donde:
- tr: tiempo de retraso en horas.
 - L : longitud del cauce principal (m).
 - S : pendiente media del cauce, en porcentaje

Conocido tr de la cuenca, Z se puede calcular por medio de la relación d/tr obtenida por Chow y mostrada en la siguiente ilustración.

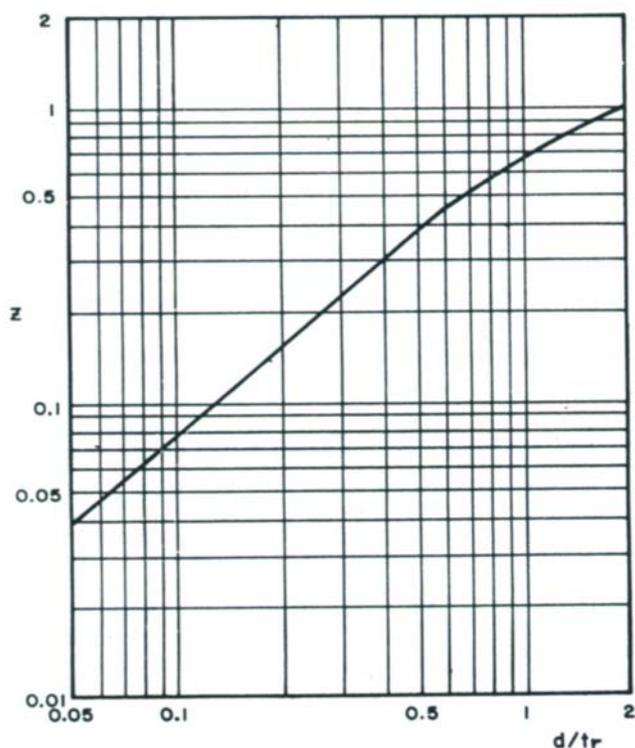


Ilustración 3-8 Relación entre Z y d/tr

Los gastos de diseño para la cuenca del río Alzayanca mediante la aplicación de este método se muestran en la siguiente tabla.

L	21.517	Km
S	0.012	milesimas
A	99.920	Km ²

Tr (años)	Pe (mm)	d _e = Tc (hrs)	tr (hrs)	d/tr	Z	Qp (m ³ /s)
20	1.71	2.59	2.845	0.91	0.61	11.19
50	2.38					15.58
100	2.89					18.91
200	3.38					22.11

Tabla 3-10 Determinación del gasto de diseño para cada periodo de retorno por el método de Chow para la cuenca del río Alzayanca.

CONCLUSIONES

De acuerdo al desarrollo del trabajo y datos obtenidos se pueden concluir lo siguiente.

- Con respecto a los parámetros físicos obtenidos de la cuenca del río Alzayanca como son: área de la cuenca, pendiente media de la cuenca, pendiente media del cauce principal y tiempo de concentración, se puede decir que la cuenca responde lentamente ante una lluvia intensa, debido a que las velocidades del flujo correspondientes a la pendiente de la cuenca y del cauce principal son bajas, pues los valores de estos parámetros son pequeños, esta conclusión es apoyada por otro lado con el tiempo de concentración y ancho del canal natural del río = 113.92 m, cuyos valores son representativos para no presentar inundación alguna.
- Al trazar los polígonos de Thiesen se observó que tres de las seis estaciones vecinas a la cuenca Alzayanca, son desechadas refiriéndose en este caso a: Huamantla, Sta. Maria Tocatlan y Colonia Temextla, debido a que el área delimitada por los polígonos de esas estaciones es nula, lo que impide el cálculo algebraico de la lluvia media, sin embargo no quiere decir que las lluvias que caen en estas estaciones no acumulen agua en los rios de la cuenca Alzayanca, si no que su influencia es menor, por lo que su aportación no es importante para el calculo de la lluvia media de la cuenca.
- La extracción de los datos mediante ERIC II es muy sencilla y rápida aunque tiene el inconveniente de que algunas estaciones no cuentan con datos continuos, teniéndose en este caso que utilizar métodos para interpolar o ampliar los registros, pero aún así se convierte en una buena herramienta en el análisis de sistemas hidrológicos. Por otro lado el programa AX, tiene ventajas grandes una de ellas es la facilidad de introducir datos y la rapidez de arrojar resultados ajustados a alguna de las funciones de distribución de probabilidad, además de mostrarlos gráficamente o en tablas de texto.
- La cuenca Alzayanca presenta cuatro tipos de suelos (tabla 3-3), de ahí que la mayor parte de la superficie de la cuenca esta compuesta de material permeable, lo que se refleja en los valores del numero de escurrimiento ($N = 78$), del coeficiente de escurrimiento ($C = 0.1$) y lluvia de exceso ($Pe = 2.89$ mm), con lo cual se puede concluir que el escurrimiento superficial en la cuenca producido por una lluvia intensa es pequeño, pues la mayor parte del agua es infiltrada al terreno y es retenida por las plantas existentes.

Los gastos obtenidos por el método Racional, Hidrograma Unitario Triangular y método de Ven Te Chow se muestran en la siguiente tabla:

T A B L A R E S U M E N			
Tr (años)	GASTOS MÁXIMOS (m ³ /seg)		
	RACIONAL	H U T	VEN TE CHOW
20	18.31	17.50	11.19
50	25.50	24.35	15.58
100	32.42	29.57	18.91
200	36.35	34.59	22.11

De acuerdo a las conclusiones arriba desarrolladas se muestra evidente que los gastos calculados por cada método presentarían valores pequeños para una cuenca cuya área pareciera muy grande, de tal suerte se puede decir que la zona en estudio es de tipo semiárido.

Por lo que respecta a los niveles topográficos y de rasante de la estructura que se pretende construir en esta zona, se puede decir que estarán regidos por los cálculos arrojados mediante la aplicación de un método de la hidráulica de canales.

BIBLIOGRAFÍA

Aparicio M.F.J., Fundamentos de Hidrología de Superficie, Ed. Limusa, México 2001.

Campos A.D.F., Procesos del ciclo hidrológico, Ed. Universitaria Potosina, Septiembre de 1983.

Comisión Nacional del Agua (Gerencia de Aguas superficiales e Ingeniería de Ríos), Manual de Ingeniería de Ríos "Estudio hidrológico para obras de protección", México 1993.

Comisión Nacional del Agua, Instructivo de Hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona Federal, 1987.

Enviromental Systems Research Institute, ArcView GIS ver. 3.2,1999.

Escalante S.C.A. & Reyes Ch.L., Técnicas Estadísticas en Hidrología, UNAM, Septiembre de 2002.

http://www.cna.gob.mx/publica/doctos/publicaciones/PHR_internet/PHR_PDF/Reg_IV/RIV_4_a.pdf

http://www.hec.usase.army.mi/software/hecras/hecras-arcview_download.htm

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

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Extractor Rápido de Información Climatologica (ERIC II)

Jiménez E.M., Manual de operación del programa AX, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 1992.

Secretaria de Agricultura y Recursos Hidraulicos, Boletín Hidrologico Num. 48 - Región Hidrologica Num. 18 (Cuenca de los Ríos Atoyac y Mixteco), México D.F. 1970.

U.S Army corps of engineers (Hidrologic Engenieering Center), Hec-Ras (River Analisis System)ver 3.1.1 , Mayo 2003.

Ven Te Chow, Hidrología Aplicada, Ed. McGraw-Hill, 1995