



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**IDENTIFICACIÓN DE CORRELACIONES ENTRE EL  
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y EL TIEMPO BASE DE  
AVENIDAS MÁXIMAS ANUALES DE HIDROMÉTRICAS  
DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA NO. 10**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**INGENIERA CIVIL**

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

Brenda Rodríguez Hidalgo

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 15 de Febrero 2018



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/011/18

Señorita  
BRENDA RODRÍGUEZ HIDALGO  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"IDENTIFICACIÓN DE CORRELACIONES ENTRE EL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y EL TIEMPO BASE DE AVENIDAS MÁXIMAS ANUALES DE HIDROMÉTRICAS DE LA REGIÓN HIDROLÓGICA No. 10"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. METODOLOGÍA
- III. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO
- IV. ANÁLISIS Y RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES
- REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 22 de febrero del 2018.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

# Índice

Introducción .....	4
1. Antecedentes .....	6
1. Métodos utilizados en estudios previos .....	7
1.1.1 Método del Instituto de Ingeniería.....	7
1.1.2 Método bivariado .....	8
1.2 Objetivo.....	8
1.3 Hipótesis.....	8
2. Metodología.....	9
2.1 Características fisiográficas de una cuenca hidrológica.....	9
2.1.1 Parteaguas .....	9
2.1.2 Área de la cuenca.....	10
2.1.3 Corriente principal.....	10
2.1.4 Longitud del cauce principal .....	10
2.1.5 Pendiente del cauce principal.....	10
2.1.6. Tiempo de concentración .....	14
2.2 Análisis de los hidrogramas .....	14
2.2.1 Hidrograma.....	15
2.2.2 Métodos de separación del tiempo base .....	16
2.3 Parámetros indicadores del grado de ajuste y de dispersión .....	19
2.3.1 Coeficiente de determinación .....	19
2.3.2 Coeficiente de correlación.....	20
2.3.3 Coeficiente de variación .....	20
2.4 Recopilación y análisis de avenidas .....	21
2.5 Método Solver .....	23
3. Descripción del sitio de estudio .....	26
3.1. Fisiografía .....	26
3.2 Tipos de suelo .....	27
3.3 Clima .....	27
4. Análisis y resultados.....	30
4.1 Separación de gasto base.....	34
4.2 Determinación del mejor modelo.....	38
4.2.1 Modelo 1 (tiempo de concentración) .....	39

4.2.1.1 Modelo 1 (grupo 1).....	41
4.2.1.2 Modelo 1 (grupo2).....	43
4.2.2 Modelo 2 (Área de la cuenca).....	44
4.2.2.1 Modelo 2 (grupo 1).....	46
4.2.2.1 Modelo 2 (grupo 2).....	47
4.2.3 Modelo 3 (Pendiente media de la cuenca).....	48
4.2.4 Modelo 4 (tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca).....	50
4.2.5 Modelo 4 (grupo 1, tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca) .....	51
4.2.5 Modelo 4 (grupo 2, tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca) .....	53
Conclusiones.....	55
Referencias.....	58

## Introducción

Conocer el tiempo base de una avenida de diseño es importante porque este parámetro permite conocer el inicio y término del escurrimiento directo provocado por una tormenta y, ayuda a la separación del gasto base; con este resultado se pueden estimar las pérdidas, las cuales resultan de utilidad para estimar el volumen de escurrimiento directo ante un evento de precipitación. La capacidad de infiltración del suelo es rebasada cuando la intensidad de la precipitación es de gran magnitud, generando escurrimientos que contribuyen a elevar los niveles en el cauce de una cuenca. Sin embargo, es difícil determinar el tiempo base mediante métodos gráficos porque se consideran situaciones subjetivas al momento de definir la curva de recesión del escurrimiento directo. El conocimiento del tiempo base también es auxiliar en métodos para construir o darle forma al hidrograma de diseño.

Para el diseño de cualquier obra hidráulica es necesario tener un rango de seguridad para gastos y volúmenes máximos, los cuales son proporcionados por una avenida de diseño que considera la ocurrencia de eventos de gran importancia. Considerando la información que una avenida de diseño nos puede dar (gasto, volumen y forma del hidrograma) mediante el cálculo del tiempo base, se puede asegurar que la obra hidráulica soportará los eventos de importancia iguales o mayores a los que se tiene en el registro, protegiendo a la población que pueda resultar afectada.

Este trabajo tiene como principal objetivo obtener ecuaciones para el cálculo del tiempo base a partir de variables de sencilla medición de distintas estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica número 10, obteniendo la correlación entre el tiempo base y otras características fisiográficas de las cuencas aforadas por dichas estaciones.

El capítulo 1, "Antecedes", contiene los estudios previos realizados, el objetivo y la hipótesis de esta tesis.

El capítulo 2, "Metodología", abarca conceptos generales que se utilizaron en este estudio, primero los conceptos relacionados con hidrología, como las características fisiográficas de una cuenca y los métodos de separación del tiempo base; posteriormente, la definición de parámetros estadísticos como el coeficiente de

variación, el coeficiente de correlación y el coeficiente de determinación; por último se explica la herramienta Solver del programa Excel.

En el capítulo 3, "Sitio de estudio", se describen las principales características de la región hidrológica, como: la ubicación la fisiografía, el tipo de suelo y el clima.

Después en el capítulo 4, "Aplicación y resultados", se muestran los resultados obtenidos al aplicar lo mencionado en el capítulo 2 y su respectivo análisis.

Por último, el capítulo 5 contiene las conclusiones a las que se llegó después de analizar los resultados obtenidos, proporcionando recomendaciones para trabajos futuros.

## 1. Antecedentes

Para controlar y aprovechar de mejor manera el agua, resulta necesario considerar las pérdidas, ya que generalmente representan una parte considerable de agua, particularmente las que están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charco, la evaporación y la infiltración. Se les suele referir a las pérdidas con el nombre de infiltración. (Aparicio, 1989)

El tiempo base es un parámetro importante para resolver distintos problemas hidrológicos, por ejemplo, sirve para estimar las pérdidas por infiltración mediante el criterio de la infiltración media, separando el escurrimiento directo del escurrimiento base y posteriormente calculando el volumen de escurrimiento directo. Además en un hietograma de precipitación total se podría requerir conocer de todo el volumen llovido, cuánto es el que escurre y para determinar este volumen es importante hacer la separación del hidrograma de escurrimiento total en el hidrograma de escurrimiento directo y el escurrimiento base.

Para la separación del escurrimiento directo y el escurrimiento base mediante métodos gráficos se hacen consideraciones un poco subjetivas debido a que se presentan problemas para la identificación del principio y fin de una avenida, particularmente en la definición del final de la rama de recesión del escurrimiento directo porque no resulta evidente el punto donde éste termina, por lo tanto se realizan estimaciones para el cálculo del tiempo base y del volumen de escurrimiento directo.

Contar con los hidrogramas de escurrimiento directo es importante para obtener y actualizar las avenidas de diseño (tanto en forma como en gasto de pico), ya que con los hidrogramas que se obtienen se realiza el diseño y la revisión del funcionamiento hidráulico de una obra de aprovechamiento o de control de avenidas para conocer si operaran de forma adecuada ante la ocurrencia de un evento hidrológico de gran magnitud (Arganis y Preciado, 2017). Además en el análisis bivariado se requiere conocer tanto el gasto de pico como el volumen de la avenida, y para estimar ese volumen es muy importante el conocimiento del tiempo base, por lo tanto es necesario contar con los hidrogramas de escurrimiento directo.

Existe otro análisis que permite estimar el tiempo base, este análisis es el análisis espectral en el que se analizan las avenidas históricas máximas para n días de duración, suponiendo que el gasto de pico se presenta el mismo día; las avenidas se normalizan respecto al gasto de pico y se obtienen las fracciones de cada día respecto al gasto de pico; se determina el promedio de esas fracciones y estos promedios se ordenan de mayor a menor; este orden indica la posición que tendrá cada barra de un nuevo hidrograma de diseño. Con el Método del Instituto de Ingeniería se logra preservar la forma de las avenidas históricas (Dueñas Puebla, 2016).

## **1. Métodos utilizados en estudios previos**

### **1.1.1 Método del Instituto de Ingeniería**

El Método del Instituto de Ingeniería (Domínguez y Arganis, 2012) se utiliza para obtener avenidas de diseño considerando su gasto máximo, su volumen y su forma; mediante el uso de valores de gasto medio diario registrado.

A cada serie de gastos medios máximos para distintas duraciones se les realiza un análisis estadístico para obtener la función de distribución de mejor ajuste; con esa función de distribución se obtienen los gastos medios máximos de diseño para distintos periodos de retorno, construyéndose curvas gasto- duración-periodo de retorno. (Arganis y Preciado, 2017).

Al seleccionar un periodo de retorno, los gastos medios de diseño se transforman en gastos individuales, con los gastos individuales se usa algún método para construir el hidrograma de la avenida de diseño, por ejemplo el de alternar bloques.

Este método da resultados confiables cuando se cuenta con registros extensos de gastos medios diarios, obtenidas de estaciones hidrométricas ubicadas cerca de la zona (Domínguez y Arganis, 2012).

El tiempo base que se propone en este método se establece dependiendo del tamaño de la cuenca analizada o de la capacidad de regulación de la misma; también la realización de tránsito de avenidas ayuda a definir si la selección del tiempo base del hidrograma de entrada fue adecuado o si se debe a cortar o ampliar (en el caso en que el hidrograma de salida obtenido no alcance a formar completamente su rama de recesión, debe ampliarse el tiempo base).

### **1.1.2 Método bivariado**

Este método fue desarrollado en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Es utilizado cuando interesa tanto el gasto de pico como el volumen de las avenidas históricas para obtener las avenidas de diseño de una cuenca, para este método se analiza a la función de distribución conjunta de los valores históricos de gasto de pico y volumen de avenidas máximas anuales (Ramírez y Aldama, 2000).

El método bivariado se auxilia de otros procedimientos para dar la forma a los hidrogramas de diseño, por ejemplo formas de tipo polinomiales de las ramas ascenso y descenso del hidrograma, cuyo tiempo base se define con ayuda de la teoría del hidrograma triangular (hidrogramas hermitianos paramétricos, Ramírez y Aldama, 2000).

### **1.2 Objetivo**

Estimar el tiempo base de avenidas máximas anuales que históricamente han ocurrido en distintas estaciones hidrométricas de la región hidrológica No. 10 para posteriormente obtener su correlación con el tiempo de concentración y otras posibles características fisiográficas de las cuencas analizadas. Con el fin de encontrar ecuaciones para el cálculo del tiempo base a partir de variables de sencilla medición.

### **1.3 Hipótesis**

El tiempo base de un hidrograma de escurrimiento directo en una cuenca depende del tiempo de concentración.

## 2. Metodología

### 2.1 Características fisiográficas de una cuenca hidrológica

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

Se pueden encontrar dos tipos de cuencas de acuerdo con el tipo de salida:

a) Endorreicas: El punto de salida se encuentra dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago.

b) Exorreicas: El punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y se encuentra en otra corriente o en el mar.

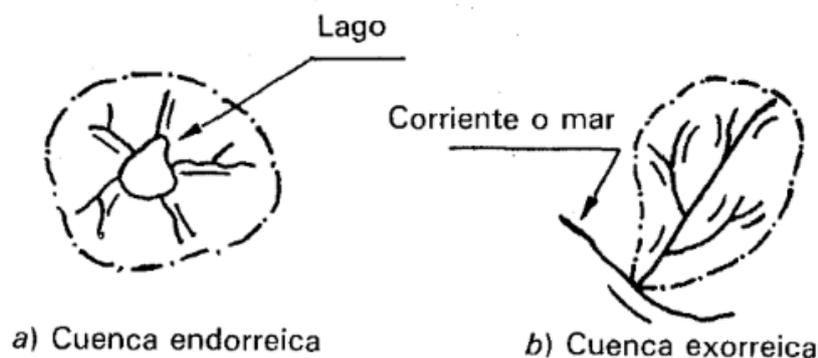


Fig. 2.1 Tipos de cuencas. (Aparicio, 1989)

A continuación se describen algunas características fisiográficas principales de la cuenca para efectos de este trabajo.

#### 2.1.1 Parteaguas

El parteaguas es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa dos cuencas adyacentes.

### **2.1.2 Área de la cuenca**

El área de la cuenca se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas.

### **2.1.3 Corriente principal**

La corriente principal de una cuenca es la corriente que pasa por la salida de la misma, esta definición se aplica solamente a las cuencas exorreicas. Las demás corrientes de una cuenca de este tipo se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una y sólo una corriente principal (Aparicio, 1989).

### **2.1.4 Longitud del cauce principal**

Es la máxima longitud que va desde el punto de descarga o salida de la cuenca al punto más alejado de la misma, este parámetro da una idea de la forma de la cuenca porque los escurrimientos superficiales dependen de la forma de la cuenca.

### **2.1.5 Pendiente del cauce principal**

Este parámetro nos da una idea de la capacidad de respuesta a una tormenta de una cuenca. Debido a que la pendiente varía a lo largo del cauce, es necesario determinar la pendiente media del cauce principal, la cual queda definida como la inclinación de su topografía. Existen distintos métodos para determinar la pendiente media del cauce principal, de los cuales se mencionan tres:

- a) Obtener el desnivel entre los extremos del cauce principal dividido entre la longitud del cauce principal en planta.

$$S = \frac{H}{L} \quad (2.1)$$

donde:

$S$  es la pendiente media del cauce principal,

$H$  es la diferencia de elevaciones en metros,

$L$  es la longitud del cauce principal en metros

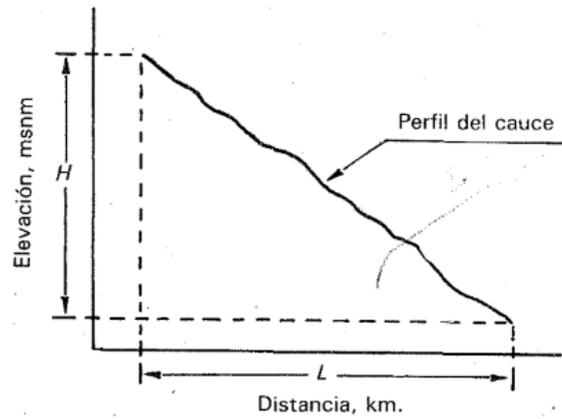


Fig. 2.2 Desnivel de un cauce principal. (Aparicio, 1989)

- b) La pendiente compensada es la de una línea recta desde el extremo de aguas abajo de la corriente, se trata de obtener áreas iguales entre el perfil del cauce, arriba y debajo de la línea.

$$S = \frac{H}{L} \quad (2.2)$$

donde:

$S$  es la pendiente media del cauce principal,

$H$  es la diferencia de elevaciones en metros,

$L$  es la longitud del cauce principal en metros

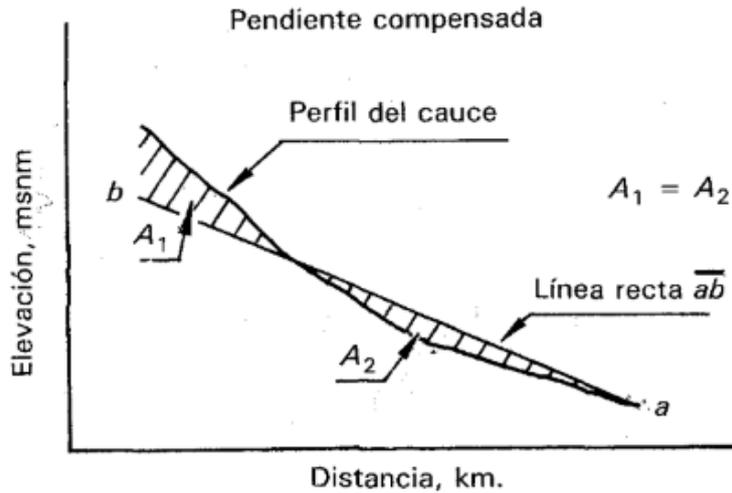


Fig. 2.3 Pendiente compensada. (Aparicio, 1989)

- c) La pendiente de Taylor- Swartz, quienes proponen 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.

Por definición, se tiene:

$$V_i = \frac{\Delta x_i}{t_i} \quad (2.3)$$

donde

$\Delta x_i$ , es la longitud de tramo  $i$ ;

$t_i$ , es el tiempo de recorrido para cada tramo

La velocidad para flujo uniforme está dada por:

$$V_i = k\sqrt{S_i} \quad (2.4)$$

donde

$k$  es un factor que depende de la rugosidad y la forma de la sección transversal,

$S_i$  es la pendiente del tramo  $i$

Para todo el tramo se tiene:

$$V = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta x_i}{\sum t_i} \quad (2.5)$$

Despejando el tiempo de la ecuación (2.3) y sustituyendo en la ecuación (2.5) con la ecuación de la velocidad en flujo uniforme se tiene:

$$V = \frac{m \Delta x_i}{\sum_{i=1}^m \frac{\Delta x_i}{k \sqrt{S_i}}} = k \sqrt{S} \quad (2.6)$$

Despejando para la pendiente se tiene:

$$S = \left[ \frac{m}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt{S_i}}} \right]^2 \quad (2.7)$$

La pendiente media para las longitudes con tramos iguales será:

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{l}{\sqrt{S_1}} + \frac{l}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l}{\sqrt{S_m}}} \right]^2 \quad (2.8)$$

La pendiente media para las longitudes con tramos diferentes será:

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (2.9)$$

donde

$S$  es la pendiente total del cauce principal,

$L$  es la longitud del cauce principal,

$l_i$  es la longitud del tramo  $i$ ,

$S_i$  es la pendiente del tramo  $i$

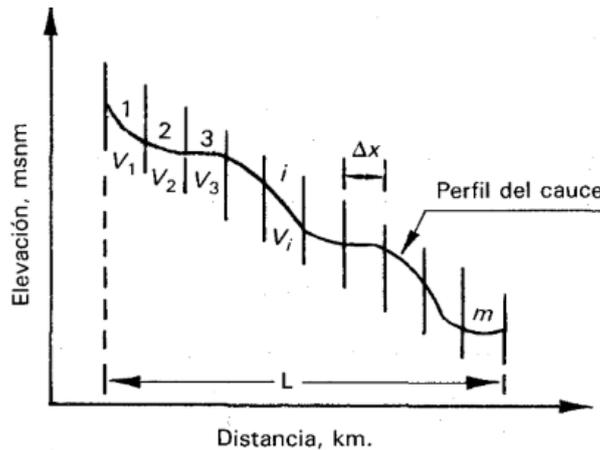


Fig. 2.4 Pendiente de Taylor-Swartz. (Aparicio, 1989)

### 2.1.6. Tiempo de concentración

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado (Ibáñez, 2011).

Es un parámetro característico de cada cuenca y depende de los siguientes factores:

- Del tamaño de la cuenca: a mayor tamaño mayor tiempo de concentración.
- De la topografía: a mayor accidentalidad o pendiente, menor tiempo de concentración
- De la forma: a igualdad de otros factores, las cuencas alargadas presentan menores tiempos de concentración que las cuencas redondeadas.

## 2.2 Análisis de los hidrogramas

El agua de la precipitación que llega a nivel del terreno sigue diversos caminos, una parte se infiltra, otra se evapora o puede seguir su camino hasta llegar a la salida de la cuenca. Para su estudio se divide a los escurrimientos en tres tipos: escurrimiento superficial, subsuperficial y subterráneo.

El escurrimiento superficial está compuesto por el flujo en la superficie y el escurrimiento en corrientes, el escurrimiento en la superficie es el agua que llena las depresiones y posteriormente escurre por su superficie y se produce siempre y cuando no llegue a un cauce bien definido, si por el contrario, llega a un cauce bien definido se convierte en escurrimiento en corrientes. Este escurrimiento llega más rápido a la salida de la cuenca y constituye el escurrimiento directo de la cuenca.

El escurrimiento subsuperficial está compuesto por el agua que se infiltra y escurre cerca y paralelamente a la superficie del terreno, la otra parte de agua que se infiltra hasta el nivel inferior del nivel freático se denomina escurrimiento subterráneo. El escurrimiento subterráneo tarda más tiempo en llegar a la salida de la cuenca, incluso puede tardar años en llegar. Este escurrimiento se localiza bajo el nivel freático, por tal razón es el único que alimenta a las corrientes cuando no hay lluvia e integra el escurrimiento base.

El escurrimiento subsuperficial se divide en dos tipos: escurrimiento subsuperficial rápido y escurrimiento subsuperficial lento. El escurrimiento cuando es relativamente rápido se le puede tratar como escurrimiento superficial y cuando es relativamente lento se le trata como escurrimiento subterráneo.

### **2.2.1 Hidrograma**

Un hidrograma es una representación gráfica de la variación en el tiempo de los gastos que escurren en un cauce. El gasto (Q) se define como el volumen de agua que pasa por una sección transversal a través de tiempo  $m^3/s$  o  $l/s$ .

Las partes que conforman un hidrograma son las siguientes:

- Punto de levantamiento. En este punto comienza el escurrimiento directo, el agua de la tormenta analizada comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce después de iniciada la tormenta.
- Pico. Es el gasto máximo que se produce por una tormenta, puede ser el punto más importante de un hidrograma para fines de diseño.

- Punto de inflexión. En este punto es cuando termina el flujo sobre el terreno y de aquí en adelante lo que queda de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo.
- Final del escurrimiento directo. A partir de este punto el escurrimiento es sólo subterráneo y se distingue por ser el punto de mayor curvatura en el hidrograma aunque pocas veces resulta fácil localizarlo.
- Tiempo pico. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma.
- Tiempo base. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo.
- Rama ascendente. Es la parte del hidrograma que va desde el punto de levantamiento hasta el punto pico. Rama descendente. Es la parte del hidrograma que va desde el punto pico hasta el punto final del escurrimiento directo. A partir del punto de inflexión es una curva de vaciado de la cuenca.

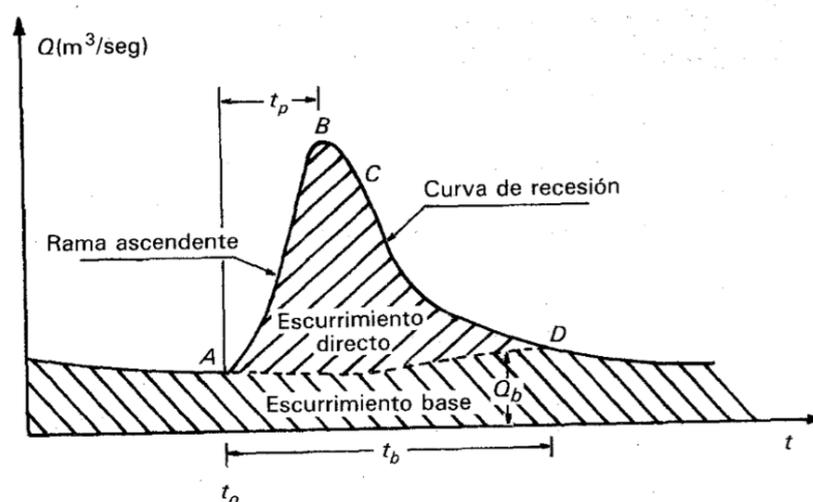


Fig. 2.5 Partes de un Hidrograma. (Aparicio, 1989)

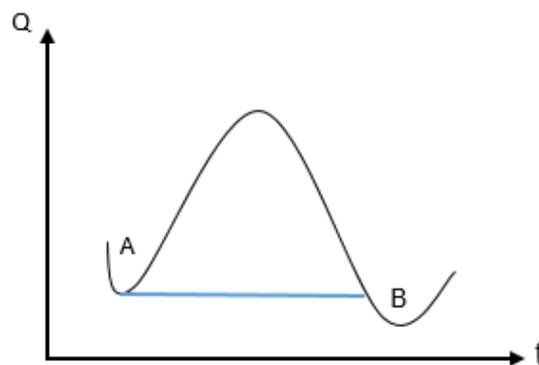
### 2.2.2 Métodos de separación del tiempo base

Generalmente resulta difícil conocer la localización del punto final del escurrimiento directo, por lo tanto separar el escurrimiento directo del escurrimiento base no es

sencillo en la mayoría de los casos, a continuación se describirán algunos métodos para separar el gasto directo del gasto base.

a) Método de la línea horizontal

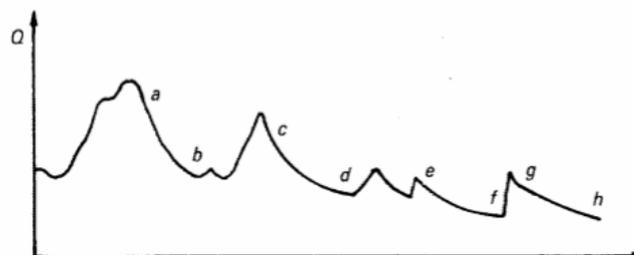
Una vez que se define la escala de tiempo para el análisis se procede a identificar el punto de levantamiento de la curva (A) y se traza una línea horizontal hasta tocar la rama descendente (en B). Aunque este criterio proporciona resultados con un grado de aproximación adecuada, en especial para tormentas de corta duración, sobrestima tanto el tiempo base del hidrograma y la magnitud del volumen de escurrimiento directo.



**Fig. 2.6 Tiempo base mediante el método de la línea horizontal. (Diseño propio)**

b) Método de la curva de vaciado del escurrimiento base

Analizando varios hidrogramas y seleccionando aquellos tramos en que sólo exista escurrimiento base. Por ejemplo, en la figura se muestran los tramos con escurrimiento base, a-b, c-d, e-f y g-h.



**Fig. 2.7 Tiempo base mediante el método de la curva de vaciado del escurrimiento base (Aparicio, 1989)**

Los tramos seleccionados se dibujan en papel semilogarítmico de tal forma que sus extremos inferiores sean tangentes a una línea recta. En este proceso, se eliminan aquellos tramos formados por escurrimiento directo, situación que se manifiesta en la gráfica elaborada en escala semilogarítmica, ya que su extremo inferior no es tangente a la línea recta. La línea resultante se denomina curva de recesión del gasto base y la figura muestra el proceso para determinar la curva mencionada. (Breña, 2006).

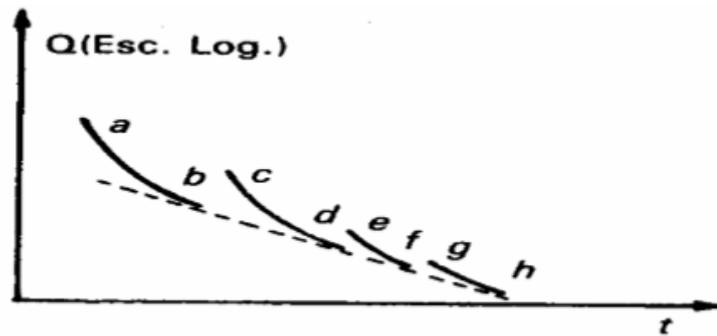


Fig. 2.8 Curva de recesión del escurrimiento base en escala semilogarítmica. (Aparicio, 1989)

c) Método del tiempo fijo

La separación por este método requiere de la prolongación de la curva del gasto base, partiendo del punto de levantamiento, hasta la intersección con la recta vertical que pasa por el gasto pico. Después de este punto de intersección, se traza otro tramo de recta que se unirá a la curva del hidrograma a una distancia equivalente a  $N$  unidades de tiempo. El valor de  $N$  se puede obtener de una regresión, considerando como segunda variable independiente alguna característica fisiográfica de la cuenca, tal como la pendiente del cauce principal.

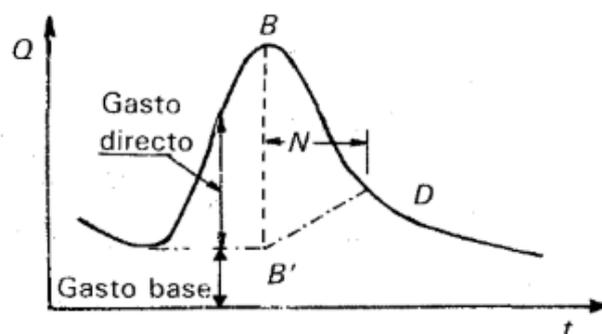


Fig. 2.9 Tiempo base mediante el método del tiempo fijo. (Aparicio, 1989)

Una expresión muy utilizada es la siguiente:

$$N = 0.827A^{0.2} \quad (2.10)$$

donde

N es la distancia, en días;

A es el área de la cuenca, en km<sup>2</sup>

d) Método de la constante

Este método consiste en observar el valor de la constante que resulta de obtener el cociente  $Q_{t+1}/Q_t$ , ya que este valor es pequeño en la rama descendente y se acerca a 1 cuando comienza la recesión del escurrimiento base.

## 2.3 Parámetros indicadores del grado de ajuste y de dispersión

### 2.3.1 Coeficiente de determinación

Este coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados y se encuentra entre cero y uno:

$$0 \leq r^2 \leq 1$$

El coeficiente de determinación se obtiene con la ecuación:

$$r^2 = \frac{\sigma^2_{t_b} - \sigma^2_{Error}}{\sigma^2_{t_b}} \quad (2.11)$$

donde

$r^2$  es el coeficiente de determinación

$\sigma^2_{t_b}$  es el cuadrado de la varianza de los datos medidos

$\sigma^2_{error}$  es el cuadrado del error de los datos calculados

Cuando el coeficiente de determinación es igual a 1, el modelo es perfecto y las variaciones de la variable dependiente (y) pueden reproducirse con él, sin embargo, cuando es igual a 0, el modelo no explica el comportamiento de la variable. De manera que cuando mayor sea el coeficiente  $r^2$  mayor será la calidad del modelo para explicar el comportamiento de la variable.

### 2.3.2 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación nos permite conocer la asociación que existe entre dos variables cuantitativas y se obtiene aplicando la raíz cuadrada al coeficiente de determinación. El coeficiente puede ser negativo o positivo, por ejemplo:

Si  $r=1$ , existe una correlación positiva perfecta entre las variables consideradas, el índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.

Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva

Si  $r=0$ , no existe relación lineal entre las variables

Si  $-1 < r < 0$ , existe correlación negativa

Si  $r=-1$ , existe correlación negativa perfecta entre las variables, el índice indica dependencia total entre las dos variables, denominada relación inversa, cuando una de ellas disminuye la otra aumenta en proporción constante (Sánchez, 2006).

La fórmula del coeficiente de determinación será:

$$r = \sqrt{\frac{\sigma^2_{t_b} - \sigma^2_{Error}}{\sigma^2_{t_b}}} \quad (2.12)$$

donde:

$r$  es el coeficiente de determinación

$\sigma^2_{t_b}$  es el cuadrado de la varianza de los datos medidos

$\sigma^2_{error}$  es el cuadrado del error de los datos calculados

### 2.3.3 Coeficiente de variación

Es una medida de dispersión con relación a la media y no tiene unidades. Se calcula como:

$$C_v = \frac{S_x}{\bar{x}} \quad (2.13)$$

## 2.4 Recopilación y análisis de avenidas

Se recopilaron los datos de gastos medios diarios máximos anuales (DD) de la base de datos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para analizar cada estación y separar el gasto base.

Las estaciones que se consideraron para realizar el análisis son: Bledal con clave 10027, Huites con clave 10037, Alamos con clave 10053, Batopilas con clave 10063, Chinipas con clave 10064, Choix con clave 10066, Acatitan 10070, Badiraguato con clave 10079, El Quelite con clave 10083, Pericos con clave 10086, Urique II con clave 10100, Piaxtla con clave 1011, Jaina con clave 10036, Guatenipa II con clave 10112, Tamazula con clave 10087, Toahayana con clave 10110, la Huerta con clave 10113 y Guasave Puente Carretera con clave 10120.

Considerando que en un estudio previo (Domínguez et al., 2017) se optó por proponer un valor del gasto de 3000 m<sup>3</sup>/s en el año 1981 para la estación 10079 Badiraguato y por otro lado al analizar a la estación 10100 Urique II (con coeficiente de variación CV más bajo de 0.4748), que tiene un comportamiento muy uniforme (posible regulación), se optó por eliminarla del análisis y por ello se hizo un nuevo ajuste con la modificación a la estación hidrométrica 10079 Badiraguato y quitando la estación 10100 Urique II, además de la estación 10120 Guasave Puente Carretera, que no pasó la prueba de homogeneidad. Por lo tanto se trabajó con un total de 16 estaciones hidrométricas.

En la figura 2.10 se muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas y algunas presas que se encuentran aguas arriba de la corriente: Adolfo López Mateos que se encuentra aguas arriba de Guatenipa II y La huerta, Josefa Ortiz de Domínguez que se encuentra aguas arriba de Alamos y Sanalona que se encuentra aguas arriba de Tamazula.



Para obtener el tiempo base promedio correspondiente a cada estación hidrométrica, se obtuvo el hidrograma para cada gasto máximo anual reportado en la base de datos del BANDAS, graficando el gasto en  $\text{m}^3/\text{s}$  sobre el eje de las ordenadas contra el tiempo en días sobre el eje de las abscisas. Teniendo la forma del hidrograma se realizó la separación de gastos utilizando dos métodos, el método de la línea recta horizontal y el método de la constante que ya se explicaron anteriormente.

Con la separación de gastos se obtuvo el tiempo base para cada año de la estación hidrométrica y posteriormente, con todos los datos de tiempo base anuales, se obtuvo un promedio para cada estación hidrométrica.

## 2.5 Método Solver

La función solver que se encuentra dentro de las funciones de Excel®, se utiliza para determinar el valor máximo o mínimo de una celda modificando otras celdas. Puede modificarse el valor óptimo de una celda, denominada “celda objetivo”. El programa ajusta valores en las celdas que se hayan especificado, pueden aplicarse restricciones para limitar los valores que arroja el modelo.

El programa tiene dos tipos de solución:

- Lineal.

Es una técnica matemática que consiste en una serie de métodos y procedimientos que permiten resolver problemas de optimización. Para este tipo de problemas, solver utiliza el método Simplex con límites en las variables.

El método Simplex fue desarrollado por Dantzig en 1947, es un método numérico para optimización de problemas multidimensionales perteneciente a la clase más general de algoritmos de búsqueda que permite encontrar una solución óptima en un problema de maximización o minimización, es decir, es un procedimiento iterativo que permite ir mejorando la solución a cada paso. El proceso concluye cuando no es posible seguir mejorando dicha solución.

- No lineal.

El algoritmo utilizado por el «Solver» es el Gradiente Reducido Generalizado (GRG), en la versión GRG2, cuya estructura matemática puede ser analizada en Abadie(1978); Lasdon, Waren, Jain y Ratner(1978); Lasdon y Waren(1978); y Ríos(1988).

Es un proceso de resolución de igualdades o desigualdades sujetas a un conjunto de restricciones sobre un conjunto de variables reales desconocidas, con una función objetivo a maximizar o minimizar cuando algunas de las restricciones o las funciones objetivo no son lineales. El método constituye una forma sistemática y de búsqueda a través de todas las posibles soluciones para obtener una solución óptima.

El algoritmo intenta entonces moverse, en una dirección a través de la región factible, de tal forma que el valor de la función objetivo mejore. Tomando un salto o movimiento determinado en dicha dirección factible, se pasa a una nueva solución factible mejorada. De nuevo, el algoritmo identifica una nueva dirección factible, si existe, y un salto determinado avanzando hacia una nueva solución factible mejorada. El proceso continúa hasta que el algoritmo alcanza un punto en el cual no existe una dirección factible para moverse que mejore el valor de la función objetivo. Cuando no hay posibilidad de mejora, o el potencial para tal mejora es arbitrariamente pequeño, el algoritmo finaliza.

Con ayuda del programa solver de Excel© se realizaron modelos del tiempo base en función del tiempo de concentración, del área y de la pendiente media del cauce con ecuaciones potenciales, lineales y de segundo grado, utilizando las 16 estaciones y separando las estaciones de acuerdo a su coeficiente de variación.

El modelo con ecuación potencial:

$$t_b = a_1 t_c^2 \quad (2.14)$$

El modelo con ecuación lineal:

$$t_b = a_1 t_c + a_2 \quad (2.15)$$

El modelo con un polinomio de segundo grado:

$$t_b = a_1 t_c^2 + a_2 t_c + a_3 \quad (2.16)$$

Observando el valor del coeficiente de correlación y de determinación que reporta el programa solver se pueden comparar las distintas alternativas.

### 3. Descripción del sitio de estudio

Esta región hidrológica se encuentra localizada al noroeste del país, misma que abarca los estados de Durango, Chihuahua y Sinaloa, que en ella queda incluidas todas las corrientes que descargan en el Océano Pacífico, desde los 23° 25' hasta 25° 48' Latitud Norte; dentro del estado de Sinaloa las corrientes principales corresponden a los ríos: Quelite, Piaxtla, Elota, San Lorenzo, Culiacán, Tamazula, Humaya, Mocerito, Sinaloa y Fuerte, entre otros. Su extensión territorial es de 103 483 km<sup>2</sup> y cuenta con 23 cuencas hidrológicas (INEGI, 1995).

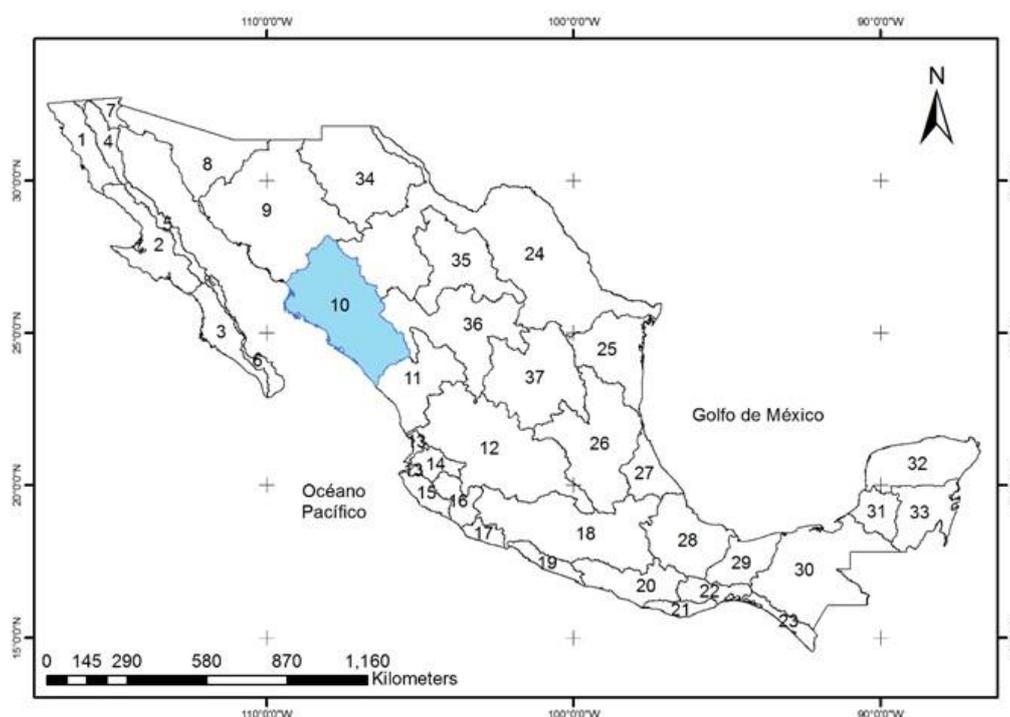


Fig. 3.1 Ubicación de la Región hidrológica 10.

#### 3.1. Fisiografía

En el estado de Sinaloa es posible diferenciar dos provincias fisiográficas, mismas que comparte con los estados vecinos. La primera domina la porción oeste y se denomina Llanura Costera del Pacífico, la segunda conocida como Sierra Madre Occidental y ubicada al este de la entidad.

La provincia Llanura Costera del Pacífico, se presenta en una franja orientada NW-SE, paralela a la costa y limitada hacia el oeste por el Golfo de California, posee elevaciones que varían desde el nivel del mar hasta los 450 msnm, se caracteriza por la homogeneidad de sus llanuras con lomeríos bajos.

La provincia Sierra Madre Occidental, delimitada por una franja de orientación NW-SE, paralela y colindante con la provincia fisiográfica Llanura Costera del Pacífico ubicada al oeste. La altura de sus relieves varía de los 100 hasta los 2780 msnm. Esta provincia se conforma por sierras altas y bajas, asociadas con valles y cañones, que reflejan un ciclo geomorfológico juvenil.

### **3.2 Tipos de suelo**

Los suelos de mayor distribución en la entidad son del tipo regosol y litosol con aproximadamente el 60% de la superficie cubierta por suelos. Se distribuyen en la totalidad de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental y porción sur de la Provincia Costera del Pacífico enmarcadas en el estado.

El litosol es un suelo de escasa profundidad, con textura gravosa, angulares, reflejando propiedades de la roca que le da origen, siendo inclusive la roca misma, dichos suelos se encuentran en la porción este de la entidad.

El regosol es un suelo que se localiza al oeste del sistema de sierras, hacia el límite con la Provincia Costera del Pacífico, hacia el límite con la Provincia Costera del Pacífico, donde su enclave topográfico permite el desarrollo del suelo de composición variada y desarrollo de texturas arenosas y limosas.

Los suelos tipo feozem y vertisol, ambos de carácter háplico representan aproximadamente el 25% de la superficie de los suelos de la entidad, sus texturas son limosas, moderadamente permeables y susceptibles a la erosión (INEGI, 1995)

### **3.3 Clima**

El clima en el estado de Sonora depende de la latitud, longitud, altitud y la circulación atmosférica. El 48% del estado presenta clima seco y semiseco localizado en la Sierra

Madre Occidental, el 46.5% presenta clima muy seco, localizado en las Llanuras Costera del Golfo y Sonorense 4% es templado subhúmedo se encuentra hacia el este del estado y el restante 1.5% presenta clima cálido subhúmedo localizado hacia el sureste.

La temperatura media anual es alrededor de 22°C, la temperatura máxima promedio es de 38°C y se presenta en los meses de junio y julio, la temperatura mínima promedio es de 5°C y se presenta en el mes de enero. La precipitación media estatal es de 450 mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de julio y agosto.

El clima en el estado es una limitante para la agricultura, sin embargo se cultiva trigo, algodón, cártamo, sandía, ajonjolí, garbanzo, sorgo, maíz y vid, principalmente con riego, en la regiones de clima seco y semiseco de los Valles de El Yaqui, Mayo y Guaymas.

Las estaciones que se consideraron para la realización de este trabajo son:

**Tabla 1. Estaciones analizadas.**

<b>Clave</b>	<b>Estación</b>
<b>10079</b>	BADIRAGUATO
<b>10111</b>	PIAXTLA
<b>10036</b>	JAINA
<b>10070</b>	ACATITAN
<b>10063</b>	BATOPILAS
<b>10037</b>	HUITES
<b>10027</b>	EL BLEDAL
<b>10083</b>	EL QUELITE
<b>10066</b>	CHOIX
<b>10112</b>	GUATENIPA II
<b>10087</b>	TAMAZULA
<b>10086</b>	PERICOS
<b>10113</b>	LA HUERTA
<b>10110</b>	TOAHAYANA
<b>10053</b>	ALAMOS
<b>10064</b>	CHINIPAS

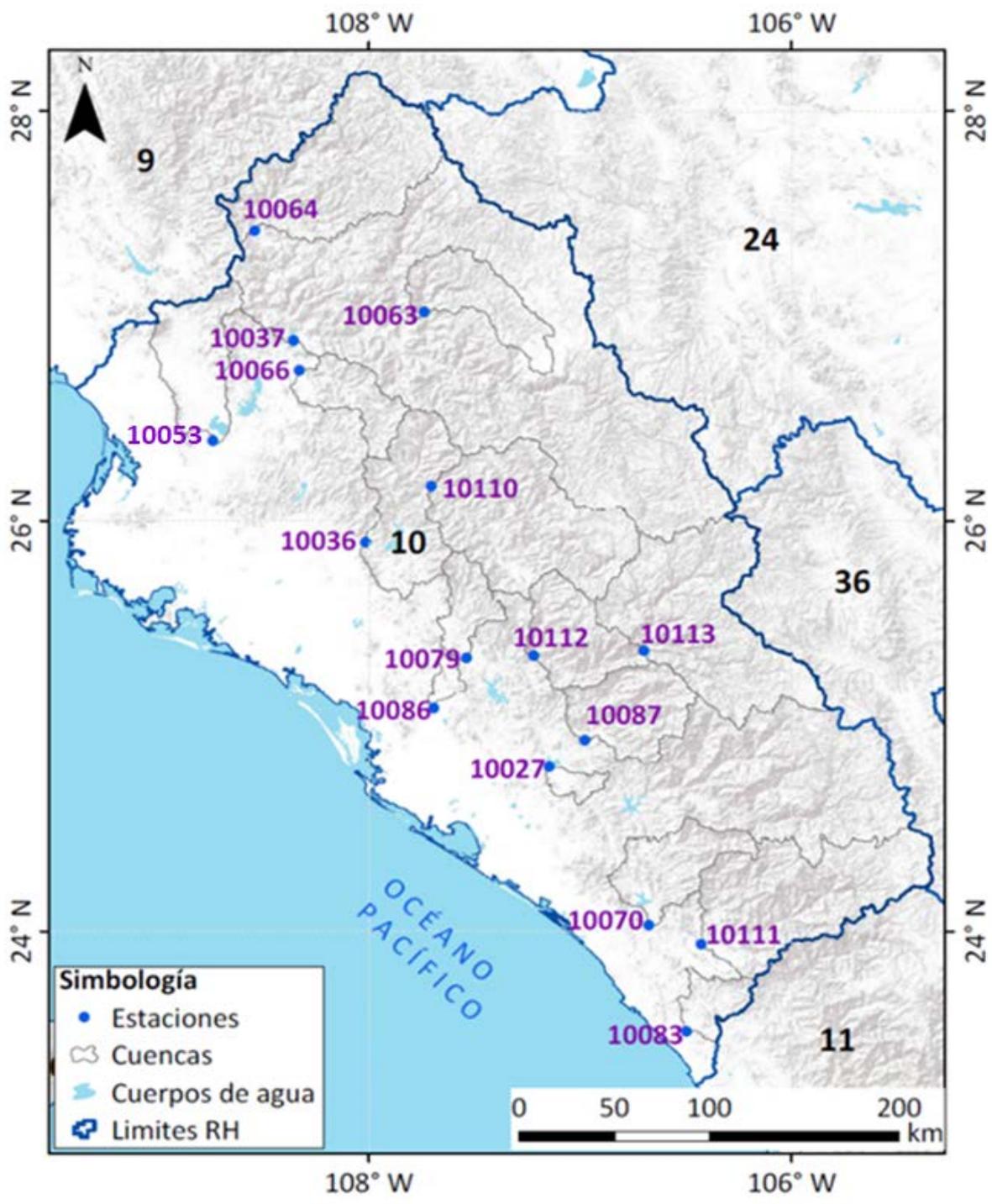


Fig. 3.2 Ubicación de estaciones hidrométricas.

#### **4. Análisis y resultados**

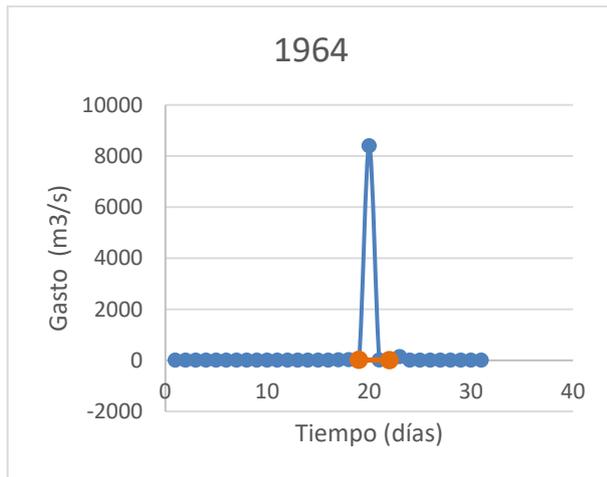
Para cada estación hidrométrica se obtuvo el tiempo base promedio, para esto, primero se obtuvo el gasto máximo anual y se graficó el hidrograma correspondiente para separar el gasto directo del gasto base. En el proceso se encontraron datos dudosos en algunas estaciones, dichos datos fueron eliminados del análisis, ya que los hidrogramas tenían un comportamiento inadecuado o los datos de las estaciones estaban incompletos, además se revisó la posible ocurrencia de fenómenos meteorológicos que pudieran influir en los resultados.

En la tabla 2 se pueden observar las 16 estaciones hidrométricas consideradas en este trabajo con sus respectivas características fisiográficas.

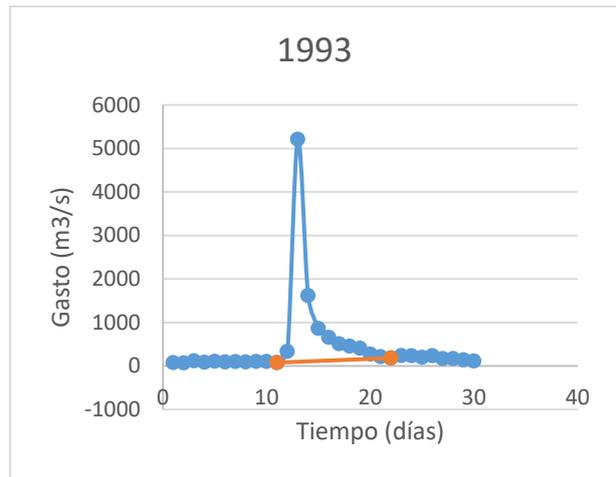
**Tabla 2. Características de las Estaciones hidrométricas.**

Clave	Estación	Latitud	Longitud	Área [km <sup>2</sup> ]	Per [km]	S [°]	Elevación [msnm]	Lcp [km]	Scp %	Tc [h]	NC	S [cm]	Hp [mm]	Tb [d]	Media QMI
10079	BADIRAGUATO	25.33	-107.54	1005.90	222.96	17.83	867.31	88.58	0.01	13.09	71.23	10.26	96.19	8.24	898.04
10111	PIAXTLA	23.94	-106.43	5279.22	558.69	22.39	1688.71	216.36	0.01	26.05	64.26	14.13	78.77	8.73	1315.93
10036	JAINA	25.90	-108.02	8179.16	709.63	20.76	1312.14	374.17	0.00	59.25	70.08	10.84	80.41	12.55	967.13
10070	ACATITAN	24.03	-106.68	1902.02	313.30	19.41	783.19	146.69	0.01	21.30	66.56	12.76	97.21	10.34	849.20
10063	BATOPILAS	27.02	-107.74	1992.98	363.35	19.07	2067.73	129.24	0.01	14.86	64.67	13.88	56.54	11.03	546.14
10037	HUITES	26.88	-108.36	26054.23	1353.36	20.31	1884.06	424.25	0.00	60.85	67.98	11.96	61.89	13.25	3304.44
10027	EL BLEDAL	24.80	-107.15	369.34	131.23	11.54	306.37	50.60	0.00	12.51	71.48	10.13	90.58	9.88	288.88
10083	EL QUELITE	23.51	-106.50	829.60	202.84	12.35	309.99	82.81	0.00	18.46	72.95	9.42	99.28	7.62	451.63
10066	CHOIX	26.74	-108.33	1378.47	274.28	18.35	998.95	104.46	0.01	15.46	66.38	12.86	72.86	11.27	336.52
10112	GUATENIPA II	25.35	-107.22	8172.85	772.45	21.67	2048.71	244.73	0.01	29.93	70.35	10.70	78.96	9.24	1530.80
10087	TAMAZULA	24.93	-106.98	2243.77	284.04	23.90	1203.06	103.71	0.01	14.06	65.73	13.24	92.38	8.92	615.02
10086	PERICOS	25.09	-107.69	270.89	131.16	8.09	237.23	43.22	0.01	8.91	84.50	4.66	93.10	7.19	250.72
10113	LA HUERTA	25.37	-106.70	6072.01	628.25	20.16	2278.29	153.34	0.01	17.42	71.42	10.16	75.69	8.37	903.52
10110	TOAHAYANA	26.17	-107.71	5260.66	489.57	21.45	1576.26	237.13	0.01	34.07	69.74	11.02	76.37	8.03	1090.09
10053	ALAMOS	26.39	-108.74	2267.57	345.27	8.85	380.28	170.49	0.00	36.63	79.34	6.62	75.62	12.81	284.52
10064	CHINIPAS	27.42	-108.54	5106.46	549.49	21.36	1837.31	227.67	0.01	27.95	64.87	13.76	60.52	12.00	981.05

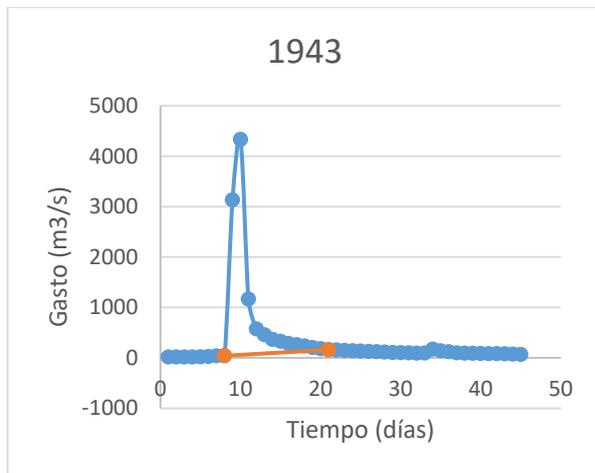
A continuación se muestran los 10 hidrogramas representativos de las estaciones: Chinipas con clave 10064, Piaxtla con clave 1011, Jaina con clave 10036, Badiraguato con clave 10079, Guatenipa con clave 10112, Tamazula con clave 10087, Acatitan con clave 10070, Toahayana con clave 10110, la Huerta con clave 10113 y Huites con clave 10037.



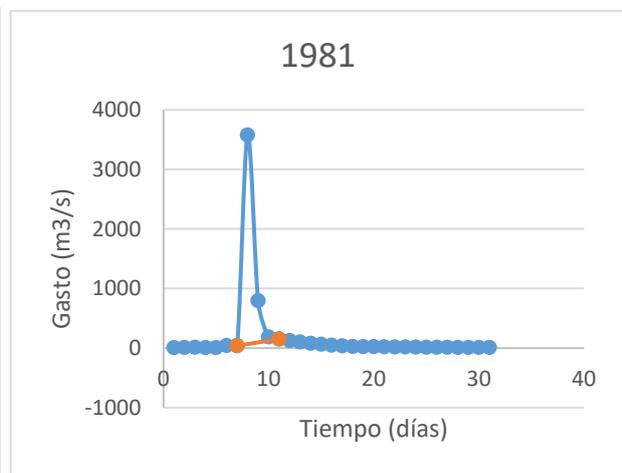
**Fig. 4.1** Chinipas 10064



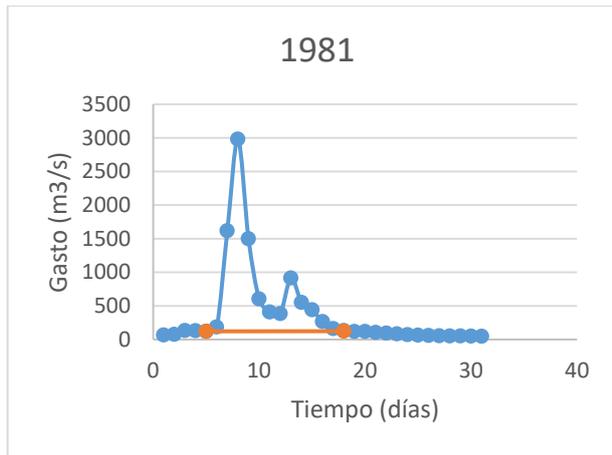
**Fig 4.2** Piaxtla 10111



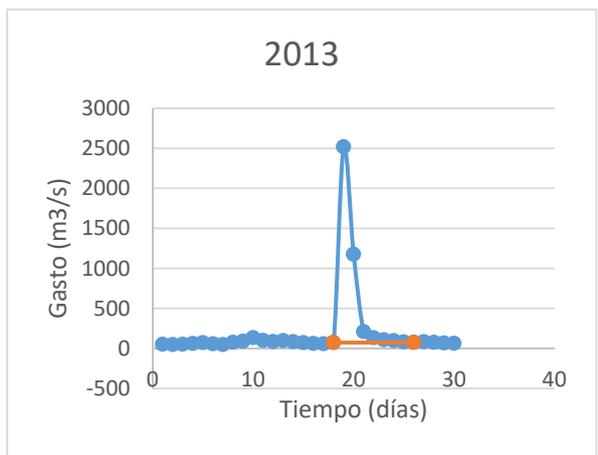
**Fig.4.3** Jaina 10036



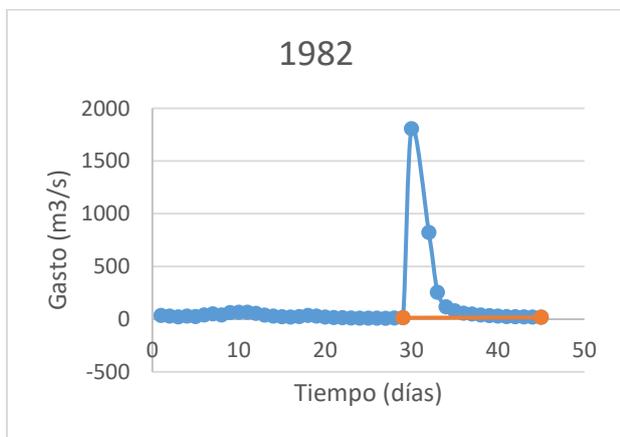
**Fig. 4.4** Badiraguato 10079



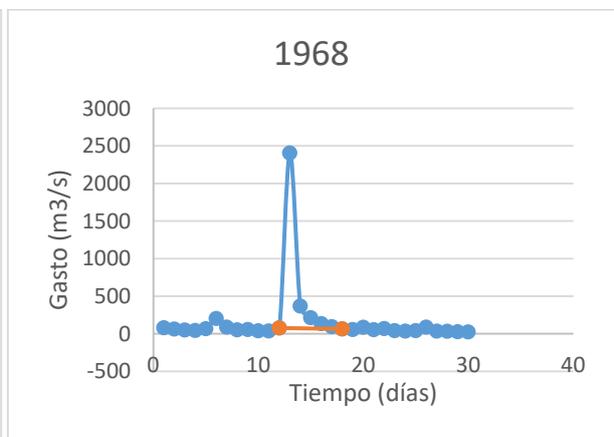
**Fig. 4.5 Guatenipa 10112**



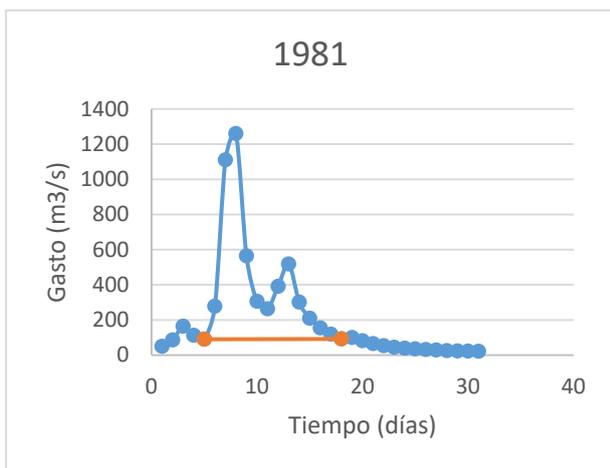
**Fig. 4.6 Tamazula 10087**



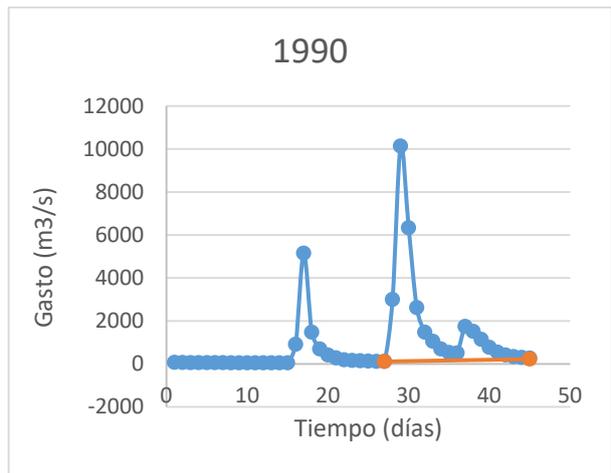
**Fig. 4.7 Acatitan 10070**



**Fig 4.8 Toahayana 10110**



**Fig. 4.9 La Huerta 10113**



**Fig. 4.10 Huites 10037**

#### 4.1 Separación de gasto base

La separación de gastos se realizó de la misma forma para las 16 estaciones eliminando años con datos dudosos, a continuación de describirá la separación del escurrimiento directo y del escurrimiento base para la estación Chinipas con clave 10064.

Se identificó el gasto máximo que se tenía en cada año para obtener la forma del hidrograma graficando gasto en  $\text{m}^3/\text{s}$  sobre la el eje vertical contra el tiempo en días sobre la línea horizontal. Para obtener el tiempo base que tuvo esa avenida se realizó la separación del gasto base y del gasto directo utilizando dos métodos, el método de la línea recta horizontal y el método de la constante.

Utilizando el método de la línea recta horizontal, se trazó una línea recta desde el punto de levantamiento del hidrograma hasta el punto de recesión de la curva. Es fácil identificar el punto de levantamiento del hidrograma, ya que resulta evidente el punto en que la curva comienza a levantarse, por ejemplo, en el hidrograma del año 1964 de la estación Chinipas el punto de levantamiento es en el día 19, sin embargo el punto de recesión del hidrograma no es evidente y se realizan consideraciones subjetivas. Con este método basta con trazar la línea recta hasta que toque la curva descendente del hidrograma, en este caso resultó en el día 21. Por lo tanto el tiempo base de la avenida fue de 2 días.

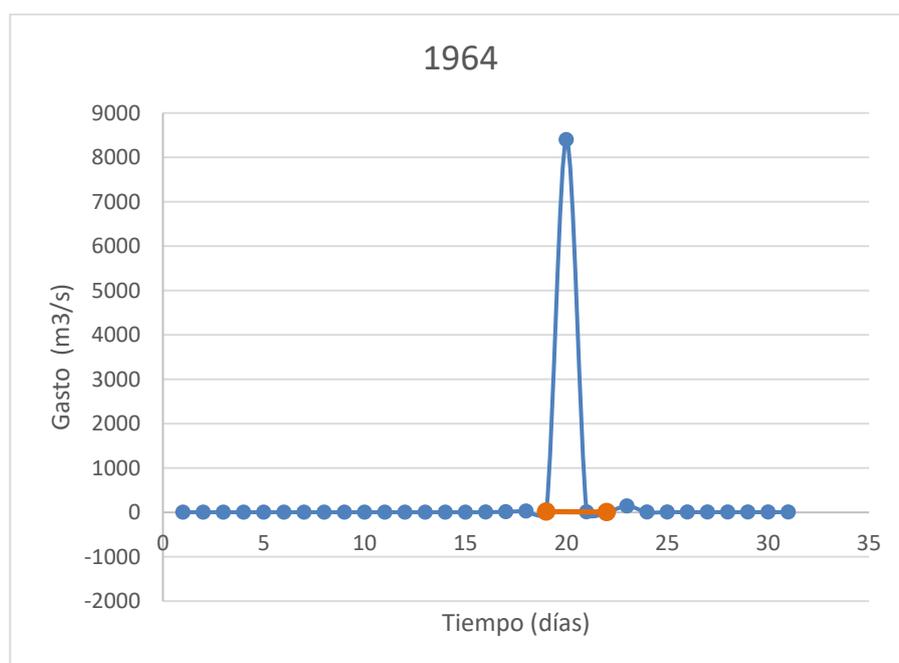
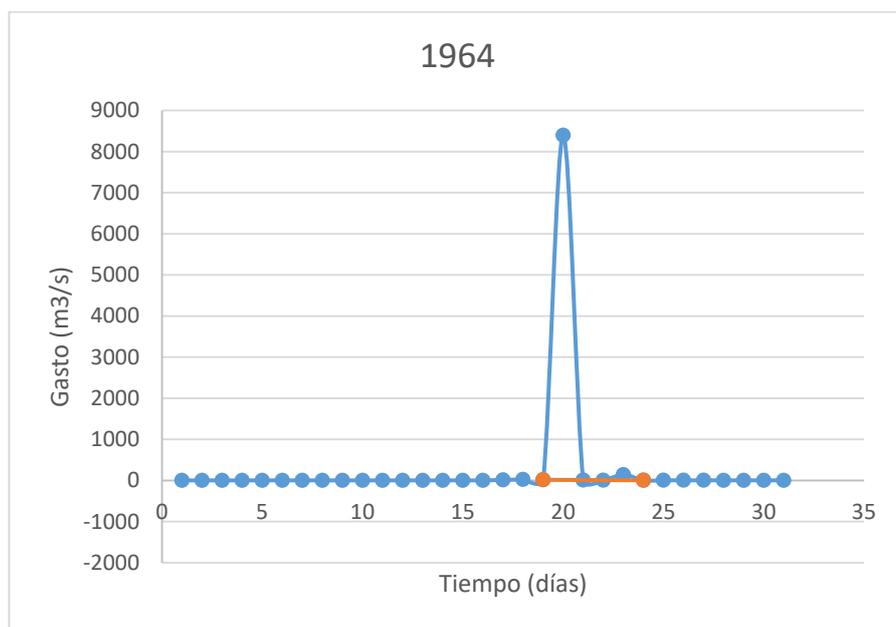


Fig. 4.11 Estación hidrométrica Chinipas con el método de la línea recta horizontal

El método de la constante consiste en identificar el punto de inflexión de la curva de recesión observando el valor de la constante que da como resultado de calcular el cociente  $Q_{t+1}/Q_t$ . Construyendo una tabla con tres columnas, en la primera se colocarán los valores de gasto iniciando con el gasto máximo, en la segunda columna se coloca  $Q_{t+1}$ , es decir, el gasto que corresponde al siguiente intervalo  $\Delta t$ , en este caso  $\Delta t=1$  y en la tercera columna se colocará el resultado de calcular  $Q_{t+1}/Q_t$ . Se observa el comportamiento de la constante  $Q_{t+1}/Q_t$  y el valor que se aproxime a 1 es el punto de inflexión de la curva, donde el escurrimiento base está en recesión, como se observa en la tabla 3.

**Tabla. 3 Estación Hidrométrica Chinipas con el método de la constante**

Día	$Q_t$	$Q_{t+1}$	$Q_{t+1}/Q_t$
20	8398	6.85	0.0008157
21	6.85	5.32	0.7766423
22	5.32	141	26.503759
23	141	3.66	0.0259574
24	3.66	3.52	0.9617486
25	3.52	3.24	0.9204545
26	3.24	2.97	0.9166667
27	2.97	2.83	0.952862
28	2.83	2.7	0.9540636
29	2.7	2.7	1
30	2.7	2.56	0.9481481
31	2.56	2.68	1.046875
32	2.68	2.68	1
33	2.68	2.68	1
34	2.68	2.84	1.0597015
35	2.84		



**Fig. 4.12 Estación Hidrométrica Chinipas con el método de la constante.**

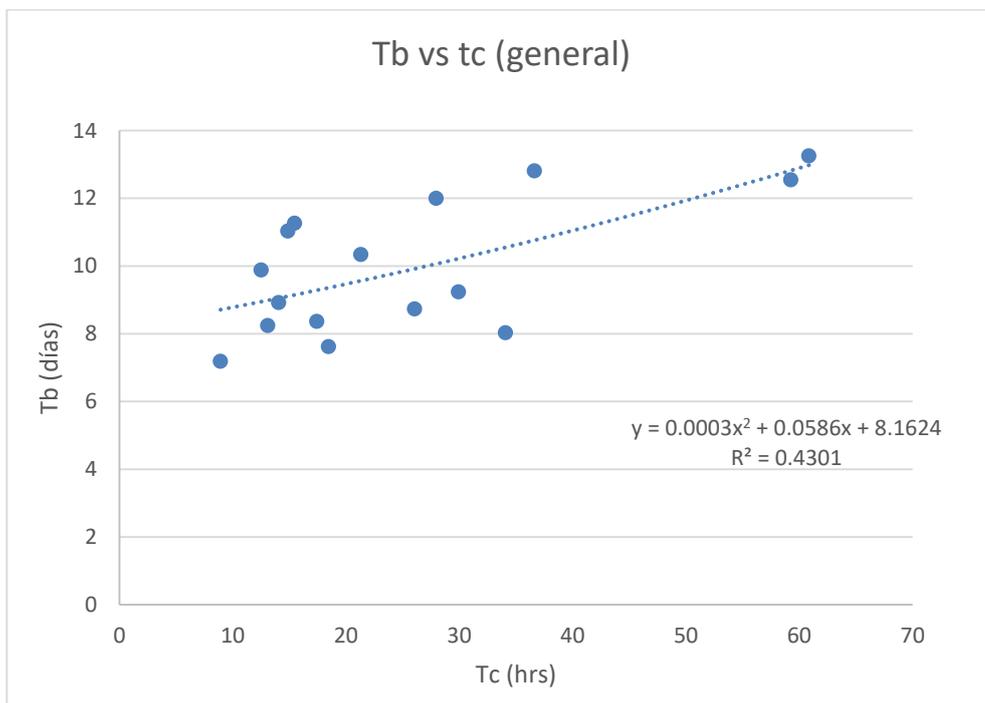
En algunas estaciones el tiempo base de cada avenida coincidía, sin embargo el método de la recta horizontal es un poco subjetivo y no considera las características de la cuenca. Por esta razón, se utilizó el tiempo base que arrojó el método de la constante para obtener el promedio de todos los tiempos base de cada estación, en la tabla 4 se muestran las 16 estaciones con su respectivo tiempo base promedio y su tiempo de concentración.

**Tabla. 4 Tiempo base de las 16 estaciones hidrométricas.**

<b>Estación</b>	<b>Tb [d]</b>	<b>Tc [h]</b>
BADIRAGUATO	8.2439	13.0887
PIAXTLA	8.7308	26.0511
JAINA	12.5469	59.2536
ACATITAN	10.3400	21.3032
BATOPILAS	11.0345	14.8594
HUITES	13.2549	60.8492

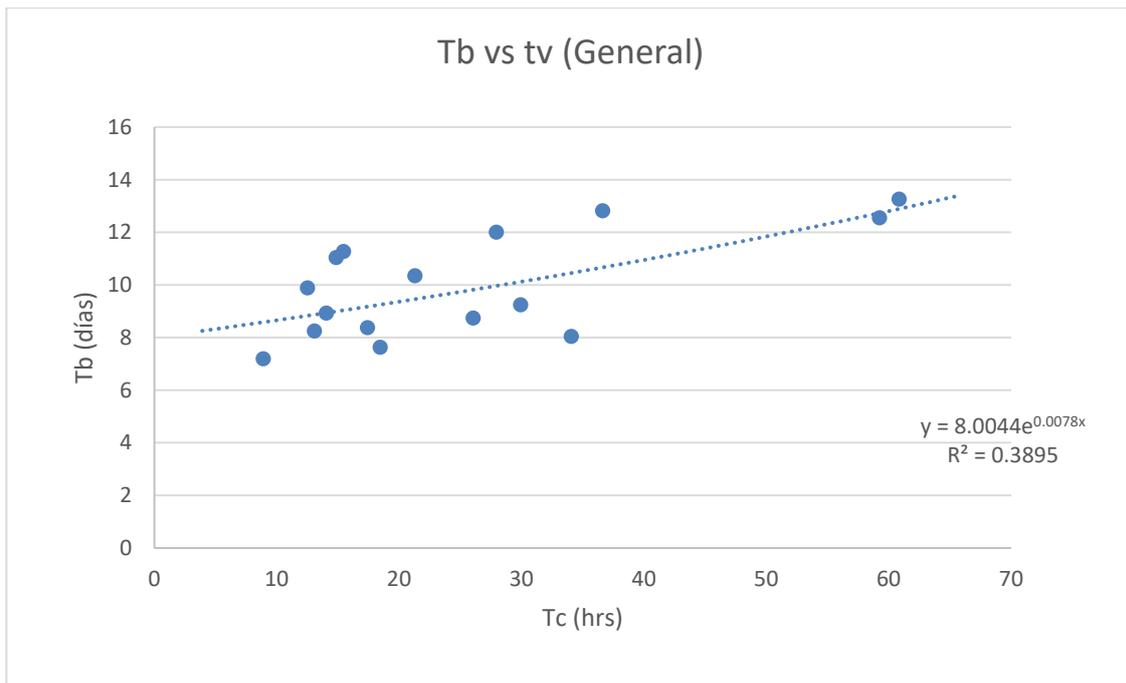
EL BLEDAL	9.8814	12.5135
EL QUELITE	7.6216	18.4606
CHOIX	11.2653	15.4607
GUATENIPA II	9.2381	29.9314
TAMAZULA	8.9231	14.0565
PERICOS	7.1875	8.9108
LA HUERTA	8.3667	17.4178
TOAHAYANA	8.0323	34.0739
ALAMOS	12.8095	36.6288
CHINIPAS	12.0000	27.9486

En la figura 4.13 se muestra la gráfica del tiempo base en función del tiempo de concentración con un ajuste de segundo grado y un coeficiente de determinación de 0.4301.



**Fig. 4.13 Modelo general con ajuste de segundo grado.**

En la figura 4.14 se muestra el tiempo base en función del tiempo de concentración con un ajuste potencial y un coeficiente de determinación de 0.3895.



**Fig. 4.14 Modelo general con ajuste potencial.**

## 4.2 Determinación del mejor modelo

Debido a que el objetivo en esta tesis fue establecer la correlación entre el tiempo base y algunas características fisiográficas, se midió la calidad de los modelos mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ). El criterio para determinar cuál modelo es mejor, es aquel que tiene el coeficiente de determinación mayor.

Además, al realizar la comparación de los datos medidos y calculados se busca que los valores estén cercanos a la recta identidad, es decir, que el dato medido sea igual al dato calculado. Si los datos caen sobre la línea, el coeficiente de determinación es igual a 1 y por lo tanto el modelo es de buena calidad, por el contrario si los datos no caen sobre la línea, el coeficiente de determinación es cero y el modelo no tiene calidad. Se presentaran los modelos con el mayor coeficiente de determinación.

Después de observar que la correlación entre el tiempo base y el tiempo de concentración no fue muy buena, se decidió proponer un modelo potencial, uno lineal y no cuadrático para someterlos a funciones prueba y observar cuál arrojaba los mejores resultados. Estos modelos se realizaron con la ayuda de la función solver de Excel©.

#### 4.2.1 Modelo 1 (tiempo de concentración)

Para el primer modelo se propuso poner el tiempo base en función del tiempo de concentración, después de probar con diferentes modelos, el modelo que resultó con mejor calidad fue el modelo de segundo grado con la ecuación 4.1.

$$t_b = a_1 t_c^2 + a_2 t_c + a_3 \quad (4.1)$$

Estableciendo como función objetivo minimizar el error medio cuadrático, se obtuvo que las constantes  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  valen:

$$a_1 = 6.554E - 05$$

$$a_2 = 0.0792857$$

$$a_3 = 7.8568417$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 4.1, se tiene que la ecuación para determinar el tiempo base en función del tiempo de concentración es:

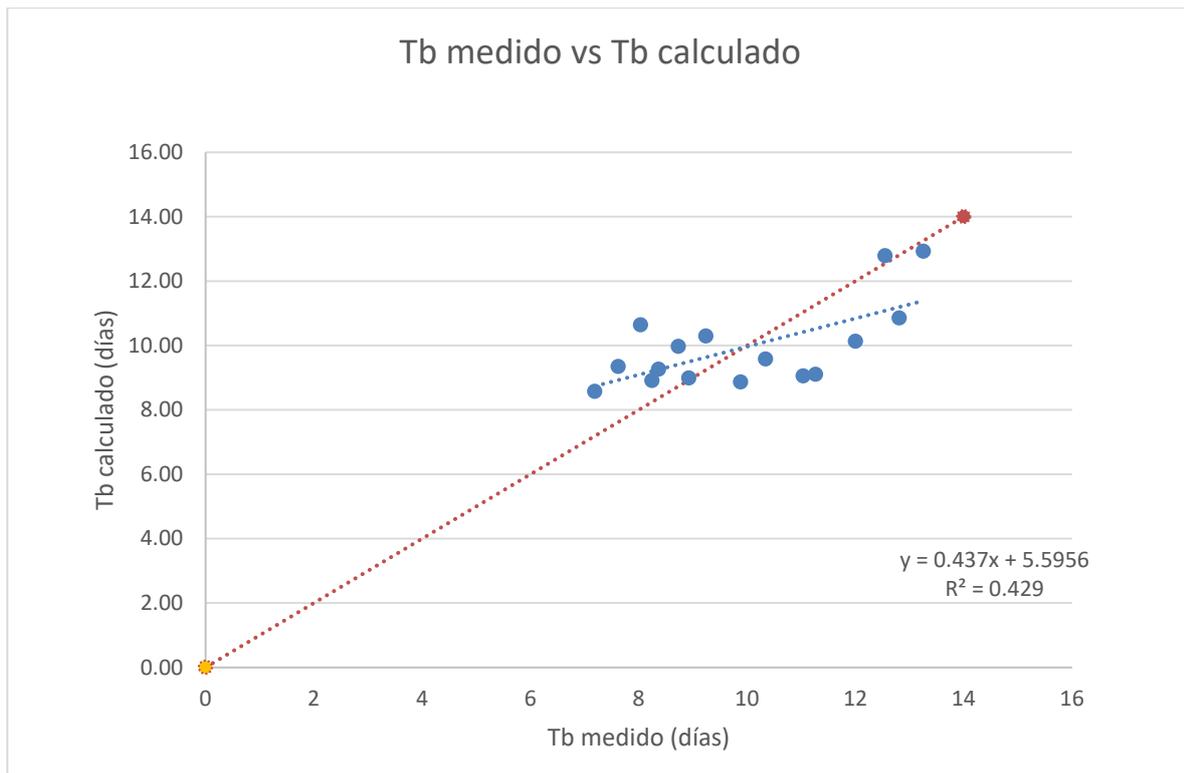
$$t_b = 6.554E - 05 t_c^2 + 0.0792857 t_c + 7.8568417 \quad (4.2)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$t_c$  = tiempo de concentración (horas)

Al graficar los valores medidos contra los calculados utilizando la ecuación 4.2 y obteniendo el coeficiente de determinación, se observa en la figura 4.15 que existe escasa correlación entre las variables.



**Fig. 4.15 Modelo 1 tiempo de concentración.**

Con el fin de aumentar el valor del coeficiente de determinación se propuso dividir las estaciones en dos grupos dependiendo del coeficiente de variación para trabajar los grupos de forma independiente, en la tabla 4 se muestra las estaciones divididas en grupos de acuerdo con su coeficiente de variación (Domínguez et al., 2017).

Tabla 5. Estaciones divididas en grupos por coeficiente de variación.

	CV	Clave	Estación
<b>Grupo 1</b>	1.582	10079	BADIRAGUATO
	1.184	10111	PIAXTLA
	1.133	10036	JAINA
	1.081	10070	ACATITAN
	1.04	10063	BATOPILAS
	0.994	10037	HUITES
	0.907	10027	EL BLEDAL
	0.906	10083	EL QUELITE
	0.882	10066	CHOIX
	0.811	10112	GUATENIPA II
<b>Grupo 2</b>	0.648	10087	TAMAZULA
	0.626	10086	PERICOS
	0.623	10113	LA HUERTA
	0.622	10110	TOAHAYANA
	0.618	10053	ALAMOS
	0.613	10064	CHINIPAS

#### 4.2.1.1 Modelo 1 (grupo 1)

Para el modelo 1 (tiempo base en función del tiempo de concentración) grupo 1, el modelo con el mejor coeficiente de determinación resultó el modelo de segundo grado con la forma:

$$t_b = a_1 t_c^2 + a_2 t_c + a_3 \quad (4.3)$$

Estableciendo como función objetivo minimizar el error medio cuadrático, se obtuvo que las constantes  $a_1$  y  $a_2$ , valen:

$$a_1 = 8.54134E - 05$$

$$a_2 = 0.236184746$$

$$a_3 = 0.107821466$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.3, se tiene la ecuación del tiempo base en función del tiempo de concentración para el grupo 1:

$$t_b = 8.54143E - 05t_c^2 + 0.236184746t_c + 0.107821466 \quad (4.4)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$t_c$  = tiempo de concentración (horas)

Al graficar nuevamente los datos medidos contra los calculados utilizando la ecuación 4.4 y obteniendo el coeficiente de determinación, se observa en la figura 4.16 que éste mejoró respecto al modelo anterior, sin embargo, la correlación sigue siendo escasa.

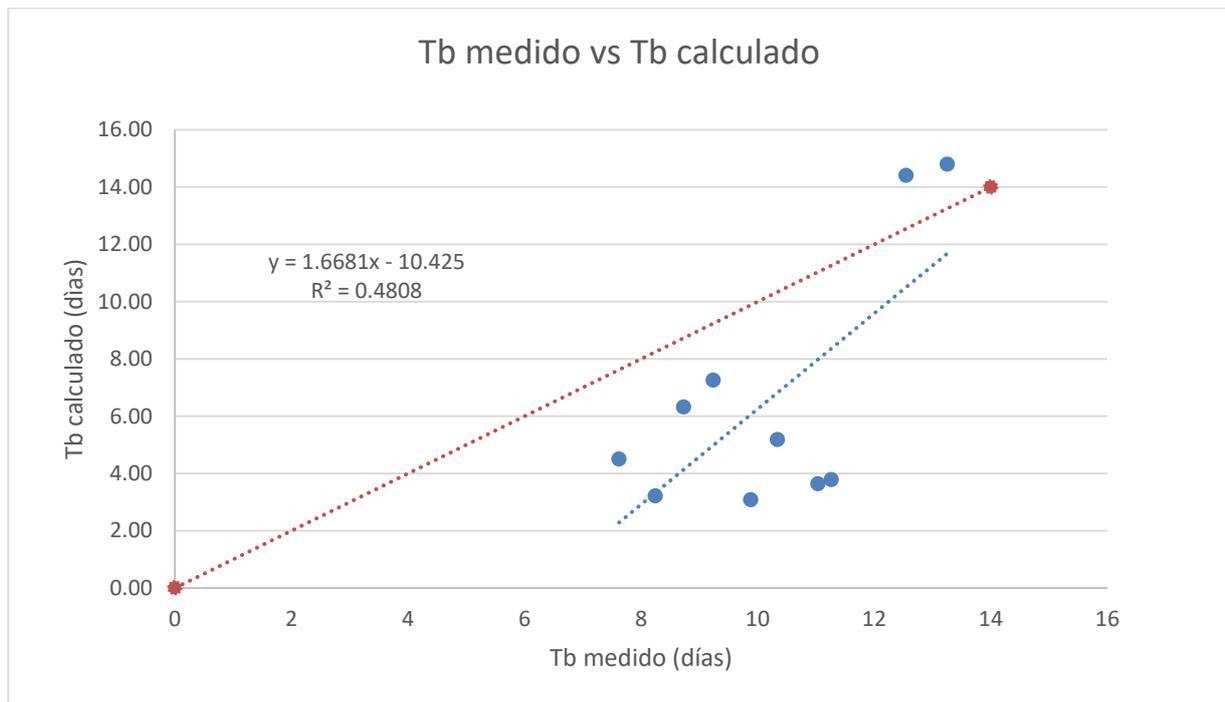


Fig. 4.16 Modelo 1 del grupo 1, tiempo de concentración.

#### 4.2.1.2 Modelo 1 (grupo 2)

Para el modelo 1 (tiempo base en función del tiempo de concentración) grupo 2 el modelo que resultó con mejor coeficiente de determinación fue el modelo potencial:

$$t_b = a_1 t_c^{a_2} \quad (4.5)$$

Estableciendo como función objetivo el error medio cuadrático, se obtuvo que las constantes  $a_1$  y  $a_2$ , valen:

$$a_1 = 3.868800038$$

$$a_2 = 0.295236873$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.5, se tiene que la ecuación del tiempo base en función del tiempo de concentración para el grupo 2 es:

$$t_b = 3.868800038 t_c^{0.295236873} \quad (4.6)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$t_c$  = tiempo de concentración (horas)

Al graficar nuevamente los valores calculados y medidos con la ecuación 4.6 y calculando el coeficiente de determinación, se observa que no mejoró respecto del calculado en el grupo 1, si se compara contra el modelo general (utilizando todas las estaciones) mejoró sólo un poco, como se representa en la figura 4.17.

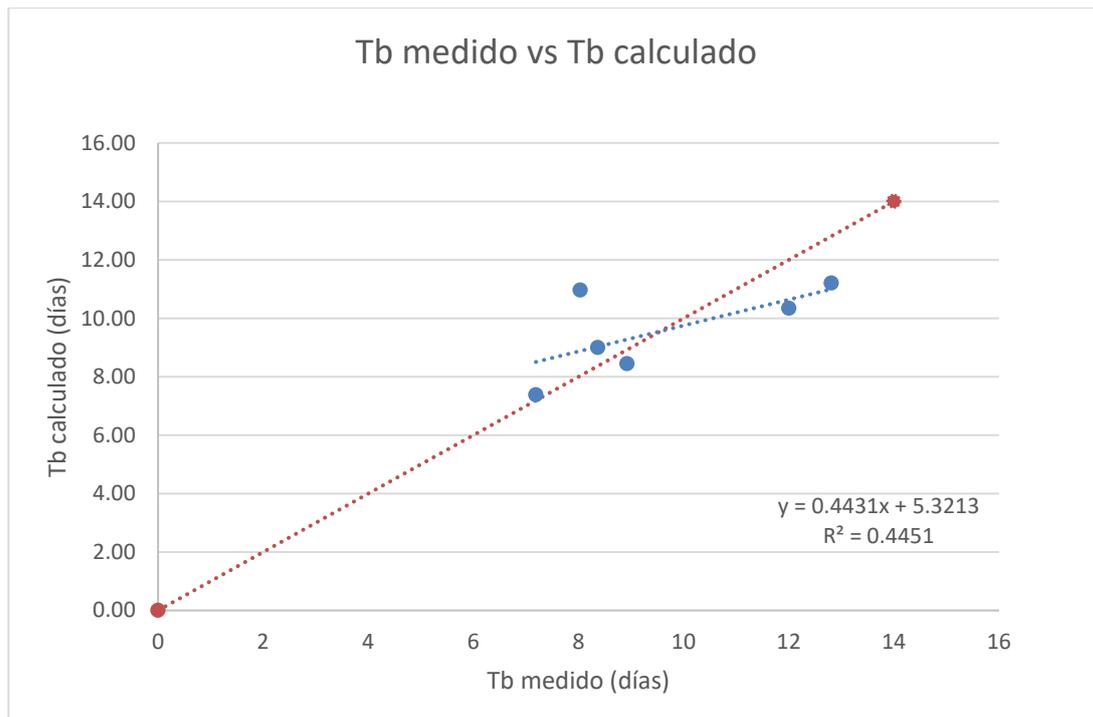


Fig. 4.17 Modelo 1 del grupo 2, tiempo de concentración.

#### 4.2.2 Modelo 2 (Área de la cuenca)

Para este modelo se propuso poner el tiempo base en función del área de la cuenca, después de probar con algunas funciones prueba, el modelo que resultó con mejor calidad fue un modelo lineal, ecuación 4.7.

$$t_b = a_1 A + a_2 \quad (4.7)$$

Estableciendo como función objetivo de igual manera que los modelos pasados, minimizar el error medio cuadrático, se obtuvo que el valor de las constantes  $a_1$  y  $a_2$  son:

$$a_1 = 0.000892286$$

$$a_2 = 1.67493E - 07$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.7, se llega a la ecuación del tiempo base en función del área de la cuenca para todas las estaciones hidrométricas:

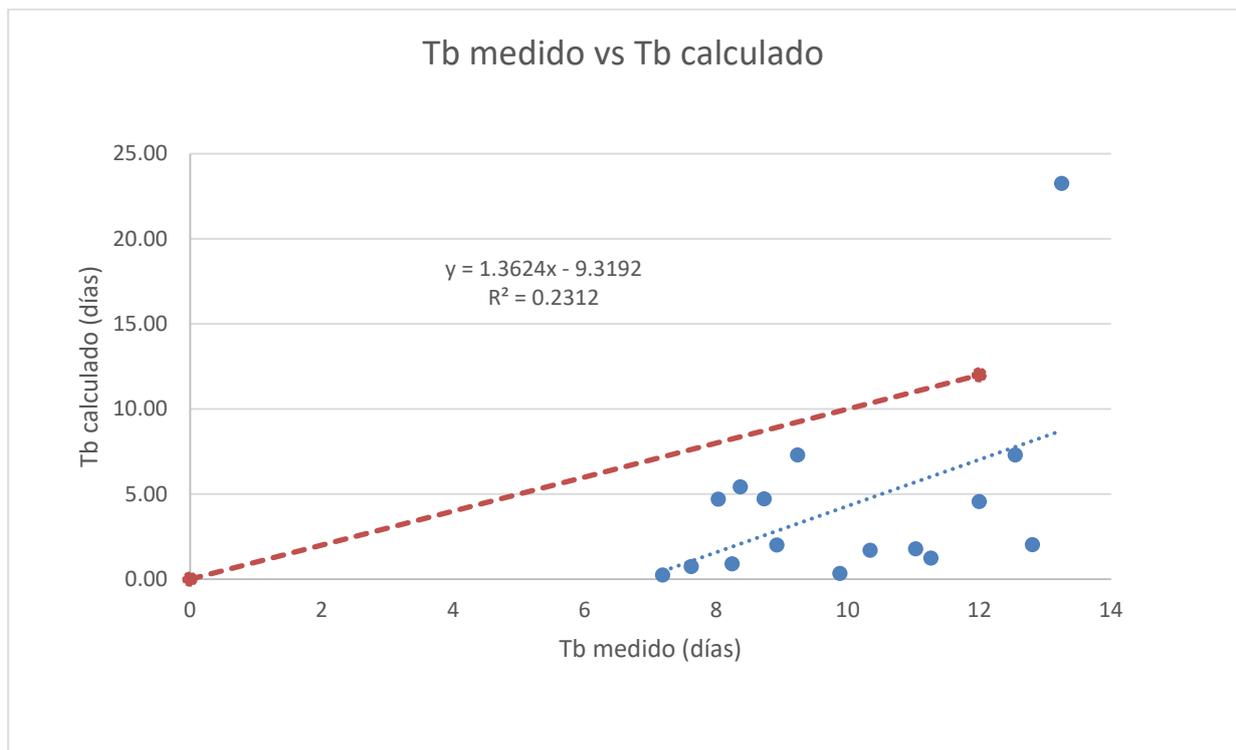
$$t_b = 0.000892286A + 1.67493^{-07} \quad (4.8)$$

donde:

$t_c$  = tiempo base (días)

$A$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

Graficando nuevamente los datos medidos contra los calculados y calculando el coeficiente de determinación, se observa en la figura 4.18 que el coeficiente de variación resultó menor que el modelo del tiempo base en función del tiempo de concentración, por lo tanto la correlación fue aún más escasa que en los modelos anteriores.



**Fig. 4.18 Modelo 2, general del área de la cuenca.**

#### 4.2.2.1 Modelo 2 (grupo 1)

$$t_b = a_1A + a_2 \quad (4.9)$$

Estableciendo como función objetivo minimizar el error medio cuadrático, se obtuvo que el valor de las constantes  $a_1$  y  $a_2$  son:

$$a_1 = 0.000756858$$

$$a_2 = 1.20005E - 07$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.9, se llegó a la ecuación lineal del tiempo base en función del área de la cuenca para el grupo 1 de las estaciones hidrométricas:

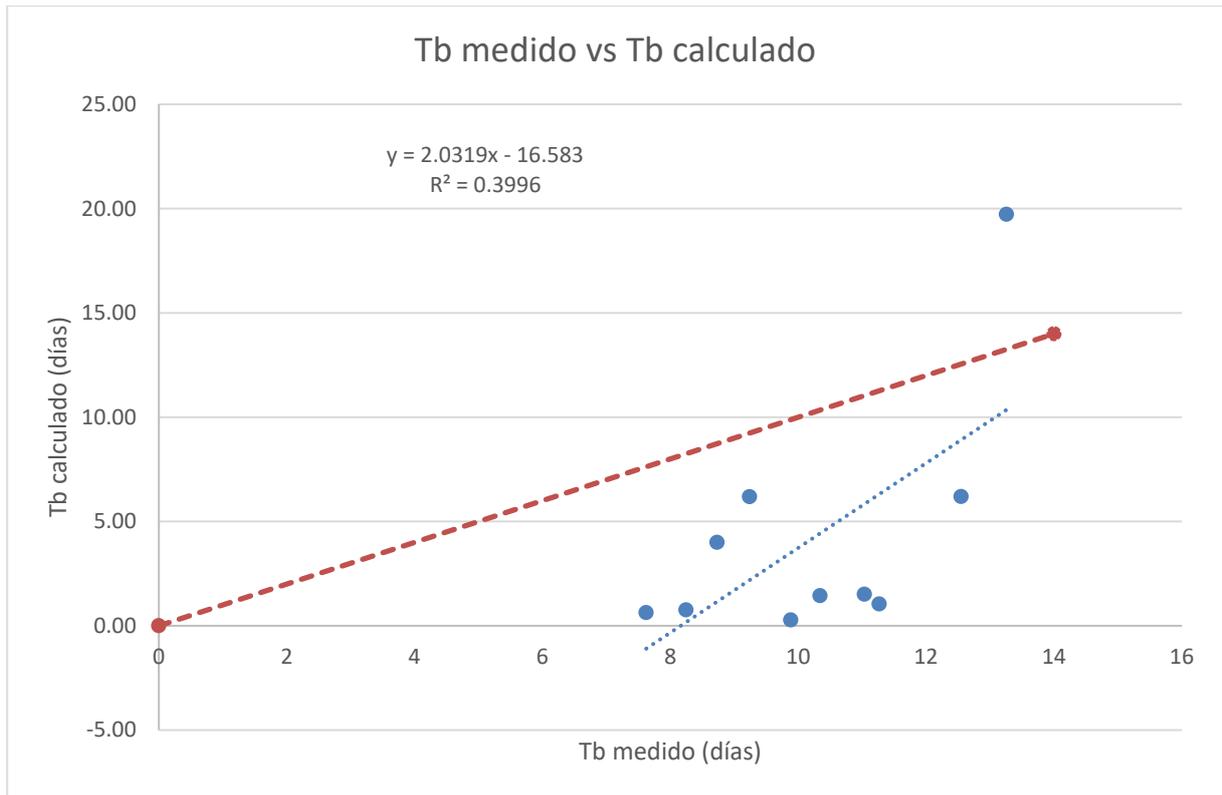
$$t_b = 0.000756958A + 1.210005^{-7} \quad (4.10)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$A$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

En la figura 4.19 se muestra la gráfica de los datos medidos y calculados con su correspondiente coeficiente de determinación. El coeficiente de determinación resultó mayor al coeficiente del modelo general (para todas las estaciones hidrométricas), debido a esto se tiene una correlación mayor pero aún es muy escasa.



**Fig. 4.19 Modelo 2 del grupo 1 del área de la cuenca.**

#### 4.2.2.1 Modelo 2 (grupo 2)

$$t_b = a_1 A^{a_2} \quad (4.11)$$

Estableciendo como función objetivo minimizar el error medio cuadrático, se obtuvieron los siguientes resultados para las constantes  $a_1$  y  $a_2$ :

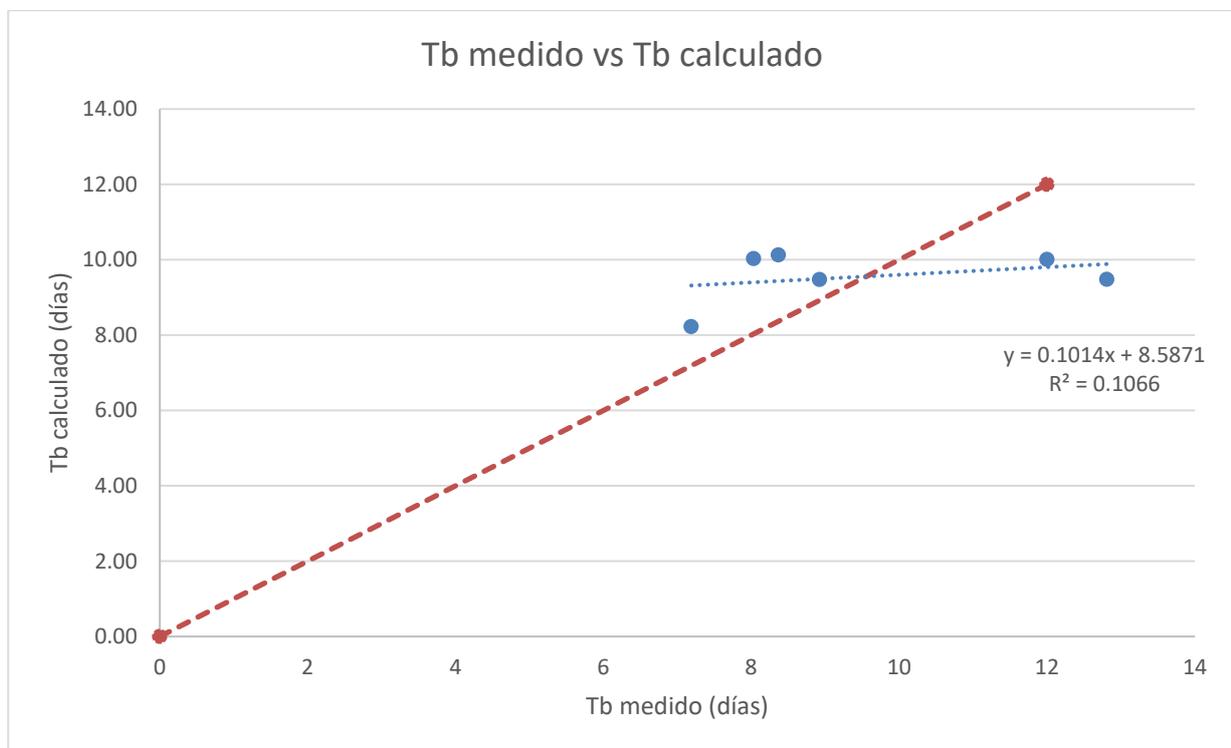
$$a_1 = 5.655748811$$

$$a_2 = 0.06683287$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 4.11, se tiene la siguiente ecuación del tiempo base en función del área de la cuenca para el grupo 2 de las estaciones hidrométricas.

$$t_b = 5.65574881A^{0.06683287} \quad (4.12)$$

Al graficar nuevamente los datos medidos contra los datos calculados y obteniendo el coeficiente de determinación se puede observar en la figura 4.20 que el coeficiente de determinación resultó menor que en los modelos en función del tiempo de concentración al igual que en los modelos en función del área de cuenca para todas las estaciones y para el grupo 1.

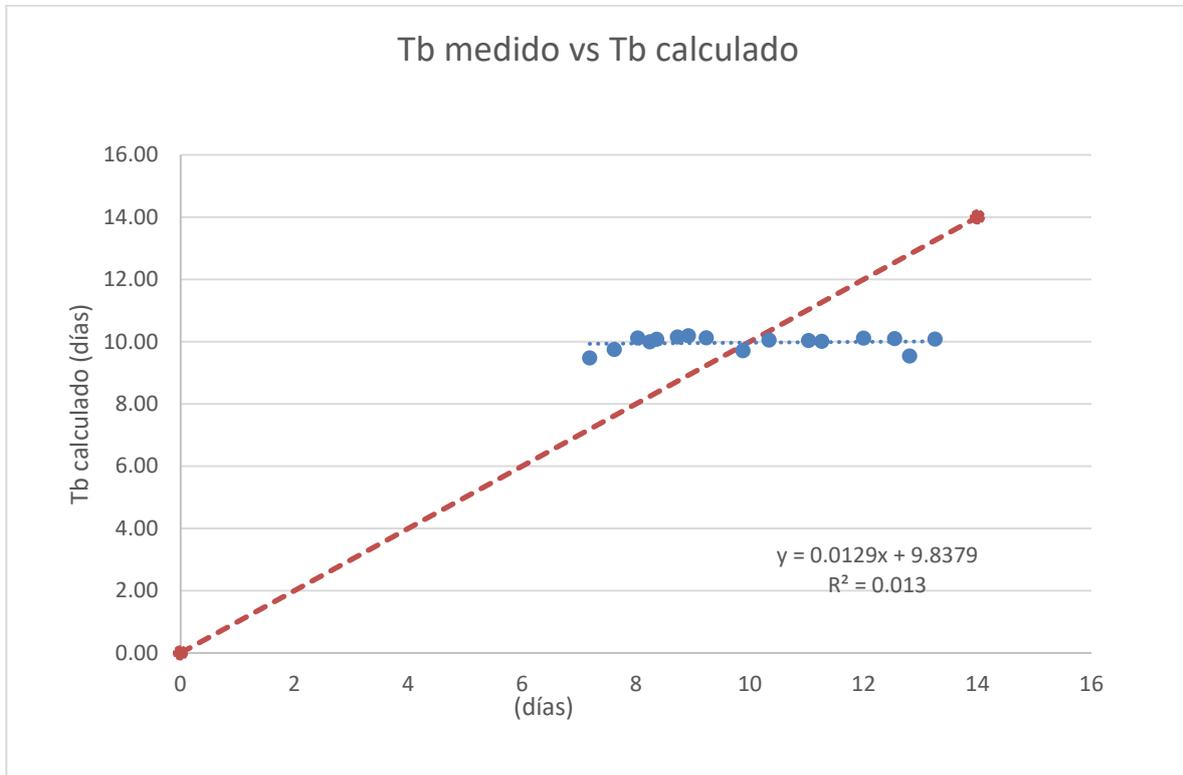


**Fig. 4.20 Modelo 2 del grupo 2 del área de la cuenca.**

### 4.2.3 Modelo 3 (Pendiente media de la cuenca)

Se intentó poner el tiempo base en función de la pendiente media de la cuenca S en grados, para todas las estaciones y para cada grupo en que se dividió, sin embargo el modelo tendía a dar un valor constante y el coeficiente de determinación dio cercano a cero.

A continuación se presenta en la figura 4.21 el modelo que resultó con el mayor coeficiente de determinación, se puede observar que el coeficiente de determinación es muy pequeño y no existe correlación entre las variables. Debido a que no hay correlación, se descartó del análisis.



**Fig. 4.21 Modelo 3 general de la pendiente media de la cuenca.**

#### 4.2.4 Modelo 4 (tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca)

Para este modelo de dos variables independientes se propuso colocar el tiempo base en función del área de la cuenca y del tiempo de concentración. Para todas las estaciones hidrométricas se tiene que el modelo con mejor coeficiente de determinación fue:

$$t_b = a_1 + a_2A + a_3t_c \quad (4.13)$$

Estableciendo como función objetivo minimizar el erro medio cuadrático, se obtuvieron los siguientes valores para las constantes  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  :

$$a_1 = 7.856791176$$

$$a_2 = 0$$

$$a_3 = 0.082161813$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.13, se llega a la ecuación del tiempo base en función del tiempo de concentración y del área de la cuenca, de la siguiente forma:

$$t_b = 7.85679117 + 0.082161813t_c \quad (4.14)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$A$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$t_c$  = tiempo de concentración (hrs)

Debido a que el resultado de la constante  $a_2$  resultó igual a cero, la ecuación se redujo a una ecuación de tiempo base en función del tiempo de concentración ( $t_b = f(t_c)$ ). Graficando los datos medidos contra los datos calculados y obteniendo el coeficiente de determinación 4.22, se nota que este mejora, sin embargo la ecuación se reduce a una variable independiente.

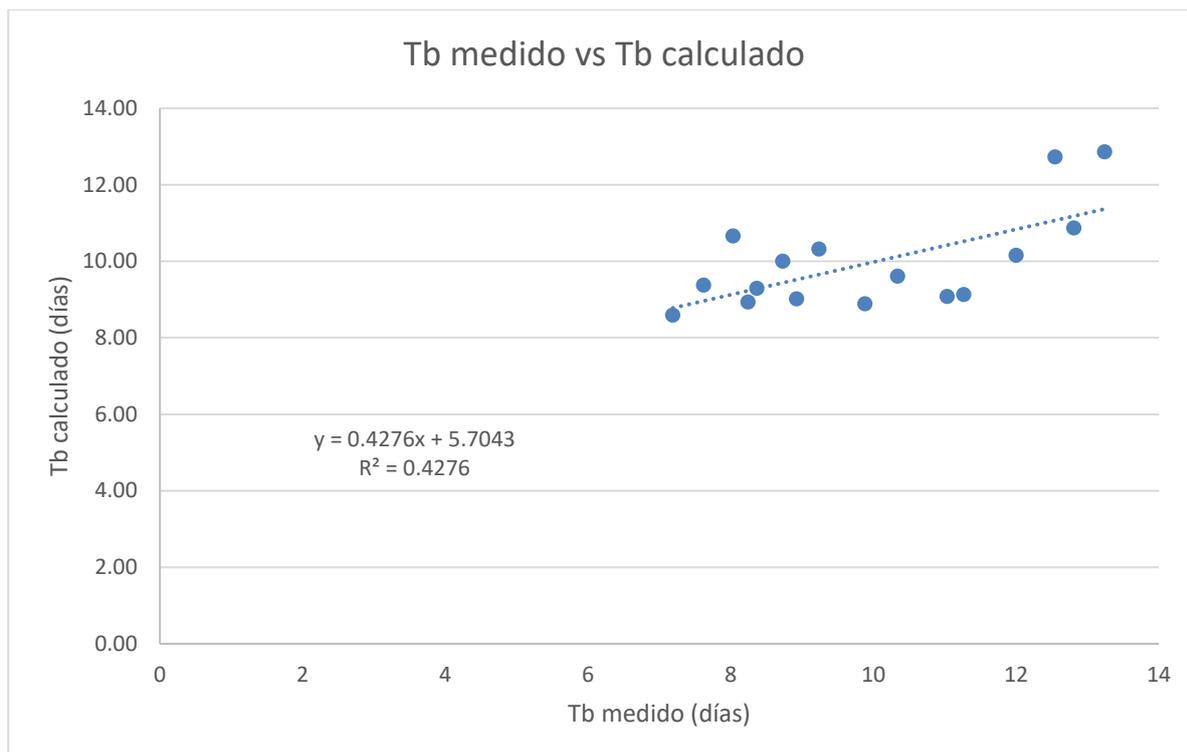


Fig. 4.22 Modelo 4 general en función del tiempo de concentración y el área de la cuenca.

#### 4.2.5 Modelo 4 (grupo 1, tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca)

Para el grupo 1 de las estaciones hidrométricas, el modelo que resultó con el mayor coeficiente de determinación de la ecuación tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca, fue el siguiente con la forma:

$$t_b = a_1 + a_2A + a_3t_c \quad (4.15)$$

Estableciendo como función objetivo minimizar el error medio cuadrático se obtuvo el valor de las constantes  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ :

$$a_1 = 8.322257936$$

$$a_2 = 7.56272E - 06$$

$$a_3 = 0.069506009$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación (4.15), se tiene la ecuación con la forma lineal:

$$t_b = 8.32225793 + 7.5627E - 06A + 0.069506009t_c \quad (4.16)$$

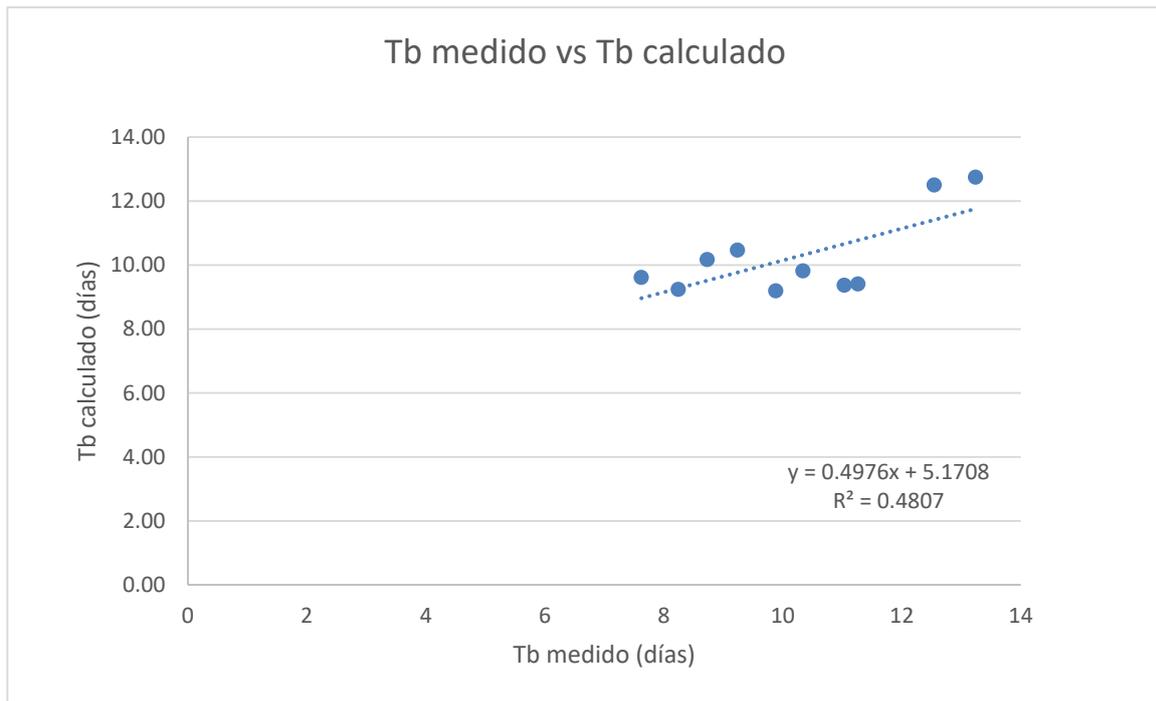
donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$A$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$t_c$  = tiempo de concentración (hrs)

De igual forma se puede observar en la ecuación que el área ya no influye debido a que el valor de la constante  $a_2$  es muy pequeño, por lo tanto tiende a reducirse a una ecuación de una sola variable independiente. Graficando los valores medidos contra los valores calculados y calculando el coeficiente de determinación se puede observar en la figura 4.23 que éste mejoró un poco.



**Fig 4.23 Modelo 4 del grupo 1 en función del tiempo de concentración y área de la cuenca.**

#### 4.2.5 Modelo 4 (grupo 2, tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca)

Para el grupo 2 el modelo que resultó con el mayor coeficiente de determinación fue el modelo con la forma siguiente:

$$t_b = a_1 A^{a_2} t_c^{a_3} \quad (4.17)$$

Estableciendo como función objetivo minimizar el error medio cuadrático se obtuvo el valor de las constantes  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ :

$$a_1 = 3.869004977$$

$$a_2 = 0$$

$$a_3 = 0.295222201$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la ecuación 4.17, se tiene la ecuación con la forma lineal:

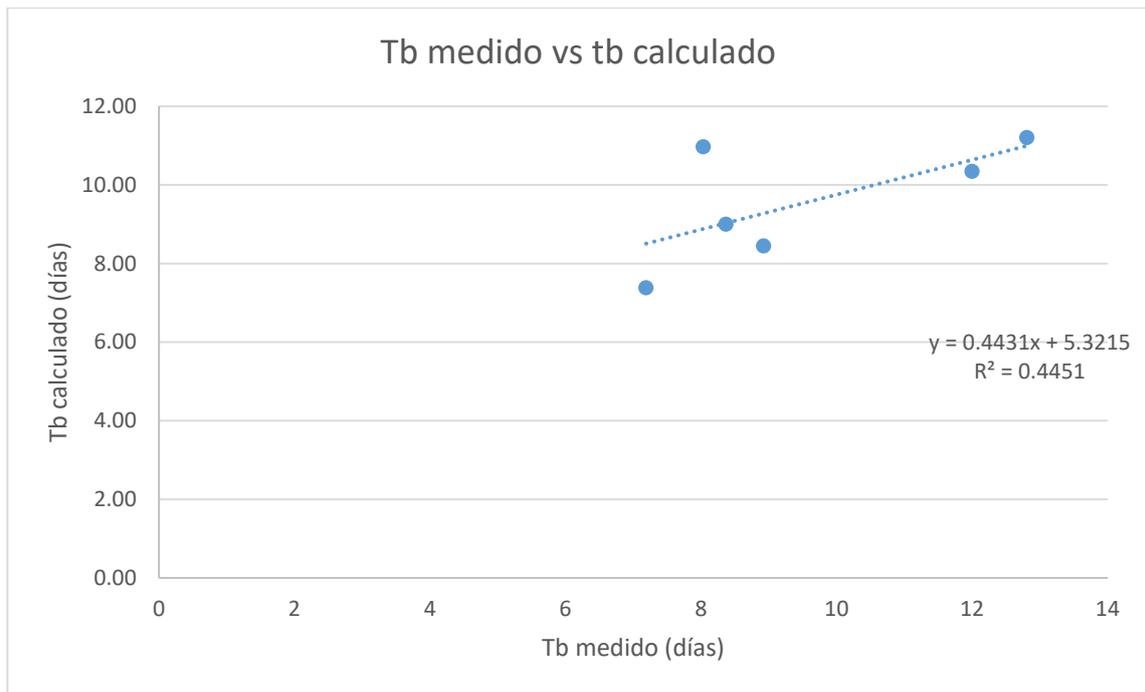
$$t_b = 3.869004977 t_c^{0.295222201} \quad (4.18)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$t_c$  = tiempo de concentración (hrs)

Debido a que el valor de la constante  $a_2$  resultó igual a cero se eliminó de la ecuación (4.18). Graficando los datos medidos contra los datos calculados y obteniendo el coeficiente de determinación se puede observar que mejoró respecto al modelo general y se redujo respecto al modelo para el grupo 1.



**Fig. 4.24 Modelo 4, grupo 2 del tiempo de concentración y área de la cuenca.**

## Conclusiones

Para los modelos que involucran a todas las estaciones, el modelo que dio mejores resultados es el modelo 1 donde el tiempo base se encuentra en función del tiempo de concentración y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.429.

$$t_b = 6.554E - 05t_c^2 + 0.0792857t_c + 7.8568417 \quad (4.2)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$t_c$  = tiempo de concentración (horas)

Para los modelos en los que se separaron a las estaciones por grupos de acuerdo a su coeficiente de variación, el modelo que dio el coeficiente de determinación mayor fue el modelo 1 grupo 1 en el que el tiempo base está en función del tiempo de concentración, donde el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue de 0.4808, apenas cercano a 0.5.

$$t_b = 3.868800038t_c^{0.295236873} \quad (4.6)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$t_c$  = tiempo de concentración (horas)

De acuerdo con los modelos que se realizaron en función de algunas características de la cuenca, como el tiempo de concentración, el área de la cuenca y la pendiente media de la cuenca, para el caso de una variable, el mejor modelo para el tiempo base en función del tiempo de concentración, resultó ser del grupo 1, de segundo grado con un coeficiente de determinación de 0.4808. Para el segundo modelo del tiempo base en función del área de la cuenca, el mejor modelo resultó lineal del grupo 1 con un coeficiente de determinación de 0.3996 y finalmente, el modelo del tiempo base en función de la pendiente media de la cuenca, el cual se descartó del estudio debido a que el coeficiente de determinación obtenido fue muy cercano a cero.

De los modelos en función de dos variables, el tiempo de concentración y el área de la cuenca para todas las estaciones hidrométricas y para cada grupo de acuerdo a los coeficientes de variación de las estaciones, el mejor modelo fue del grupo 1 con un coeficiente de determinación de 0.4807.

$$t_b = 8.32225793 + 7.5627E - 06A + 0.069506009t_c \quad (4.16)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$A$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

$t_c$  = tiempo de concentración (hrs)

En cuanto a los modelos del grupo 2, los modelos que proporcionaron mejores resultados fueron el modelo 1 (tiempo base en función del tiempo de concentración) y el modelo 4 (tiempo base en función del tiempo de concentración y área de la cuenca) con un coeficiente de determinación de 0.4451 para ambos.

Como se puede observar con todos los modelos probados se obtuvieron coeficientes de determinación cercanos a 0.5, que caen a la mitad de lo que se esperaría como un valor satisfactorio o no satisfactorio del modelo de ajuste. Probablemente, debido a la existencia de una obra que controla o regula el flujo que pasa por el río naturalmente. Por lo que el criterio de selección para la aplicación de los modelos sería basándose en el que tenga su forma más sencilla y con menos variables.

Cuando se desee calcular avenidas de diseño en algún sitio de esta región un camino para seleccionar el tiempo base para esas avenidas sería calcularlo a partir de obtener el tiempo de concentración para el modelo 1 del grupo 1 y para el modelo 3 en función del tiempo de concentración y el área de la cuenca, las cuales son variables de los mejores modelos de la cuenca analizada.

$$t_b = 3.868800038t_c^{0.295236873} \quad (4.6)$$

donde:

$t_b$  = tiempo base (días)

$t_c$  = tiempo de concentración (horas)

Se propone realizar el estudio con el tiempo base mínimo en lugar del tiempo base promedio para ver si el resultado es mejor. Además, este procedimiento puede ser útil para aplicarse en otras regiones hidrométricas del país, para tener mayores puntos de comparación de las correlaciones entre el tiempo base y el tiempo de concentración o en otras características de la cuenca, para determinar con cuál se obtiene una correlación mayor.

## Referencias

1. Aparicio Mijares, F. J. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Noriega Editores. México. 1989.
2. Arganis J. M.L., Preciado J. M. Método Híbrido para construir hidrogramas de diseño con datos de caudal y pico y volumen. Memorias de las V Jornadas de Ingeniería del Agua JIA. España. 2017.
3. Breña Puyol, A. F., Jacobo Villa, M. A. Principios y Fundamentos de Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 2006.
4. Dominguez M, R., Arganis J, M. L. Validation of Methods to Estimate Design Discharge Flow Rates For Dam Spillways With Large Regulating Capacity. Hydrological Sciences Journal, 57-460-478. 2012.
5. Domínguez M, R., Arganis J, M. L., Carrizosa E, E., Esquivel, G.G. Ecuaciones regionales de caudales de Sinaloa, México. Memorias de las V Jornadas de Ingeniería del Agua JIA. España. 2017.
6. Domínguez M, R., Arganis J,M.L., Carrizosa, E.E., Hincapié, L. C., Esquivel, G. G., Herrera, A.J.L., Ramírez, G. J.C., Mariles, G. J., Roldán L. M.A., Santana, S.A.O., Ponce, S. M., Juan, D.E., Martínez, M.G., Ramírez, C.L. Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana: regionalización de gastos. Instituto de Ingeniería, UNAM. México. 2017.
7. Dueñas Puebla, D. Estimación de las avenidas de diseño de la presa Infiernillo, Michoacán. A partir de métodos estadísticos y espectrales. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. 2016.
8. Ibáñez Asencio, S. Métodos para la determinación del tiempo de concentración ( $t_c$ ) de una cuenca hidrográfica. Universidad Politécnica de Valencia. 2011.
9. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, (INEGI). Estudio hidrológico del Estado de Sinaloa. México. 1995.
10. Ramírez O, A., Aldama, A. Análisis de frecuencias conjunto para la estimación de avenidas de diseño. México. 2000.
11. Sánchez Álvarez, I., López Ares S. Optimización con Solver. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad de Oviedo. 2006.

12. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
13. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/son/territorio/clima.aspx?tema=me&e=26>
14. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/Vera\\_H\\_L/Cap3.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/Vera_H_L/Cap3.pdf)
15. [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221362/702825221362\\_1.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221362/702825221362_1.pdf)
16. <http://sauce.pntic.mec.es/~jpeo0002/Archivos/PDF/T08.pdf>
17. <http://www.uv.es/asepuma/VI/31.PDF>