



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN  
CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS**

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA PARA ESTIMAR LOS  
GASTOS MÁXIMOS DE ESCORRENTÍA EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS  
CON ESCASA INFORMACIÓN**

**DIANA IVETTE DÍAZ DÍAZ**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO DE MÉXICO**

**2017**

---

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Diana Ivette Díaz Díaz, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Iourii Nikolskii Gavrilov, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Aplicación del método del número de curva para estimar los gastos máximos de escorrentía en cuencas hidrográficas con escasa información y de los producto de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 24 de noviembre de 2017

  
\_\_\_\_\_  
Firma del  
Alumno (a)

  
\_\_\_\_\_  
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis, titulada: **Aplicación del método del número de curva para estimar los gastos máximos de escorrentía en cuencas hidrográficas con escasa información**, realizada por el alumno: **Diana Ivette Díaz Díaz**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS**

**HIDROCIENCIAS**

**CONSEJO PARTICULAR**


CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
M.C. Juan Gabriel Brígido Morales

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Francisco Gavi Reyes

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Cesáreo Landeros Sánchez

Montecillo, Texcoco, Estado de México, diciembre de 2017

# **APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA PARA ESTIMAR LOS GASTOS MÁXIMOS DE ESCORRENTÍA EN CUENCAS HIDROGRAFICAS CON ESCASA INFORMACIÓN**

**Diana Ivette Díaz Díaz, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2017**

## **RESUMEN**

La escasez de información hidrométrica, y una continua disminución de estaciones climatológicas operando; nos hace reflexionar en el grado de confiabilidad existente para el cálculo de gastos máximos utilizando métodos indirectos para la transformación lluvia-escurrimiento con la información disponible de precipitación. El objetivo del presente trabajo fue estimar la variación en la estimación de gastos máximos para 6 cuencas hidrológicas con diferentes condiciones climáticas en la República Mexicana; en las que se dispone de amplia información hidrométrica pero escasa información climática. Para establecer que los valores obtenidos son confiables se han aplicado 3 pruebas estadísticas de homogeneidad, así como una prueba aleatoriedad de datos. Posteriormente cada serie de datos se ajustó a la función de probabilidad con menor error estándar, utilizando el software AX del CENAPRED y se calcularon valores de gasto máximo y precipitación máxima diaria para los periodos de retorno de 10, 25, 50 100, 200, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años. En el cálculo de la lluvia efectiva que da origen al escurrimiento se utilizó el método del Número de Curva y para el cálculo de gastos máximos se usaron 3 métodos hidrológicos: Hidrograma Unitario Triangular, TR-55 e Hidrograma Unitario de Clark. Se encontró que, a pesar de la poca información, los métodos hidrológicos estiman gastos mayores a los calculados con datos hidrométricos; el error relativo calculado fue desde un 5% hasta un 300%, y el método hidrológico con valores más cercanos a los provenientes de estaciones hidrométricas fue el del Hidrograma Unitario Triangular.

**Palabras clave:** Gasto máximo, función de probabilidad, periodo de retorno, precipitación efectiva, métodos hidrológicos.

# APPLICATION OF THE CURVE NUMBER METHOD FOR ESTIMATING MAXIMUM FLOOD OF DRAINAGE ON HYDROGRAPHIC BASINS WITH FEW INFORMATION

Diana Ivette Díaz Díaz, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2017

## ABSTRACT

The shortage of hydrometric information, and a continuous decrease of climatological stations operating; it makes us reflect on the existing degree of reliability for the calculation of peak discharges using indirect methods for the rain-runoff transformation with the information available for precipitation. The objective of the present work was to estimate the variation in the estimation of peak discharges for 6 hydrological basins with different climatic conditions of Mexican Republic; in which there is large hydrometric information but limited climatic information. To establish that the values obtained are reliable, 3 homogeneity statistical tests have been applied, as well as a test of randomness of data; subsequently, each series of data was adjusted to the probability function with the lowest standard error, using the AX software of CENAPRED, and peak discharges and maximum daily precipitation values were calculated for return periods of 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1,000, 5,000 and 10,000 years. In the calculation of the effective rainfall that gives rise to the runoff, the method of the Runoff Number was used and for the calculation of peak discharges three hydrological methods were used: Triangular Unit Hydrograph, TR-55 and Clark Unit Hydrograph. It was found that, despite the limited information, hydrological methods estimate peak discharges greater than those calculated with hydrometric data; the calculated relative error was from 5% to 300%, and the method with values closest to those from hydrometric stations was the Triangular Unit Hydrograph

**Keywords:** maximum discharge, probability function, return period, effective rainfall, hydrological methods.

## AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados por la oportunidad de continuar el proceso de formación.

Al CONCYT por la oportunidad que nos brinda, subsidiando la investigación y formación académica, cuyo apoyo permite dedicarnos firmemente en este proceso.

A los académicos y administrativos del postgrado de Hidrociencias por su apoyo incondicional y sus herramientas brindadas para facilitar mi estancia en el programa.

Al Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov por su apoyo, sus aportaciones, sus palabras, su orientación, impulso y entusiasmo en la investigación.

Al M.C. Juan Gabriel Brigido Morales, que, con su incansable esfuerzo y dedicación, su infinita orientación y aportaciones propiciaron la culminación de esta investigación, por su fortaleza permanente en el trabajo y su gran compromiso con el mismo.

Al Dr. Francisco Gavi Reyes por su apoyo y ánimo en este trabajo y al Dr. Cesáreo Landeros Sánchez por su apoyo brindado en la presente investigación.

A mis amigos y compañeros que se volvieron parte esencial en este proceso, apoyando e impulsándome.

A las personas que intervinieron, impulsaron y fortalecieron cada paso en mi camino.

## DEDICATORIA

A mis hijos Paola Daniela y Manuel quienes son la mayor bendición de mi vida, me inspiran a seguir adelante y representan mi fuerza; que con sus sonrisas me alegran cada día.

A mi esposo Manuel que me apoyo a iniciar esta formación, por ser una persona que apoya incondicionalmente a sus seres queridos y con el ejemplo hace la diferencia, quien es un buen líder y un gran emprendedor, y que gracias a Dios es mi compañero de vida.

A mi mami quien ha sido mi ejemplo, que me enseñó cada día a aprender, que ante cualquier adversidad jamás se ha dejado vencer, que me ha mostrado la importancia de apoyar, pero sobre todo por haberme brindado su infinito amor.

A mi papá que con sus palabras me ha mostrado su apoyo, quien inculcó la importancia familiar y con sus consejos me inspiran a superarme.

A mis hermanos y sus familias, que han sido un ejemplo de superación y constancia.

A mis amigos, que a pesar de la distancia siempre puedo contar con ellos.

## CONTENIDO

	PÁGINA
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	v
LISTA DE FIGURAS .....	xi
LISTA DE CUADROS .....	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS .....	2
2.1. Objetivo general .....	2
2.2. Objetivos particulares.....	2
3. HIPÓTESIS .....	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
4.1. Método del Número de Curva .....	3
4.2. Modelos hidrológicos .....	5
4.3. Cuenca hidrográfica .....	6
4.4. Parámetros Hidrológicos .....	6
4.5. Precipitación.....	7
4.6. Frecuencias de Eventos Extremos.....	8
4.6.1. Pruebas de homogeneidad.....	8
4.6.2. Prueba de bondad de ajuste.....	8
4.6.3. Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP) .....	9
4.7. Curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno (P-D-Tr).....	10
4.8. Métodos Hidrológicos para la estimación de crecientes .....	11
5. MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
5.1. Materiales.....	13
5.2. Métodos .....	13
5.2.1. Selección del área de estudio.....	15
5.2.2. Delimitación de las cuencas con influencia en la zona de estudio .....	16
5.2.3. Adquisición y Procesamiento de Imágenes Satelitales.....	17



5.2.4.	Determinación de los parámetros hidrológicos que caracterizan la respuesta de una cuenca a la precipitación en exceso: .....	18
5.2.5.	Selección de las estaciones para obtención de información climatológica..	21
5.2.6.	Análisis estadístico de los registros anuales de hidrometría y pluviometría.	21
5.2.7.	Análisis de frecuencia de eventos extremos.....	26
5.2.8.	Correcciones al valor de precipitación máxima diaria.....	27
5.2.9.	Curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno (P-D-Tr) .....	27
5.2.10.	Obtención del valor de precipitación representativo para la cuenca.....	29
5.2.11.	Reducción por magnitud de cuenca .....	29
5.2.12.	Cálculo de la precipitación efectiva.....	30
5.2.13.	Cálculo de los gastos máximos .....	30
5.2.14.	Estimación de las variaciones en los gastos máximos obtenidos por métodos hidrológicos e hidrométricos. ....	35
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
6.1.	Delimitación de las cuencas.....	35
6.2.	Procesamiento de Imágenes Satelitales .....	38
6.3.	Determinación de los parámetros hidrológicos que caracterizan la respuesta de una cuenca a la precipitación en exceso. ....	40
6.3.1.	Tiempo de concentración .....	40
6.3.2.	Número de escurrimiento .....	41
6.4.	Estaciones climatológicas seleccionadas para las zonas de estudio.....	43
6.5.	Análisis estadístico de los registros anuales de hidrometría y pluviometría....	49
6.5.1.	Análisis de Homogeneidad o consistencia .....	49
6.5.6.	Prueba de independencia de eventos .....	55
6.5.7.	Prueba de bondad de ajuste.....	58
6.6.	Análisis de frecuencia de eventos.....	64
6.6.1.	Periodo de retorno .....	64
6.7.	Correcciones al valor de precipitación máxima probable .....	65
6.8.	Curvas P-D-Tr representativas para las cuencas.....	65
6.9.	Valor representativo de precipitación máxima ponderada para las cuencas estudiadas .....	75

6.10. Factor de reducción por magnitud de cuenca (FRA).....	76
6.11. Valor representativo de la precipitación efectiva en las cuencas estudiadas ...	76
6.12. Valores de gasto máximo calculados por periodo de retorno, en función de la transformación lluvia-escorrimento .....	78
6.12.1.Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT) .....	78
6.12.2.Método TR-55.....	79
6.12.3.Método del Hidrograma Unitario de Clark.....	82
6.13. Estimación de las variaciones en los gastos máximos obtenidos por métodos hidrológicos e hidrométricos. ....	83
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	85
8. LITERATURA CITADA .....	88
9. ANEXOS .....	94

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema del hidrograma anual de un río en México.....	12
<b>Figura 2.</b> Localización de los sitios de ubicación de las estaciones hidrométricas seleccionadas para el estudio de sus cuencas hidrográficas. ....	15
<b>Figura 3.</b> Superficie delimitada para las cuencas de estudio, tomando como punto de salida, la ubicación de las estaciones hidrométricas. ....	36
<b>Figura 4.</b> Interfaz de la Plataforma de Aplicaciones para imágenes Sentinel (SNAP) 38	
<b>Figura 5.</b> Imágenes en color verdadero creadas a partir de archivos corregidos atmosféricamente (derecha) y sin corregir (izquierda). ....	39
<b>Figura 6.</b> Fusión de la banda 2 para dos escenas tomadas por el satélite SENTINEL 2A.....	39
<b>Figura 7.</b> Imágenes en color verdadero creadas a partir de dos escenas tomadas por satélite.....	40
<b>Figura 8.</b> Número de escurrimiento característico de la cuenca 13001: Río Huicicila. 41	
<b>Figura 9.</b> Número de escurrimiento característico de la cuenca 23016: Río Cintalapa. ....	41
<b>Figura 10.</b> Número de escurrimiento característico de la cuenca 25010: Río Pablillo. .	42
<b>Figura 11.</b> Número de escurrimiento característico de la cuenca 28030: Río Actopan. 42	
<b>Figura 12.</b> Número de escurrimiento característico de la cuenca 28056: Río Valle Nacional. ....	42
<b>Figura 13.</b> Número de escurrimiento característico de la cuenca 30032: Río Teapa. ..	43
<b>Figura 14.</b> Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso k con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 13001: Paso de Arocha). ....	55
<b>Figura 15.</b> Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso k con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 23016: Cintalapa). ....	56
<b>Figura 16.</b> Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso k con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 25010: Pablillo). ....	56
<b>Figura 17.</b> Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso k con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 28030: Actopan). ....	57
<b>Figura 18.</b> Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso k con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 28056: Jacatepec). ....	57
<b>Figura 19.</b> Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso k con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 30032: Teapa). ....	58
<b>Figura 20.</b> Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 13001: Río Huicicila. ....	72

<b>Figura 21.</b> Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 23016: Río Cintalapa. ....	72
<b>Figura 22.</b> Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 25010: Río Pablillo.....	73
<b>Figura 23.</b> Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 28030: Río Actopan. ....	73
<b>Figura 24.</b> Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 28056: Río Valle Nacional. ....	74
<b>Figura 25.</b> Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 30032: Río Teapa. ....	74

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b>	Funciones de probabilidad utilizadas por el programa AX, para el ajuste a una serie de datos. ....	10
<b>Cuadro 2.</b>	Información general de las estaciones hidrométricas seleccionadas. ....	16
<b>Cuadro 3.</b>	Longitudes de onda y anchos de banda de las 3 resoluciones espaciales de los instrumentos MSI .....	17
<b>Cuadro 4.</b>	Clasificación de suelos para determinar el número de escurrimiento N. ...	19
<b>Cuadro 5.</b>	Valor del número de escurrimiento N, de acuerdo al tipo y uso de suelo. .	19
<b>Cuadro 6.</b>	Parámetros para el cálculo del gasto pico unitario, función del tipo de tormenta y del cociente $Ia/Pc$ .....	32
<b>Cuadro 7.</b>	Características de las cuencas incluidas para su estudio.....	37
<b>Cuadro 8.</b>	Características de altimétricas de las cuentas y tiempo de concentración.	40
<b>Cuadro 9.</b>	Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 13001 (Río Huicicila) .....	44
<b>Cuadro 10.</b>	Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 23016 (Río Cintalapa). ....	44
<b>Cuadro 11.</b>	Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 25010 (Río Pablillo).....	45
<b>Cuadro 12.</b>	Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 28030 (Río Actopan). ....	46
<b>Cuadro 13.</b>	Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 28056 (Río Valle Nacional).....	47
<b>Cuadro 14.</b>	Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 30032 (Río Teapa). ....	48
<b>Cuadro 15.</b>	Resultados de la prueba estadística de Helmert aplicada a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas. ....	49
<b>Cuadro 16.</b>	Resultados de la prueba estadística t de Student aplicada a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas. ....	50
<b>Cuadro 17.</b>	Resultados de la prueba estadística de Cramer aplicada a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas. ....	50
<b>Cuadro 18.</b>	Resultados de la prueba estadística de Cramer aplicada a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas. ....	51
<b>Cuadro 19.</b>	Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 13001: Río Huicicila. ....	52

<b>Cuadro 20.</b> Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 23016: Río Cintalapa.....	52
<b>Cuadro 21.</b> Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 25010: Río Pablillo. ....	53
<b>Cuadro 22.</b> Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 28030: Río Actopan.....	53
<b>Cuadro 23.</b> Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 28056: Río Valle Nacional. ....	54
<b>Cuadro 24.</b> Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 30032: Río Teapa.....	54
<b>Cuadro 25.</b> Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 13001: Paso de Arocha. ..	59
<b>Cuadro 26.</b> Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 23016: Cintalapa. ....	59
<b>Cuadro 27.</b> Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 25010: Pablillo. ....	59
<b>Cuadro 28.</b> Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 28030: Actopan. ....	60
<b>Cuadro 29.</b> Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 28056: Jacatepec. ....	60
<b>Cuadro 30.</b> Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 30032: Teapa. ....	60
<b>Cuadro 31.</b> Resumen de error estándar calculado por las diferentes funciones de probabilidad usadas para el ajuste de las series de datos hidrométricos. .	61
<b>Cuadro 32.</b> Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 13001: Río Huicicila. ....	61
<b>Cuadro 33.</b> Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 23016: Río Cintalapa.....	62
<b>Cuadro 34.</b> Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 25010: Río Pablillo. ....	62

<b>Cuadro 35.</b> Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 28030: Río Actopan.....	62
<b>Cuadro 36.</b> Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 28056: Río Valle Nacional.....	63
<b>Cuadro 37.</b> Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 30032: Río Teapa.....	63
<b>Cuadro 38.</b> Valores de gasto máximo ( $m^3/s$ ) por periodo de retorno para las series de datos de las estaciones hidrométricas.....	64
<b>Cuadro 39.</b> Valor representativo de precipitación máxima probable en 24 horas (mm), para las cuencas estudiadas. ....	65
<b>Cuadro 40.</b> Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 13001: Río Huicicila.....	66
<b>Cuadro 41.</b> Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 23016: Río Cintalapa. ....	67
<b>Cuadro 42.</b> Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 25010: Río Pablillo.....	68
<b>Cuadro 43.</b> Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 28030: Río Actopan.....	69
<b>Cuadro 44.</b> Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 28056: Río Valle Nacional. ....	70
<b>Cuadro 45.</b> Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 30032: Río Teapa. ....	71
<b>Cuadro 46.</b> Valor representativo de precipitación máxima probable en 24 horas (mm), para las cuencas estudiadas. ....	75
<b>Cuadro 47.</b> Valor representativo de precipitación máxima probable (mm), de acuerdo al tiempo de concentración de las cuencas estudiadas.....	76
<b>Cuadro 48.</b> Valor representativo de la precipitación efectiva para 24 horas (mm). ....	77
<b>Cuadro 49.</b> Valor representativo de precipitación efectiva por tiempo de concentración (mm). ....	77
<b>Cuadro 50.</b> Porcentaje de la precipitación perdido por las abstracciones. ....	78
<b>Cuadro 51.</b> Tiempo pico estimado (h), para las cuencas estudiadas.....	78
<b>Cuadro 52.</b> Gastos máximos calculados por el método del HUT para las cuencas estudiadas. ....	79
<b>Cuadro 53.</b> Retención máxima potencial (S), y pérdidas iniciales durante la tormenta ( <i>I</i> ), calculados para las cuencas de estudio. ....	80

<b>Cuadro 54.</b> Valor del cociente $I_a/P_c$ , por periodo de retorno para las cuencas de estudio. .....	80
<b>Cuadro 55.</b> Valor del gasto pico unitario ( $q_u$ ), interpolado para los cocientes de $I_a/P_c$ , en las cuencas de estudio y para diferentes periodos de retorno. ....	81
<b>Cuadro 56.</b> Gastos máximos calculados por el método TR-55 para las cuencas estudiadas. ....	81
<b>Cuadro 57.</b> Parámetros de cálculo para el desarrollo del hidrograma Unitario de Clark en las cuencas de estudio. ....	82
<b>Cuadro 58.</b> Gastos máximos calculados en las cuencas de estudio, con el método del hidrograma Unitario de Clark. ....	82
<b>Cuadro 59.</b> Error relativo (en %) de los gastos máximos obtenidos con métodos hidrológicos, para las series homogéneas. ....	83
<b>Cuadro 60.</b> Error relativo (en %) de los gastos máximos obtenidos con métodos hidrológicos, para las series no homogéneas. ....	84



## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en México no existen suficientes datos observados sobre los regímenes hidrológicos de los diferentes caudales naturales; aunado a esto, en los caudales naturales que cuentan con una estación hidrométrica, se ha observado la falta de continuidad de los datos recopilados. La correcta medición de los caudales que se presentan en los cauces nos proporciona un parámetro para la estimación gastos máximos que pudieran presentarse en el futuro; pues de ello dependerán las soluciones que pudieran darse a situaciones críticas tales como desbordamientos de ríos, inundaciones de los terrenos adyacentes a un cauce, descargas urgentes críticas de presas, erosión física de lechos, etc.

Ante la escasez de información hidrométrica, se utilizan métodos indirectos para la determinación de gastos máximos, a través de la transformación lluvia-escorrimento; donde el método más usado es el Método del Número de Curva, cuya base es la estimación de los gastos que ocurren a partir de un evento de precipitación, considerando el tipo de cobertura, tipo y composición del suelo, pendiente superficial y estado de humedad del terreno. Si bien, a lo largo de los años, diversos investigadores han realizado trabajos con la finalidad de poner a prueba la fiabilidad de dicha metodología, (Hawkins, 1975; Hawkins, 1993; Tedela *et al.* 2012; Soulis y Valiantzas, 2012). Entre las deficiencias que reportan se tiene que no toma en cuenta la intensidad de la lluvia y que no aborda los efectos de la variación espacial. Sin embargo, dicha metodología constituye una herramienta de gran valor para realizar estudios hidrológicos en cuencas hidrográficas, cuando hay una deficiencia de registros extensos y confiables (Gaspari *et al.* 2007).

Por otra parte, en México nos enfrentamos a otro problema para la estimación de gastos máximos; debido a que en México no se tienen un sistema de pluviógrafos suficiente para caracterizar las tormentas que se presentan; si bien existen pluviómetros, la distribución de los mismos es insuficiente. Campos (1998) menciona que, en el mejor de los casos, la mitad de los estados de la República Mexicana cuentan con una red mínima aceptable; a lo que hay que también hay que agregar que

en muchos casos se cuenta con periodos faltantes de información y recientemente varias estaciones climatológicas han dejado de operar.

En este sentido, el propósito de la presente investigación es determinar las diferencias existentes en la determinación de gastos máximos de manera directa a través del ajuste de funciones de probabilidad a las series hidrométricas, y la obtenida de manera indirecta, mediante el uso del método del Número de Curva bajo condiciones de escasez de información climatológica en seis cuencas de la República Mexicana situadas en diferentes zonas climáticas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo general**

- Estimar la variación existente en la determinación de gastos máximos anuales en ríos, a partir de una estimación indirecta de la transformación lluvia-escorrimento (método de número de curva) y bajo escenarios de escasa información climatológica; así como de ajustes probabilísticos a los registros hidrométricos.

### **2.2. Objetivos particulares**

- Analizar estadísticamente las series de datos disponibles, con la finalidad de establecer que son correctas y válidas para el trabajo.
- Analizar la frecuencia de eventos extremos de lluvia y gastos en ríos, utilizando técnicas estadísticas.
- Obtener el Número de curva característico de 6 cuencas distribuidas en la República Mexicana.
- Determinar los valores del gasto máximo anual, correspondiente a los periodos de retorno de 10, 25, 50 100, 200, 500, 1,000, 5,000 y 10,000, utilizando el Método del Número de Curva, en las cuencas seleccionadas
- Determinar los valores del gasto máximo anual, correspondiente a los periodos de retorno de 10, 25, 50 100, 200, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años, a través del

ajuste de funciones de probabilidad a los datos observados en las estaciones hidrométricas de los ríos de las cuencas seleccionadas.

### **3. HIPÓTESIS**

- La escasez de información climática en las cuencas hidrográficas puede causar variaciones considerables en el cálculo de gastos máximos anuales, obtenidos a través de métodos indirectos de transformación lluvia-escorrentamiento.

### **4. REVISIÓN DE LITERATURA**

La modelación del proceso precipitación–escorrentamiento es necesaria cuando se deben estimar los recursos hídricos de un río o en otras situaciones, como en el pronóstico de crecientes. Beven (2001) citado por Campos (2014) establece y destaca que la razón teórica principal por la cual se requiere modelar el proceso precipitación–escorrentamiento, se debe a la limitación real que se tiene para medir todos los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca al transformar la precipitación en el escorrentamiento. También cita ejemplos prácticos y generales asociados a la escasez de datos, donde es imprescindible la modelación de dicho proceso, como en las cuencas sin aforos, las cuales no tienen información hidrométrica.

Desde que se inició la modelación del proceso precipitación–escorrentamiento, uno de los modelos que más se ha usado es del tipo “conceptual”; donde se emplean representaciones matemáticas simplificadas de los principales procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca (Campos, 2014). Dentro de este tipo se encuentra el método del Número de curva (conocido en México como el Número de escorrentamiento).

#### **4.1. Método del Número de Curva**

La metodología del número de curva (MNC) fue desarrollada en la década de 1950 por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (NRCS), y actualizada en las décadas posteriores; es un modelo empírico cuya base parte de la observación de eventos. La aplicación típica es para calcular el volumen de escorrentamiento a partir de

un volumen de precipitación; los NC generalmente varían entre 30 y 98, cuanto mayor el valor, será mayor el volumen de escurrimiento generado (NRCS, 1986).

El MNC se determina de acuerdo con las propiedades del suelo y el tipo de cobertura del mismo; y se utilizan para aproximar las diferentes capacidades de infiltración, intercepción y almacenamiento. El método utiliza una representación simplificada del almacenamiento del agua del evento dentro de la cuenca, incluyendo: la retención de la cuenca de la lluvia inicial antes de comenzar el escurrimiento; un número de curva representa la retención potencial máxima; y la relación entre la escorrentía y la precipitación esta linealmente afín a la relación de la abstracción de evento (la lluvia antes del escurrimiento) y la retención potencial máxima (Tedela *et al.* 2012).

Para la tormenta como un todo, la precipitación en exceso ( $P_e$ ) es siempre menor o igual a la precipitación total ( $P$ ); de manera similar, después de que el escurrimiento inicia, la profundidad adicional de agua retenida en la cuenca ( $F_a$ ) es menor o igual a la retención potencial máxima ( $S$ ). Existe una cierta precipitación ( $I_a$ ) que no forma escurrimiento por lo que el escurrimiento potencial es  $P - I_a$ . La hipótesis del método consiste en igualar las relaciones entre las dos cantidades reales y las dos potenciales (Chow, 1994).

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (1)$$

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2)$$

Combinando estas dos ecuaciones,  $P_e$  resulta:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (3)$$

De acuerdo a la experiencia en estudios de muchas cuencas experimentales se desarrolló una ecuación empírica para el cálculo de las abstracciones iniciales:

$$I_a = 0.2S \quad (4)$$

Con lo que al sustituir la ecuación (4) en la ecuación (3), se tiene:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5)$$

Para estandarizar curvas de precipitación y precipitación efectiva se define el número adimensional de curva (NC). Este se determina en función de la pendiente, el uso del suelo o la cobertura, y el tipo de suelo; mientras que la retención máxima potencial en milímetros y el número de curva se relaciona con la ecuación (6)

$$S = \left( \frac{25,400}{N} - 254 \right) \quad (6)$$

En la actualidad, el uso de los Sistemas de Información Geográfica nos permite generar de manera automatizada, mapas digitales de número de escurrimiento. (Shadeed and Almasri, 2010; Zhan and Huang, 2004).

#### **4.2. Modelos hidrológicos**

Los modelos hidrológicos han sido ampliamente usados en hidrología, siendo una herramienta útil para el entendimiento de los procesos relacionados con los recursos hídricos, para su cuantificación, para la estimación de impactos producto de los efectos del clima y para la estimación de los efectos por cambio de uso de suelo, entre otros (Zúñiga, 2012)

El objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. El modelo del sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas mesurables y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas (Chow *et al.* 1994), que intenta reproducir bajo diferentes formas y procesos un fenómeno físico que ocurre sobre un objeto o territorio. Por lo tanto, en hidrología, un modelo busca representar un territorio delimitado por una divisoria de aguas (cuenca), y los fenómenos de transferencia de lluvia a caudal y de agua en el interior (Muñoz, 2010).

Los procesos hidrológicos evolucionan en el espacio y en el tiempo en una forma que es parcialmente predecible, o determinística, y parcialmente aleatoria. Los métodos estadísticos están basados en principios matemáticos que describen la variación aleatoria de un conjunto de observaciones de un proceso, basados en observaciones del lugar de los procesos físicos que las producen (Chow *et al.* 1994).

### **4.3. Cuenca hidrográfica**

La cuenca es un área natural denominada como una unidad fisiográfica en donde intervienen un conjunto de sistemas hídricos, conformada de componentes biofísicos. Dividida en ocasiones en subcuencas y microcuencas

La delimitación de área de la cuenca es imprescindible para estudios y análisis territorial, para ello se realiza con software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), existiendo una gama amplia de estos tanto libres como con licencia. No obstante, las propiedades de cada software proporcionan al usuario diversas ventajas en su utilización, un ejemplo de ellos es la velocidad de procesamiento de imágenes, así como el número de pasos a seguir para finalizar la delimitación seleccionada.

### **4.4. Parámetros Hidrológicos**

De acuerdo con Campos (2010) los parámetros hidrológicos de una cuenca son estimaciones que involucran varias propiedades físicas de ésta y tienen una aplicación directa en los cálculos o estimaciones hidrológicas. Tales como el tiempo de concentración, tiempo de retraso y tiempo pico.

- El tiempo de concentración ( $T_c$ ) se define como el tiempo que tarda el escurrimiento de una tormenta en viajar desde el punto hidráulicamente más distante hasta la salida de la cuenca; para el tiempo de concentración se han desarrollado diferentes fórmulas empíricas, como la de Kirpich, de California Highways and Public Works y la de Chow, por citar algunas.
- El tiempo de retraso ( $T_r$ ) es el lapso entre el centro de la lluvia en exceso y el de hidrograma de escurrimiento directo.

- El tiempo al pico ( $T_p$ ) se define como el lapso desde el comienzo de la lluvia en exceso hasta el gasto pico del hidrograma de escurrimiento directo.

#### **4.5. Precipitación**

La precipitación es la liberación de agua de la atmósfera que llega a la superficie de la tierra; el término "precipitación" abarca todas las formas de agua que libera la atmósfera, incluida la nieve, el granizo, la aguanieve y la lluvia. La cantidad de precipitación que cae sobre una ubicación varía espacialmente y temporalmente; donde las diferentes influencias sobre la precipitación se pueden dividir en estáticas (altitud, aspecto y pendiente; no varían entre eventos de tormenta) y dinámicas (cambios causados por variaciones en el clima) (Davie, 2008).

La naturaleza aleatoria de precipitación dificulta entender los procesos hidrológicos para conocer su comportamiento futuro; situación que nos obliga a coleccionar la mayor cantidad de información que nos permita emitir conclusiones a partir de observaciones. Entre los sistemas de medición se tienen pluviógrafos y pluviómetros o sistemas telemétricos de medición.

Las técnicas de medición descritas aquí se concentran en la medición de la precipitación en una ubicación precisa (o al menos en un área extremadamente pequeña). Sin embargo, en realidad resulta necesario saber cuánta precipitación ha caído en un área mucho más grande, generalmente una zona de captación; por lo que, para pasar de mediciones puntuales a una estimación distribuida espacialmente, es necesario emplear alguna forma de promediado espacial, donde para superar una distribución desigual de sistemas de los sistemas de medición dentro de una cuenca se crean polígonos (conocidos como Polígonos de Thiessen) que conectan un área representativa del sistema de medición (usualmente pluviómetros) . El tamaño del área representativa (un polígono) se basa en qué tan cerca está cada medidor de los otros que lo rodean (Davie, 2008).

## **4.6. Frecuencias de Eventos Extremos**

El análisis de frecuencias de los gastos máximos anuales se emplea para proveer la magnitud de un evento  $\hat{Q}_T$ , de cierto período de retorno  $T$ , para el diseño de obras hidráulicas y otros aspectos de gran importancia en la planeación y manejo de recursos hidráulicos (Plaza, 2010).

Según Chow (1965), citado por Escalante (2015), el análisis de frecuencias de los gastos máximos anuales involucra la interpretación de registros pasados de eventos hidrológicos para obtener probabilidades de ocurrencia futuras. Comenzando con el tratamiento de datos brutos y determinando frecuencia y probabilidad.

En el caso de los métodos de transformación lluvia-escorrentamiento, resulta necesario conocer la precipitación, por lo que también se debe realizar un análisis de eventos extremos; sin embargo, para determinar que los datos recopilados son confiables, es necesario realizar una serie de pruebas estadísticas a las series de datos.

### **4.6.1. Pruebas de homogeneidad**

Retomando que las características estadísticas de una serie hidrológica (media, desviación estándar, etc) pueden sufrir pérdida de homogeneidad, lo cual es producido por actividades humanas y procesos naturales dentro de la cuenca, tales como: deforestación, rectificación de cauces, construcción de embalses, incendios forestales, erupciones volcánicas. Se aplicaron las siguientes pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos, las cuales presentan una hipótesis nula y una regla para ser aceptada o rechazada.

### **4.6.2. Prueba de bondad de ajuste**

Se aplica esta prueba para determinar cuál de las distribuciones teóricas de probabilidad se ajusta mejor a la serie de observaciones de las variables, precipitaciones y gastos máximos (Rodríguez, 2011).



### **4.6.3. Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP)**

Una vez que se ha revisado la calidad de la información, se está en posibilidad de realizar el análisis de frecuencia de las series, cuyo principal objetivo es relacionar la magnitud de eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia a través del uso de distribuciones de probabilidad.

La determinación de la frecuencia de caudales máximos resulta imprescindible para el diseño de diferentes infraestructuras tales como presas; sin embargo, su determinación con datos observados conlleva un grado de incertidumbre, como el tipo de función de distribución utilizada y la representatividad de los datos utilizados.

Las funciones de distribución de probabilidad recomendadas en hidrología son las siguientes (CONAGUA, 2011):

- Familia Normal: Normal, Log Normal (2 y 3 parámetros).
- Familia General de Valores Extremos (GEV): GEV I (Gumbel), Doble Gumbel, GEV III (Weibull).
- Familia Exponencial/Pearson: Exponencial, Pearson III, Log Pearson III
- Distribución Gamma (2 y 3 parámetros).

Uno de los criterios mejor adoptados para la selección para del tipo de función de probabilidad a utilizar, es buscar el de mejor ajuste a la muestra de datos, lo cual puede determinarse mediante el error estándar.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), elaboró un programa que ajusta distintas funciones de probabilidad a series de datos, calcula el error estándar de cada una de ellas y estima valores para diferentes períodos de retorno. Dentro de las funciones de probabilidad que contempla dicho programa son las siguientes:

**Cuadro 1.** Funciones de probabilidad utilizadas por el programa AX, para el ajuste a una serie de datos.

NOMBRE	FUNCIÓN	PARÁMETROS
<b>Normal estandarizada</b>	$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ <p>donde <math>t = \frac{x-\alpha}{\beta}</math></p>	$\alpha$ y $\beta$
<b>Log normal</b>	$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ <p>donde <math>t = \frac{\ln(x-\delta)-\alpha}{\beta}</math></p>	$\alpha$ , $\beta$ y $\delta$
<b>Gumbel</b>	$F(x) = e^{-e^{-t}}$ <p>donde <math>t = \alpha(x-\beta)</math></p>	$\alpha$ : parámetro de forma $\beta$ : parámetro de escala
<b>Exponencial</b>	$F(x) = 1 - e^{-t}$ <p>donde <math>t = \frac{x-\beta}{\alpha}</math></p>	$\alpha$ y $\beta$
<b>Gamma</b>	$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma\beta} \times \int_{\delta}^x t^{\beta-1} \times e^{-t} dt$ <p>donde <math>t = \frac{x-\delta}{\alpha}</math></p> <p>Y <math>\Gamma(\beta)</math>: 1 función matemática Gamma 1</p>	$\alpha$ , $\beta$ y $\delta$
<b>Doble Gumbel</b>	$F(x) = P \left( e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \right) + (1-P) \left( e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right)$	$\alpha_1$ , $\alpha_2$ , $\beta_1$ , $\beta_2$ , y P

Fuente: Jiménez (1997).

#### 4.7. Curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno (P-D-Tr)

El estudiar las precipitaciones y conocer su distribución temporal es motivo de interés para meteorológicos o hidrológicos, al tiempo que se pueden proporcionar índices para realizar estudios de crecidas o permitir la alimentación de modelos precipitación-escurrimiento. Para ello se han ideado métodos de procesamiento estadístico de los

registros de precipitación máxima en 24 horas, relacionando la misma con relaciones o cocientes promedio duración-lluvia.

Las curvas P-D-Tr son gráficas que concentran las características de las tormentas de la zona o región, con respecto a sus variables: magnitud, duración y frecuencia. Sin embargo, debido a la escasez de información de lluvias de cortas duraciones, en México se han empleado las relaciones promedio encontradas entre lluvias en otros países (Campos, 1998).

#### **4.8. Métodos Hidrológicos para la estimación de crecientes**

Existen métodos hidrológicos para la transformación lluvia-escorrimento que permiten estimar el caudal generado a partir de los datos de precipitación, y los datos físicos de la cuenca: geometría (pendiente), tipo de suelo (infiltración), usos del suelo (coeficiente de fricción de fondo, retención superficial); definiendo la altura de precipitación y la forma en que se distribuye a lo largo del tiempo (Garrido, 2008).

Algunos de los métodos hidrológicos permiten estimar el hidrograma de la creciente estimada, mientras que otros solamente permiten calcular el gasto máximo buscado. Entre los métodos más conocidos se encuentran los siguientes (Fuentes & Franco, 1996; Viessman, 1997; Campos, 2010; Karamouz, 2013):

- Método racional
- Método de Bell
- Método de Chow
- Método del TR-55
- Método del Hidrograma Unitario Triangular.
- Hidrograma Unitario de Snyder
- Hidrograma Unitario de Clark

Cada método fue desarrollado para ciertas condiciones y su empleo requiere de parámetros específicos; si bien ninguno se ha desarrollado en México, su uso se ha adaptado.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

Tomando en cuenta que el objetivo principal del presente trabajo fue estimar variación de los gastos máximos anuales en ríos, aplicando el método del Número de Curva; pero que dicho método solamente permite calcular el escurrimiento superficial, es necesario acotar lo siguiente:

- La mayoría de los ríos de México se ubican en zonas montañosas donde el factor del escurrimiento superficial es el principal componente de los gastos máximos observados, siendo el flujo base (componente subterráneo) solamente una pequeña fracción de los mismos, tal como se muestra en la Figura 1



**Figura 1.** Esquema del hidrograma anual de un río en México.

De la Figura 1 se puede observar  $Q_{\text{máx total}} = Q_{\text{máx}} + \text{Flujo base}$  o  $Q_{\text{máx}} = Q_{\text{máx total}} - \text{Flujo base}$ , donde el flujo base es relativamente pequeño y constante.

En este sentido, se consideró válido el no considerar el flujo base, considerando para la determinación de los gastos máximos, solamente el escurrimiento proveniente de la precipitación en exceso.

## 5.1. Materiales

- Información recopilada de Estaciones hidrométricas
- Información recopilada de Estaciones climatológicas
- Archivo vectorial de uso del suelo y vegetación en la República Mexicana
- Archivo vectorial de edafología de la República Mexicana
- Modelo Digital de elevaciones de la República Mexicana
- Archivo vectorial de la red hidrográfica de la República Mexicana
- Imágenes satelitales Sentinel 2A del año 2017 para los sitios de estudio
- Software ArcSWAT 2012.10\_2.19
- Software ArcGis v. 10.2.2
- Software SAGA GIS
- Paquetería de Office

## 5.2. Métodos

1. Se seleccionaron los sitios de estudio, considerando que la posición de la estación hidrométrica se localizara aguas abajo, de un tramo de río libre de infraestructura; de manera que no existiera modificación del comportamiento del escurrimiento ante la presencia de precipitaciones máximas.
2. La información de las series hidrométricas fue obtenida del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); donde se recopiló la información de escurrimientos máximos anuales observados en cada sitio.
3. Utilizando las coordenadas de los sitios de estudio, se han delimitado y caracterizado las cuencas que aportan escurrimiento, utilizando para ello el software ArcSWAT v. 2012 en el entorno de ArcGIS v. 10.2.2 y el software SAGA GIS.
4. Se determinaron algunos de los parámetros hidrológicos que caracterizan la respuesta de una cuenca ante la precipitación en exceso: número de

escurrimiento (N), tiempo de concentración ( $T_c$ ), tiempo de retraso ( $T_r$ ), y tiempo pico ( $T_p$ ).

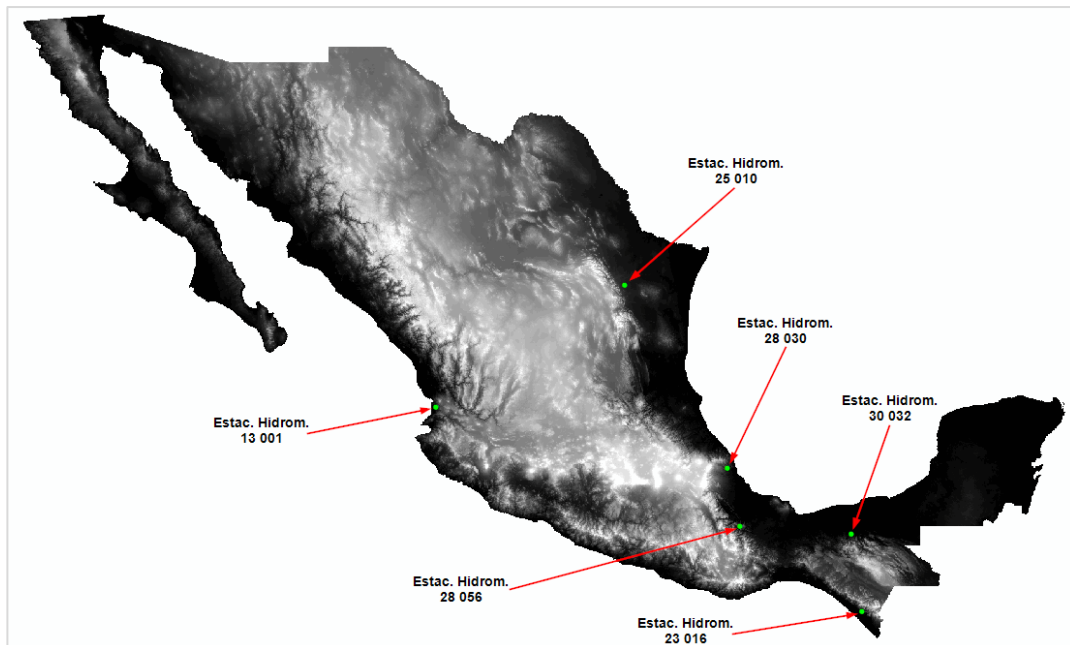
5. La recopilación de información pluviométrica se ha realizado considerando el tamaño de las cuencas; donde el número de estaciones a utilizar por cuenca se determinó mediante la elaboración de polígonos de Thiessen, con el software ArcGIS v.10.2.2.
6. Se analizaron las series de datos de pluviometría y crearon las series de precipitación máxima diaria anual; rellenando en algunos casos para datos faltantes, donde ha utilizado el método del U.S. National Weather.
7. Para determinar la confiabilidad de los cálculos realizados, se realizaron una serie de pruebas estadísticas a las series de datos tanto de hidrométricas, como pluviométricas; aplicando 3 pruebas estadísticas de homogeneidad (Helmert, t de student y Cramer), y una para comprobar que las series están compuestas por variables aleatorias (Independencia de Anderson); posteriormente se ajustaron diferentes funciones de probabilidad utilizando el software AX y se seleccionó la función que mejor describiera la serie aplicando tomando en cuenta una prueba de bondad de ajuste (Error estándar).
8. Utilizando la función seleccionada se calcularon los valores máximos de escurrimiento y precipitación, asociados a los periodos de retorno de 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000, 5,000 y 10,000 años.
9. Se corrigieron los valores de precipitación máxima diaria calculada por periodo de retorno; para obtener los datos de precipitación máxima en 24 horas.
10. Utilizando el método de Chen y los procedimientos descritos por Conde *et al.* (2015), se elaboraron las curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno (P-D-Tr).
11. A partir del tiempo de concentración y la información de la distribución horaria de la lluvia (curvas P-D-Tr); se calculó la altura de precipitación característica para cada cuenca y se determinó el valor de la precipitación en exceso.
12. Se determinaron los valores de avenida máxima para los periodos de retorno previstos, utilizando 3 métodos: Hidrograma Unitario Triangular, Método de Chow y Método TR-55, verificando las variantes a ajustar.

13. Se ha comparado los gastos obtenidos a través de funciones de probabilidad aplicados a los gastos observados (información hidrométrica), con los obtenidos de manera indirecta a través de la modelación del proceso lluvia-escorrentamiento. Cuantificando la magnitud de las diferencias.

### 5.2.1. Selección del área de estudio

La primera parte del trabajo consistió en la realización de un análisis de la ubicación de las estaciones hidrométricas en la República Mexicana y utilizando imágenes de satélite, localizando aquellas que drenaran una zona libre de infraestructura a lo largo de su cauce; es decir, presas de almacenamiento o control de avenidas, pues las mismas modifican el comportamiento de las avenidas máximas que se presentan en épocas de altas precipitaciones.

Posteriormente, se realizó una revisión de la información hidrométrica para cada una de las estaciones seleccionadas; eligiendo aquellas que contaran con un registro de por lo menos de 30 años. En total se seleccionaron 6 sitios de estudio, localizados en la zona centro, noroeste y sureste de la República Mexicana. (Figura 2)



**Figura 2.** Localización de los sitios de ubicación de las estaciones hidrométricas seleccionadas para el estudio de sus cuencas hidrográficas.

En el Figura 2 se muestra información disponible respecto de la ubicación de las estaciones hidrométricas encontradas en los sitios de estudio seleccionados.

**Cuadro 2.** Información general de las estaciones hidrométricas seleccionadas.

Clave	Nombre	Corriente	Estado	Latitud (N)	Longitud (O)
13001	Paso de Arocha	Río Huicicila	Nayarit	21°17'00"	105°04'30"
23016	Cintalapa	Río Cintalapa	Chiapas	15°18'30"	92°44'00"
25010	Pablillo	Río Pablillo	Nuevo León	24°51'25"	99°33'20"
28030	Actopan	Río Actopan	Veracruz	19°29'40"	96°34'42"
28056	Jacatepec	Río Valle Nacional	Oaxaca	17°52'00"	96°12'00"
30032	Teapa	Río Teapa	Tabasco	17°34'00"	92°58'00"

### 5.2.2. Delimitación de las cuencas con influencia en la zona de estudio

La delimitación de las cuencas cuya área drena en el sitio de la estación hidrométrica, se realizó utilizando un modelo digital de elevaciones, con una resolución de 15 m (INEGI) y el software ArcSWAT 2012 en el entorno de ArcGIS 10.2.2. La delimitación obtenida fue corregida posteriormente con base en la red hidrográfica del INEGI en su versión 2015.

El procedimiento fue el siguiente:

- a) Corrección inicial al modelo digital de elevaciones, de los errores que constantemente se presentan debido a la resolución de los datos o el redondeo de elevaciones al valor entero más cercano; para ello se utilizó el algoritmo desarrollado por Wang y Liu (2006).
- b) Obtención de las celdas de dirección de flujo y acumulación de flujo (Fairfield y Leymarie, 1991; Lea, 1992; Costa-Cabral y Burges, 1994).
- c) Se especificaron las celdas objetivo, para las cuales se identifica el área contribuyente ascendente (O'Callaghan y Mark, 1984).
- d) Posteriormente, utilizando la delimitación realizada se determinó la red hídrica y algunas características de las cuencas (o subcuencas cuando fue necesario).



e) Finalmente, se contrastaron las delimitaciones realizadas con el software, y las delimitaciones realizadas por el INEGI en su versión 2015; aplicando algunas correcciones cuando fue necesario.

Asimismo, se calcularon los parámetros de área, perímetro y forma de la cuenca, además de la longitud del recorrido más largo, diferencia de elevaciones en la cuenca, y pendiente media del cauce principal utilizando el criterio de Taylor-Schwarz.

### 5.2.3. Adquisición y Procesamiento de Imágenes Satelitales

Con en el propósito de caracterizar las zonas de estudio, se adquirieron imágenes provenientes del satélite SENTINEL-2A, cuyo instrumento óptico muestrea 13 bandas espectrales, las cuales se agrupan en tres resoluciones espaciales (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Longitudes de onda y anchos de banda de las 3 resoluciones espaciales de los instrumentos MSI

Número de banda	Resolución Espacial	S2A		S2B	
		Longitud de onda	Ancho de banda	Longitud de onda	Ancho de banda
	(m)	(nm)	(nm)	(nm)	(nm)
2 (Azul)	10	496.6	98	492.1	98
3 (Verde)		560	45	559	46
4 (Rojo)		664.5	38	665	39
8 (Infrarrojo cercano)		835.1	145	833	133
5 (Vegetación - Borde Rojo)	20	703.9	19	703.8	20
6 (Vegetación - Borde rojo)		740.2	18	739.1	18
7 (Vegetación - Borde rojo)		782.5	28	779.7	28
8a (Infrarrojo cercano reducido)		864.8	33	864	32
11 (Rango espectral infrarrojo de onda corta)		1613.7	143	1610.4	141
12 (Rango espectral infrarrojo de onda corta)	2202.4	242	2185.7	238	
1 (Aerosoles costeros)	60	443.9	27	442.3	45
9 (Vapor de agua)		945	26	943.2	27
10 (rango espectral infrarrojo de onda corta - nubes)		1373.5	75	1376.9	76

Fuente: European Space Agency (ESA).

El nivel de procesamiento adquirido fue el 1C, que incluye correcciones geométricas y radiométricas, además de la ortorectificación y el registro espacial en un sistema de referencia global con precisión subpíxel, pero con valores de reflectancia en el Tope de la Atmósfera (TOA).

Para propósitos del trabajo, se aplicó una corrección para llegar a un nivel de procesamiento 2A (también referida también como Reflectancia en la Superficie (SR) o como reflectancia Bajo la Atmósfera (BOA); utilizando la herramienta Sen2cor dentro del ámbito de una Plataforma de Aplicaciones para imágenes Sentinel (SNAP por sus siglas en inglés).

#### **5.2.4. Determinación de los parámetros hidrológicos que caracterizan la respuesta de una cuenca a la precipitación en exceso:**

##### **1. Tiempo de concentración.**

Se ha empleado el método de Kirpich (Kirpich, 1940, citado por Campos, 2010):

$$T_c = 0.0663 \cdot \left( \frac{L_c}{\sqrt{S_c}} \right)^{0.77} \quad (7)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (h);

$L_c$  = Longitud total del recorrido más largo (km);

$S_c$  = Pendiente media del cauce del recorrido más largo (adim).

##### **2. Número de escurrimiento**

El número de escurrimiento, engloba una gran cantidad de parámetros (uso, tipo y composición del suelo, pendiente y estado de humedad del terreno), por lo que su uso es recomendable; para ello se utilizó la información del Cuadro 4 y Cuadro 5 (Fuentes y Franco, 1996).

El procedimiento se realizó tomando como base, información recopilada del INEGI: MDE con una resolución de 15 m, capa vectorial de edafología, capa vectorial de

uso del suelo y vegetación (la cual fue corregida con apoyo de imágenes satelitales actuales) y las recomendaciones emitidas por Domínguez et al. (2015); para condiciones de humedad media (lluvias previas de entre 25 y 50 mm).

**Cuadro 4.** Clasificación de suelos para determinar el número de escurrimiento N.

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 subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo).

Fuente: Fuentes y Franco (1996).

**Cuadro 5.** Valor del número de escurrimiento N, de acuerdo al tipo y uso de suelo.

USO DE LA TIERRA O COBERTURA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE	PENDIENTE	TIPO DE SUELO			
		(%)	A	B	C	D
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, baja 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 baja transpiración	----	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	----	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	----	36	60	70	76
	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

USO DE LA TIERRA O COBERTURA	CONDICIÓN DE LA SUPERFICIE	PENDIENTE	TIPO DE SUELO			
		(%)	A	B	C	D
	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 al voleo o con maquinaria) 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
Pastizal	----	>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

Fuente: Fuentes y Franco (1996).

El procedimiento se realizó de manera automatizada, utilizando funciones de algebra de mapas, disponibles en el software ArcGis 10.2.2.

### 5.2.5. Selección de las estaciones para obtención de información climatológica

De acuerdo con la ubicación de las estaciones climatológicas de la CONAGUA, se seleccionaron alrededor de cada cuenca un número de estaciones de tal manera que al elaborar polígonos de Thiessen con las mismas, se cubriera completamente el área de cada cuenca de estudio.

Posteriormente, se revisó la información de cada estación, considerando contar con un registro mínimo de 20 años para datos de precipitación; se revisó la consistencia de información con base en los registros de Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión nacional del Agua y la base de datos CLICOM (Cimate Computing, del CICESE); para información faltante que pudiera complementarse con estaciones aledañas, se complementó utilizando el método del del U.S. National Weather (Campos, 1998).

$$P_x = \frac{\sum P_i \cdot W_i}{\sum W_i} \quad (8)$$

Donde:

$P_x$  = Precipitación que se desea conocer (mm).

$P_i$  = Precipitación observada en la estación  $i$  (mm)

$W_i$  = Factor de ponderación calculado como:  $W_i = 1/D_i^2$ ; y

$D_i$  = Distancia de la estación "x" a la estación "i".

Para cada estación seleccionada, se obtuvieron series anuales compuestas por el valor de la precipitación máxima en 24 horas.

### 5.2.6. Análisis estadístico de los registros anuales de hidrometría y pluviometría.

Para determinar que los cálculos realizados eran confiables, se realizó una serie de pruebas estadísticas a las series de datos.

### 5.2.6.1. Pruebas de homogeneidad o consistencia.

Los análisis de homogeneidad de series hidrológicas son un aspecto fundamental en los análisis hidrológicos y deben realizarse previamente a cualquier otro análisis, con el objetivo de determinar la calidad de la información hidrológica que se está utilizando.

Se utilizan para determinar si las estimaciones estadísticas muestrales son válidas estimaciones de los parámetros poblacionales (Campos, 1998); los análisis hidrológicos serán tan buenos como la información hidrológica que se use (Hurtado, 2015), para el presente estudio se realizaron 3 pruebas de homogeneidad.

#### 1. Prueba estadística de Helmer

Esta prueba analiza el signo de las desviaciones de cada evento  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1, 2, \dots, n_j$ , con respecto a su valor medio  $\bar{Q}^j$ . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia S, de lo contrario se considera como un cambio C (Escalante & Reyes, 2008); la serie se considera homogénea si se cumple la condición:

$$-\sqrt{n_j-1} \leq (S-C) \leq \sqrt{n_j-1} \quad (9)$$

#### 2. Prueba estadística t de Student

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, esta prueba es muy útil. Si se considera una serie  $Q_i^j$  para  $i = 1, 2, \dots, n_j$ , del sitio  $j$ , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño  $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$ , entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión (Escalante & Reyes, 2008):

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ \frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (10)$$

Donde:

$\bar{x}_1, s_1^2$  = la media y varianza de la primera parte del registro de tamaño  $n$

$\bar{x}_2, s_2^2$  = la media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño  $n$

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución  $t$  de Student de dos colas, y con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$ .

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que aquel de la distribución  $t$  de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $Q_i^j$  se considera no homogénea.

### 3. Prueba estadística de Cramer

Esta prueba se utiliza para verificar homogeneidad en el registro  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i=1, 2, \dots, n_j$ , y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un período de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques: el primero, del tamaño total de la muestra  $n_j$ ; el segundo, de tamaño  $n_{60}$  (60% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ); y el tercero, de tamaño  $n_{30}$  (30% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ).

La prueba compara el valor de  $\bar{Q}^j$  del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos  $\bar{Q}_{60}^j$  y  $\bar{Q}_{30}^j$ . Para que se considere la serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques (Escalante & Reyes, 2008).

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \text{ para una sola muestra analizada } j=1 \quad (11)$$

$$S_Q^j = \left[ \frac{1}{(n_j-1)} \sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Q_k^j}{n_{60}} \quad (13)$$

$$\bar{Q}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{Q_k^j}{n_{30}} \quad (14)$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{Q}_{60}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (15)$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{Q}_{30}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j} \quad (16)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j-2)}{n_j - n_w \left[ 1 + (\tau_w^j)^2 \right]} \right\}^{1/2} |\tau_w^j|; \text{para } w=60 \text{ y } w=30 \quad (17)$$

El estadístico  $t_w$  tiene distribución t de Student de dos colas con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$ .

Si y solo si el valor absoluto de  $t_w$  para  $w=60$  y  $w=30$ , es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $Q_i^j$  se considera no homogénea.

### 5.2.6.2. Prueba de independencia de eventos

Para que se pueda llevar a cabo el análisis de frecuencias se requiere que  $Q_i^j$  de la serie j para  $i=1, 2, \dots, n_j$ , esté compuesta por variables aleatorias (Escalante & Reyes, 2008), la prueba aplicada fue la siguiente:

#### 1. Prueba de independencia de Anderson.

Hace uso del coeficiente de autocorrelación serial  $r_k^j$  para diferentes tiempos de retraso k. Si se analiza un solo registro, entonces  $j = 1$  (salas el al, 1988, citado por Escalante & Reyes, 2008).



La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial del retraso k es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2} \text{ Para } r_0^j = 1 \text{ y } k=1, 2, \dots, \frac{n_j}{3} \quad (18)$$

Donde:

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j} \quad (19)$$

Además, los límites al 95% de confianza para  $r_k^j$  se pueden obtener como

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \quad (20)$$

La gráfica de los valores estimados para  $r_k^j$  (ordenadas) contra los tiempos de retraso  $k$  (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra. Si y solo si, el 10% de los valores  $r_k^j$  sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie  $Q_i^j$  es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.

### 5.2.6.3. Prueba de bondad de ajuste

#### 1. Error estándar

Uno de los criterios mejor adoptados de selección para el tipo de distribución de funciones de probabilidad, de mejor ajuste a una muestra de datos, es el del error estándar (Kite, 1988, citado por Escalante & Reyes, 2008), que se expresa como:

$$EE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\hat{Q}_T^j - Q_T^j)^2}{n_j - mp} \right]^{1/2} \quad (21)$$

Donde:

EE = Error estándar

$Q_T^j$  = Eventos ordenados de mayor a menor con un período de retorno asignado

$T = \frac{n_j - 1}{m}$  y una probabilidad de no excedencia  $P = 1 - \frac{1}{T}$ .

$n_j$  = Longitud en años del registro analizado.

$m$  = número de orden del registro.

$m = 1$  para el evento más grande.

$m = n_j$  para el evento más chico.

$\hat{Q}_T^j$  = Eventos estimados por cierta distribución de probabilidad para cada período de Retorno  $T$  asignado a la muestra ordenada  $Q_T^j$ .

$mp$  = número de parámetros de la distribución ajustada.

La distribución de mejor ajuste será aquella que proporcione el mínimo valor de EE. Si una o más distribuciones tienen valores similares del EE, entonces se deberá optar por aquella distribución que tenga el menor número de parámetros.

Este procedimiento se realizó de manera automática a través del software AX del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

### **5.2.7. Análisis de frecuencia de eventos extremos**

El análisis de frecuencias relaciona los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Chow *et al.* 1994).

#### **1. Periodo de retorno**

El periodo de retorno  $T_r$ , expresado en años, se define como el número promedio de años en que un evento de magnitud dada  $x$  puede ser igualado o excedido por lo menos una vez en ese periodo de retorno (Fuentes y Franco, 1996; Escalante & Reyes, 2008).

$$T = \frac{1}{P(X > x)} = \frac{1}{[1 - P(X \leq x)]} \quad (22)$$

Para el presente trabajo se obtuvieron los periodos de retorno de 10, 25, 50 100, 200, 500, 1,000, 5,000 y 10,000, lo cual se realizó de manera automática, utilizando el software AX del CENAPRED; donde, después de elegir la función de probabilidad con menor error estándar, se extrapolaron los valores de gasto máximo anual para obtener los gastos máximos por periodo de retorno, y de precipitación máxima diaria, para obtener los valores de precipitación máxima probable correspondientes a los periodos de retorno citados.

### 5.2.8. Correcciones al valor de precipitación máxima diaria

Se realizó una corrección por intervalo fijo de observación donde la recomendación de Weiss (1964) citado por Campos (1998), es multiplicar los valores de lluvias máximas por 1.13 para obtener un valor de precipitación correspondiente a un tiempo de 24 horas.

### 5.2.9. Curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno (P-D-Tr)

La construcción de las curvas P-D-Tr, consiste en estimar la lluvia en milímetros de duración  $t$  (minutos) y periodo de retorno  $Tr$  (años), atendiendo a las recomendaciones de Campos (1990), solamente se utilizará la fórmula de Cheng-Lung Chen.

$$P_i^{Tr} = \frac{a \cdot P_1^{10} \log(10^{2-F} \cdot Tr^{F-1}) t}{60(t+b)^c} \quad (23)$$

Donde:

$P_1^{10}$  = Lluvia de duración de 1 hora y periodo de retorno de 10 años (mm).

$F$  = Cociente lluvia-periodo de retorno ( $F = P_t^{100} / P_t^{10}$ )

$Tr$  = Periodo de retorno (años)

$t$  = Tiempo (min)

$a$ ,  $b$  y  $c$  = Parámetros función del cociente  $R$

El cociente R, es el cociente lluvia-duración y se refiere a la cantidad de lluvia que cae en una hora con respecto de la lluvia total de 24 horas ( $R = P_1^{Tr} / P_{24}^{Tr}$ ).

Si bien, el procedimiento más conocido es el publicado por Campos (1990); recientemente Conde et al. (2014) publicó un procedimiento un tanto menos complicado y con resultados muy similares a los obtenidos anteriormente, por lo que en este caso utilizamos dicho procedimiento, con una modificación:

1. Se recopilaron los valores de precipitación máxima en 24 horas, asociados a los periodos de retorno de 10, 25, 50 100, 200, 500, 1,000, 5,000 y 10,000 años
2. El cociente R se obtuvo a través de una ecuación polinomial de segundo grado procedente de los valores encontrados por Campos (2010) en las 10 estaciones pluviográficas contrastadas para diferentes zonas geográficas del país:

$$R = - 0.000000009 * ELEV^2 + 0.0002 * ELEV + 0.3073 \quad ( 24)$$

Donde:

R = Cociente lluvia-duración.

ELEV = Elevación de la estación (msnm).

Sin embargo, atendiendo al trabajo de Campos (1990), que observó que los valores del coeficiente R se encontraban entre 0.3 y 0.65, cuando la ecuación generaba un valor mayor del límite superior, se limitó al valor de dicho límite.

3. El cociente F se obtuvo al dividir los valores de precipitación máxima en 24 horas asociados a los periodos de retorno de 100 y 10 años.
4. La determinación de los parámetros a, b y c se hizo con base en las siguientes ecuaciones:

$$Eca1 = - 4.1666 \cdot 10^{-6} \cdot R(\%)^4 + 5.2777 \cdot 10^{-4} \cdot R(\%)^3 \quad ( 25)$$

$$Eca2 = -1.6250 \cdot 10^{-2} \cdot R(\%)^2 + 0.6662 \cdot R(\%) - 1.5 \quad ( 26)$$

$$a = Eca1 + Eca2 \quad ( 27)$$

$$Ecb1 = - 2.7083 \cdot 10^{-6} \cdot R(\%)^4 + 4.1527 \cdot 10^{-4} \cdot R(\%)^3 \quad ( 28)$$

$$Eca2 = -2.4770 \cdot 10^{-2} \cdot R(\%)^2 + 0.9551 \cdot R(\%) - 11.25 \quad ( 29)$$

$$b = Ecb1 + Ecb2 \quad ( 30)$$

$$c = -0.00012 \cdot R(\%)^2 + 0.019 \cdot R(\%) + 0.1628 \quad ( 31)$$

Donde:

R (%) = Cociente lluvia-duración expresado en porcentaje.

5. El valor de precipitación de 1 hora y periodo de retorno de 10 años, se obtuvo de la multiplicación del valor R y la precipitación máxima en 24 horas, asociada al periodo de retorno de 10 años.
6. Se generaron las gráficas P-D-Tr con intervalos de tiempo de 1 hora para cada una de las estaciones climatológicas seleccionadas.

#### **5.2.10. Obtención del valor de precipitación representativo para la cuenca**

Dado que para cada cuenca se utilizó más de una estación climatológica para la obtención de información, los valores calculados con cada una de ellas para la precipitación máxima diaria y distintos periodos de retorno, fueron ponderados conforme a los polígonos de Thiessen para obtener el valor representativo de la cuenca.

De esta manera, se generó una gráfica P-D-Tr característica para cada cuenca de estudio; además, se calculó el valor de precipitación equivalente al tiempo de concentración en cada cuenca.

#### **5.2.11. Reducción por magnitud de cuenca**

Dado que se la lluvia máxima en 24 horas de una estación solo es representativa para 25 km<sup>2</sup>; al tener que abarcar una mayor superficie los valores deben ser reducidos. Por lo tanto, se calculó un Factor de Reducción Areal (FRA) para ajustar la

representatividad de la precipitación calculada por magnitud de cuenca, utilizando la siguiente ecuación (WMO, 1973; citado por Campos, 1998b):

$$1.012021-5.985305 \cdot 10^{-4} \cdot A + 1.39148 \cdot 10^{-6} \cdot A^2 - 1.54815510^{-9} \cdot A^3 + 6.1255610^{-13} \cdot A^4 \quad (32)$$

Donde

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

### 5.2.12. Cálculo de la precipitación efectiva

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación que da origen al escurrimiento directo; es decir, aquella que resulta después de cuantificar las abstracciones. En éste caso su cálculo se ha derivado del cálculo del número de escurrimiento, y el valor representativo de precipitación en las cuencas, utilizando la siguiente ecuación:

$$Pe = \frac{\left( P - \frac{5,080}{N} + 50.8 \right)^2}{P + \frac{20,320}{N} - 203.2} \quad (33)$$

Donde:

Pe = Precipitación efectiva (mm).

P = Precipitación calculada por periodo de retorno (mm).

N = Número de escurrimiento (adim.).

Como mencionamos anteriormente, se iguala la duración del exceso con el tiempo de concentración; después de conocer dicho valor para cada una de las microcuencas, se calcula el valor de la precipitación en cada microcuenca.

### 5.2.13. Cálculo de los gastos máximos

#### 1. Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT)

Este método es bastante consistente y por eso ha alcanzado la universalidad, pero requiere del conocimiento de las características fisiográficas de las microcuencas;

dicho método emplea la siguiente ecuación (U. S. Bureau of Reclamation, 1960, citado por Campos, 2010):

$$Q_{\text{máx}} = 0.208 \frac{A}{T_p} P_e \quad (34)$$

Donde:

$Q_{\text{máx}}$  = Gasto máximo (m<sup>3</sup>/s)

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

$P_e$  = Precipitación efectiva (mm)

$T_p$  = Tiempo pico (h)

Mientras que el tiempo pico se determinó utilizando las fórmulas siguientes (Chow, 1979, citado por Aparicio, 1992):

Para cuencas pequeñas ( $\leq 250 \text{ km}^2$ ):

$$T_p = \frac{T_c}{2} + 0.6 \cdot T_c \quad (35)$$

Para cuencas grandes ( $>250 \text{ km}^2$ ):

$$T_p = \sqrt{T_c} + 0.6 \cdot T_c \quad (36)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (h).

## 2. Método TR-55

Este método permite estimar gastos procedentes de cuencas pequeñas y medianas, utiliza un hietograma regional de 24 horas de duración, el número de escurrimiento (N) y un gasto pico unitario. Además de 3 tipos de tormenta que tienen semejanza con la llamada tormenta balanceada; para México, la tormenta tipo I es aplicable en la península de Baja California, la tormenta tipo III en la costa del Golfo de México y el sureste mexicano y por último la tormenta tipo II en el resto del país (NRCS, 1986, citado por Campos, 2010).

De acuerdo con la ubicación de las cuencas, se utilizó la tormenta tipo II y III; cuyos parámetros de muestran en el Cuadro 6.

**Cuadro 6.** Parámetros para el cálculo del gasto pico unitario, función del tipo de tormenta y del cociente  $Ia/Pc$

Tipo de tormenta	$Ia/Pc$	$C_0$	$C_1$	$C_2$
II	0.10	2.55323	-0.61512	-0.16403
	0.15	2.53125	-0.61698	-0.15217
	0.20	2.50928	-0.61885	-0.14030
	0.25	2.48730	-0.62071	-0.12844
	0.30	2.46532	-0.62257	-0.11657
	0.35	2.41896	-0.61594	-0.08820
	0.40	2.36409	-0.59857	-0.05621
	0.45	2.29238	-0.57005	-0.02281
	0.50	2.20282	-0.51599	-0.01259
III	0.10	2.47317	-0.51848	-0.17083
	0.15	2.45395	-0.51687	-0.16124
	0.20	2.43473	-0.51525	-0.15164
	0.25	2.41550	-0.51364	-0.14205
	0.30	2.39628	-0.51202	-0.13245
	0.35	2.35477	-0.49735	-0.11985
	0.40	2.30726	-0.46541	-0.11094
	0.45	2.24876	-0.41314	-0.11508
	0.50	2.17772	-0.36803	-0.09525

Fuente: Campos (2010).

El Gasto máximo se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{máx}} = q_u \cdot P_e \cdot F_p \cdot A \quad (37)$$

Donde:

$q_u$  = Gasto pico unitario en  $m^3/s$  por cm de lluvia en exceso y  $km^2$  de área de la cuenca.

$P_e$  = Precipitación efectiva en centímetros, correspondiente a lluvia de 24 horas de duración y periodo de retorno.



Fp = Factor de ajuste por cuerpos de agua, según el porcentaje de los mismos; toma los valores siguientes: 0% - 1.00, 0.2% - 0.97, 1% - 0.87, 3% - 0.75 y 5% - 0.72

A = Área de la cuenca en km<sup>2</sup>.

El gasto pico unitario (qu) se estima con la ecuación siguiente:

$$\log(\text{qu}) = C_0 + C_1 \cdot \log(T_c) + C_2[\log(T_c)]^2 - 2.366 \quad (38)$$

Donde:

qu = Gasto pico unitario en m<sup>3</sup>/s por cm de lluvia en exceso y km<sup>2</sup> de área de la cuenca.

T<sub>c</sub> = Tiempo de concentración de la cuenca en horas.

C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> = Son coeficientes que se obtienen del Cuadro 6 en función del tipo de tormenta y del cociente *Ia/Pc*

*Ia* son las pérdidas iniciales durante la tormenta (en función del número de escurrimiento, N) y *Pc* es la lluvia de duración de 24 horas y periodo de retorno (ambas en mm). Cuando *Ia/Pc* < 0.10 se utilizan los valores de C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> correspondientes a 0.10, cuando *Ia/Pc* > 0.50 se emplean los de 0.5; para valores intermedios se interpola o se adopta el más cercano. El valor de *Ia* se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$Ia = 0.20 \cdot S \quad (39)$$

Siendo

$$S = \left( \frac{25,400}{N} - 254 \right) \quad (40)$$

Donde:

S = Retención máxima potencial, (mm).

N = Número de escurrimiento, (adim.).

### 3. Método del Hidrograma Unitario de Clark

Este método se basa en el concepto de que, la traslación del flujo a través de una cuenca hidrográfica se puede describir mediante isócronas de escurrimiento y el hidrograma correspondiente del área contribuyente en función del tiempo de retraso por el tránsito de agua lo largo de la cuenca (Nicklow *et al.* 2006).

Para los cálculos se definió un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) de 0.5 h; calculándose las áreas tributarias con la siguiente ecuación (HEC, 2000):

$$A_t = A \cdot 1.414 \left( \frac{t}{T_c} \right)^{1.5} \quad (41)$$

Donde:

$A_t$  = Área acumulada hasta la isocrona  $t$  ( $\text{km}^2$ ).

$A$  = Área total de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

$t$  = Isócrona considerada (h).

$T_c$  = Tiempo de concentración (h).

El área correspondiente a cada isocrona, se derivó por diferencias entre las áreas acumuladas de isócronas.

Los valores de gasto se calcularon mediante la siguiente ecuación (Sánchez, 2017):

$$Q_i = \frac{I_{i-1} + I_i}{2} \cdot c + Q_{i-1} \cdot (1-c) \quad (42)$$

Siendo

$$c = \frac{2 \cdot \Delta t}{2R + \Delta t} \quad (43)$$

Donde:

$Q_i$  = Gasto de salida en el tiempo  $t_i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$Q_{i-1}$  = Gasto de salida en el tiempo  $t_{i-1}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$I_i$  = Gasto de entrada en el tiempo  $t_i$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$I_{i-1}$  = Gasto de entrada en el tiempo  $t_{i-1}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$\Delta t$  = Incremento de tiempo entre los tiempos  $t_{i-1}$  y  $t_i$  (h).

R = Coeficiente de almacenamiento (adim).

El coeficiente de almacenamiento (R) se asumió coincidente con el tiempo de retraso en una cuenca (Tr); estimándolo de la siguiente manera (Mockus 1957; Simas 1996):

$$R = 0.6 \cdot T_c \quad (44)$$

Donde:

$T_c$  = Tiempo de concentración (h).

#### **5.2.14. Estimación de las variaciones en los gastos máximos obtenidos por métodos hidrológicos e hidrométricos.**

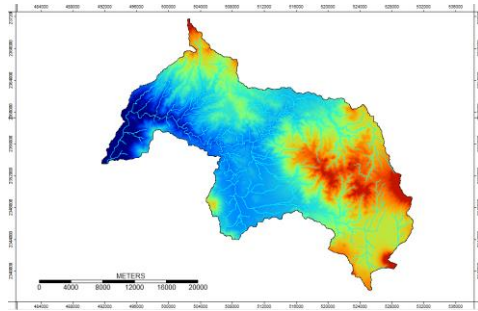
Considerando que los resultados provenientes de las estaciones hidrométricas tienen mayor confiabilidad; se ha estimado la diferencia relativa entre los valores de gasto máximo obtenidos por métodos hidrológicos y el ajuste de funciones de probabilidad aplicado a los datos hidrométricos, para ello se ha utilizado la siguiente expresión:

$$\Delta Q_{\text{máx}} = \left( \frac{Q_{\text{máx}}^{\text{Hidrológico}} - Q_{\text{máx}}^{\text{Hidrométrico}}}{Q_{\text{máx}}^{\text{Hidrométrico}}} \right) 100 \quad (45)$$

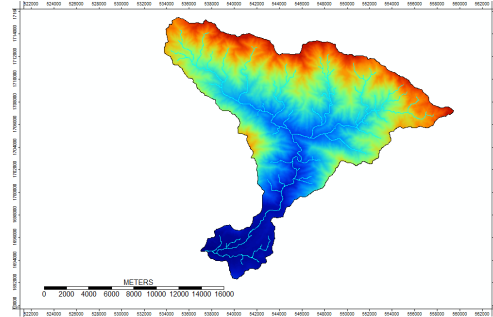
## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1. Delimitación de las cuencas.**

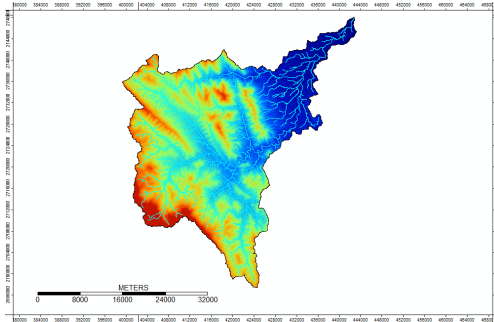
Los criterios utilizados para la determinación de las cuencas fueron estrictamente topográficos e hidrográficos. Es decir, límites que obedecen únicamente a demarcaciones naturales; en la Figura 3 se muestran las cuencas delimitadas



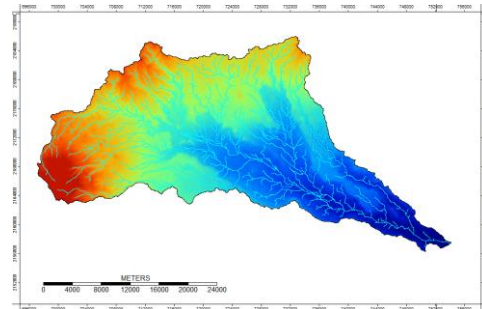
a) Cuenca del Río Huicila (13001)



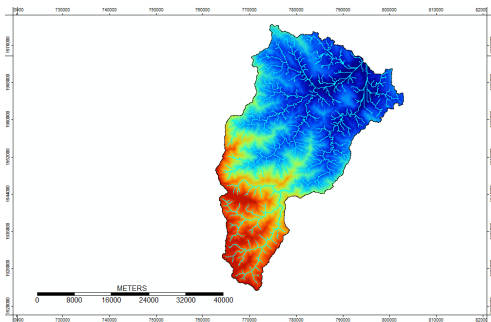
b) Cuenca del Río Cintalapa (23016)



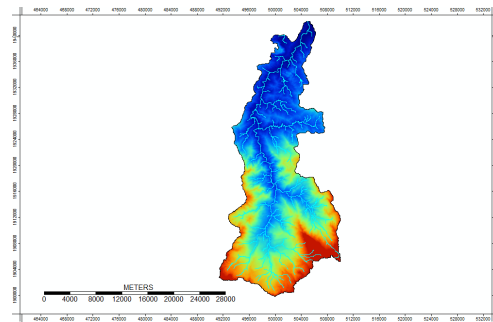
c) Cuenca del Río Pablillo (25010)



d) Cuenca del Río Actopan (28030)



e) Cuenca del Río Valle Nacional (28056)



f) Cuenca del Río Teapa (30032)

**Figura 3.** Superficie delimitada para las cuencas de estudio, tomando como punto de salida, la ubicación de las estaciones hidrométricas.

Partiendo de los archivos vectoriales generados de las cuencas y utilizando los Modelos Digitales de Elevación, se determinaron las características principales de las mismas; además, se investigaron las características climatológicas y los regímenes de precipitación y humedad predominantes (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Características de las cuencas incluidas para su estudio.

<b>Características</b>	<b>13001: Río Huicicila</b>	<b>23016: Río Cintalapa</b>	<b>25010: Río Pablillo</b>	<b>28030: Río Actopan</b>	<b>28056: Río Valle Nacional</b>	<b>30032: Río Teapa</b>
Área (km <sup>2</sup> )	541.90	227.08	973.95	790.26	1,115.61	427.81
Perímetro (km)	151.04	96.06	277.14	173.94	189.87	139.63
Longitud del cauce principal (km)	72.24	39.24	91.01	84.42	85.14	60.58
Elevación del punto más alto (m)	2,242.00	2,758.00	3,162.00	3,147.00	3211.00	2460.00
Elevación del punto más bajo (m)	87.00	84.00	351.00	178.00	1.00	0
Pendiente media del cauce principal (adim.)*	0.020	0.036	0.013	0.029	0.017	0.004
Tipo de cuenca	Exorreica	Exorreica	Exorreica	Exorreica	Exorreica	Exorreica
Rango de precipitación anual (mm)	800-1,500	1,500-3,500	600-1,000	600-1,800	1,200-3,500	2,000-4,000
Régimen de humedad predominante (días)	180-270	180-270	180-270	270-330	330-365	330-365
Clima predominante	Semicálido subhúmero	Semicálido húmero	Semicálido subhúmero	Templado húmedo	Cálido húmedo	Cálido húmedo

\*La pendiente media se calculó utilizando el criterio de Taylor-Schwarz

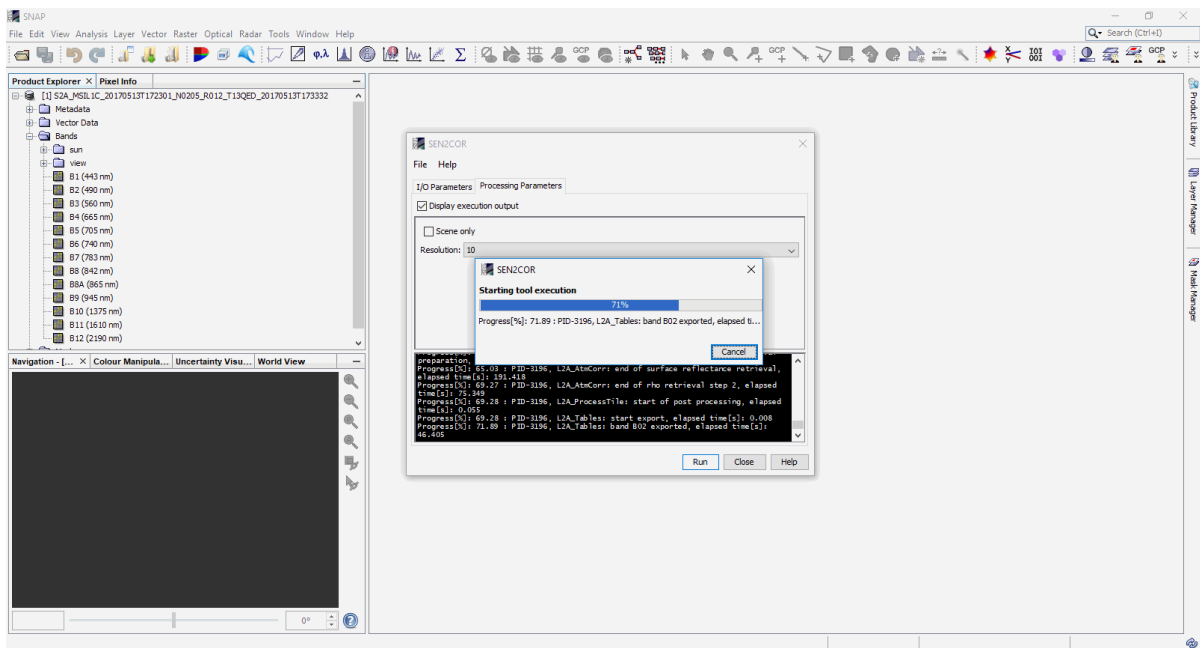
Como puede observarse, las 6 cuencas hidrográficas representan gran gama de las condiciones:

- Se ubican en las zonas climáticas con precipitación promedio anual que oscila entre los 600 a 4,000 mm lo que corresponde a las zonas de semiáridas a tropicales húmedas. Aunque hay que tomar en cuenta que los menores rangos de precipitación ocupan solamente una parte de la cuenca, sobre todo en la zona norte del estado de Veracruz y Nuevo León.
- Las áreas varían entre 200 y 1,100 km<sup>2</sup>.
- Las pendientes medias de sus superficies varían entre 0.09 y 0.13.

- Las pendientes medias de sus cauces principales varían entre 0.004 y 0.04.

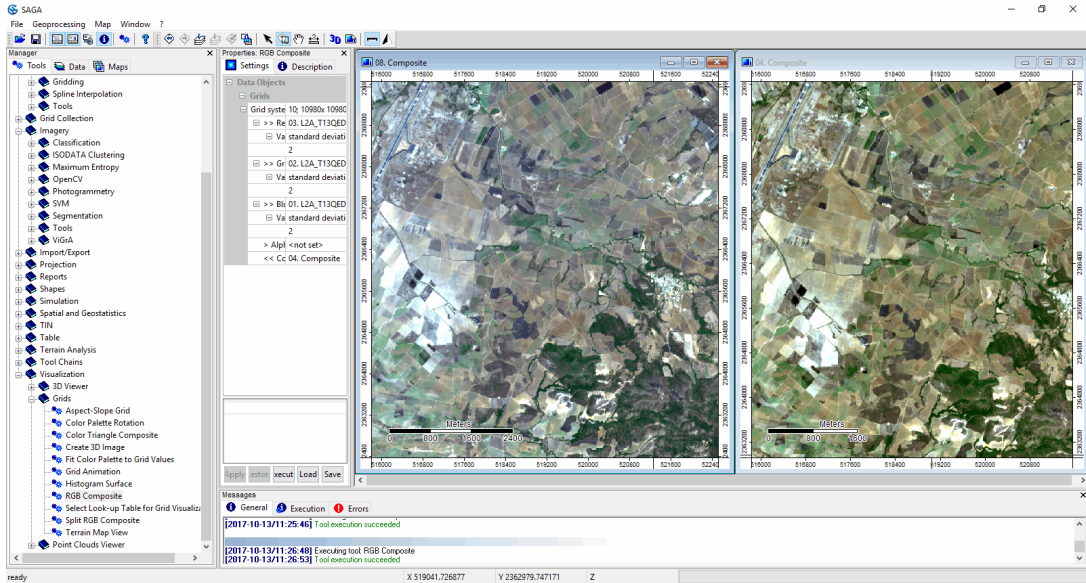
## 6.2. Procesamiento de Imágenes Satelitales

Respecto de la corrección aplicada a las imágenes satelitales, el procesamiento llevado a cabo para la corrección atmosférica se muestra a continuación; donde se utilizó la herramienta Sen2cor dentro del ámbito de una Plataforma de Aplicaciones para imágenes Sentinel (SNAP por sus siglas en inglés). En la Figura 4 se muestra la interfaz del programa y el procesamiento de información.



**Figura 4.** Interfaz de la Plataforma de Aplicaciones para imágenes Sentinel (SNAP)

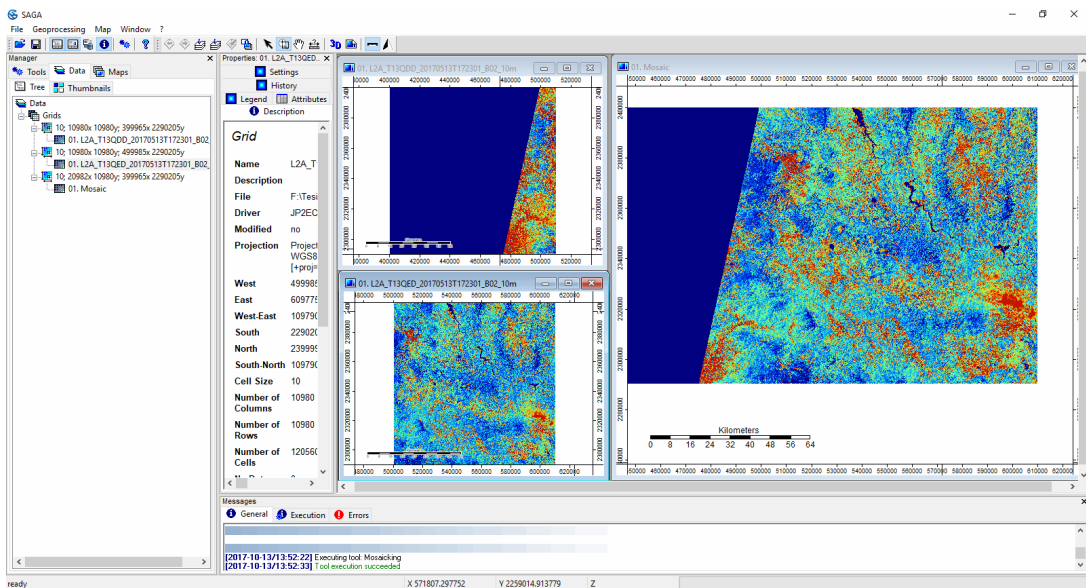
Una vez que se llevaron las bandas a un nivel de procesamiento 2A, se realizaron los procedimientos para la construcción de imágenes en color verdadero, utilizando el software SAGA GIS. Para ejemplificar las diferencias existentes entre los niveles de procesamiento 1C y 2A, en la Figura 5 se muestra muestran los resultados.



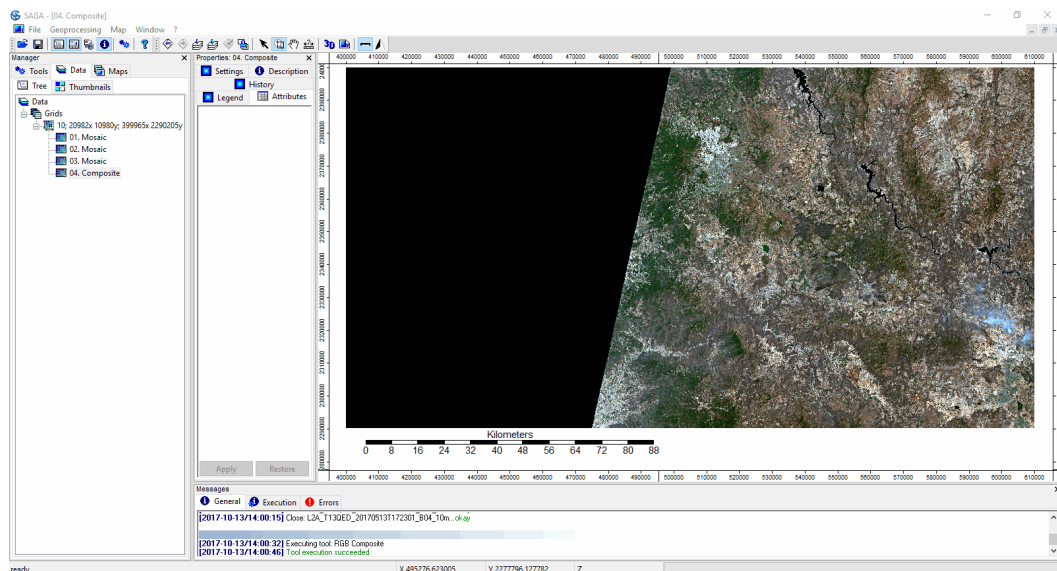
**Figura 5.** Imágenes en color verdadero creadas a partir de archivos corregidos atmosféricamente (derecha) y sin corregir (izquierda).

Puede notarse que el proceso de corrección atmosférica mejora significativamente la calidad de las imágenes, lo que permite mejorar los análisis posteriores.

En los casos donde se requirió de más de una escena provista por el satélite, se realizaron los procedimientos para la fusión de bandas y posterior creación de una imagen única, tal y como se muestra en la Figura 4 y Figura 5.



**Figura 6.** Fusión de la banda 2 para dos escenas tomadas por el satélite SENTINEL 2A.



**Figura 7.** Imágenes en color verdadero creadas a partir de dos escenas tomadas por satélite.

### 6.3. Determinación de los parámetros hidrológicos que caracterizan la respuesta de una cuenca a la precipitación en exceso.

#### 6.3.1. Tiempo de concentración

Para la aplicación de los modelos lluvia-escorrentamiento, se asume que la duración de la lluvia es igual al tiempo de concentración de la cuenca; los resultados obtenidos para cada una de las cuencas consideradas en el presente estudio se muestran en el Cuadro 8, mismos que se han obtenido utilizando la ecuación (7).

**Cuadro 8.** Características de altimétricas de las cuentas y tiempo de concentración.

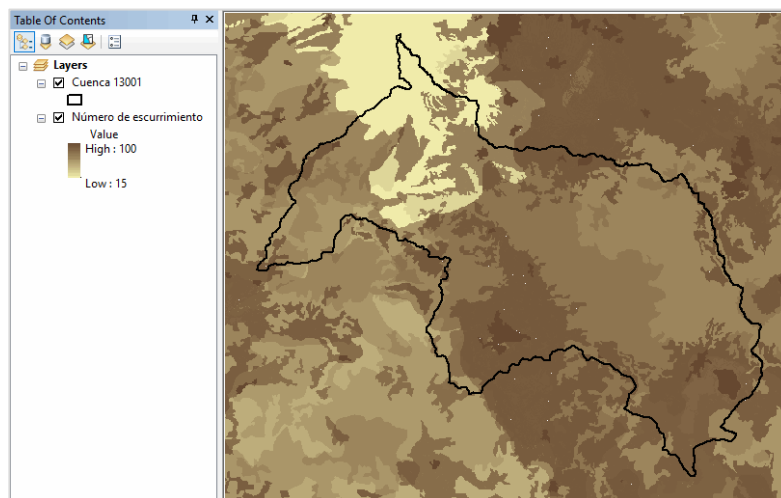
Cuencas	Elevación Máxima (m)	Elevación Mínima (m)	Lc (km)	S (adim.)	Tiempo de concentración (h)
13001: Río Huicicila	1,722.00	87.00	72.24	0.020	8.00
23016: Río Cintalapa	2,526.00	84.00	39.24	0.036	4.00
25010: Río Pablillo	3,159.00	351.00	91.01	0.013	11.40
28030: Río Actopan	3,104.00	178.00	84.42	0.029	7.94
28056: Río Valle Nacional	3,080.00	1.00	85.14	0.017	9.69
30032: Río Teapa	2,460.00	0.00	60.58	0.004	13.18

Nota: Lc es la longitud total del recorrido más largo;  $S_c$  es la pendiente media del cauce del recorrido más largo.

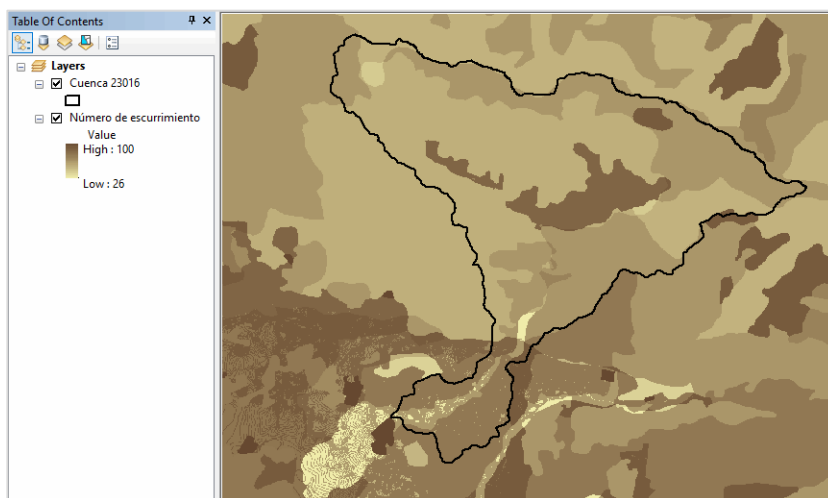


### 6.3.2. Número de escurrimiento

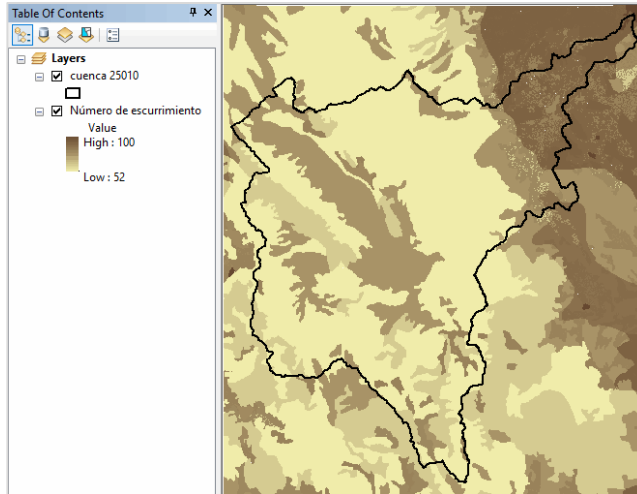
Partiendo de la información relativa a edafología, pendiente superficial, uso del suelo y vegetación actualizado con imágenes satelitales, se elaboraron archivos raster donde se puede notar la variación del número de escurrimiento. Para ello se tomaron superficies mayores a las de las cuencas, con la finalidad de evitar información faltante. De la Figura 8 a la Figura 13 se muestran los resultados obtenidos, donde se indican los rangos en los que variaron los números de escurrimiento para las zonas delimitadas.



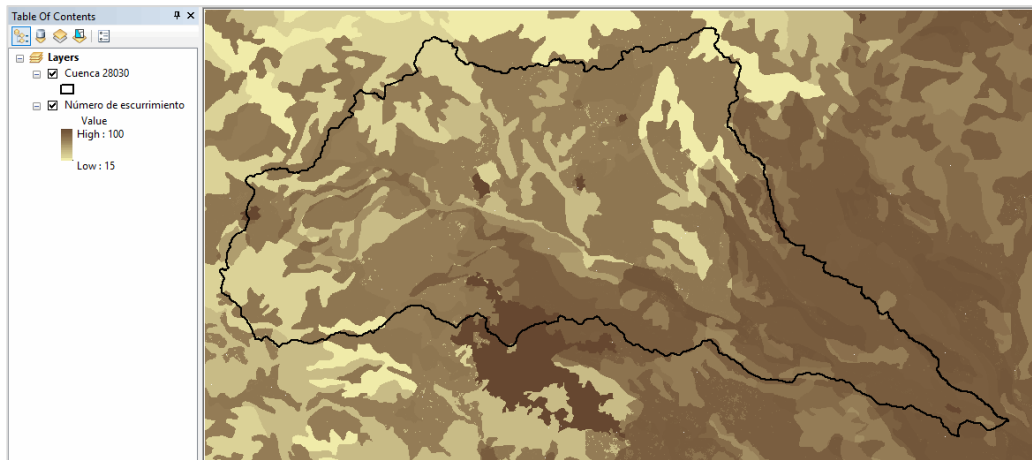
**Figura 8.** Número de escurrimiento característico de la cuenca 13001: Río Huicicila.



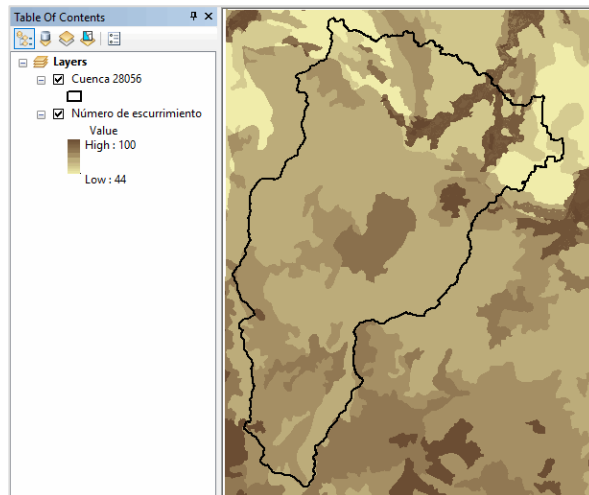
**Figura 9.** Número de escurrimiento característico de la cuenca 23016: Río Cintalapa.



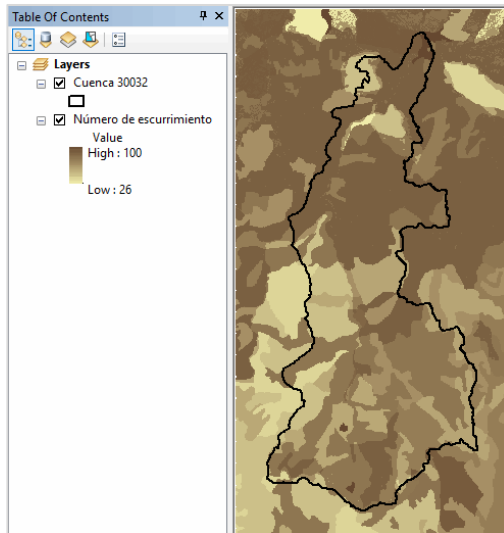
**Figura 10.** Número de escurrimiento característico de la cuena 25010: Río Pablillo.



**Figura 11.** Número de escurrimiento característico de la cuena 28030: Río Actopan.



**Figura 12.** Número de escurrimiento característico de la cuena 28056: Río Valle Nacional.



**Figura 13.** Número de escurrimiento característico de la cuenca 30032: Río Teapa.

Si bien existe un rango de variación obtenido; para determinar el número de escurrimiento de cada cuenca se procedió a recortar el raster correspondiente a la cuenca y posteriormente se ponderaron los valores, obteniéndose así los siguientes números de escurrimiento por cuenca:

Cuenca 13001 (Río Huicicila): N = 73

Cuenca 23016 (Río Cintalapa): N = 68

Cuenca 25010 (Río Pablillo): N = 62

Cuenca 28030 (Río Actopan): N = 66

Cuenca 28056 (Río Valle Nacional): N = 64

Cuenca 30032 (Río Teapa): N = 76

#### **6.4. Estaciones climatológicas seleccionadas para las zonas de estudio**

De acuerdo con el inventario de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional, se realizó la ubicación de las mismas a partir de sus coordenadas geográficas y posteriormente se seleccionaron aquellas que cumplieran con los requisitos previamente establecidos. Del Cuadro 9 al Cuadro 14 se presentan las estaciones seleccionadas en cada cuenca de estudio, sus propiedades y el porcentaje de influencia sobre la cuenca (obtenido con el método de Polígonos de Thiessen).

**Cuadro 9.** Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 13001 (Río Huicicila)

No.	Clave	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnmm)	No. datos	Periodo de registro	Área en la cuenca (km <sup>2</sup> )	% de influencia
1	18006	Compostela	21° 14' 00"	104° 55' 00"	834.0	28	1948-1950; 1952-1976	70.91	13.09%
2	18010	El Refilion	21° 18' 34"	104° 54' 24"	800.0	30	1969-1978;1980-1998; 2013	92.00	16.98%
3	18023	Miravalles	21° 17' 56"	104° 52' 36"	933.0	49	1961-1978; 1980-2008; 2013-2014	158.23	29.20%
4	18025	Paso de Arocha	21° 16' 31"	105° 04' 52"	84.0	60	1949-1978; 1980-2009	7.32	1.35%
5	18038	Tepic	21° 30' 00"	104° 53' 00"	935.0	38	1951; 1954-1978; 1980-1991	4.07	0.75%
6	18040	Tetitlán (CFE)	21° 07' 00"	104° 36' 00"	779.0	33	1956-1988	12.65	2.33%
7	18077	Cuastecomatillo	21° 02' 35"	104° 45' 14"	720.0	27	1981-2000; 2005-2009;2013-2014	19.91	3.67%
8	18079	Trigomil	21° 22' 29"	104° 47' 30"	1,194.0	30	1981-2010	82.08	15.15%
9	18083	Cumbres de Huicicila	21° 19' 05"	105° 00' 47"	960.0	24	1982-1989; 1991-2001; 2006-2009; 2013	94.73	17.48%
								541.90	100.00%

**Cuadro 10.** Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 23016 (Río Cintalapa).

No.	Clave	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnmm)	No. datos	Periodo de registro	Área en la cuenca (km <sup>2</sup> )	% de influencia
1	7048	Finca El Triunfo	15° 20' 53"	92° 32' 55"	822.0	26	1952-1977	59.63	26.26%
2	7053	Escuintla (DGE)	15° 19' 51"	92° 39' 21"	92.0	40	1965-1979; 1987-1988; 1990-2000; 2002-2004; 2006-2012; 2014-2015	12.75	5.61%
3	7348	Independencia	15° 20' 54"	92° 34' 42"	112.0	28	1946-1947; 1949-1956; 1960-1964; 1970; 1973-1976; 1983; 1985-1987; 2012-2015.	106.00	46.68%
4	7390	Cacaluta	15° 21' 54"	92° 43' 52"	80.0	31	1973-1984; 1986; 1988-2000; 2002-2016	23.12	10.18%
5	7393	Finca La Paz	15° 20' 48"	92° 28' 34"	973.0	35	1970-1998; 2000-2015	25.59	11.27%
								541.90	100.00%

**Cuadro 11.** Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 25010 (Río Pablillo).

No.	Clave	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnmm)	No. datos	Periodo de registro	Área en la cuenca (km <sup>2</sup> )	% de influencia
1	19027	Iturbide	24° 43' 31"	99° 54' 17"	1,462.0	68	1941-1942; 1947-2006; 2008-2011; 2014-2015	267.64	27.48%
2	19034	Pablillo (SMN)	24° 51' 25"	99° 33' 20"	346.0	45	1924-1925; 1927-1951; 1953-1954; 1956-1958; 1960, 1962-1966-1971; 1974-1975	13.62	1.40%
3	19035	Camacho	24° 52' 19"	99° 34' 44"	350.0	67	1948-2006; 2008-2015	2.78	0.28%
4	19091	Pablillo (DGE)	24° 35' 39"	99° 59' 49"	2,073.0	41	1975-2015	89.02	9.14%
5	19100	San Francisco La carrera	24° 41' 39"	99° 40' 03"	514.0	22	1997-1983; 1985; 1997-1998; 2000-2005; 2008-2013	196.47	20.17%
6	19111	La Ascención	24° 19' 22"	99° 54' 37"	1,980.0	21	1980-1985; 1997-1998; 2000-2006; 2008; 2010-2015	28.96	2.97%
7	19144	Cieneguitas y crucitas	24° 31' 04"	99° 58' 47"	2,530.0	36	1975-1978; 1980-1983; 1985; 1988-2008; 2010-2015	166.36	17.08%
8	19147	Las crucitas	24° 46' 52"	99° 41' 52"	500.0	20	1981; 1985; 1997-2006; 2008-2015	90.90	9.33%
9	19155	La Poza	24° 42' 57"	100° 00' 57"	1,750.0	28	1982-1983; 1985; 1987-2005; 2008; 2011-2015	19.65	2.02%
10	28060	Villa Mainero	24° 32' 44"	99° 37' 00"	492.0	48	1964-2007; 2009-2012	98.55	10.12%
								973.95	100.00%

**Cuadro 12.** Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 28030 (Río Actopan).

No.	Clave	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnmm)	No. datos	Periodo de registro	Área en la cuenca (km <sup>2</sup> )	% de influencia
1	30003	Actopan	19° 30' 10"	96° 36' 40"	250.0	64	1952-2015	52.51	6.64%
2	30007	Almolonga	19° 35' 18"	96° 47' 03"	730.0	43	1970-2012	172.91	21.88%
3	30040	Chiconquiaco	19° 44' 35"	96° 49' 05"	2,063.0	20	1965-1984	75.07	9.50%
4	30089	Las minas (CFE)	19°41' 23"	97° 08' 51"	1,415.0	52	1949-2000	53.87	6.82%
5	30097	Los pescados (CFE)	19° 33' 41"	97° 08' 53"	2,395.0	46	1964-2002; 2004-2007; 2009-2012	51.09	6.46%
6	30114	Naolinco de Victoria	19° 39' 07"	96° 52' 23"	1,542.0	61	1955-2015	176.37	22.32%
7	30175	Tembladeras	19° 30' 44"	97° 07' 05"	3,102.0	49	1966-2014	14.99	1.90%
8	30195	Emiliano Zapata (CFE)	19° 29' 00"	96° 47' 00"	924.0	44	1964-1971; 1973-1984; 1986-2009	6.84	0.87%
9	30228	Jalapa de Enriquez (DGE)	19° 31' 05"	96° 53' 54"	1,365.0	28	1953-1980	2.29	0.29%
10	30267	La Concepcion	19° 36' 17"	96° 54' 00"	1,000.0	42	1974-2015	164.75	20.85%
11	30452	Briones	19° 30' 30"	96° 56' 58"	1,349.0	32	1984-2015	19.57	2.48%
								790.26	100.00%

**Cuadro 13.** Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 28056 (Río Valle Nacional).

No.	Clave	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnmm)	No. datos	Periodo de registro	Área en la cuenca (km <sup>2</sup> )	% de influencia
1	20004	San Juan Atepec	17° 25' 59"	96° 32' 59"	1975	49	1955-1984; 1991-1993; 1995; 2000-2010; 2012-2015	83.91	7.52%
2	20041	Ixtlán de Juárez	17° 19' 59"	96° 28' 59"	2312	48	1955-1984; 1991-1993; 1995; 2000-2013	22.21	1.99%
3	20042	Santa María Jacatepec	17° 52' 00"	96° 12' 00"	47	53	1955-1984; 1991-1993; 1995; 1997-1998; 2000-2014	39.67	3.56%
4	20064	San Pablo Macuilianguis	17° 32' 48"	96° 34' 00"	2139	32	1955-1984; 1986-1987	65.51	5.87%
5	20114	San Lucas Arroyo Paloma	17° 50' 19"	96° 22' 03"	346	44	1954-1984; 2001-2006; 2009-2015	151.56	13.59%
6	20136	Santiago Progreso	17° 42' 24"	96° 15' 57"	134	24	1984-1961	325.36	29.16%
7	20175	Valle Nacional	17° 46' 59"	96° 19' 00"	82	44	1961-1984; 1991-1993; 1995-1997; 2000-2006; 2009-2015	204.86	18.36%
8	20183	San Juan Yae	17° 25' 59"	96° 16' 59"	1440	38	1955-1984; 1992-1995; 2000; 2003-2006	42.08	3.77%
9	20279	Soyalapa (CFE)	17° 35' 49"	96° 33' 38"	2193	25	1976-2000	180.46	16.18%
								1115.62	100.00%

**Cuadro 14.** Estaciones climatológicas para obtención de información pluviométrica en la cuenca 30032 (Río Teapa).

No.	Clave	Nombre	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnmm)	No. datos	Periodo de registro	Área en la cuenca (km <sup>2</sup> )	% de influencia
1	7032	Chapultenango	17° 20' 00"	93° 06' 00"	600	26	1952-1977	18.92	4.42%
2	7167	Tapilula	17° 14' 55"	93° 00' 48"	780	40	1965-1979; 1987-1988; 1990-2000; 2002-2004; 2006-2012; 2014-2015	211.02	49.33%
3	7186	Finca El escalón	17° 21' 00"	92° 50' 00"	680	28	1946-1947; 1949-1956; 1960-1964; 1970; 1973-1976; 1983; 1985-1987; 2012-2015	9.24	2.16%
4	7217	Solosuchiapa	17° 25' 42"	93° 01' 43"	165	31	1973-1984; 1986; 1988-2000; 2002-2016	141.93	33.18%
5	27024	La Huasteca	17° 31' 12"	92° 55' 36"	80	35	1970-1983; 1994-1998; 2000-2015	8.59	2.01%
6	27044	Teapa (DGE)	17° 32' 56"	92° 57' 12"	51	53	1960-1970; 1972-2012; 2015	26.71	6.24%
7	27045	Teapa (SMN)	17° 34' 00"	92° 58' 00"	54	63	1924-1960; 1986-1962; 1988	2.94	0.69%
8	27061	Puyacatengo	17° 30' 48"	92° 55' 12"	86	40	1972-2003; 2006; 2008; 2010-2012; 2014-2016	4.91	1.15%
9	27068	Campo Experimental Puyacatengo	17° 31' 38"	92° 55' 50"	78	35	1974-1997; 2001-2005; 2011-2016	3.54	0.83%
								427.81	100.00%



El número de las estaciones climatológicas seleccionadas para la obtención de información pluviométrica, varía entre 5 y 11. El área media que representa una estación climatológica dentro de la cuenca varía desde los 3 km<sup>2</sup> hasta los 320 km<sup>2</sup>, debido a la escasa densidad de estaciones en algunas zonas del país; esta situación conlleva un problema especial respecto de la precisión o fiabilidad de las estimaciones, pues 2 factores que influyen en los resultados, son la cantidad y calidad de los datos disponibles (WMO, 2009). Además, Campos (1998) menciona que los valores puntuales recogidos en estaciones pluviométricas, solamente son representativos para 25 km<sup>2</sup>

## 6.5. Análisis estadístico de los registros anuales de hidrometría y pluviometría.

### 6.5.1. Análisis de Homogeneidad o consistencia

Se aplicaron tres pruebas de Homogeneidad a cada una de las estaciones tanto hidrométricas y climatológicas, con finalidad de establecer la confiabilidad de ellas.

#### 6.5.1.1. Estaciones hidrométricas

Los resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas se presentan del Cuadro 15 al Cuadro 18

#### 6.5.2. Prueba estadística de Helmer

**Cuadro 15.** Resultados de la prueba estadística de Helmer aplicada a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas.

Parámetros	Estación 13001: Paso de Arocha	Estación 23016: Cintalapa	Estación 25010: Pablillo	Estación 28030: Actopan	Estación 28056: Jacatepec	Estación 30032: Teapa
$\bar{x}$	200.94	138.74	185.91	238.54	1464.67	823.41
Secuencias	37.00	26.00	34.00	30.00	29.00	36.00
Cambios	18.00	7.00	28.00	31.00	25.00	19.00
$\sqrt{n-1}$	7.42	5.74	7.87	7.81	7.35	7.42
S-C	19.00	19.00	6.00	-1.00	4.00	17.00
Resultado	Serie NO homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea

### 6.5.3. Prueba estadística t de Student

**Cuadro 16.** Resultados de la prueba estadística t de Student aplicada a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas.

Parámetros	Estación 13001: Paso de Arocha	Estación 23016: Cintalapa	Estación 25010: Pablillo	Estación 28030: Actopan	Estación 28056: Jacatepec	Estación 30032: Teapa
n	56	34	63	62	55	56
n <sub>1</sub>	28	17	32	31	28	28
n <sub>2</sub>	28	17	31	31	27	28
$\bar{x}_1$	319.70	201.29	148.41	264.63	1528.82	987.36
$\bar{x}_2$	82.19	76.19	224.62	212.45	1398.14	659.46
s <sub>1</sub>	283.77	158.71	132.10	291.84	540.88	494.63
s <sub>2</sub>	88.67	74.84	384.85	198.95	597.66	576.12
t <sub>d</sub>	4.15	2.85	-1.04	0.81	0.84	2.24
gl	54.00	32.00	61.00	60.00	53.00	54.00
α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>c</sub>	1.67	1.69	1.67	1.67	1.67	1.67
Resultado	Serie NO homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea

### 6.5.4. Prueba estadística de Cramer

**Cuadro 17.** Resultados de la prueba estadística de Cramer aplicada a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas.

Parámetros	Estación 13001: Paso de Arocha	Estación 23016: Cintalapa	Estación 25010: Pablillo	Estación 28030: Actopan	Estación 28056: Jacatepec	Estación 30032: Teapa
n <sub>100</sub>	56	34	63	62	55	56
n <sub>60</sub>	34	20	38	37	33	34
n <sub>30</sub>	17	10	19	19	16	17
$\bar{x}_{100}$	200.94	138.74	185.91	238.54	1464.67	823.41
$\bar{x}_{60}$	111.63	134.34	208.05	220.92	1440.73	822.64
$\bar{x}_{30}$	73.26	31.50	269.09	237.46	1369.77	679.65
s	240.31	137.69	286.12	249.09	567.99	557.15
T <sub>60</sub>	-0.37	-0.03	0.08	-0.07	-0.04	0.00
T <sub>30</sub>	-0.53	-0.78	0.29	0.00	-0.17	-0.26
t <sub>60</sub>	3.83	0.22	0.75	0.67	0.38	0.01

Parámetros	Estación 13001: Paso de Arocha	Estación 23016: Cintalapa	Estación 25010: Pablillo	Estación 28030: Actopan	Estación 28056: Jacatepec	Estación 30032: Teapa
$t_{30}$	2.75	3.29	1.52	0.02	0.78	1.27
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	1.67	1.69	1.67	1.67	1.67	1.67
Resultado	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

### 6.5.5. Resumen

**Cuadro 18.** Resultados de las pruebas estadísticas aplicadas a las series de gastos máximos registrados en las estaciones hidrométricas.

Prueba estadística	Estaciones hidrométricas					
	13001: Paso de Arocha	23016: Cintalapa	25010: Pablillo	28030: Actopan	28056: Jacatepec	30032: Teapa
Helmert	S NH	S NH	S H	S H	S H	S NH
t de Student	S NH	S NH	S H	S H	S H	S NH
Cramer	S NH	S H	S H	S H	S H	S H

S NH: Serie no homogénea; SH: Serie homogénea.

De los resultados obtenidos en las pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series hidrométricas, encontramos que solamente 3 cuencas cuentan con información consistente; donde las 3 pruebas dieron como resultado que sus datos observaban un comportamiento homogéneo; entre ellas se incluyen las estaciones hidrométricas ubicadas en el Río Palillo, Río Actopan y Río Valle Nacional.

Campos (1998) menciona que cuando una serie resulta no homogénea, se deben hacer ajustes o correcciones; sin embargo, en el presente trabajo los procedimientos de cálculo se realizaron utilizando las 6 series de datos, tratando de identificar el comportamiento resultante cuando se extrapolan valores (los correspondientes a los periodos de retorno).

### 6.5.5.1. Estaciones climatológicas

Para el caso de las estaciones climatológicas, los resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria se muestran del Cuadro 19 al Cuadro 24; donde se han ordenado de acuerdo con la cuenca en la que se utilizarán para la obtención de información.

**Cuadro 19.** Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 13001: Río Huicicila.

Prueba estadística	Estaciones climatológicas (Cuenca 13001: Río Huicicila)								
	18006	18010	18023	18025	18038	18040	18077	18079	18083
Helmert	S NH	S NH	S NH	S NH	S H	S H	S H	S NH	S H
t de Student	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H
Cramer	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H

S NH: Serie no homogénea; SH: Serie homogénea.

**Cuadro 20.** Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 23016: Río Cintalapa.

Prueba estadística	Estaciones climatológicas (Cuenca 23016)				
	7048	7053	7348	7390	7393
Helmert	S H	S H	S H	S H	S H
t de student	S H	S H	S H	S H	S H
Cramer	S H	S H	S H	S H	S H

S NH: Serie no homogénea; SH: Serie homogénea.

**Cuadro 21.** Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 25010: Río Pablillo.

Prueba estadística	Estaciones climatológicas (Cuenca 25010: Río Pablillo)									
	19027	19034	19035	19091	19100	19111	19144	19147	19155	28060
Helmert	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SNH
t de Student	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH
Cramer	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH

S NH: Serie no homogénea; SH: Serie homogénea.

**Cuadro 22.** Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 28030: Río Actopan.

Prueba estadística	Estaciones climatológicas (Cuenca 28030: Río Actopan)									
	30003	30007	30040	30085	30097	30114	30195	30228	30267	30452
Helmert	SH	SH	SNH	SNH	SH	SH	SH	SH	SH	SNH
t de Student	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH
Cramer	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH	SH

S NH: Serie no homogénea; SH: Serie homogénea.

**Cuadro 23.** Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 28056: Río Valle Nacional.

Prueba estadística	Estaciones climatológicas (Cuenca 28056: Río Valle Nacional)								
	20004	20041	20042	20064	20114	20136	20175	20183	20279
Helmert	S H	S NH	S H	S H	S NH	S H	S NH	S H	S H
t de Student	S NH	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H
Cramer	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H

**Cuadro 24.** Resumen de pruebas estadísticas de homogeneidad aplicadas a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas de la cuenca 30032: Río Teapa.

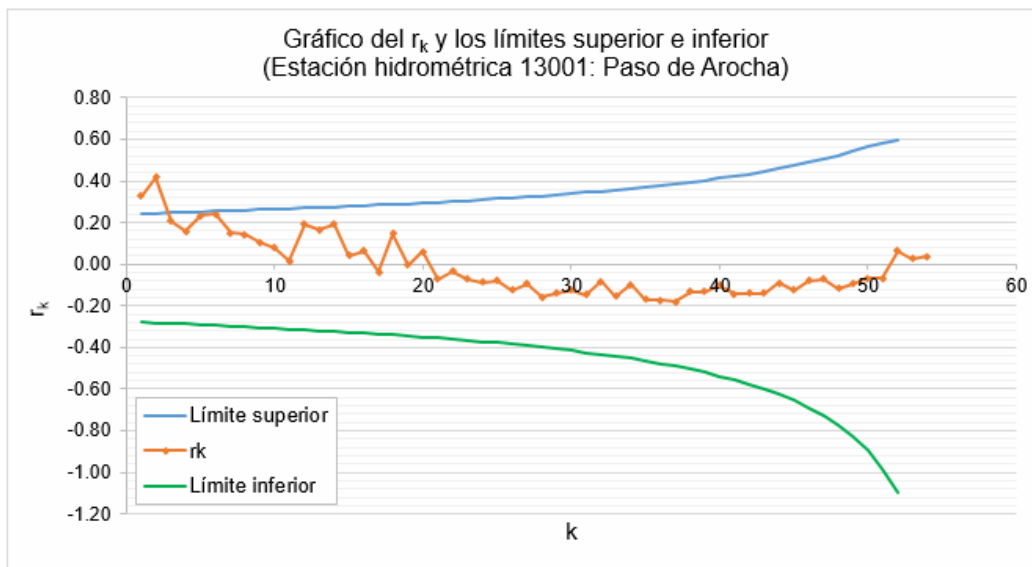
Prueba estadística	Estaciones climatológicas (Cuenca 30032: Río Teapa)								
	7032	7167	7186	7217	27024	27044	27045	27061	27068
Helmert	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S NH	S H	S H
t de Student	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H
Cramer	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H	S H

De las 3 pruebas hubo un máximo de un resultado no homogéneo para cada serie de datos de precipitación máxima diaria; siendo la prueba de Helmert, la que en la mayoría de los casos dio como resultado la falta de homogeneidad. Sin embargo, tomando en cuenta que existieron 2 resultados con homogeneidad para las pruebas, se consideró válido utilizar dicha información.

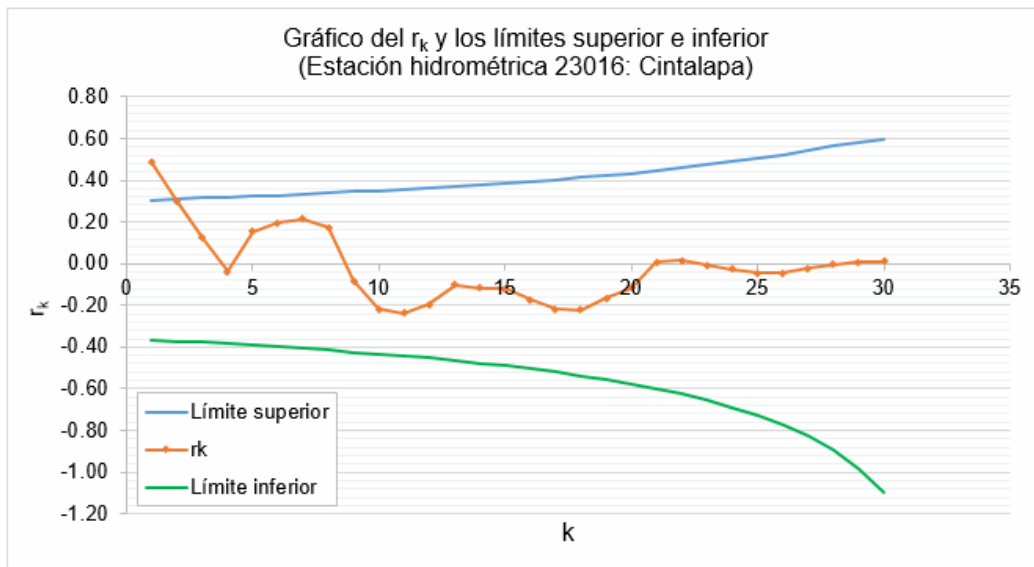
## 6.5.6. Prueba de independencia de eventos

### 6.5.6.1. Estaciones hidrométricas

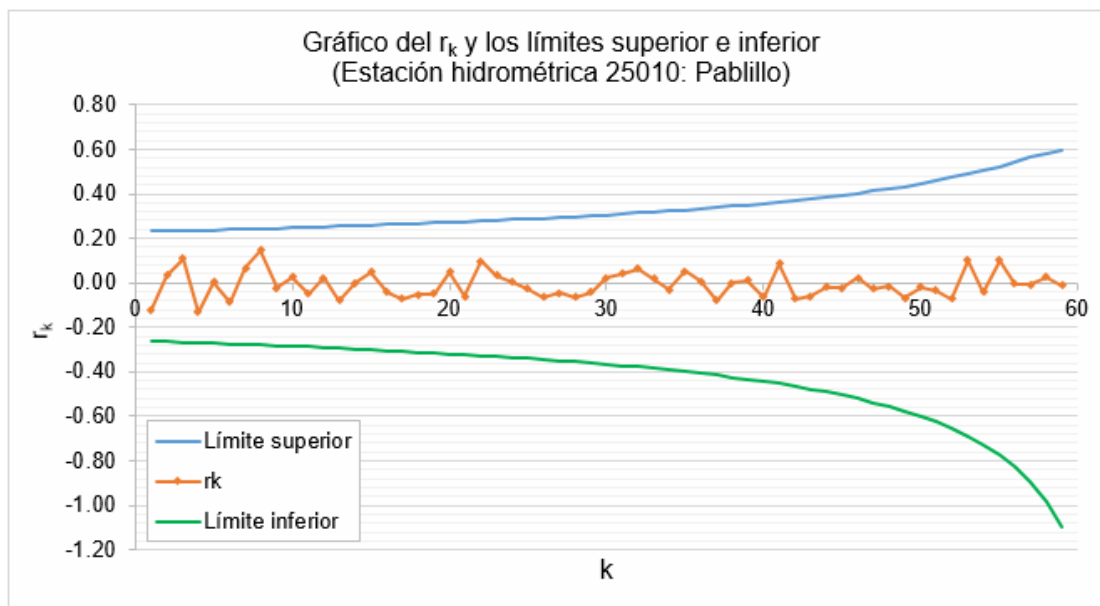
Los resultados de la prueba de independencia de Anderson nos permitieron elaborar los correlogramas, con la finalidad de identificar el número de datos que sobrepasan los límites de confianza y poder determinar si las series están compuestas por variables aleatorias. De la Figura 14 a la Figura 19 se muestran los resultados obtenidos.



**Figura 14.** Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 13001: Paso de Arocha).

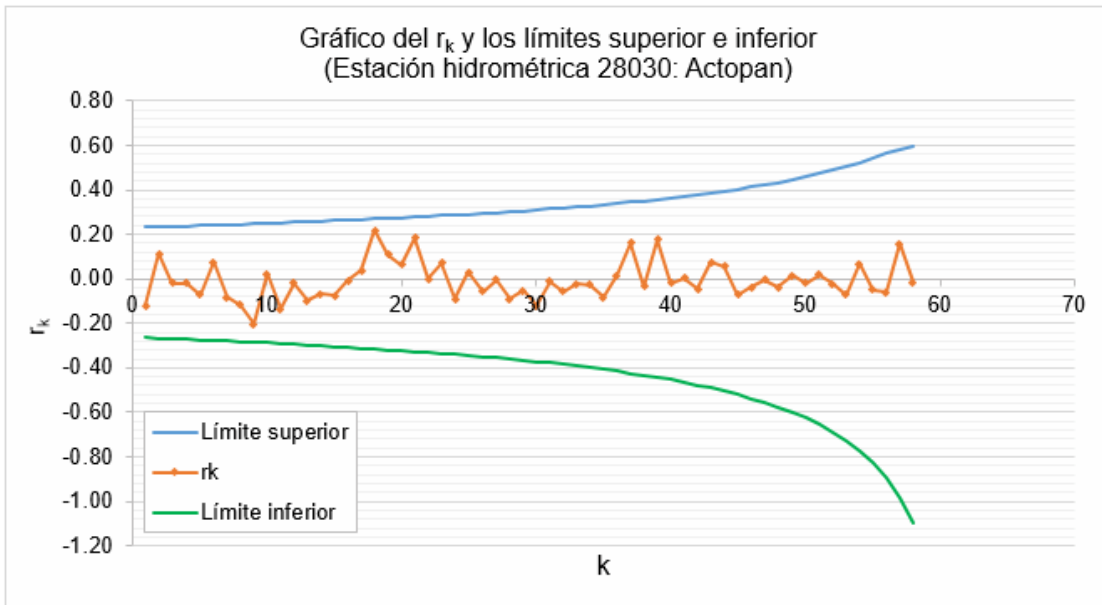


**Figura 15.** Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 23016: Cintalapa).

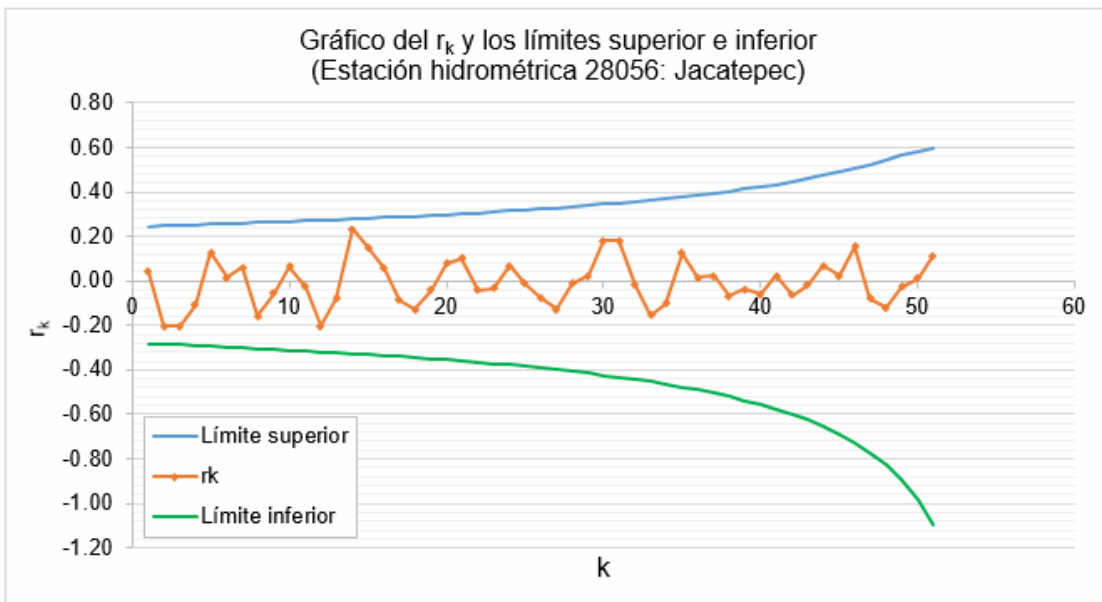


**Figura 16.** Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 25010: Pablillo).

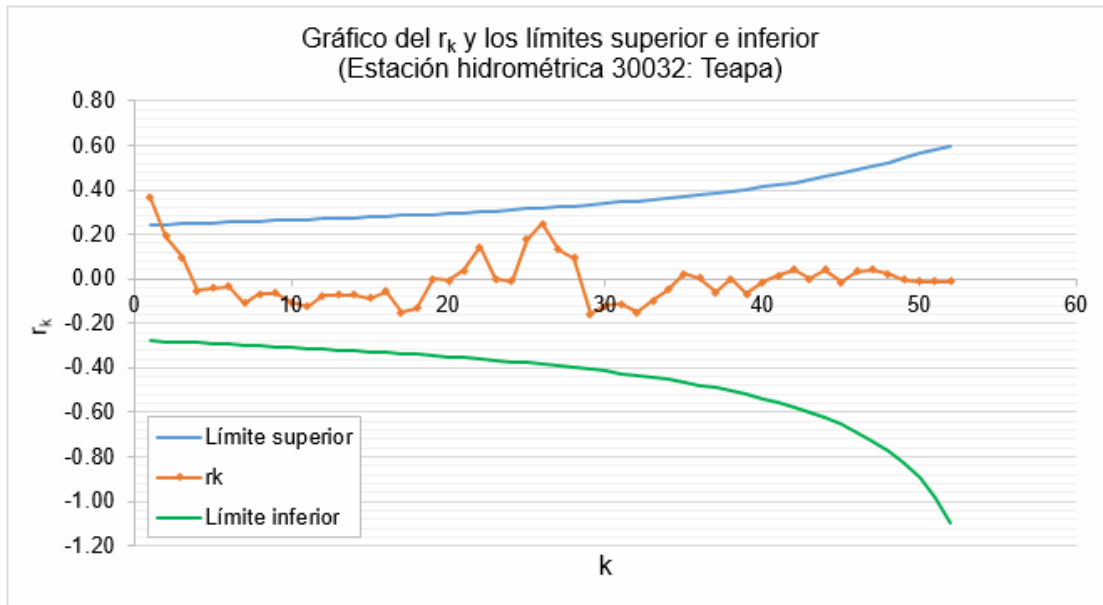




**Figura 17.** Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 28030: Actopan).



**Figura 18.** Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 28056: Jacatepec).



**Figura 19.** Gráfico del coeficiente de autocorrelación serial de retraso  $k$  con sus límites superior e inferior (estación hidrométrica 30032: Teapa).

De acuerdo con los resultados obtenidos, podemos observar que todas las series de datos de los gastos máximos observados en las estaciones hidrométricas son independientes; es decir, que están conformadas por variables aleatorias.

### 6.5.6.2. Estaciones climatológicas

Los correlogramas resultantes de las pruebas de independencia de eventos realizadas para las series de datos de precipitación máxima diaria seleccionadas para la obtención de información en cada cuenca estudiada se muestran del Anexo 4 al Anexo 9. Los resultados obtenidos indican que todas las series se encuentran compuestas por variables aleatorias.

### 6.5.7. Prueba de bondad de ajuste

Para las pruebas de bondad de ajuste se ejecutaron 6 funciones con dos métodos de cálculos Momentos y Máxima Verosimilitud con 2 y 3 parámetros cada una; estas pruebas se ejecutaron tanto en las estaciones hidrométricas como en las estaciones climatológicas, mostrando los errores estándar calculados en los siguientes cuadros.

### 6.5.7.1. Estaciones hidrométricas

Del Cuadro 25 al Cuadro 30 se muestran las diferentes funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos hidrométricos, y el error estándar calculado para cada una de las mismas.

**Cuadro 25.** Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 13001: Paso de Arocha.

Función	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	139.470	-----	139.470	-----
Lognormal	76.057	74.099	54.811	58.334
Gumbel	99.217	-----	124.076	-----
Exponencial	72.432	-----	86.817	-----
Gamma	73.853	74.554	93.745	11111.000
Doble Gumbel	64.374			

**Cuadro 26.** Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 23016: Cintalapa.

Función	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	73.849	-----	73.849	-----
Lognormal	53.116	51.454	42.800	43.309
Gumbel	57.398	-----	66.283	-----
Exponencial	50.559	-----	50.410	-----
Gamma	52.972	55.447	56.206	11111.000
Doble Gumbel	48.824			

**Cuadro 27.** Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 25010: Pablillo.

Función	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	217.171	-----	217.171	-----
Lognormal	130.589	130.291	117.963	121.718
Gumbel	176.621	-----	195.369	-----
Exponencial	150.565	-----	168.513	-----
Gamma	143.486	158.572	169.543	11111.000
Doble Gumbel	127.957			

**Cuadro 28.** Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 28030: Actopan.

Función	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	132.821	-----	132.821	-----
Lognormal	62.825	65.524	59.859	62.226
Gumbel	87.436	-----	115.553	-----
Exponencial	55.250	-----	59.235	-----
Gamma	59.201	58.598	85.193	11111.000
Doble Gumbel	44.791			

**Cuadro 29.** Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 28056: Jacatepec.

Función	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	150.873	-----	150.873	-----
Lognormal	70.746	73.968	70.214	70.095
Gumbel	70.588	-----	78.287	-----
Exponencial	106.146	-----	764.638	-----
Gamma	86.717	73.298	98.326	75.219
Doble Gumbel	95.36			

**Cuadro 30.** Valores obtenidos de error estándar para las funciones de probabilidad ajustadas a los datos de la estación hidrométrica 30032: Teapa.

Función	Momentos		Máxima verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Normal	300.836	-----	300.836	-----
Lognormal	169.608	165.696	190.540	182.475
Gumbel	214.410	-----	255.071	-----
Exponencial	168.909	-----	266.159	-----
Gamma	205.094	177.730	235.420	228.728
Doble Gumbel	128.87			

Dado que el error estándar es una estimación de cuánto varía el valor de una estadística de prueba; se tomó el menor valor de error estándar calculado. Por lo que en el Cuadro 31 se resumen las funciones de probabilidad utilizadas para la obtención de gastos máximos, por periodos de retorno.

**Cuadro 31.** Resumen de error estándar calculado por las diferentes funciones de probabilidad usadas para el ajuste de las series de datos hidrométricos.

Estación hidrométrica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
13001 - Paso de Arocha	Lognormal	Máxima verosimilitud	54.81
23016 - Cintalapa	Lognormal	Máxima verosimilitud	42.80
25010 - Pablillo	Lognormal	Máxima verosimilitud	117.96
28030 - Actopan	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	44.79
28056 - Jacatepec	Lognormal	Máxima verosimilitud	70.09
30032 - Teapa	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	86.82

### 6.5.7.2. Estaciones climatológicas

Los resúmenes de la función de probabilidad seleccionada para cada una de las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas utilizadas para la obtención de información, se muestran del Cuadro 32 al Cuadro 37.

**Cuadro 32.** Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 13001: Río Huicicila.

Estación climatológica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
18006	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	2.99
18010	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	2.6
18023	Log Normal	Máxima verosimilitud	2.6
18025	Log Normal	Máxima verosimilitud	3.78
18038	Gumbel	Máxima verosimilitud	3.13
18040	Normal	Momentos	2.29
18077	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	1.76
18079	Normal	Momentos	5.09
18083	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	4.01

**Cuadro 33.** Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 23016: Río Cintalapa.

Estación climatológica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
7048	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	6.36
7053	Log Normal	Máxima verosimilitud	19.23
7348	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	11.94
7390	Gumbel	Máxima verosimilitud	6.39
7393	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	11.83

**Cuadro 34.** Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 25010: Río Pablillo.

Estación climatológica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
19027	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	4.28
19034	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.03
19035	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.32
19091	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	7.55
19100	Gumbel	Máxima verosimilitud	5.65
19111	Normal	Momentos	2.72
19144	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	4.54
19147	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.95
19155	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	3.52
28060	Log Normal	Máxima verosimilitud	7.77

**Cuadro 35.** Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 28030: Río Actopan.

Estación climatológica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
30003	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	7.67
30007	Gumbel	Máxima verosimilitud	4.65
30040	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	9.91
30089	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	6.76
30097	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	9.45
30114	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.34

Estación climatológica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
30175	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	4.25
30195	Gumbel	Máxima verosimilitud	3.32
30228	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	3.2
30267	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.59
30452	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	4.41

**Cuadro 36.** Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 28056: Río Valle Nacional.

Estación climatológica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
20004	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.1
20041	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	6.1
20042	Log Normal	Máxima verosimilitud	6.11
20064	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	9.52
20114	Log Normal	Momentos	18.89
20136	Normal	Momentos	12.3
20175	Log Normal	Momentos	11.39
20183	Gumbel	Máxima verosimilitud	5.55
20279	Gumbel	Máxima verosimilitud	6.63

**Cuadro 37.** Resumen de funciones de probabilidad ajustadas a las series de datos pluviométricos de las estaciones climatológicas de la cuenca 30032: Río Teapa.

Estación climatológica	Función de probabilidad a utilizar	Método de cálculo	Error estándar
7032	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	8.8
7167	Gamma	Máxima verosimilitud	8.99
7186	Normal	Momentos	11.71
7217	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	8.05
27024	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	10.5
27044	Normal	Momentos	4.85
27045	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.98
27061	Doble Gumbel	Mínimos cuadrados	5.71
27068	Gamma	Momentos	8.99

Podemos observar que, en las series hidrométricas la función de probabilidad que predomina es Lognormal, y en las estaciones meteorológicas es la Doble Gumbel; éste resultado tiene validez, si consideramos que los ciclones que se presentan en ciertas zonas y las precipitaciones relacionadas con los fenómenos meteorológicos dominantes de la región generan que los valores de precipitación máxima pertenezcan a 2 poblaciones.

De cualquier manera, es necesario acotar que Linsley (1977) menciona que a pesar de que se han hecho numerosos estudios comparativos, de diferentes funciones de probabilidad, no se ha llegado a una conclusión de tipo general.

## 6.6. Análisis de frecuencia de eventos

### 6.6.1. Periodo de retorno

De acuerdo con la función de probabilidad que arrojó el menor error estándar, para los datos de las estaciones hidrométricas se obtuvieron los valores de gasto máximo asociados a los periodos de retorno seleccionados; cuyos resultados se muestran en el Cuadro 38.

**Cuadro 38.** Valores de gasto máximo ( $m^3/s$ ) por periodo de retorno para las series de datos de las estaciones hidrométricas.

Periodo de retorno (años)	13001: Paso de Arocha	23016: Cintalapa	25010: Pablillo	28030: Actopan	28056: Jacatepec	30032: Teapa
10	459.60	340.50	434.90	636.80	2,207.80	1,470.50
25	763.20	560.50	753.50	910.20	2,632.10	2,468.40
50	1,059.20	773.60	1,074.70	1,092.30	2,948.70	3,063.60
100	1,422.40	1,033.50	1,479.10	1,267.10	3,265.80	3,605.20
200	1,862.70	1,347.20	1,981.10	1,438.40	3,585.60	4,125.00
500	2,583.70	1,858.20	2,824.10	1,662.90	4,016.10	4,796.80
1,000	3,259.10	2,334.70	3,632.10	1,832.10	4,352.60	5,300.10
5,000	5,229.60	3,715.90	6,062.90	2,222.50	5,127.40	6,461.70
10,000	6,404.50	4,535.00	7,551.80	2,389.10	5,500.30	6,988.30



## 6.7. Correcciones al valor de precipitación máxima probable

Después de obtener los valores de precipitación máxima probable, éstos se corrigieron por intervalo de observación para obtener el valor representativo de una precipitación máxima en 24 horas por periodo de retorno para cada cuenca.

**Cuadro 39.** Valor representativo de precipitación máxima probable en 24 horas (mm), para las cuencas estudiadas.

Periodo de retorno (años)	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	142.0	240.4	155.4	194.6	293.6	309.5
25	158.2	370.1	222.3	248.6	343.2	358.0
50	168.7	483.7	272.1	290.5	378.6	397.1
100	178.7	588.1	319.0	330.7	413.4	436.9
200	188.4	688.7	364.6	369.9	449.1	474.3
500	200.9	819.5	424.5	419.7	497.2	518.7
1,000	210.5	918.1	469.7	459.7	533.5	547.8
5,000	232.3	1143.8	574.5	549.2	616.0	601.0
10,000	242.0	1247.2	621.9	589.0	651.4	620.5

## 6.8. Curvas P-D-Tr representativas para las cuencas

La lluvia se define por 3 variables: lámina, duración y frecuencia; características que son plasmadas en las curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno (P-D-Tr). Para el caso de las cuencas de estudio, una vez que se definió la precipitación máxima probable por periodo de retorno; se procedió a calcular los datos para la construcción de las curvas P-D-Tr, mismos que se muestran del Cuadro 40 al Cuadro 45. Asimismo de manera gráfica, dichas curvas se presentan de la Figura 20 a la Figura 25.

**Cuadro 40.** Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 13001: Río Huicicila.

Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)								
	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1,000.00	5,000.00	10,000.00
60	68.2	75.2	80.4	85.7	92.6	97.9	103.1	115.3	120.6
120	82.8	91.2	97.6	104.0	112.4	118.8	125.2	140.0	146.4
180	91.5	100.8	107.9	115.0	124.3	131.4	138.4	154.8	161.9
240	97.9	107.9	115.4	123.0	133.0	140.5	148.1	165.7	173.2
300	103.0	113.5	121.4	129.4	139.9	147.9	155.8	174.3	182.3
360	107.2	118.2	126.5	134.8	145.7	154.0	162.3	181.6	189.9
420	110.9	122.2	130.8	139.4	150.7	159.3	167.9	187.8	196.4
480	114.1	125.8	134.7	143.5	155.2	164.0	172.9	193.4	202.2
540	117.1	129.1	138.1	147.2	159.2	168.2	177.3	198.4	207.4
600	119.7	132.0	141.3	150.5	162.8	172.1	181.4	202.9	212.2
660	122.2	134.7	144.2	153.6	166.2	175.6	185.1	207.1	216.5
720	124.5	137.2	146.9	156.5	169.2	178.9	188.5	210.9	220.6
780	126.6	139.5	149.4	159.2	172.1	182.0	191.8	214.6	224.4
840	128.6	141.7	151.7	161.7	174.8	184.8	194.8	217.9	227.9
900	130.4	143.8	153.9	164.0	177.4	187.5	197.6	221.1	231.2
960	132.2	145.8	156.0	166.3	179.8	190.1	200.3	224.1	234.4
1020	133.9	147.6	158.0	168.4	182.1	192.5	202.9	227.0	237.4
1080	135.5	149.4	159.9	170.4	184.3	194.8	205.3	229.8	240.3
1140	137.0	151.1	161.7	172.3	186.4	197.0	207.7	232.4	243.0
1200	138.5	152.7	163.4	174.2	188.4	199.2	209.9	234.9	245.6
1260	139.9	154.2	165.1	176.0	190.3	201.2	212.0	237.3	248.1
1320	141.2	155.7	166.7	177.7	192.2	203.1	214.1	239.6	250.5
1380	142.54	157.17	168.25	179.32	193.95	205.03	216.10	241.81	252.88
1440	143.80	158.56	169.74	180.91	195.67	206.85	218.02	243.96	255.13

**Cuadro 41.** Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 23016: Río Cintalapa.

Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)								
	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1,000.00	5,000.00	10,000.00
<b>60</b>	96.3	148.9	188.6	228.4	280.9	320.7	360.5	452.8	492.5
<b>120</b>	121.5	188.6	239.4	290.2	357.3	408.1	458.9	576.8	627.6
<b>180</b>	138.0	214.9	273.1	331.2	408.1	466.3	524.5	659.5	717.7
<b>240</b>	150.7	235.2	299.1	363.0	447.5	511.5	575.4	723.8	787.7
<b>300</b>	161.2	252.0	320.8	389.5	480.3	549.0	617.7	777.3	846.0
<b>360</b>	170.2	266.6	339.4	412.3	508.6	581.5	654.4	823.6	896.4
<b>420</b>	178.2	279.4	356.0	432.6	533.8	610.3	686.9	864.7	941.2
<b>480</b>	185.4	291.1	371.0	450.9	556.5	636.4	716.3	901.8	981.7
<b>540</b>	192.0	301.7	384.6	467.6	577.3	660.2	743.2	935.8	1,018.8
<b>600</b>	198.1	311.5	397.3	483.1	596.5	682.3	768.0	967.2	1,053.0
<b>660</b>	203.7	320.6	409.1	497.5	614.4	702.8	791.2	996.6	1,085.0
<b>720</b>	209.0	329.2	420.1	511.0	631.2	722.1	813.0	1,024.1	1,115.0
<b>780</b>	214.0	337.3	430.5	523.8	647.0	740.3	833.5	1,050.0	1,143.3
<b>840</b>	218.7	344.9	440.4	535.9	662.1	757.5	853.0	1,074.7	1,170.1
<b>900</b>	223.2	352.2	449.8	547.4	676.4	773.9	871.5	1,098.1	1,195.7
<b>960</b>	227.5	359.2	458.8	558.4	690.0	789.6	889.2	1,120.4	1,220.0
<b>1020</b>	231.6	365.8	467.3	568.9	703.1	804.6	906.1	1,141.9	1,243.4
<b>1080</b>	235.5	372.2	475.6	579.0	715.6	819.0	922.4	1,162.4	1,265.8
<b>1140</b>	239.3	378.3	483.5	588.7	727.7	832.9	938.0	1,182.2	1,287.4
<b>1200</b>	242.9	384.2	491.1	598.0	739.3	846.2	953.1	1,201.3	1,308.2
<b>1260</b>	246.5	390.0	498.5	607.1	750.6	859.1	967.7	1,219.8	1,328.3
<b>1320</b>	249.9	395.5	505.7	615.8	761.5	871.6	981.8	1,237.6	1,347.8
<b>1380</b>	253.1	400.8	512.6	624.3	772.0	883.7	995.5	1,254.9	1,366.6
<b>1440</b>	256.3	406.0	519.3	632.5	782.2	895.5	1,008.7	1,271.7	1,384.9

**Cuadro 42.** Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 25010: Río Pablillo.

Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)								
	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1,000.00	5,000.00	10,000.00
60	79.4	116.1	143.9	171.7	208.4	236.2	264.0	328.5	356.3
120	95.5	138.9	171.8	204.7	248.1	281.0	313.9	390.2	423.1
180	104.9	152.1	187.9	223.6	270.8	306.5	342.2	425.1	460.8
240	111.8	161.6	199.3	237.0	286.8	324.5	362.2	449.7	487.4
300	117.2	169.1	208.3	247.5	299.4	338.6	377.8	468.9	508.1
360	121.8	175.3	215.7	256.2	309.7	350.2	390.7	484.7	525.2
420	125.7	180.6	222.1	263.7	318.6	360.2	401.7	498.2	539.8
480	129.1	185.3	227.8	270.3	326.4	368.9	411.4	510.1	552.6
540	132.2	189.5	232.8	276.1	333.4	376.7	420.1	520.6	564.0
600	135.0	193.3	237.4	281.5	339.7	383.8	427.9	530.2	574.3
660	137.6	196.8	241.6	286.3	345.5	390.3	435.0	539.0	583.7
720	140.0	200.1	245.4	290.8	350.8	396.2	441.6	547.0	592.4
780	142.3	203.1	249.1	295.0	355.8	401.8	447.8	554.5	600.5
840	144.4	205.9	252.4	299.0	360.5	407.0	453.5	561.5	608.1
900	146.4	208.6	255.6	302.6	364.8	411.9	458.9	568.1	615.2
960	148.3	211.1	258.6	306.1	369.0	416.5	464.0	574.4	621.9
1020	150.0	213.5	261.5	309.4	372.9	420.8	468.8	580.2	628.2
1080	151.7	215.8	264.2	312.6	376.6	425.0	473.4	585.8	634.3
1140	153.4	217.9	266.8	315.6	380.1	429.0	477.8	591.2	640.0
1200	154.9	220.0	269.2	318.5	383.5	432.8	482.0	596.3	645.5
1260	156.4	222.0	271.6	321.2	386.8	436.4	486.0	601.2	650.8
1320	157.9	223.9	273.9	323.9	389.9	439.9	489.8	605.9	655.8
1380	159.3	225.8	276.1	326.4	392.9	443.2	493.6	610.4	660.7
1440	160.6	227.6	278.2	328.9	395.8	446.5	497.1	614.7	665.4

**Cuadro 43.** Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 28030: Río Actopan.

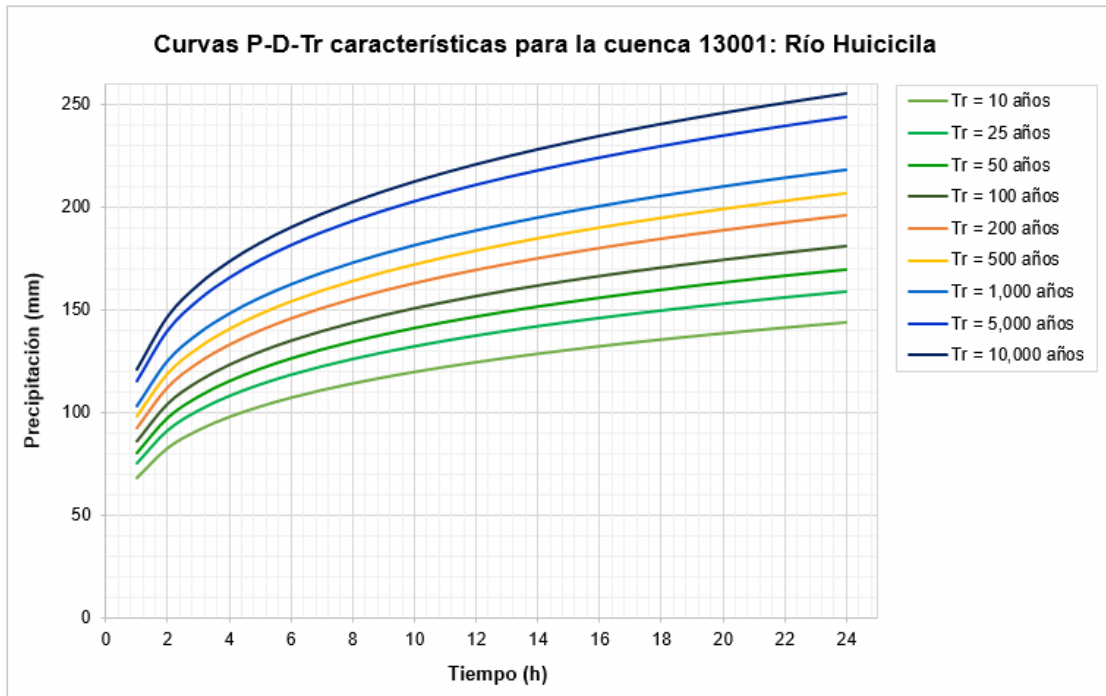
Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)								
	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1,000.00	5,000.00	10,000.00
60	104.7	133.6	155.4	177.2	206.1	228.0	249.8	271.7	300.5
120	124.7	159.2	185.2	211.3	245.7	271.8	297.9	323.9	358.4
180	136.1	173.8	202.2	230.7	268.3	296.8	325.3	353.7	391.4
240	144.2	184.1	214.3	244.5	284.4	314.6	344.7	374.9	414.8
300	150.6	192.2	223.8	255.3	296.9	328.5	360.0	391.5	433.2
360	155.8	198.9	231.6	264.2	307.3	340.0	372.6	405.2	448.3
420	160.3	204.7	238.3	271.8	316.2	349.8	383.4	416.9	461.3
480	164.2	209.7	244.1	278.5	324.0	358.4	392.8	427.2	472.7
540	167.7	214.2	249.4	284.5	331.0	366.1	401.3	436.4	482.9
600	170.9	218.3	254.1	289.9	337.3	373.1	408.9	444.8	492.1
660	173.8	222.0	258.4	294.9	343.1	379.5	415.9	452.4	500.6
720	176.5	225.4	262.4	299.4	348.4	385.4	422.4	459.4	508.3
780	179.0	228.6	266.2	303.7	353.3	390.9	428.4	465.9	515.6
840	181.3	231.6	269.6	307.7	358.0	396.0	434.0	472.1	522.3
900	183.5	234.4	272.9	311.4	362.3	400.8	439.3	477.8	528.7
960	185.6	237.1	276.0	314.9	366.4	405.4	444.3	483.2	534.7
1020	187.5	239.6	278.9	318.3	370.3	409.7	449.0	488.4	540.4
1080	189.4	242.0	281.7	321.5	374.0	413.8	453.5	493.3	545.8
1140	191.2	244.2	284.4	324.5	377.5	417.7	457.8	497.9	551.0
1200	192.9	246.4	286.9	327.4	380.9	421.4	461.9	502.4	555.9
1260	194.5	248.5	289.3	330.2	384.1	425.0	465.8	506.6	560.6
1320	196.1	250.5	291.7	332.8	387.2	428.4	469.6	510.7	565.2
1380	197.6	252.4	293.9	335.4	390.2	431.7	473.2	514.7	569.5
1440	199.0	254.3	296.1	337.9	393.1	434.9	476.7	518.5	573.7

**Cuadro 44.** Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 28056: Río Valle Nacional.

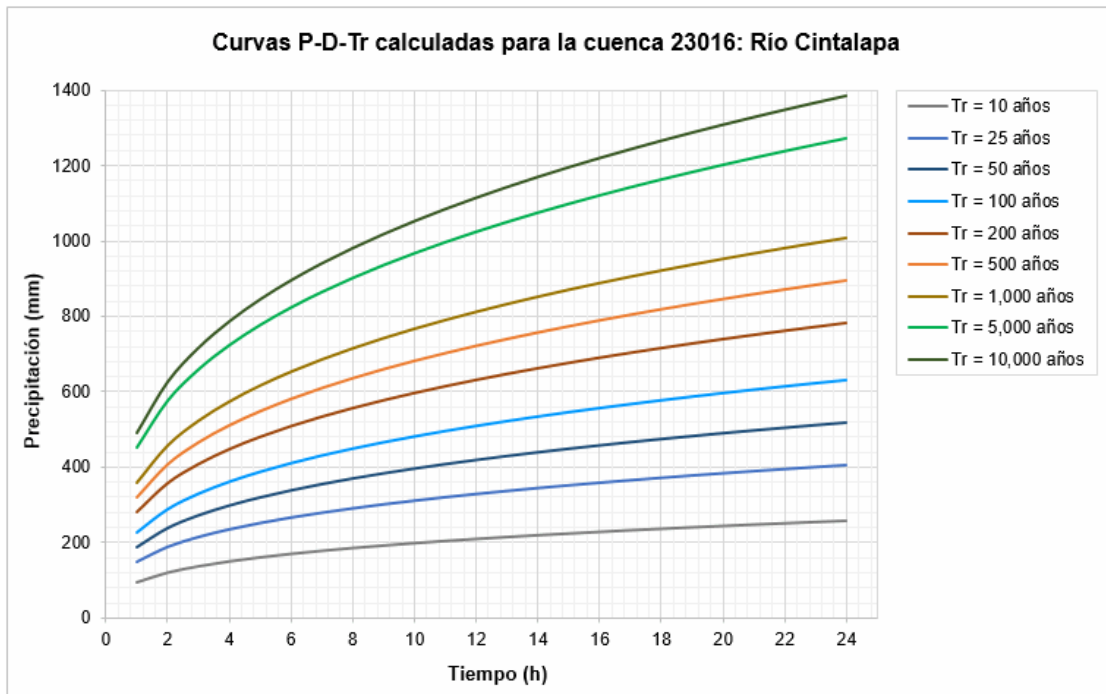
Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)								
	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1,000.00	5,000.00	10,000.00
<b>60</b>	123.9	146.9	164.3	181.8	204.8	222.3	239.7	280.2	297.6
<b>120</b>	154.8	182.9	204.1	225.3	253.3	274.6	295.8	345.1	366.3
<b>180</b>	174.8	205.9	229.5	253.0	284.1	307.6	331.2	385.8	409.3
<b>240</b>	190.1	223.5	248.8	274.0	307.4	332.6	357.9	416.5	441.7
<b>300</b>	202.8	238.0	264.6	291.3	326.5	353.1	379.7	441.6	468.2
<b>360</b>	213.6	250.4	278.2	306.0	342.8	370.6	398.4	463.0	490.8
<b>420</b>	223.3	261.4	290.2	319.1	357.2	386.0	414.9	481.8	510.7
<b>480</b>	231.9	271.2	301.0	330.8	370.1	399.9	429.6	498.7	528.5
<b>540</b>	239.8	280.2	310.8	341.4	381.9	412.5	443.0	514.1	544.7
<b>600</b>	247.1	288.6	319.9	351.3	392.7	424.1	455.4	528.2	559.6
<b>660</b>	253.9	296.3	328.3	360.4	402.8	434.8	466.9	541.3	573.4
<b>720</b>	260.3	303.5	336.2	369.0	412.2	444.9	477.6	553.6	586.3
<b>780</b>	266.3	310.3	343.7	377.0	421.1	454.4	487.8	565.2	598.5
<b>840</b>	271.9	316.8	350.7	384.6	429.5	463.4	497.3	576.1	610.0
<b>900</b>	277.3	322.9	357.4	391.9	437.4	471.9	506.4	586.4	620.9
<b>960</b>	282.5	328.8	363.8	398.8	445.0	480.0	515.0	596.3	631.3
<b>1020</b>	287.4	334.4	369.9	405.4	452.3	487.8	523.3	605.8	641.3
<b>1080</b>	292.1	339.7	375.7	411.7	459.3	495.3	531.2	614.8	650.8
<b>1140</b>	296.7	344.9	381.3	417.8	466.0	502.4	538.9	623.5	659.9
<b>1200</b>	301.1	349.8	386.7	423.6	472.4	509.3	546.2	631.9	668.8
<b>1260</b>	305.3	354.6	392.0	429.3	478.6	515.9	553.3	639.9	677.2
<b>1320</b>	309.4	359.3	397.0	434.8	484.6	522.4	560.1	647.7	685.5
<b>1380</b>	313.4	363.8	401.9	440.1	490.5	528.6	566.7	655.3	693.4
<b>1440</b>	317.2	368.1	406.7	445.2	496.1	534.6	573.2	662.6	701.1

**Cuadro 45.** Valores calculados para la construcción de curvas P-D-Tr en la cuenca 30032: Río Teapa.

Duración (minutos)	Periodo de retorno (años)								
	10.00	25.00	50.00	100.00	200.00	500.00	1,000.00	5,000.00	10,000.00
60	126.3	147.9	164.1	180.4	202.0	218.3	234.6	272.4	288.7
120	158.6	185.4	205.7	226.0	252.8	273.1	293.4	340.4	360.7
180	179.6	209.8	232.6	255.5	285.6	308.4	331.3	384.2	407.1
240	195.7	228.4	253.2	277.9	310.6	335.4	360.1	417.6	442.3
300	209.0	243.8	270.1	296.4	331.2	357.5	383.8	444.9	471.3
360	220.3	256.9	284.6	312.2	348.8	376.5	404.1	468.4	496.0
420	230.4	268.5	297.3	326.2	364.3	393.2	422.0	489.0	517.8
480	239.4	278.9	308.8	338.7	378.2	408.1	438.0	507.5	537.4
540	247.6	288.4	319.3	350.1	390.9	421.8	452.6	524.3	555.2
600	255.2	297.1	328.9	360.6	402.6	434.3	466.1	539.8	571.5
660	262.2	305.2	337.8	370.4	413.4	446.0	478.6	554.2	586.7
720	268.8	312.8	346.2	379.5	423.6	456.9	490.2	567.6	600.9
780	275.0	320.0	354.0	388.1	433.1	467.1	501.2	580.2	614.3
840	280.8	326.7	361.5	396.2	442.1	476.8	511.5	592.2	626.9
900	286.4	333.1	368.5	403.9	450.6	486.0	521.4	603.5	638.9
960	291.7	339.2	375.2	411.2	458.8	494.7	530.7	614.3	650.2
1020	296.7	345.1	381.6	418.2	466.5	503.1	539.7	624.6	661.1
1080	301.6	350.7	387.8	424.9	474.0	511.1	548.2	634.4	671.5
1140	306.3	356.0	393.7	431.3	481.1	518.8	556.4	643.9	681.5
1200	310.7	361.2	399.4	437.5	488.0	526.2	564.3	653.0	691.1
1260	315.1	366.2	404.9	443.5	494.6	533.3	572.0	661.8	700.4
1320	319.3	371.0	410.2	449.3	501.0	540.2	579.3	670.2	709.4
1380	323.3	375.7	415.3	454.9	507.2	546.9	586.5	678.4	718.0
1440	327.2	380.2	420.2	460.3	513.3	553.3	593.4	686.4	726.4

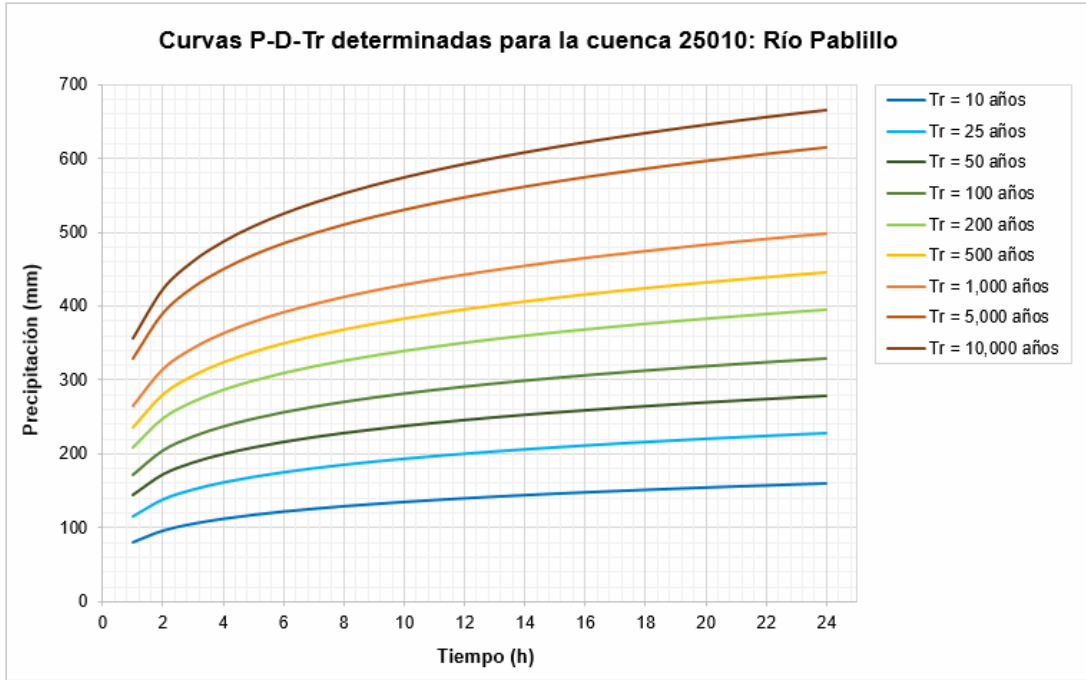


**Figura 20.** Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 13001: Río Huicicila.

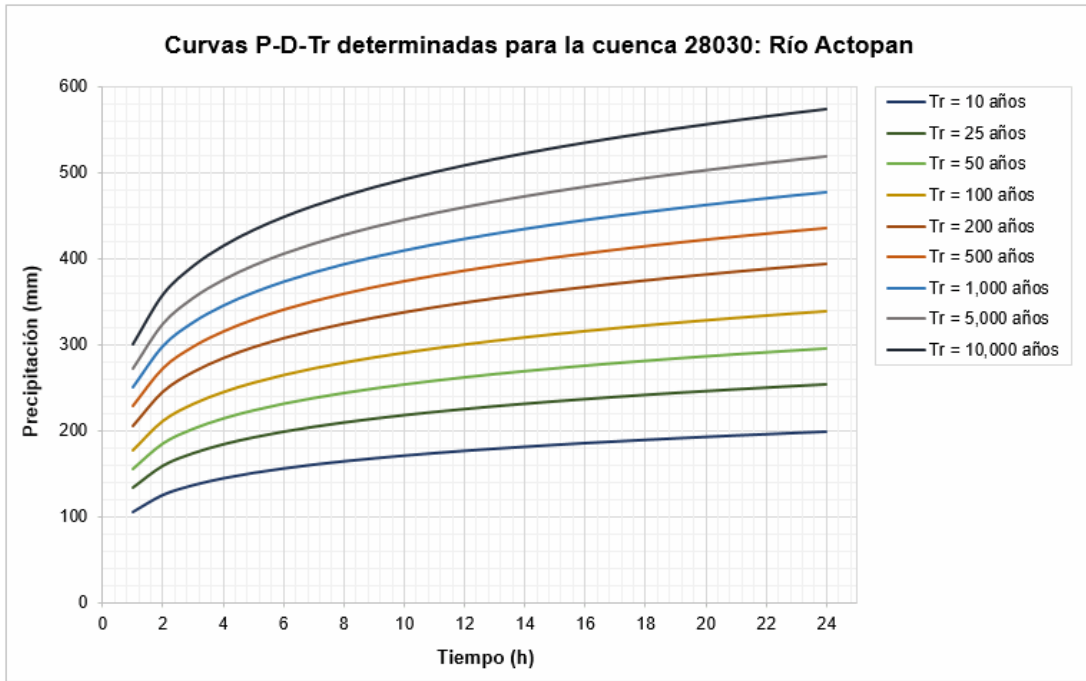


**Figura 21.** Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 23016: Río Cintalapa.

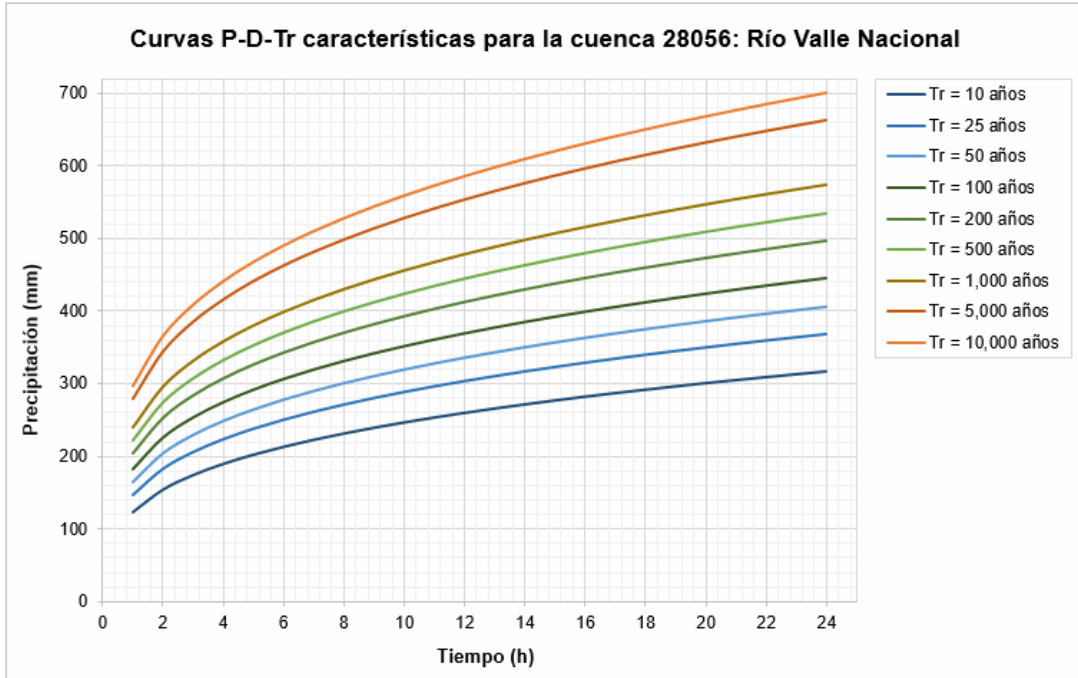




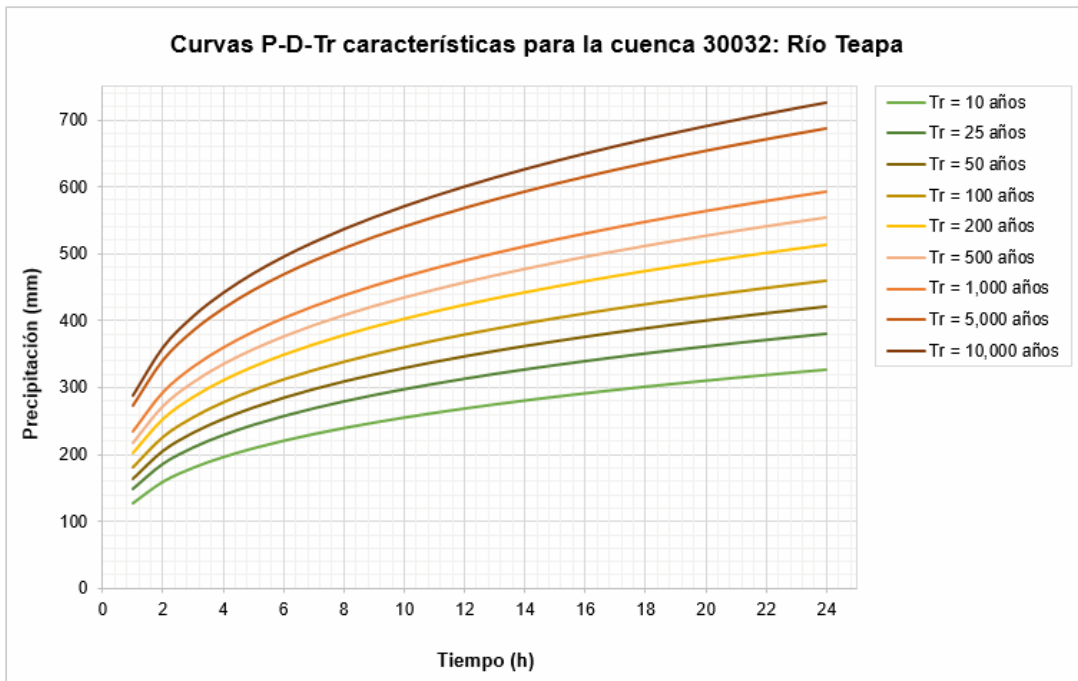
**Figura 22.** Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 25010: Río Pablillo.



**Figura 23.** Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 28030: Río Actopan.



**Figura 24.** Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 28056: Río Valle Nacional.



**Figura 25.** Curvas P-D-Tr estimadas para la cuenca 30032: Río Teapa.

Los resultados indican que la distribución de la tormenta no se comporta de manera lineal; es decir, la mayor parte de la precipitación se concentra en poco tiempo. De acuerdo con una gran variedad de criterios que tratan de encontrar la distribución de la precipitación

durante una tormenta, Campos (1998) menciona que hasta la mitad de la lluvia precipitada en 24 horas puede distribuirse en solamente 6 horas.

Para nuestros resultados encontramos que desde un 30% hasta un 40% del valor de la precipitación puede concentrarse en una hora, dependiendo del periodo de retorno analizado.

### 6.9. Valor representativo de precipitación máxima ponderada para las cuencas estudiadas

Como se mencionó anteriormente, en algunos de los métodos hidrológicos se asume una duración de la tormenta coincidente con el tiempo de concentración; puesto que se supone que en ese tiempo toda el área de la cuenca estará aportando un flujo a la salida y se presentará el gasto máximo de escurrimiento. Sin embargo, existen algunos métodos que utilizan la información de la precipitación total en 24 horas; por lo que, atendiendo a las 2 condiciones, a continuación, se presentan resultados de los valores representativos ponderados de la precipitación máxima probable para 24 horas (Cuadro 46) y precipitación máxima probable para una duración coincidente con el tiempo de concentración calculado en cada cuenca (Cuadro 47).

**Cuadro 46.** Valor representativo de precipitación máxima probable en 24 horas (mm), para las cuencas estudiadas.

Periodo de retorno (años)	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	142.0	240.4	155.4	194.6	293.6	309.5
25	158.2	370.1	222.3	248.6	343.2	358.0
50	168.7	483.7	272.1	290.5	378.6	397.1
100	178.7	588.1	319.0	330.7	413.4	436.9
200	188.4	688.7	364.6	369.9	449.1	474.3
500	200.9	819.5	424.5	419.7	497.2	518.7
1,000	210.5	918.1	469.7	459.7	533.5	547.8
5,000	232.3	1143.8	574.5	549.2	616.0	601.0
10,000	242.0	1247.2	621.9	589.0	651.4	620.5

**Cuadro 47.** Valor representativo de precipitación máxima probable (mm), de acuerdo al tiempo de concentración de las cuencas estudiadas.

Periodo de retorno (años)	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	114.8	161.3	138.6	164.0	244.9	276.1
25	126.5	248.8	198.1	209.4	286.0	321.2
50	135.4	315.0	243.2	243.8	317.2	355.4
100	144.3	381.1	288.2	278.1	348.3	389.6
200	156.0	468.6	347.7	323.6	389.4	434.7
500	164.9	534.8	392.7	357.9	420.6	468.9
1,000	173.8	600.9	437.7	392.3	451.7	503.1
5,000	194.4	754.6	542.3	472.1	523.9	582.4
10,000	203.3	820.7	587.3	506.4	555.1	616.6

### 6.10. Factor de reducción por magnitud de cuenca (FRA)

Dado que los valores de precipitación máxima probable debían corregirse por magnitud de cuenca; al aplicar la ecuación (32), se obtuvieron los siguientes resultados.

- Cuenca 13001 - Río Huicicila: 0.90
- Cuenca 23016 - Río Cintalapa: 0.93
- Cuenca 25010 - Río Pablillo: 0.87
- Cuenca 28030 - Río Actopan: 0.88
- Cuenca 28030 - Río Valle Nacional: 0.88
- Cuenca 28030 - Río Teapa: 0.91

Es decir que los valores de precipitación deben reducirse entre un 9% y un 13%, de acuerdo con el tamaño de la cuenca.

### 6.11. Valor representativo de la precipitación efectiva en las cuencas estudiadas

Hasta los apartados anteriores se ha calculado el valor de la precipitación máxima probable por periodo de retorno; sin embargo, como se ha mencionado, el método del Numero de escurrimiento nos permite determinar la cantidad de precipitación que realmente da origen al escurrimiento, conocida también como la precipitación efectiva, y cuyo valor se obtiene al aplicar la ecuación (39)

En este sentido, los valores obtenidos de precipitación efectiva por periodo de retorno se muestran en el Cuadro 48 para el caso de la precipitación total de 24 horas y en el 0 para un tiempo de duración de tormenta coincidente con el tiempo de concentración.

**Cuadro 48.** Valor representativo de la precipitación efectiva para 24 horas (mm).

Periodo de retorno (años)	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	58.9	125.2	41.7	76.7	140.5	204.0
25	70.6	233.7	82.8	115.3	178.2	246.0
50	78.4	333.3	117.0	146.9	205.7	280.2
100	85.9	426.5	150.9	178.1	233.3	315.2
200	93.3	517.4	185.2	209.3	261.9	348.3
500	103.1	636.4	231.5	249.6	300.9	387.7
1,000	110.6	726.7	267.2	282.4	330.7	413.6
5,000	128.0	934.2	351.8	356.9	399.0	461.1
10,000	135.8	1029.5	390.6	390.4	428.6	478.6

**Cuadro 49.** Valor representativo de precipitación efectiva por tiempo de concentración (mm).

Periodo de retorno (años)	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	40.2	64.9	32.6	56.4	105.0	175.3
25	48.1	131.9	67.2	87.0	134.9	214.1
50	54.2	186.6	96.9	111.7	158.3	243.7
100	60.5	243.2	128.5	137.4	182.1	273.6
200	69.0	319.8	172.4	172.5	214.3	313.3
500	75.5	378.7	206.8	199.7	239.0	343.5
1,000	82.2	438.0	241.9	227.3	264.0	373.9
5,000	98.0	577.2	325.6	292.6	322.8	444.5
10,000	104.9	637.6	362.2	321.1	348.5	475.1

Considerando la precipitación calculada para una duración de 24 h, así como para la duración igualada al tiempo de concentración en las cuencas, así como su respectivo número de escurrimiento; en el Cuadro 50 se muestra la variación encontrada para los distintos periodos de retorno considerados.

**Cuadro 50.** Porcentaje de la precipitación perdido por las abstracciones.

Cuenca estudiada	Porcentaje de abstracciones considerando los periodos de retorno	
	Precipitación calculada para 24 h	Precipitación por tiempo de concentración
13001: Río Huicicila	38% al 54%	43% al 61%
23016: Río Cintalapa	11% al 44%	17% al 57%
25010: Río Pablillo	28% al 69%	29% al 73%
28030: Río Actopan	25% al 55%	28% al 61%
28056: Río Valle Nacional	25% al 45%	28% al 51%
30032: Río Teapa	15% al 28%.	15% al 30%

Dado que las pérdidas empiezan desde el inicio de la lluvia, es normal que los valores sean mayores cuando se considera una precipitación coincidente con el tiempo de concentración calculado en las cuencas.

## 6.12. Valores de gasto máximo calculados por periodo de retorno, en función de la transformación lluvia-escorrentamiento

### 6.12.1. Método del Hidrograma Unitario Triangular (HUT)

De acuerdo con las características de las cuencas, solamente se encontró una cuenca que por su área se consideró pequeña; en este sentido, atendiendo a los métodos para el cálculo del tiempo pico se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 51.

**Cuadro 51.** Tiempo pico estimado (h), para las cuencas estudiadas

Cuencas	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
Tiempo pico (h)	7.6	4.4	10.2	7.6	8.9	11.5

Como puede observarse, el tiempo pico estimado en las cuencas varió entre 4.4 y 11.5 horas; aunque es necesario hacer notar que si bien, las ecuaciones tienen como condición el tamaño de la cuenca, el tiempo pico no está directamente relacionado al mismo. Como ejemplo se puede citar el caso de la cuenca 30032: Río Teapa, su área

solo es aproximadamente un 90% mayor al de la cuenca 23016: Río Cintalapa, mientras que su tiempo pico es aproximadamente 2.5 veces mayor.

Finalmente se calcularon los gastos máximos para cada periodo de retorno analizado y para cada cuenca estudiada, los cuales se muestran en el Cuadro 52.

**Cuadro 52.** Gastos máximos calculados por el método del HUT para las cuencas estudiadas.

Periodo de retorno (años)	Gasto máximo (m <sup>3</sup> /s)					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	594.4	696.2	647.1	1,223.4	2,730.3	1,352.3
25	710.1	1,414.8	1,331.6	1,886.7	3,506.3	1,651.2
50	800.6	2,001.5	1,920.7	2,423.7	4,114.8	1,879.9
100	893.3	2,608.6	2,547.8	2,980.1	4,734.6	2,110.2
200	1,018.8	3,430.2	3,419.0	3,742.3	5,569.7	2,416.6
500	1,115.7	4,061.2	4,100.7	4,330.6	6,213.7	2,649.6
1,000	1,214.0	4,697.9	4,797.1	4,929.9	6,862.6	2,883.5
5,000	1,447.4	6,190.6	6,456.4	6,346.8	8,390.6	3,428.7
10,000	1,549.7	6,837.7	7,183.0	6,964.5	9,058.4	3,664.4

### 6.12.2.Método TR-55

El método TR-55 es uno de los que implican la mayor cantidad de parámetros, por lo que a continuación se mostraran los resultados para algunas de las etapas de cálculo que se consideran de mayor importancia.

- En el caso de la presencia de cuerpos de agua, solamente se detectaron pequeños cuerpos en la cuenca 25010: Río Pablillo; sin embargo, eran demasiado pequeños por lo que no se requirió de ningún factor de ajuste (Fp).
- Respecto de la retención máxima potencial de cada cuenca (S), y los valores de abstracciones iniciales (*I*<sub>a</sub>), los resultados se muestran en el Cuadro 53.

**Cuadro 53.** Retención máxima potencial (S), y pérdidas iniciales durante la tormenta (*Ia*), calculados para las cuencas de estudio.

Parámetros	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
S (mm)	93.9	119.5	155.7	130.8	142.9	80.2
<i>Ia</i> (mm)	18.8	23.9	31.1	26.2	28.6	16.0

El valor de la retención máxima potencial es inversamente proporcional al número de curva; pues un menor valor del número de curva indica una cobertura que es capaz de retener un mayor volumen precipitado. En el caso de las abstracciones iniciales su valor está en relación directa con el de la retención máxima potencial, y fue el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos, quien a través de observaciones concluyó que el 20% del valor de la retención máxima potencial resultaba una buena aproximación.

Por otra parte, al establecer la relación existente entre los valores de las abstracciones iniciales y la precipitación máxima probable (en este caso denominada  $P_c$ ); se puede observar que el porcentaje que representan las abstracciones iniciales respecto de la precipitación, se torna más pequeño conforme el periodo de retorno es mayor. Los valores resultantes para el cociente  $I_a/P_c$  se muestran en el Cuadro 54.

**Cuadro 54.** Valor del cociente  $I_a/P_c$ , por periodo de retorno para las cuencas de estudio.

Periodo de retorno (años)	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	0.15	0.11	0.23	0.15	0.11	0.06
25	0.13	0.07	0.16	0.12	0.10	0.05
50	0.12	0.05	0.13	0.10	0.09	0.04
100	0.12	0.04	0.11	0.09	0.08	0.04
200	0.11	0.04	0.10	0.08	0.07	0.04
500	0.10	0.03	0.08	0.07	0.07	0.03
1,000	0.10	0.03	0.08	0.06	0.06	0.03
5,000	0.09	0.02	0.06	0.05	0.05	0.03
10,000	0.09	0.02	0.06	0.05	0.05	0.03



Atendiendo al tipo de tormenta aplicable en las cuencas, las relaciones de  $I/P_c$  y el tiempo de concentración, se obtuvieron los valores de gasto pico unitario ( $q_u$ ) por periodo de retorno.

**Cuadro 55.** Valor del gasto pico unitario ( $q_u$ ), interpolado para los cocientes de  $I/P_c$ , en las cuencas de estudio y para diferentes periodos de retorno.

Periodo de retorno (años)	Cuencas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	0.305	0.538	0.212	0.310	0.268	0.205
25	0.305	0.540	0.220	0.309	0.269	0.205
50	0.310	0.540	0.222	0.318	0.269	0.205
100	0.311	0.540	0.225	0.320	0.269	0.205
200	0.312	0.540	0.226	0.318	0.269	0.205
500	0.314	0.540	0.226	0.318	0.269	0.205
1,000	0.315	0.540	0.226	0.318	0.269	0.205
5,000	0.315	0.540	0.226	0.318	0.269	0.205
10,000	0.315	0.540	0.226	0.318	0.269	0.205

Puede notarse que, la variación en los valores obtenidos del gasto pico unitario por periodo de retorno, esta es muy pequeña; lo que sugiere que, la variación resultante del gasto máximo por periodo de retorno es dependiente en su mayoría, de la precipitación efectiva. Para el caso que nos ocupa, los valores de gasto máximo resultante por periodo de retorno en las cuencas estudiadas, se muestra en el Cuadro 56.

**Cuadro 56.** Gastos máximos calculados por el método TR-55 para las cuencas estudiadas.

Periodo de retorno (años)	Gasto máximo ( $m^3/s$ )					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	974.4	1,529.4	859.5	1,882.3	4,197.2	1,791.0
25	1,165.1	2,868.4	1,777.2	2,817.7	5,346.2	2,159.9
50	1,316.5	4,090.4	2,533.8	3,688.8	6,171.5	2,460.9
100	1,448.7	5,234.7	3,301.1	4,498.6	6,999.6	2,767.9
200	1,579.8	6,350.2	4,075.5	5,260.5	7,857.9	3,058.9
500	1,752.7	7,811.1	5,093.8	6,272.5	9,027.8	3,404.5
1,000	1,885.9	8,919.1	5,879.1	7,097.1	9,919.2	3,632.0
5,000	2,181.9	11,466.0	7,739.9	8,971.2	11,969.4	4,049.2
10,000	2,314.7	12,636.2	8,593.1	9,813.4	12,856.4	4,202.4

### 6.12.3. Método del Hidrograma Unitario de Clark

El método de Clark consiste en calcular el hidrograma que se produce a partir de la lluvia efectiva en una cuenca y el tránsito de dicho hidrograma; por lo que, atendiendo a los procedimientos establecidos para su cálculo, en el Cuadro 57 se muestran los parámetros que se utilizaron para el desarrollo del método.

**Cuadro 57.** Parámetros de cálculo para el desarrollo del hidrograma Unitario de Clark en las cuencas de estudio.

Parámetros	Cuenclas					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
Área (km <sup>2</sup> )	541.9	227.09	973.95	790.26	1,115.63	427.81
T <sub>c</sub> (h)	8.0	4.0	11.4	7.9	9.7	13.2
Δt (h)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
R (h)	4.8	2.4	6.8	4.8	5.8	7.9
c	0.10	0.19	0.07	0.10	0.08	0.06

Partiendo de los hidrogramas resultantes, se obtuvieron los valores de gasto máximo para cada cuenca y periodo de retorno, los resultados de los mismos se muestran en el Cuadro 58.

**Cuadro 58.** Gastos máximos calculados en las cuencas de estudio, con el método del hidrograma Unitario de Clark.

Periodo de retorno (años)	Gastos máximos (m <sup>3</sup> /s)					
	13001: Río Huicicila	23016: Río Cintalapa	25010: Río Pablillo	28030: Río Actopan	28056: Río Valle Nacional	30032: Río Teapa
10	751.3	967.2	776.3	1,547.3	3,352.7	1,599.8
25	898.9	1,965.7	1,600.3	2,386.7	4,307.4	1,953.9
50	1,012.9	2,780.9	2,307.6	3,064.4	5,054.6	2,224.1
100	1,130.6	3,624.4	3,060.1	3,769.4	5,814.6	2,496.9
200	1,289.5	4,766.0	4,102.7	4,732.3	6,842.7	2,859.2
500	1,411.0	5,643.8	4,924.7	5,478.5	7,631.4	3,134.8
1,000	1,536.2	6,527.6	5,760.5	6,101.8	8,429.7	3,412.3
5,000	1,831.5	8,602.1	7,753.8	8,027.2	10,307.2	4,056.6
10,000	1,960.4	9,502.2	8,625.3	8,809.0	11,127.8	4,335.9

### 6.13. Estimación de las variaciones en los gastos máximos obtenidos por métodos hidrológicos e hidrométricos.

Hasta este punto, se han obtenido los valores de gasto máximo probable en las cuencas, series hidrométricas y métodos hidrológicos. Sin embargo, como vimos en los resultados de las pruebas de homogeneidad, se encontró que las series de datos hidrométricos en 3 de las 6 cuencas seleccionadas para su estudio no eran consistentes; por lo que los resultados de gasto máximo obtenido por periodo de retorno pudieran ser erróneos, dificultando el poder establecer la comparación de los gastos máximos obtenidos por métodos hidrológicos.

En este sentido, para estimar el error relativo existente entre los métodos hidrométricos e hidrológicos se han constituido 2 grupos: series de datos hidrométricos homogéneos y no homogéneos, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 59 y Cuadro 60

**Cuadro 59.** Error relativo (en %) de los gastos máximos obtenidos con métodos hidrológicos, para las series homogéneas.

Periodo de retorno (años)	Cuenca 25010: Río Pablillo			Cuenca 28030: Río Actopan			Cuenca 28056: Río Valle Nacional		
	HUT	TR-55	CLARK	HUT	TR-55	CLARK	HUT	TR-55	CLARK
10	48.8	97.6	78.5	92.1	195.6	143.0	23.7	90.1	51.9
25	76.7	135.9	112.4	107.3	209.6	162.2	33.2	103.1	63.7
50	78.7	135.8	114.7	121.9	237.7	180.5	39.5	109.3	71.4
100	72.3	123.2	106.9	135.2	255.0	197.5	45.0	114.3	78.0
200	72.6	105.7	107.1	160.2	265.7	229.0	55.3	119.2	90.8
500	45.2	80.4	74.4	160.4	277.2	229.5	54.7	124.8	90.0
1,000	32.1	61.9	58.6	169.1	287.4	233.1	57.7	127.9	93.7
5,000	6.5	27.7	27.9	185.6	303.7	261.2	63.6	133.4	101.0
10,000	-4.9	13.8	14.2	191.5	310.8	268.7	64.7	133.7	102.3

**Cuadro 60.** Error relativo (en %) de los gastos máximos obtenidos con métodos hidrológicos, para las series no homogéneas.

Periodo de retorno (años)	Cuenca 13001: Río Huicicila			Cuenca 23016: Río Cintalapa			Cuenca 30032: Río Teapa		
	HUT	TR-55	CLARK	HUT	TR-55	CLARK	HUT	TR-55	CLARK
10	29.3	112.0	63.5	104.5	349.2	184.1	-8.0	21.8	8.8
25	-7.0	52.7	17.8	152.4	411.8	250.7	-33.1	-12.5	-20.8
50	-24.4	24.3	-4.4	158.7	428.7	259.5	-38.6	-19.7	-27.4
100	-37.2	1.8	-20.5	152.4	406.5	250.7	-41.5	-23.2	-30.7
200	-45.3	-15.2	-30.8	154.6	371.4	253.8	-41.4	-25.8	-30.7
500	-56.8	-32.2	-45.4	118.6	320.4	203.7	-44.8	-29.0	-34.6
1,000	-62.8	-42.1	-52.9	101.2	282.0	179.6	-45.6	-31.5	-35.6
5,000	-72.3	-58.3	-65.0	66.6	208.6	131.5	-46.9	-37.3	-37.2
10,000	-75.8	-63.9	-69.4	50.8	178.6	109.5	-47.6	-39.9	-38.0

Podemos observar que el error relativo entre gastos máximos, que se obtuvieron donde se compararon las series de datos hidrométricos que resultaron homogéneas va desde un 5% hasta un 300%; dependiendo del método hidrológico; y casi para la totalidad de los datos se observó que el gasto máximo obtenido por los métodos hidrológicos supera al valor obtenido por ajuste de funciones de probabilidad a las series de datos observados. Con una excepción en la cuenca 25010, donde para un periodo de retorno de 10,000 años, con el método del HUT se obtuvo un gasto máximo menor al obtenido con los ajustes de probabilidad aplicados a la serie hidrométrica.

Esta relación no se observa en el error relativo que se obtuvo al comparar las series de datos hidrométricos que no resultaron homogéneas; para cuyo caso el mismo se encuentra entre un 2% y un 400%. Además, existen 2 estaciones en las que el valor de gasto máximo obtenido con métodos hidrológicos es mucho menor al obtenido de por ajuste de funciones de probabilidad a las series de datos observados

Al analizar los rangos de precipitación anual tenemos que la cuenca 13001 posee valores similares a la cuenca 28030 (800-1500 mm y 600-1800 mm respectivamente) y ambas se encuentran en una latitud similar. Sin embargo, conforme el periodo de retorno es mayor, los gastos máximos obtenidos en la estación hidrométrica 13001 son muy

superiores a los encontrados en la 28030; siendo hasta 4 veces mayor para el periodo de retorno de 10,000 años. Atendiendo a esta situación, se puede suponer que existen errores en los datos hidrométricos, de la estación 13001, lo que también se reflejó en que dicha serie resultó estadísticamente no homogénea; además ésta puede ser la razón por la que los gastos máximos obtenidos a partir de los ajustes de probabilidad aplicados a los datos hidrométricos resultaran superiores a los obtenidos por los métodos hidrológicos.

Respecto a la situación de la cuenca 30032, donde también encontramos que los gastos máximos obtenidos con los ajustes de probabilidad aplicados a las series hidrométricas fueron superiores a los obtenidos con métodos hidrológicos; se puede establecer una comparación entre dicha cuenca y la 23016. Los rangos de precipitación anual en la cuenca 30032 son de 2,000 a 4,000 mm, mientras que en la cuenca 23016 van de 1,500 a 3,500 mm; sin embargo, los valores de gasto máximo obtenidos por unidad de área no son concordantes, pues los valores de gasto máximo en la cuenca 30032 son menores a los obtenidos en la cuenca 23016.

Atendiendo a las situaciones antes expuestas, podemos sugerir que existen errores en los valores registrados en las estaciones hidrométricas, lo que conduce a estimaciones erróneas para los gastos máximos por periodo de retorno.

## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se ha analizado la aplicabilidad del método del Número de Curva y 3 métodos hidrológicos para estimar los gastos máximos de escurrimiento en cuencas hidrográficas con escasa información, encontrando que en su aplicación se obtienen diferencias notables en los valores de gasto máximo, al comparar los ajustes obtenidos con funciones de probabilidad, cuando se tienen datos provenientes de estaciones hidrométricas. También resulta de suma importancia analizar que las series de información pluviométrica sean homogéneas y estén conformadas por variables aleatorias.

## Conclusiones

Atendiendo a los resultados obtenidos, se pueden formular las siguientes conclusiones:

1. La mayoría de los gastos máximos calculados por métodos hidrológicos se encontraron muy superiores a los calculados por métodos hidrométricos.
2. El mejor ajuste entre los gastos máximos calculados a partir de series hidrométricas y los métodos hidrológicos, se logra al utilizar el método hidrológico del Hidrograma Unitario Triangular. El segundo lugar con relativamente buen ajuste corresponde al método de Hidrograma Unitario de Clark y el peor ajuste se obtuvo con el método del TR-55.
3. De acuerdo con la zona de estudio y datos utilizados, encontramos que en zonas con un régimen de precipitaciones altas (como el sureste mexicano), los métodos hidrológicos tienden a sobreestimar los valores de gasto máximo por periodo de retorno, si comparamos los resultados obtenidos con funciones de probabilidad ajustados a series de datos provenientes de estaciones hidrométricas (datos observados).
4. Los resultados obtenidos también indican que, en zonas de alta precipitación; al comparar los gastos máximos obtenidos por métodos hidrológicos e hidrométricos son más cercanos para periodos de retorno pequeños y se separan conforme incrementa el periodo de retorno.
5. De otro modo, para la zona con un régimen de precipitación baja; se encontró que el ajuste era mejor para periodos de retorno pequeños y grandes y peor para los periodos intermedio.

Las inconsistencias que pudieran aparecer en el comportamiento del error relativo, pueden tener su origen en la forma de calcular la precipitación representativa de la cuenca; pues se ponderan varias series de datos que pueden no coincidir en la longitud de registros, y por lo tanto también el comportamiento de la función de probabilidad ajustada puede resultar diferente.

El método del número de curva nos permite calcular la precipitación que dará origen al escurrimiento; sin embargo, el procedimiento para calcular el gasto máximo implica una

serie de métodos que, si bien han sido estudiados, conllevan un porcentaje de error para calcular los gastos máximos y son susceptibles de mejorar. Realizando un análisis encontramos que por ejemplo en el caso del método del TR-55; si se tomara en cuenta la precipitación igualada al tiempo de concentración, se disminuye el error relativo, alcanzando un ajuste mejor al del Método de Clark.

## **Recomendaciones**

En la práctica se recomienda que se utilicen datos provenientes de series hidrométricas y solamente se empleen métodos indirectos de transformación lluvia-escorrentamiento (hidrológicos), cuando no se cuente con datos de hidrometría. Sin embargo, como vimos en las cuencas analizadas, existe la posibilidad de que los registros hidrométricos sean erróneos; por lo que se recomienda que nunca se use una serie solamente por contener un amplio registro y sin realizad pruebas estadísticas, si encuentra que el comportamiento no es homogéneo, Campos (1998) sugiere hacer ajustes o correcciones a dichas series para volverlas homogéneas, que deberán buscarse, puesto que no formaron parte de la presente investigación.

A pesar de contar con series de datos hidrométricas; el utilizar métodos hidrológicos, puede darnos una aproximación para establecer que los valores son correctos; puesto que la toma de datos también es un factor de error. Específicamente, se sugiere el uso del método del Hidrograma Unitario Triangular.

En la presente tesis se ha utilizado la forma comúnmente usada para la elaboración de análisis hidrológicos para la construcción de obras de protección; sin embargo, dado que la variación en los resultados obtenidos para el cálculo de gastos máximos fue muy grande, se sugiere para trabajos futuros investigar métodos diferentes por ejemplo en las funciones de probabilidad o los métodos hidrológicos.

## 8. LITERATURA CITADA

- Allende T. C. y Mendoza, M. E., 2007. Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, Núm. 63, 56-76 pp
- Aparicio, M. F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. México, D. F. Editorial Limusa.
- Arias P. P; 2015. Guía de Aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Ejemplos prácticos. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”. La Habana, Cuba. 1-18 pp.
- Campos A. D. F., Gómez de L. R. 1990. Procedimiento para obtener Curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos. Ingeniería Hidráulica en México. V(2): 39-52.
- Campos, A. D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. San Luis Potosí. Editorial Universitaria Potosina.
- Campos-Aranda D. F. 2010. Introducción a la hidrología urbana. 1a. Edición. Ed. Autor. San Luis Potosí. S.L.P. México.
- Campos-Aranda D. F. 2014. Modelación del proceso precipitación- escurrimiento mensual por medio de regresiones. Ingeniería Investigación y Tecnología, XV(04): 625-636.
- Chow V. T; Maidment, D.R. y Mays, L.W. 1994. Hidrología Aplicada, Traducida por Saldarriaga, J. McGRAW-HILL, Colombia 584 pp.
- CONAGUA. 2011. Manual para el control de inundaciones. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.
- CONAGUA. 2015. Banco Nacional de Datos de Aguas superficiales (BANDAS). Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos. Archivos descargados y disponibles en su página de internet en: [ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases\\_Datos\\_Bandas](ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas)



- Conde R. R., Vita G. A. L., Castro O. V. A. y López M. J. R. 2014. Construcción de curvas I-D-Tr de las estaciones climatológicas de México con la base de datos del SMN-CONAGUA. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 1a. ed. Puebla, México.
- Costa-Cabral M. Burges S. J. 1994. Digital Elevation Model Networks (DEMON): a model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal áreas. *Water Resources Research*, 30(1):1681-1692
- Davie T. 2008. *Fundamentals of hydrology*. Ed. Routledge. New York, N. Y.
- Domínguez M. R., Gracia S. J., Carrizosa E. E., Esquivel G. G., Arganis J. L. M., Franco V. 2015. Pérdidas (pp. 1-59). En *Manual de diseño de obras civiles*. Marengo, H., Noyola, A., Camargo, J., & Franco, V. (Eds.). México. D.F. Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- ESA (2012. Imágenes satelitales Sentinel 2A. European Space Agency Consultado en Octubre de 2017. Recuperado de <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- ESRI. (2013). *Software ArcMap 10.2.2*. Environmental Systems Research Institute.
- Escalante S. C. A. y Reyes C. L. 2008. *Técnicas estadísticas en hidrología*. México, Departamento de la Facultad de Ingeniería – UNAM.
- Farías M. 2007. Método de Abstracciones o del Número de Curva del SCS. Universidad de Piura 2-7 pp.
- Fuentes M. O. A. y Franco V. (1996). Estudio hidrológico para obras de protección. En *Manual de Ingeniería de Ríos*. (Comisión Nacional del Agua e Instituto de Ingeniería de la UNAM). México D. F. CONAGUA. (2011). *Manual para el control de inundaciones*. México D. F. Ed. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

- Garrido M. 2008. Cálculo hidrológico de procesos de lluvia-escorrentía mediante un modelo de aguas someras 2D. Universidad de Coruña, España. 16-17 pp.
- Gaspari F. J., Senisterra G.E., Marlats R. M. Relación precipitación - escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso del suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. Rev. FCA UNCuyo. Tomo XXXIX. N° 1. Año 2007. Pp. 21-28.
- Hawkins R. H. 1975. The importance of accurate curve numbers in the estimation of storm runoff. Journal of the American Water Resources Association, 11(5): 887-891.
- Hawkins R. H. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 119(2): 334-345
- Hurtado W. A. 2015. Análisis regional de frecuencia de caudales máximos en la cuenca alta y media del Río Magdalena-Colombia, UNAM, México.
- Hydrologic Engineering Center (HEC). 2000. Hydrologic Modeling System HEC-HMS - User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- INEGI. 2010. Red Hidrográfica (escala 1: 50,000). Instituto Nacional de Estadística y Geografía Archivo descargado y disponible en su página de internet en: [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones\\_hidrograficas.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/regiones_hidrograficas.aspx)
- INEGI. 2013. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Archivo descargado y disponible en su página de internet: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continuoelevaciones.aspx>
- INEGI. 2012. Datos vectoriales de uso del suelo y vegetación (escala 1: 250,000). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Archivo descargado y disponible en su página de internet en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/>
- INEGI). 2012. Conjunto de datos vectorial edafológico (escala 1: 250,000 serie II). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Archivo descargado y disponible en

su página de internet en:  
[http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial\\_serieii.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx)

- Jiménez. E. M. 1997. Manual de operación de los programas AX. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Sistema Nacional de Protección Civil.
- K. X. Soulis and J. D. Valiantzas. 2012. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds - the two-CN system approach. *Hydrology and Earth System Sciences*. 16(3): 1001–1015.
- Mockus. V. 1957. Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. Annual meeting of AGU Pacific Southwest Region.
- Muñoz E. 2010. Desarrollo de un modelo hidrológico como herramienta de apoyo para la gestión del agua. Aplicación a la cuenca del Río Laja, Chile. Universidad de Cantabria, España. 4-8 pp.
- Natural Resources Conservation Service, 1986. Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55. United States. Department of Agriculture.
- Nicklow J. W., Boulos P. y Muleta M. 2006. Comprehensive Urban Hydrologic Modeling Handbook for Engineers and Planners. Ed. MWH Soft. Pasadena, California.
- O'Callaghan J. F., Mark D.M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28(1):323-344.
- Pacheco R. 2012. Modelación Hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba, La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), 3, 21-84 pp
- Plaza F. J., 2010. Eficiencia de las técnicas regionales Hidrológicas en función del tamaño de muestra disponible. UNAM, México. 99 pp.

- Rivano F. M. 2004. Análisis de eventos extremos de precipitación y su efecto en el diseño de drenaje superficial de tierras agrícolas del sur de Chile. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 92 pp.
- Rodríguez Y. 2011. Modelación hidrológica de avenidas. Caso de estudio: Cuenca del río Zaza. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cuba. 9-66 pp.
- SMN (2017). Proyecto de bases de datos climatológicos. México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Consultado en agosto de 2017. disponible en su página de internet en: <http://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Diarios/>
- SMN (2010). Base de datos climática nacional. Sistema de Información Climática Computadorizada (CLICOM). México, DF: Servicio Meteorológico Nacional. Consultado en agosto de 2017. disponible en su página de internet en: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>.
- Sánchez S. R. J. 2017. Hidrología Superficial y Subterránea. Createspace Independent Publishing Platform. Salamanca, España.
- Shadeed, S. and Almasri, M., 2010. Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. *Water Science and Engineering*. 3(1):1-13.
- Simas M. 1996. Lag time characteristics in small watersheds in the United States. A dissertation submitted to School of Renewable Natural Resources, University of Arizona, Tucson, AZ.
- TAMU. (2012). Software ArcSWAT 2012. Texas A&M University. Archivo descargado y disponible en su página de internet en: <http://swat.tamu.edu/software/arcswat/>
- Tedela N. H., McCutcheon S. C., Rasmussen T. C., Hawkins R. H., Swank W. T., Campbell J. L., Adams M. B., Jackson C. R. y Tollner, E. W. 2012. Runoff Curve Number for 10 small forested watersheds in the mountains of the eastern United States. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(11) 1188-1198.

- Viessman, W., & Lewis G. L. (1997). Introduction to Hydrology. Gainesville, FL. Prentice Hall.
- Wang, L. & H. Liu (2006): An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. International Journal of Geographical Information Science. 20(2): 193-213.
- WMO. 2009. Manual on estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP). World Meteorological Organization. Chairperson, Publications Board. Geneva, Switzerland
- Zhan X. y M. Huang. 2004. ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. Journal of Environmental Modelling and Software.19(10),875-879.
- Zúñiga R., Muñoz E. y Arumí J. L. 2012. Estudio de los Procesos Hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. Obras y Proyectos 11, 69-78 pp.

## 9. ANEXOS

**Anexo 1.** Resultados de la prueba estadística de Helmert aplicada a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas.

- Estaciones climatológicas de la cuenca 13001: Río Huicicila.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 13001: Río Huicicila								
	18006	18010	18023	18025	18038	18040	18077	18079	18083
$\bar{x}$	77.77	81.12	82.86	133.31	82.03	69.65	57.87	81.45	116.27
Secuencias	19.00	11.00	18.00	23.00	16.00	18.00	14.00	20.00	10.00
Cambios	8.00	18.00	30.00	36.00	21.00	14.00	12.00	9.00	13.00
$\sqrt{n-1}$	5.20	5.39	6.93	7.68	6.08	5.66	5.10	5.39	4.80
S-C	11.00	-7.00	-12.00	-13.00	-5.00	4.00	2.00	11.00	-3.00
Resultado	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 23016: Río Cintalapa.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 23016: Río Cintalapa				
	7048	7053	7348	7390	7393
$\bar{x}$	182.04	147.40	191.97	245.44	148.39
Secuencias	13.00	21.00	13.00	15.00	18.00
Cambios	12.00	18.00	14.00	15.00	16.00
$\sqrt{n-1}$	5.00	6.24	5.20	5.48	5.83
S-C	1.00	3.00	-1.00	0.00	2.00
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 25010: Río Pablillo.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 25010: Río Pablillo									
	19027	19034	19035	19091	19100	19111	19144	19147	19155	28060
$\bar{x}$	78.17	96.80	98.71	75.83	103.20	54.09	63.48	113.01	46.21	101.26
Secuencias	37.00	21.00	32.00	22.00	11.00	12.00	19.00	9.00	11.00	29.00
Cambios	30.00	23.00	34.00	18.00	10.00	8.00	16.00	10.00	16.00	18.00
$\sqrt{n-1}$	8.19	6.63	8.12	6.32	4.58	4.47	5.92	4.36	5.20	6.86
S-C	7.00	-2.00	-2.00	4.00	1.00	4.00	3.00	-1.00	-5.00	11.00
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 28030: Río Actopan.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 28030: Río Actopan										
	30003	30007	30040	30089	30097	30114	30175	30195	30228	30267	30452
$\bar{x}$	96.59	83.69	146.42	134.08	74.60	109.26	104.54	90.57	92.21	116.01	95.35
Secuencias	28.00	21.00	13.00	27.00	26.00	32.00	27.00	24.00	14.00	19.00	23.00
Cambios	35.00	21.00	6.00	24.00	19.00	28.00	21.00	19.00	13.00	22.00	8.00
$\sqrt{n-1}$	7.94	6.48	4.36	7.14	6.71	7.75	6.93	6.56	5.20	6.40	5.57
S-C	-7.00	0.00	7.00	3.00	7.00	4.00	6.00	5.00	1.00	-3.00	15.00
Resultado	Serie homog.	Serie homog.	Serie NO homog.	Serie homog.	Serie NO homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie NO homog.

- Estaciones climatológicas de la cuenca 28056: Río Valle Nacional.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 28056: Río Valle Nacional								
	20004	20041	20042	20064	20114	20136	20175	20183	20279
$\bar{x}$	65.43	62.98	197.28	75.50	169.46	199.52	188.64	126.77	166.02
Secuencias	25.00	33.00	27.00	18.00	29.00	10.00	29.00	17.00	10.00
Cambios	23.00	14.00	25.00	13.00	14.00	13.00	14.00	20.00	14.00
$\sqrt{n-1}$	6.93	6.86	7.21	5.57	6.56	4.80	6.56	6.08	4.90
S-C	2.00	19.00	2.00	5.00	15.00	-3.00	15.00	-3.00	-4.00
Resultado	Serie homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 30032: Río Teapa.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 30032: Río Teapa								
	7032	7167	7186	7217	27024	27044	27045	27061	27068
$\bar{x}$	182.04	147.40	191.97	245.44	148.39	177.66	192.69	189.74	185.54
Secuencias	13.00	21.00	13.00	15.00	18.00	25.00	25.00	21.00	17.00
Cambios	12.00	18.00	14.00	15.00	16.00	27.00	37.00	18.00	17.00
$\sqrt{n-1}$	5.00	6.24	5.20	5.48	5.83	7.21	7.87	6.24	5.83
S-C	1.00	3.00	-1.00	0.00	2.00	-2.00	-12.00	3.00	0.00
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea



**Anexo 2.** Resultados de la prueba estadística t de Student aplicada a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas

- Estaciones climatológicas de la cuenca 13001: Río Huicicila.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 13001: Río Huicicila								
	18006	18010	18023	18025	18038	18040	18077	18079	18083
n	28	30	49	60	38	33	27	30	24
n <sub>1</sub>	14	15	24	30	19	16	14	15	12
n <sub>2</sub>	14	15	25	30	19	17	13	15	12
$\bar{x}_1$	85.79	82.53	82.13	135.70	78.25	67.83	53.65	74.75	109.48
$\bar{x}_2$	69.75	79.71	83.57	130.92	85.81	71.36	62.41	88.15	123.05
s <sub>1</sub>	28.28	29.13	23.03	37.33	24.64	17.19	10.91	23.88	31.96
s <sub>2</sub>	19.70	27.74	18.05	32.70	28.58	14.54	10.98	17.66	39.07
t <sub>d</sub>	1.68	0.26	-0.24	0.52	-0.85	-0.62	-2.00	-1.69	-0.89
gl	26.00	28.00	47.00	58.00	36.00	31.00	25.00	28.00	22.00
α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>c</sub>	1.71	1.70	1.68	1.67	1.69	1.70	1.71	1.70	1.72
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 23016: Río Cintalapa.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 23016: Río Cintalapa				
	7048	7053	7348	7390	7393
n	26	40	28	31	35
n <sub>1</sub>	13	20	14	16	18
n <sub>2</sub>	13	20	14	15	17
$\bar{x}_1$	191.77	156.61	183.36	241.38	140.28
$\bar{x}_2$	172.32	138.19	200.57	249.78	156.97
s <sub>1</sub>	59.97	72.88	82.72	58.93	34.33
s <sub>2</sub>	51.38	57.27	71.44	61.24	65.27
t <sub>d</sub>	0.85	0.87	-0.57	-0.38	-0.93
gl	24.00	38.00	26.00	29.00	33.00
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>c</sub>	2.06	2.02	2.06	2.05	2.04
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 25010: Río Pablillo.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 25010: Río Pablillo									
	19027	19034	19035	19091	19100	19111	19144	19147	19155	28060
n	68	45	67	41	22	21	36	20	28	48
n <sub>1</sub>	34	22	34	20	11	10	18	10	14	24
n <sub>2</sub>	34	23	33	21	11	11	18	10	14	24
$\bar{x}_1$	68.34	92.80	94.93	65.62	96.95	44.53	52.87	108.90	40.50	94.91
$\bar{x}_2$	88.00	100.63	102.61	85.56	109.44	62.77	74.08	117.12	51.93	107.61
s <sub>1</sub>	34.65	44.21	36.48	34.57	27.51	18.31	14.41	22.16	19.03	35.42
s <sub>2</sub>	66.10	42.11	50.62	53.78	32.42	34.36	51.86	47.15	35.31	47.91
t <sub>d</sub>	-1.51	-0.59	-0.70	-1.37	-0.93	-1.42	-1.62	-0.47	-1.03	-1.02
gl	66.00	43.00	65.00	39.00	20.00	19.00	34.00	18.00	26.00	46
α	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>c</sub>	1.997	2.017	1.997	2.023	2.086	2.093	2.032	2.101	2.056	2.013
Resultado	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.

- Estaciones climatológicas de la cuenca 28030: Río Actopan.

Parámetro S	Estaciones climatológicas Cuenca 28030: Río Actopan										
	30003	30007	30040	30089	30097	30114	30175	30195	30228	30267	30452
n	64	43	20	52	46	61	49	44	28	42	32
n <sub>1</sub>	32	22	10	26	23	30	24	22	14	21	16
n <sub>2</sub>	32	21	10	26	23	31	25	22	14	21	16
$\bar{x}_1$	98.27	78.68	160.15	132.96	70.00	106.21	97.63	83.92	89.37	113.1	89.91
$\bar{x}_2$	94.91	88.95	132.68	135.20	79.20	112.21	111.19	97.22	95.04	118.92	100.79
s <sub>1</sub>	43.67	36.98	117.31	66.82	37.92	37.47	55.54	35.80	29.63	52.91	24.99
s <sub>2</sub>	46.76	37.91	59.22	67.60	59.03	45.53	59.90	31.20	33.35	45.11	39.30
t <sub>d</sub>	0.29	-0.88	0.63	-0.12	-0.61	-0.55	-0.80	-1.28	-0.46	-0.37	-0.91
gl	62.00	41.00	18.00	50.00	44.00	59.00	47.00	42.00	26.00	40	30
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	1.999	2.020	2.101	2.009	2.015	2.001	2.012	2.018	2.056	2.021	2.042
Resultados	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.

- Estaciones climatológicas de la cuenca 28056: Río Valle Nacional.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 28056: Río Valle Nacional								
	20004	20041	20042	20064	20114	20136	20175	20183	20279
n	49	48	53	32	44	24	44	38	25
n <sub>1</sub>	24	24	26	16	22	12	22	19	12
n <sub>2</sub>	25	24	27	16	22	12	22	19	13
$\bar{x}_1$	52.93	56.18	189.77	65.65	184.52	193.70	184.54	117.56	157.45
$\bar{x}_2$	77.44	69.79	204.51	85.35	154.41	205.34	192.74	135.98	173.92
s <sub>1</sub>	13.96	22.73	53.01	18.21	64.02	78.57	66.72	33.03	50.90
s <sub>2</sub>	53.46	41.43	49.92	48.75	112.69	74.29	102.07	44.85	35.51
t <sub>d</sub>	-2.13	-1.38	-1.02	-1.47	1.06	-0.36	-0.31	-1.40	-0.91
gl	47.00	46.00	51.00	30.00	42.00	22.00	42.00	36.00	23.00
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	2.012	2.013	2.008	2.042	2.018	2.074	2.018	2.028	2.069
Resultados	Serie NO homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 30032: Río Teapa.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 30032: Río Teapa								
	7032	7167	7186	7217	27024	27044	27045	27061	27068
n	26	40	28	31	35	53	63	40	35
n <sub>1</sub>	13	20	14	16	18	26	32	20	18
n <sub>2</sub>	13	20	14	15	17	27	31	20	17
$\bar{x}_1$	191.77	156.61	183.36	241.38	140.28	181.18	191.47	196.41	185.62
$\bar{x}_2$	172.32	138.19	200.57	249.78	156.97	174.28	193.94	183.08	185.45
s <sub>1</sub>	59.97	72.88	82.72	58.93	34.33	40.79	67.49	59.74	48.36
s <sub>2</sub>	51.38	57.27	71.44	61.24	65.27	46.97	53.47	66.04	63.31
t <sub>d</sub>	0.85	0.87	-0.57	-0.38	-0.93	0.56	-0.16	0.65	0.01
gl	24.00	38.00	26.00	29.00	33.00	51.00	61.00	38.00	33.00
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
t <sub>c</sub>	2.064	2.024	2.056	2.045	2.035	2.008	2.000	2.024	2.035
Resultados	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

**Anexo 3.** Resultados de la prueba estadística de Cramer aplicada a las series de precipitación máxima diaria, en las estaciones climatológicas

- Estaciones climatológicas de la cuenca 13001: Río Huicicila.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 13001: Río Huicicila								
	18006	18010	18023	18025	18038	18040	18077	18079	18083
$n_{100}$	28	30	49	60	38	33	27	30	24
$n_{60}$	17	18	29	36	23	20	16	18	14
$n_{30}$	8	9	15	18	11	10	8	9	7
$\bar{x}_{100}$	77.77	81.12	82.86	133.31	82.03	69.65	57.87	81.45	116.27
$\bar{x}_{60}$	77.03	79.59	83.59	134.20	87.35	69.79	60.48	88.22	116.59
$\bar{x}_{30}$	75.61	82.43	83.71	135.05	87.18	72.51	59.82	87.02	134.98
s	25.27	27.99	20.44	34.88	26.60	15.73	11.62	21.73	35.59
$T_{60}$	-0.03	-0.05	0.04	0.03	0.20	0.01	0.23	0.31	0.01
$T_{30}$	-0.09	0.05	0.04	0.05	0.19	0.18	0.17	0.26	0.53
$t_{60}$	0.19	0.35	0.29	0.24	1.53	0.06	1.41	2.19	0.05
$t_{30}$	0.28	0.16	0.19	0.25	0.75	0.67	0.55	0.90	1.68
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	1.70	1.70	1.68	1.67	1.69	1.69	1.71	1.70	1.71
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 23016: Río Cintalapa.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 23016: Río Cintalapa				
	7048	7053	7348	7390	7393
$n_{100}$	26	40	28	31	35
$n_{60}$	16	24	17	19	21
$n_{30}$	8	12	8	9	10
$\bar{x}_{100}$	182.04	147.40	191.97	245.44	148.39
$\bar{x}_{60}$	175.15	145.60	188.61	246.47	147.56
$\bar{x}_{30}$	170.79	154.11	193.17	239.25	167.80
s	55.60	65.37	76.35	59.20	51.63
$\tau_{60}$	-0.12	-0.03	-0.04	0.02	-0.02
$\tau_{30}$	-0.20	0.10	0.02	-0.10	0.38
$t_{60}$	0.78	0.21	0.28	0.12	0.11
$t_{30}$	0.67	0.42	0.05	0.36	1.41
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	2.06	2.02	2.06	2.05	2.04
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea



- Estaciones climatológicas de la cuenca 25010: Río Pablillo.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 25010: Río Pablillo									
	19027	19034	19035	19091	19100	19111	19144	19147	19155	28060
$n_{100}$	68	45	67	41	22	21	36	20	28	48
$n_{60}$	41	27	40	25	13	13	22	12	17	29
$n_{30}$	20	14	20	12	7	6	11	6	8	14
$\bar{x}_{100}$	78.17	96.80	98.71	75.83	103.20	54.09	63.48	113.01	46.21	101.26
$\bar{x}_{60}$	86.86	99.14	102.93	81.83	111.06	60.89	69.84	118.28	50.78	101.95
$\bar{x}_{30}$	95.19	97.87	106.79	88.12	106.69	72.64	86.45	121.76	62.26	103.77
s	53.31	42.84	43.85	45.99	30.03	28.78	39.02	36.10	28.44	42.17
$\tau_{60}$	0.16	0.05	0.10	0.13	0.26	0.24	0.16	0.15	0.16	0.02
$\tau_{30}$	0.32	0.02	0.18	0.27	0.12	0.64	0.59	0.24	0.56	0.06
$t_{60}$	1.67	0.44	0.95	1.03	1.48	1.38	1.22	0.77	1.04	0.14
$t_{30}$	1.71	0.11	0.98	1.09	0.36	1.95	2.47	0.68	1.95	0.26
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	1.997	2.017	1.997	2.023	2.086	2.093	2.032	2.101	2.056	2.013
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

- Estaciones climatológicas de la cuenca 28030: Río Actopan.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 28030: Río Actopan										
	30003	30007	30040	30089	30097	30114	30175	30195	30228	30267	30452
$n_{100}$	64	43	20	52	46	61	49	44	28	42	32
$n_{60}$	38	26	12	31	28	37	29	26	17	25	19
$n_{30}$	19	13	6	16	14	18	15	13	8	13	10
$\bar{x}_{100}$	96.59	83.69	146.42	134.08	74.60	109.26	104.54	90.57	92.21	116.01	95.35
$\bar{x}_{60}$	93.93	82.14	139.75	131.25	75.29	108.36	106.51	93.04	95.01	118.58	102.75
$\bar{x}_{30}$	100.46	94.77	144.40	140.21	89.89	118.49	125.17	89.04	105.29	127.62	110.77
s	44.91	37.35	91.54	66.56	49.28	41.52	57.61	33.86	31.09	48.65	32.86
$\tau_{60}$	-0.06	-0.04	-0.07	-0.04	0.01	-0.02	0.03	0.07	0.09	0.05	0.23
$\tau_{30}$	0.09	0.30	-0.02	0.09	0.31	0.22	0.36	-0.05	0.42	0.24	0.47
$t_{60}$	0.57	0.33	0.38	0.37	0.12	0.21	0.28	0.57	0.58	0.41	1.55
$t_{30}$	0.44	1.27	0.06	0.43	1.39	1.12	1.68	0.19	1.41	1.02	1.83
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	1.999	2.020	2.101	2.009	2.015	2.001	2.012	2.018	2.056	2.021	2.042
Resultado	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.	Serie homog.

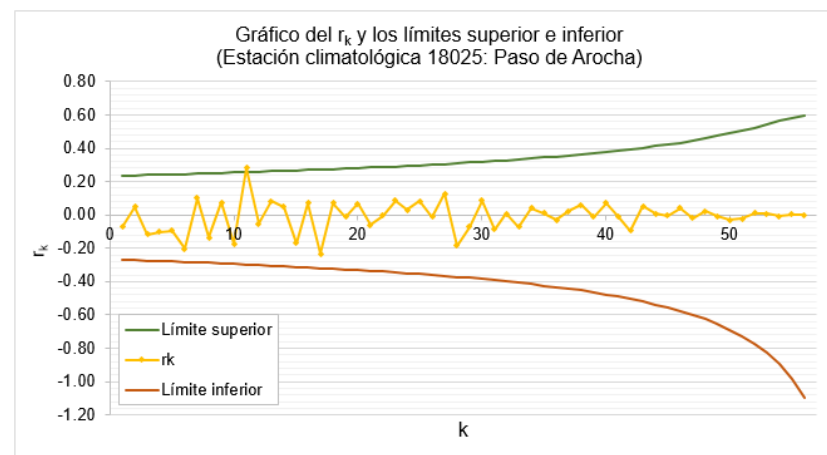
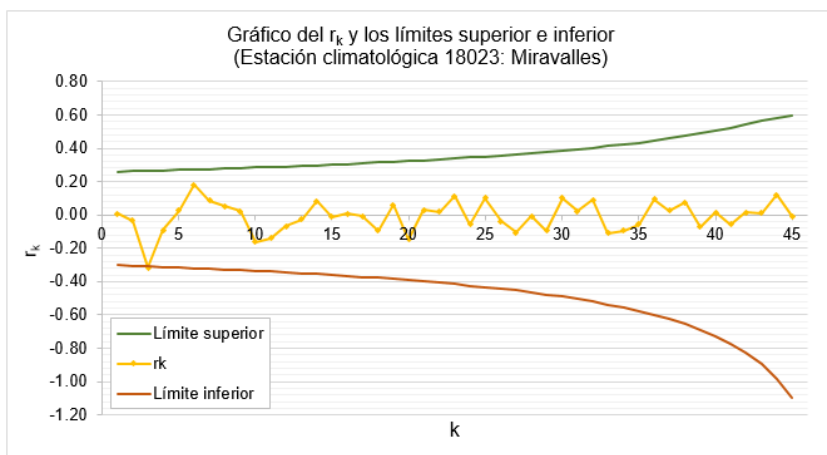
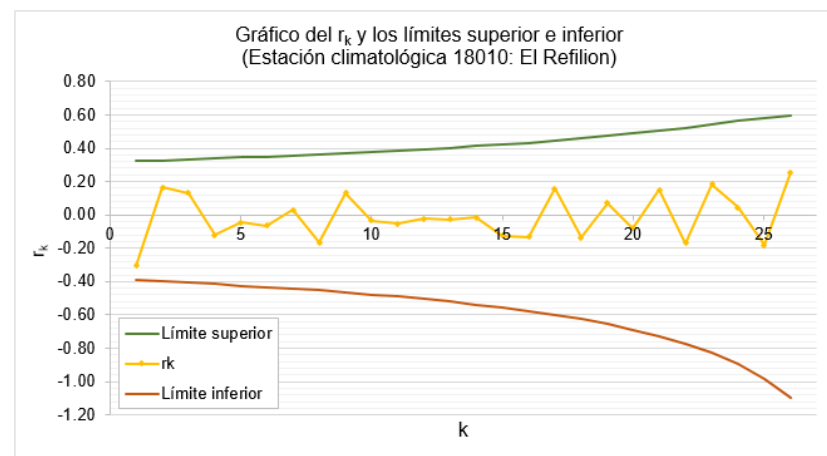
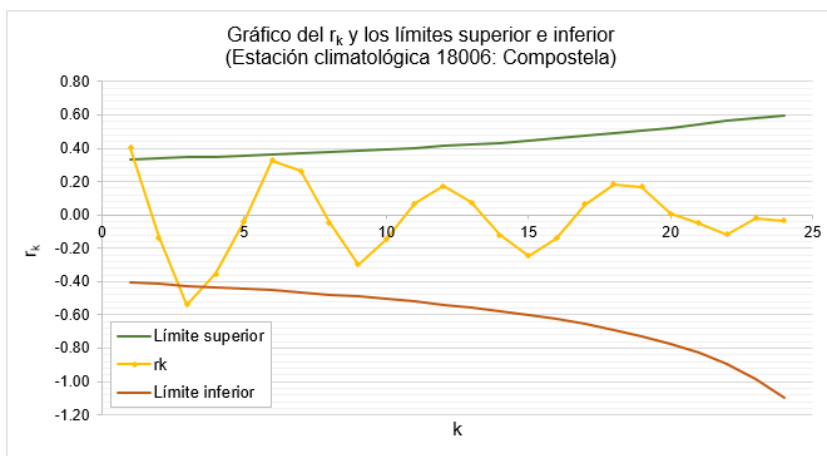
- Estaciones climatológicas de la cuenca 28056: Río Valle Nacional.

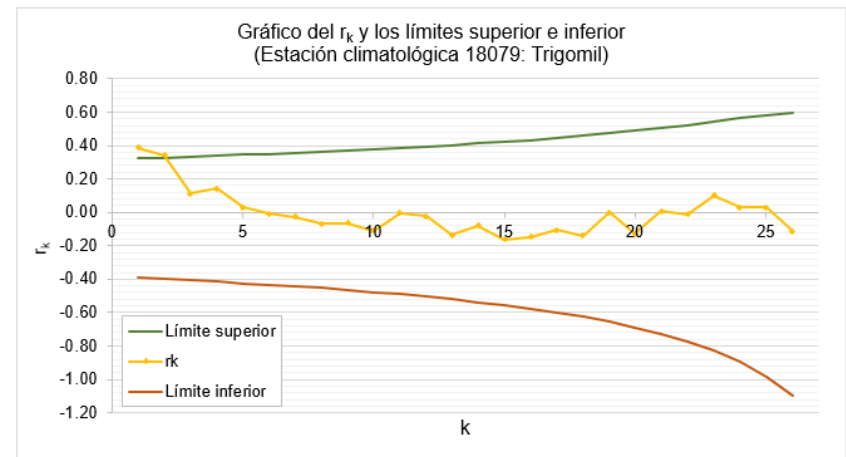
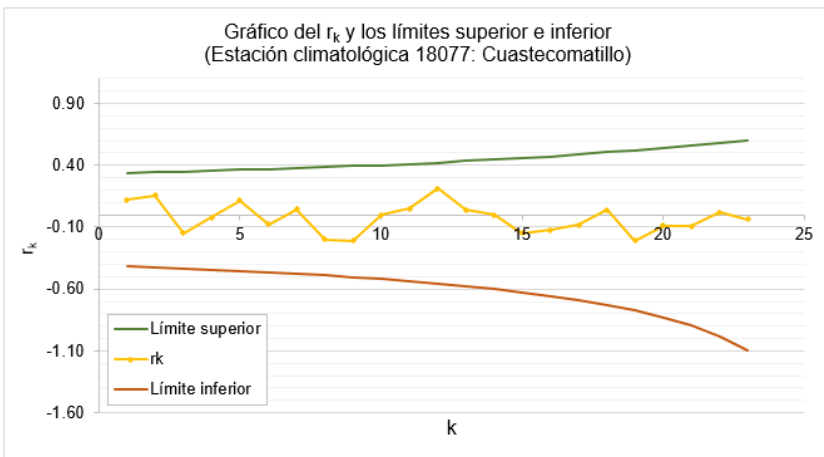
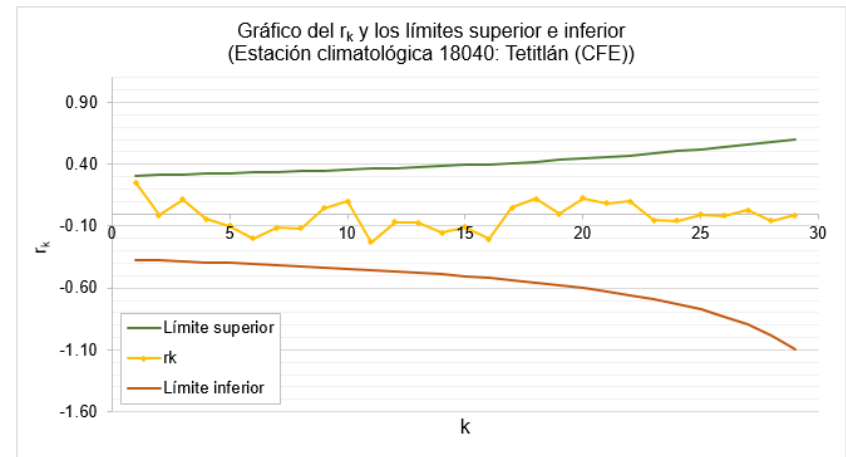
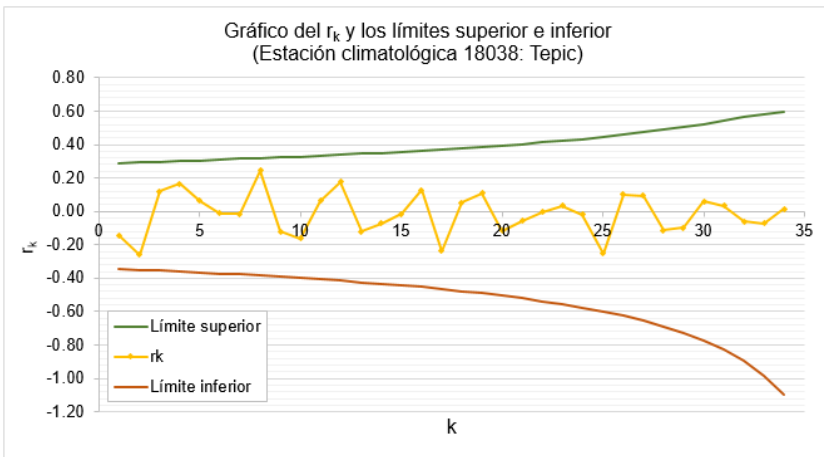
Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 28056: Río Valle Nacional								
	20004	20041	20042	20064	20114	20136	20175	20183	20279
$n_{100}$	49	48	53	32	44	24	44	38	25
$n_{60}$	29	29	32	19	26	14	26	23	15
$n_{30}$	15	14	16	10	13	7	13	11	8
$\bar{x}_{100}$	65.43	62.98	197.28	75.50	169.46	199.52	188.64	126.77	166.02
$\bar{x}_{60}$	73.56	67.41	204.30	85.15	163.17	202.03	185.97	136.37	173.02
$\bar{x}_{30}$	88.89	80.79	201.29	67.42	133.96	182.70	159.86	143.22	178.52
s	40.93	33.77	51.50	37.56	91.84	75.01	85.32	39.96	43.46
$\tau_{60}$	0.20	0.13	0.14	0.26	-0.07	0.03	-0.03	0.24	0.16
$\tau_{30}$	0.57	0.53	0.08	-0.22	-0.39	-0.22	-0.34	0.41	0.29
$t_{60}$	1.69	1.11	1.22	1.79	0.54	0.19	0.24	1.87	0.97
$t_{30}$	2.82	2.44	0.37	0.80	1.68	0.68	1.45	1.63	0.97
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	2.012	2.013	2.008	2.042	2.018	2.074	2.018	2.028	2.069
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

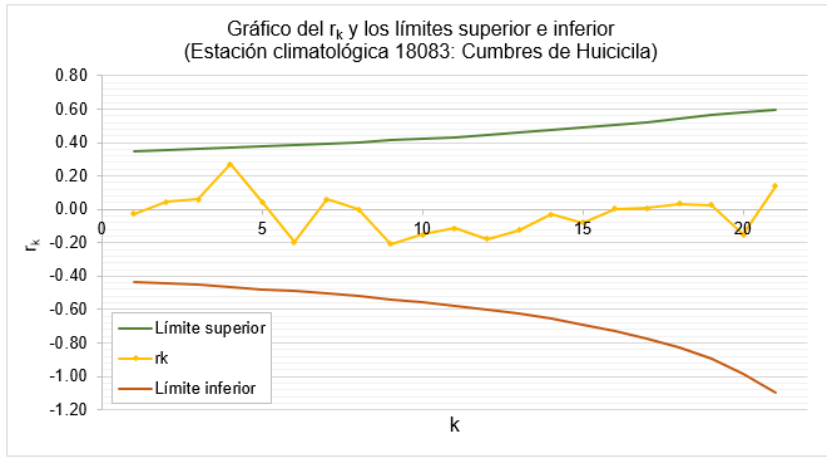
- Estaciones climatológicas de la cuenca 30032: Río Teapa.

Parámetros	Estaciones climatológicas Cuenca 30032: Río Teapa								
	7032	7167	7186	7217	27024	27044	27045	27061	27068
$n_{100}$	26	40	28	31	35	53	63	40	35
$n_{60}$	16	24	17	19	21	32	38	24	21
$n_{30}$	8	12	8	9	10	16	19	12	10
$\bar{x}_{100}$	182.04	147.40	191.97	245.44	148.39	177.66	192.69	189.74	185.54
$\bar{x}_{60}$	175.15	145.60	188.61	246.47	147.56	172.94	189.34	188.33	186.61
$\bar{x}_{30}$	170.79	154.11	193.17	239.25	167.80	171.14	189.01	175.16	191.00
s	55.60	65.37	76.35	59.20	51.63	43.77	60.52	62.52	55.28
$\tau_{60}$	-0.12	-0.03	-0.04	0.02	-0.02	-0.11	-0.06	-0.02	0.02
$\tau_{30}$	-0.20	0.10	0.02	-0.10	0.38	-0.15	-0.06	-0.23	0.10
$t_{60}$	0.78	0.21	0.28	0.12	0.11	0.96	0.53	0.17	0.14
$t_{30}$	0.67	0.42	0.05	0.36	1.41	0.70	0.31	0.95	0.36
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
tc	2.064	2.024	2.056	2.045	2.035	2.008	2.000	2.024	2.035
Resultado	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea	Serie homogénea

**Anexo 4.** Correlogramas de las muestras de datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca 13001: Río Huicicila.







**Anexo 5.** Correlogramas de las muestras de datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca 23016: Río Cintalapa.

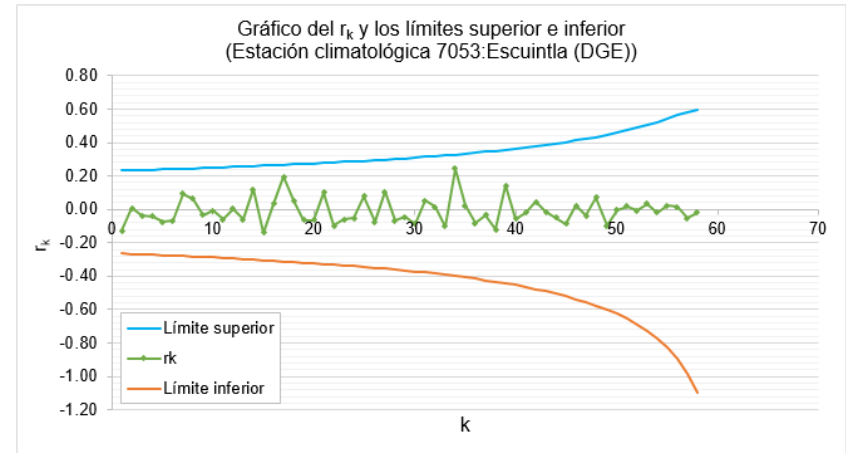
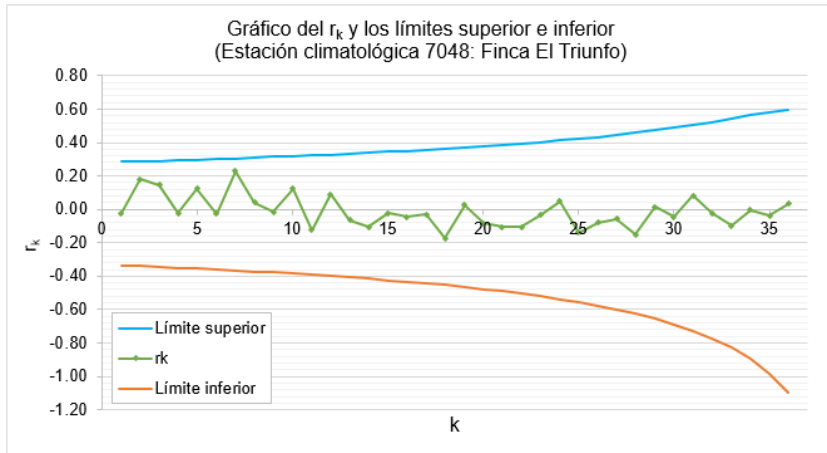


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 7348: Independencia)

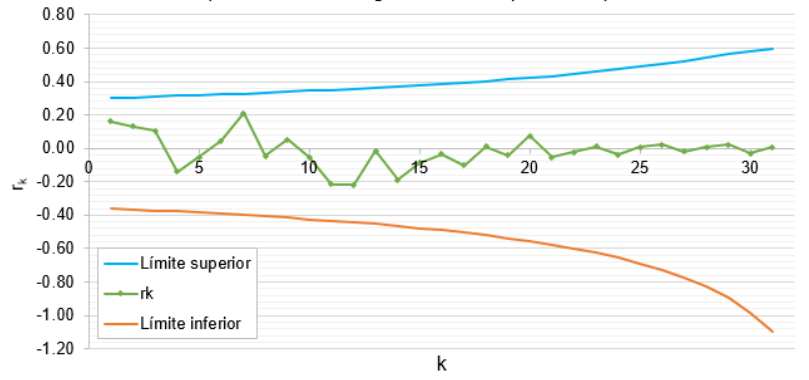


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 7390: Cacaluta)

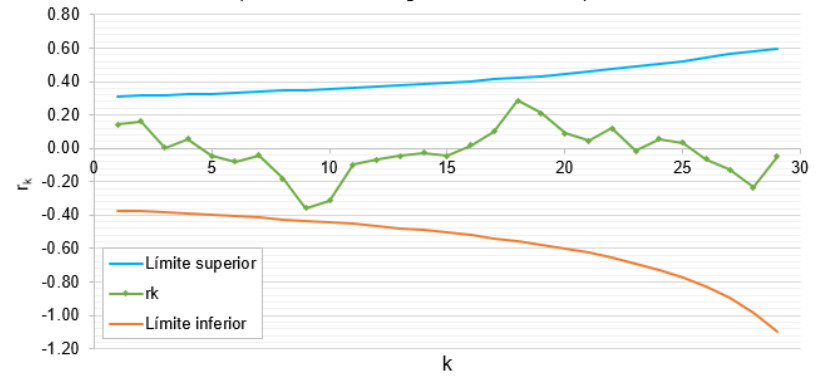
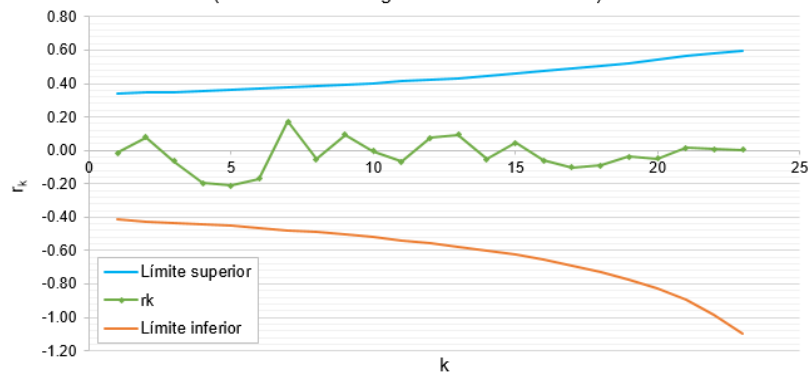
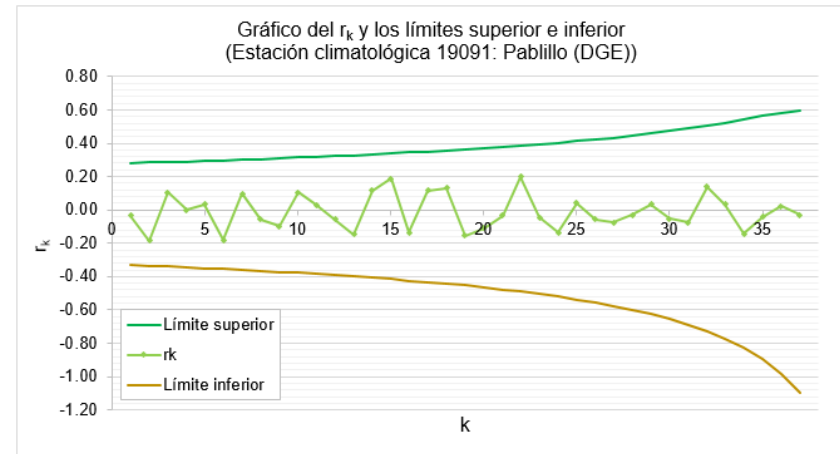
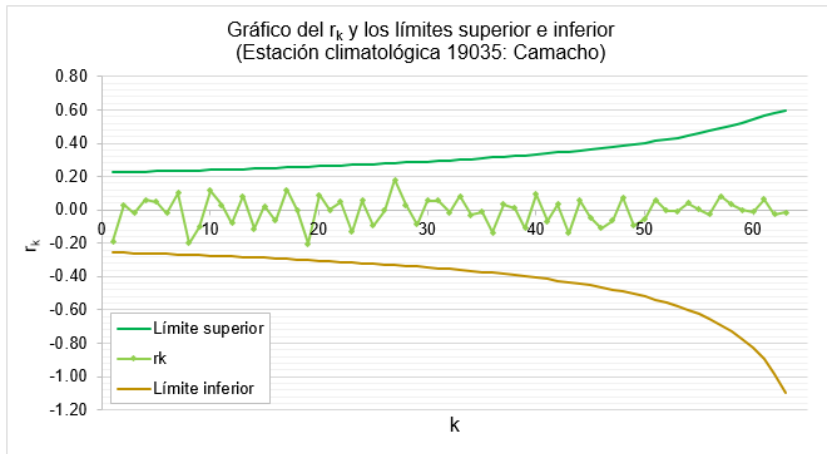
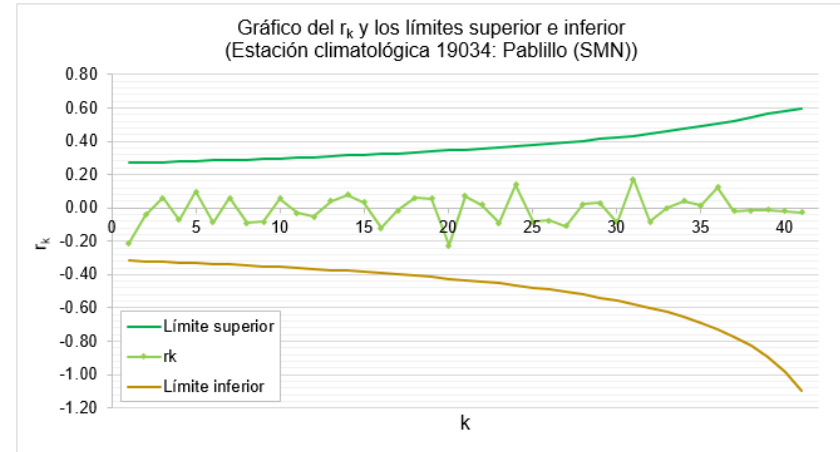
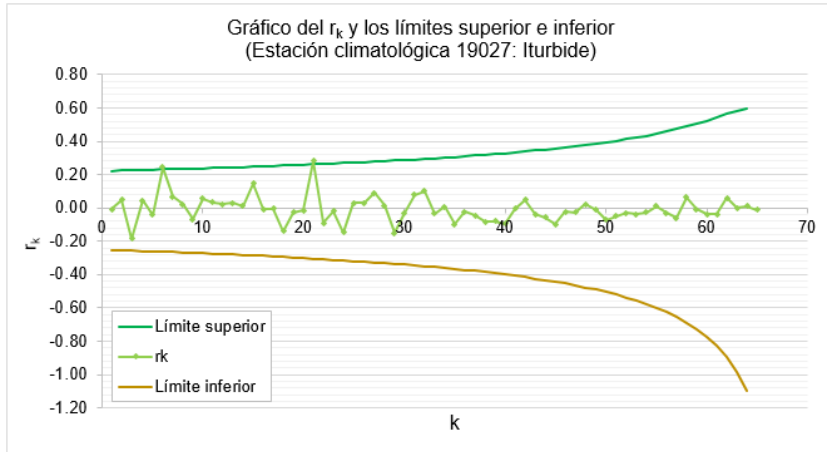


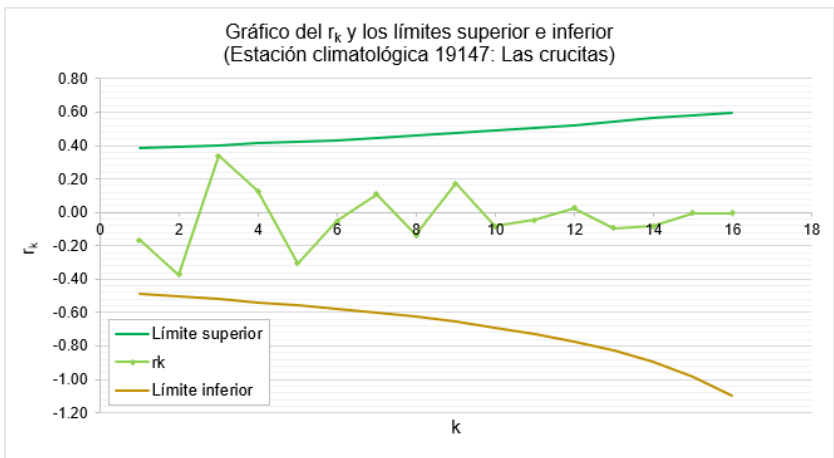
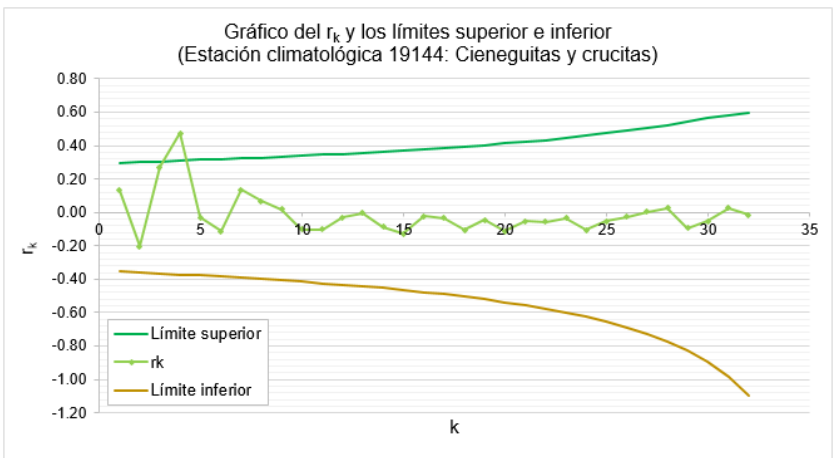
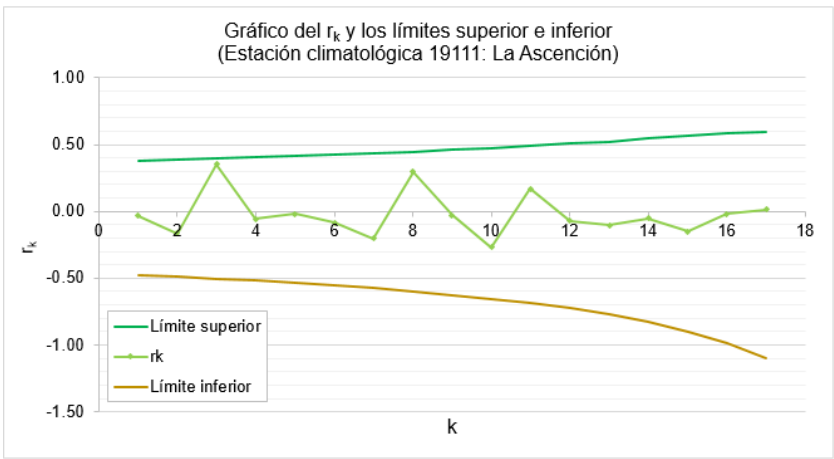
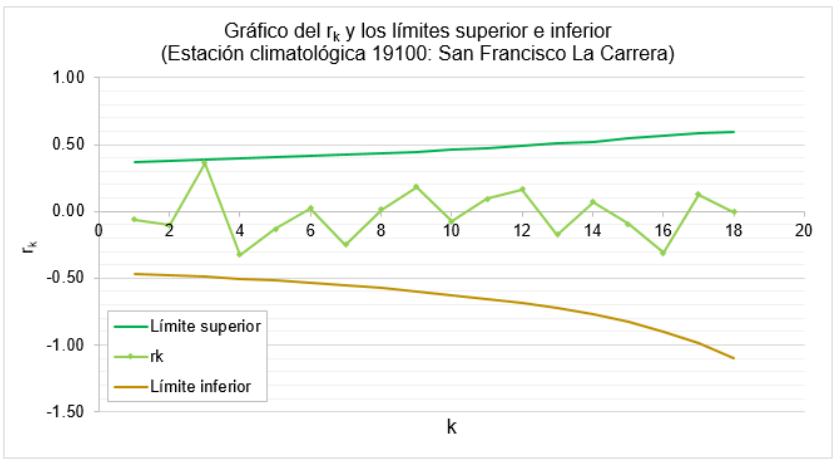
Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 7393: Finca La Paz)

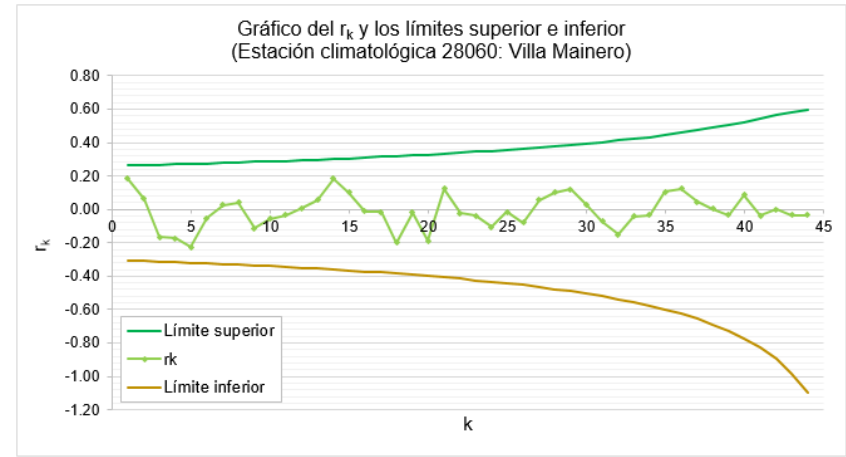
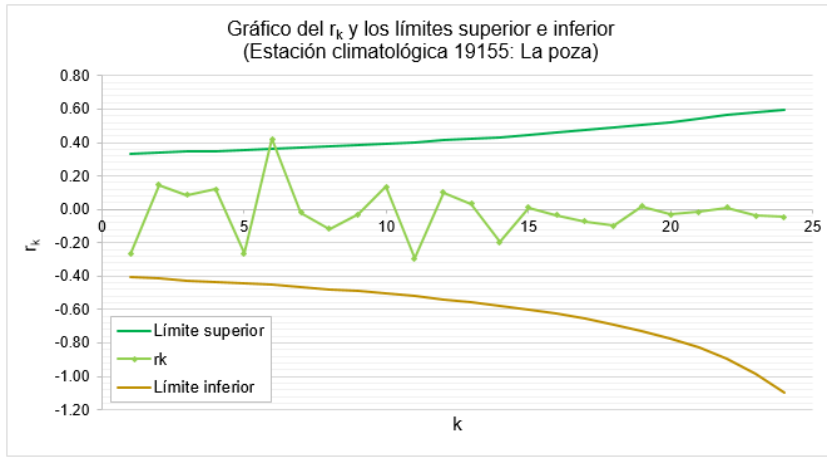




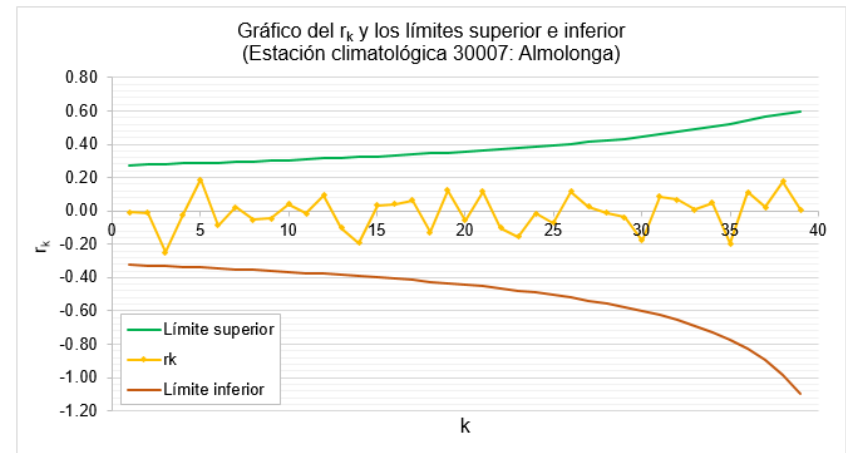
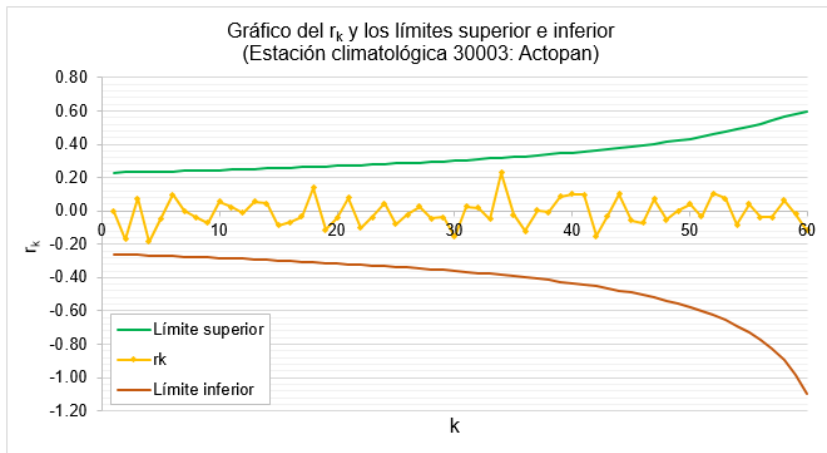
**Anexo 6.** Correlogramas de las muestras de datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca 25010: Río Pablillo.

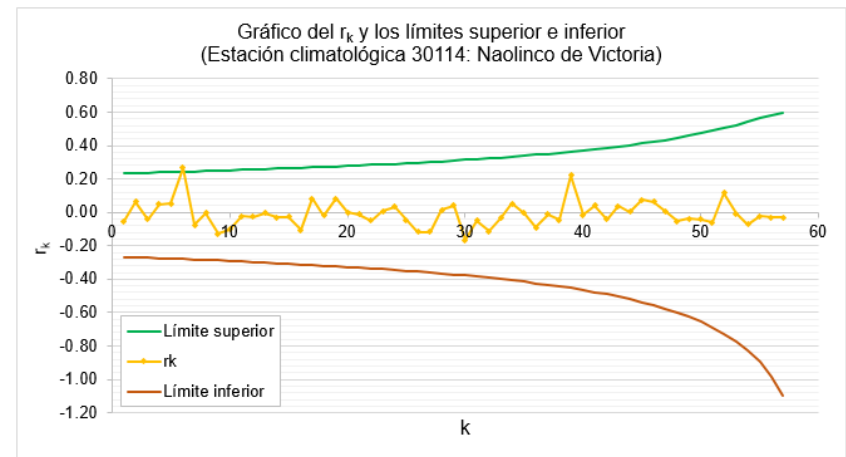
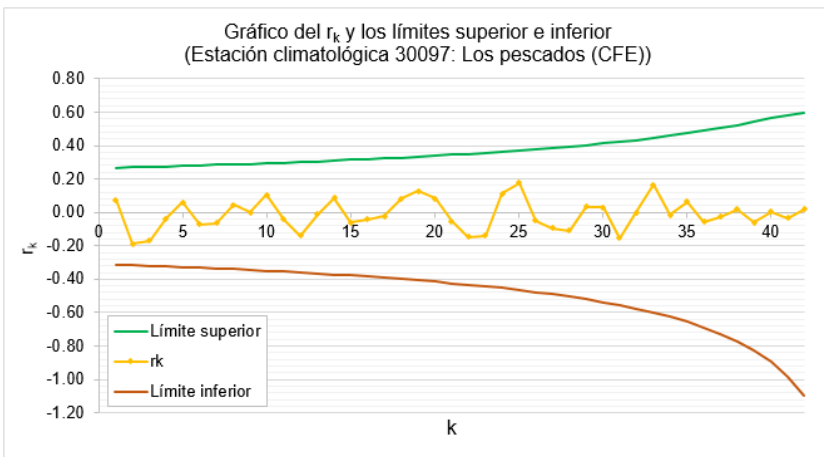
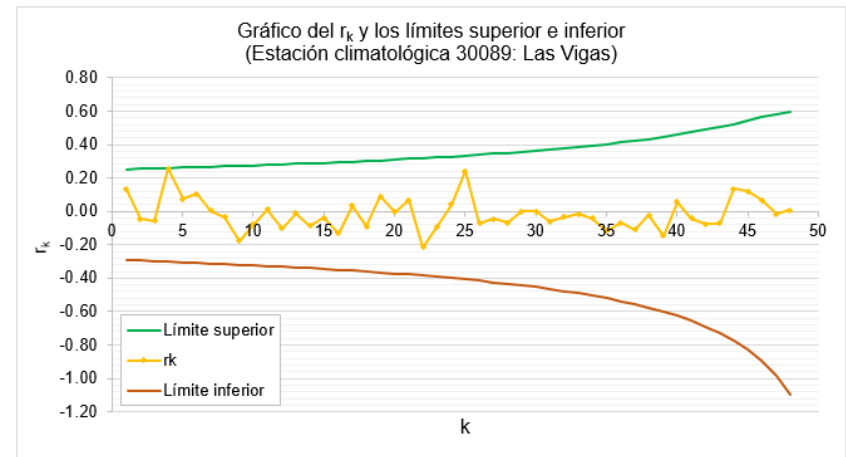
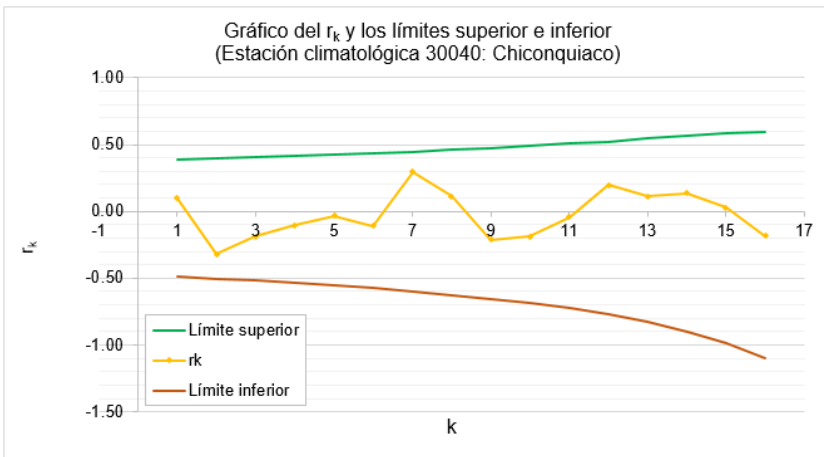


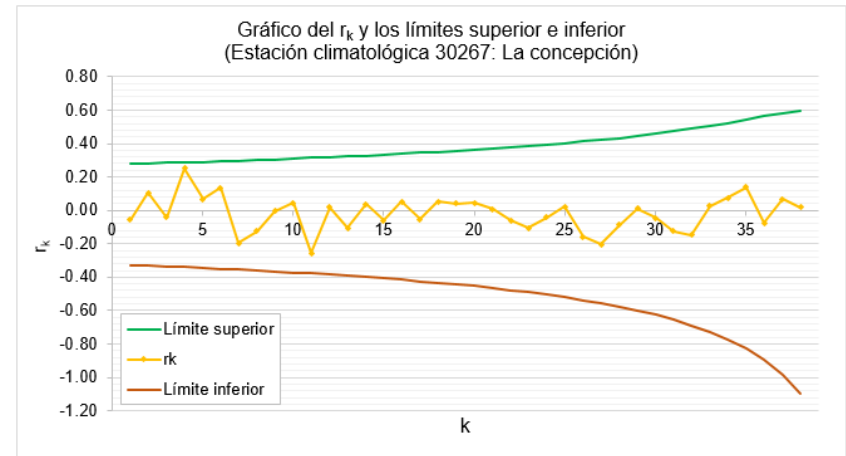
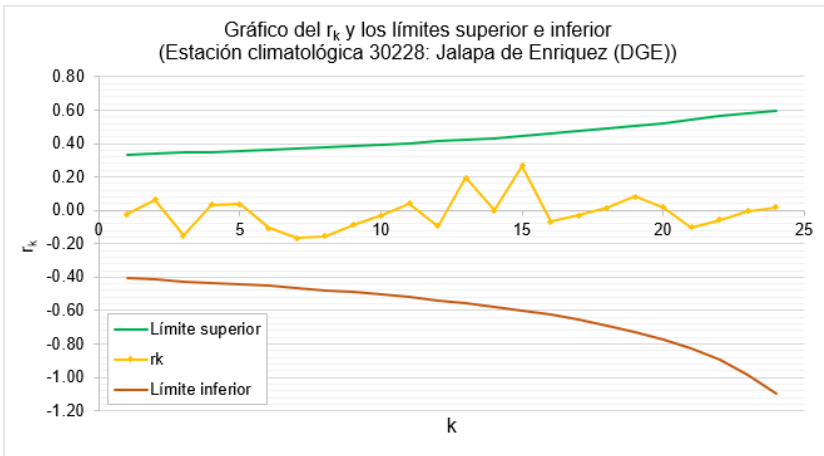
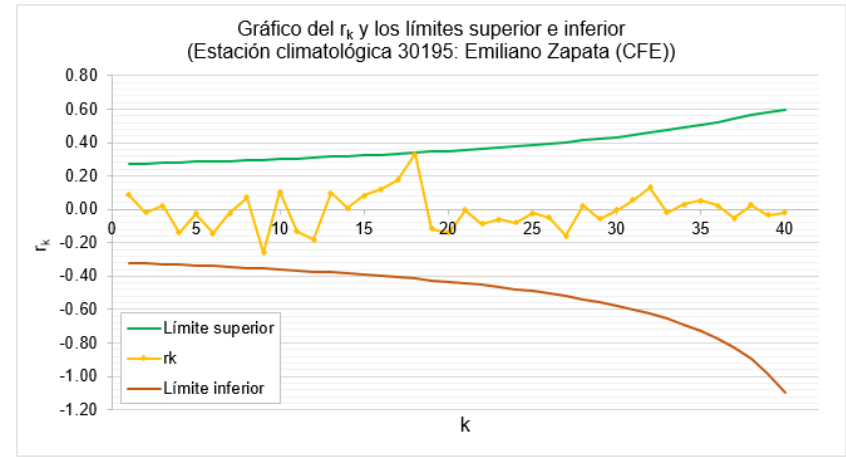
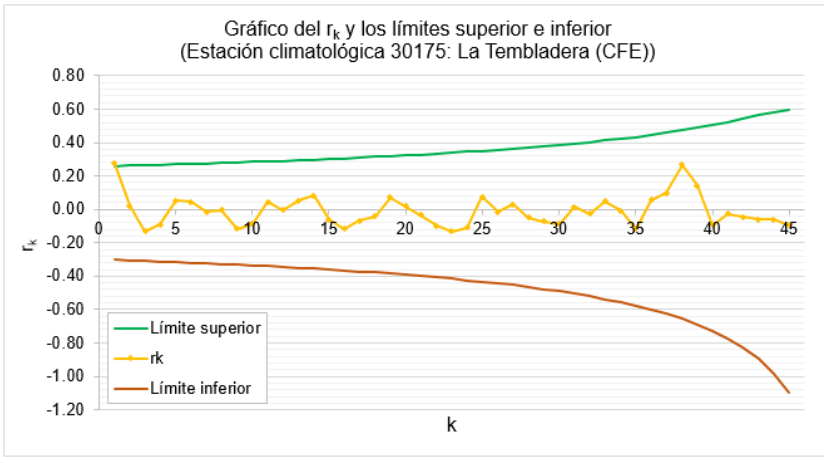


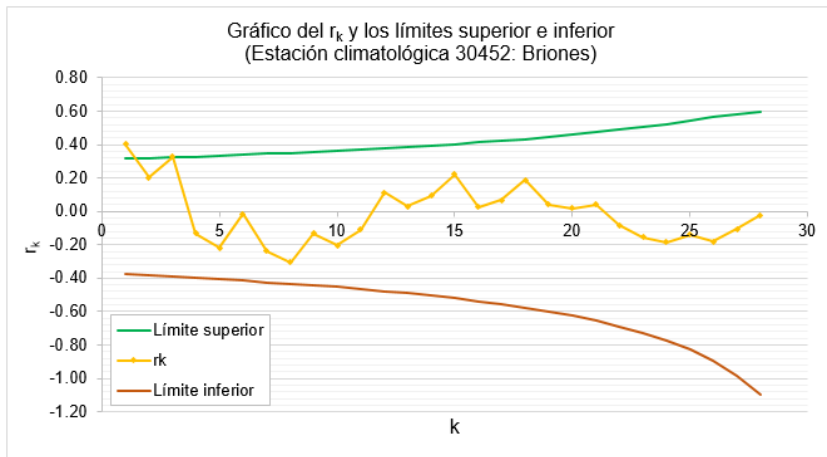


**Anexo 7.** Correlogramas de las muestras de datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca 28030: Río Actopan.

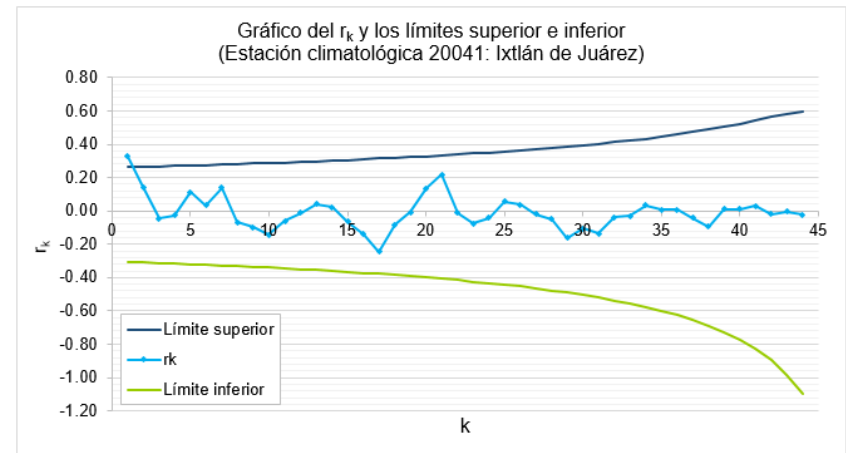
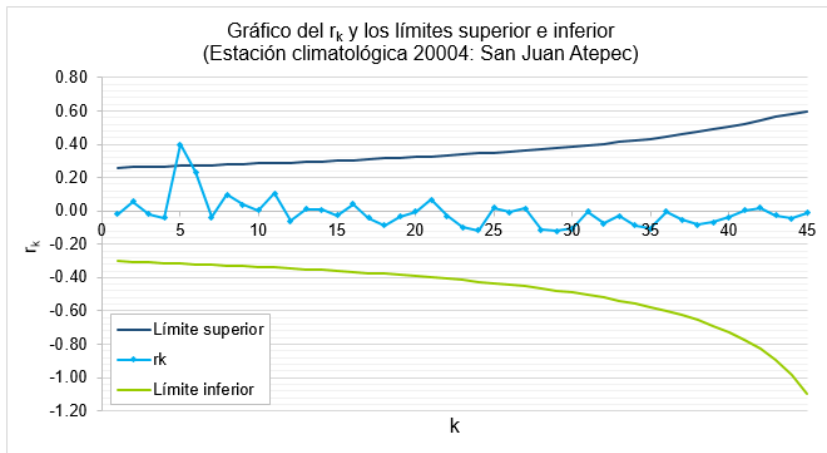








**Anexo 8.** Correlogramas de las muestras de datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca 28056: Río Valle Nacional.



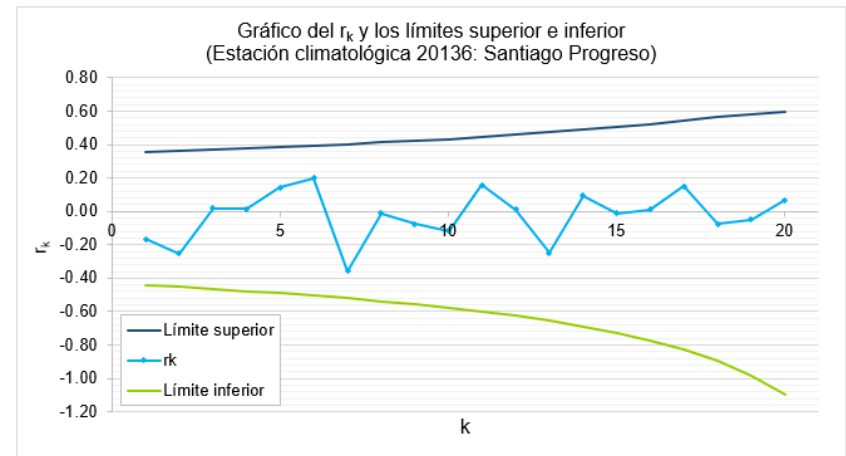
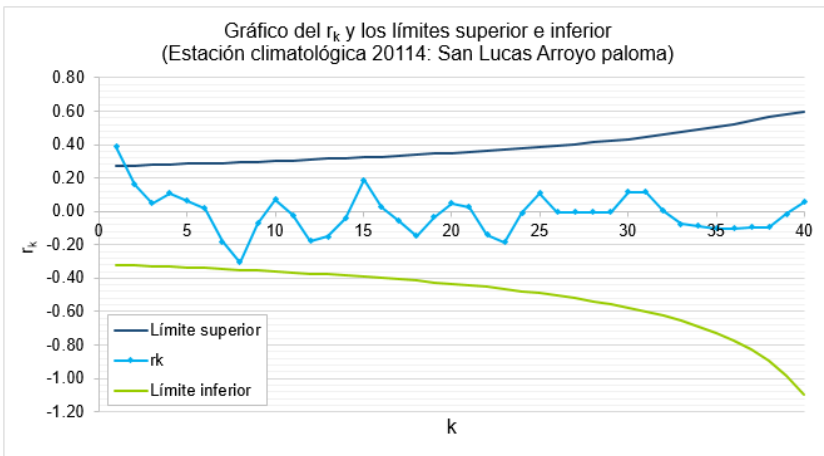
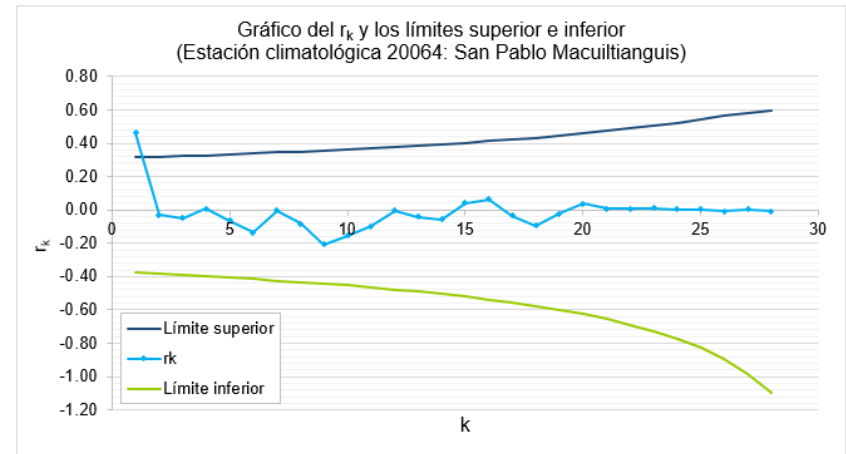
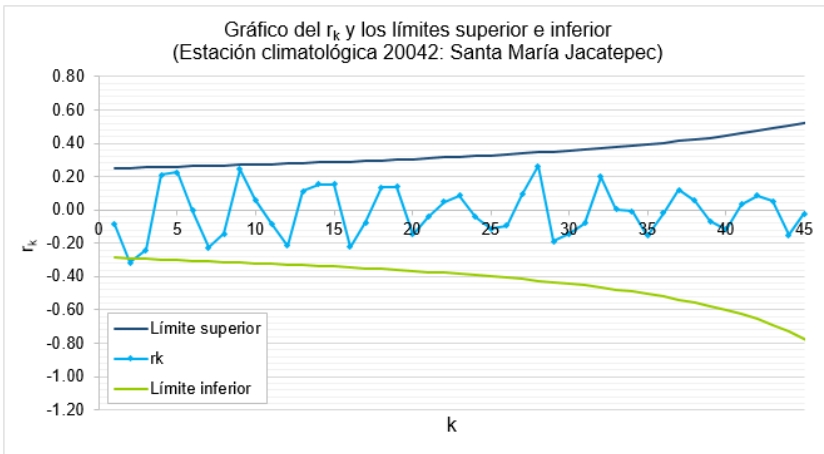


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 20175: Valle nacional)

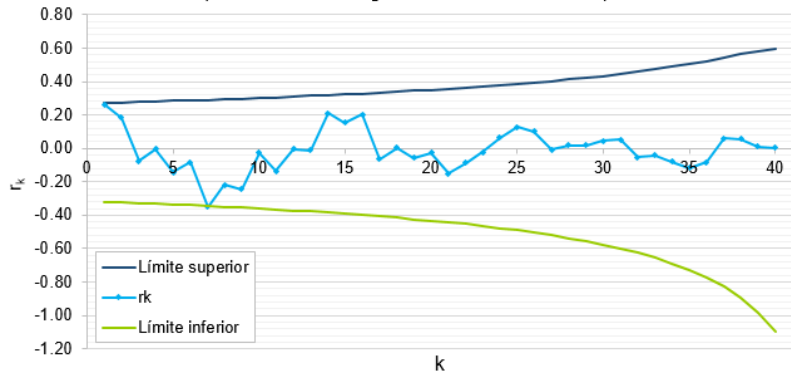


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 20183: san Juan Yae)

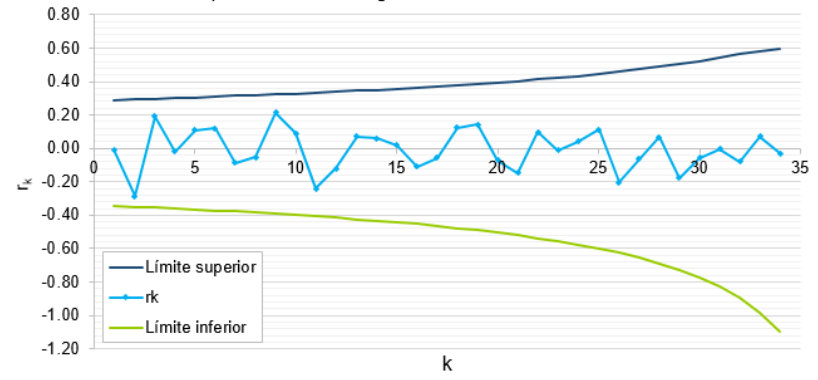
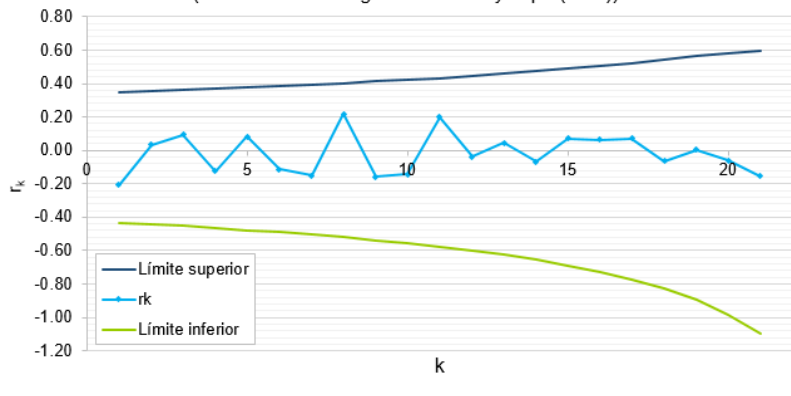


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 20279: Soyalapa (CFE))





**Anexo 9.** Correlogramas de las muestras de datos de precipitación máxima en 24 horas para las estaciones climatológicas con influencia en la cuenca 30032: Río Teapa.

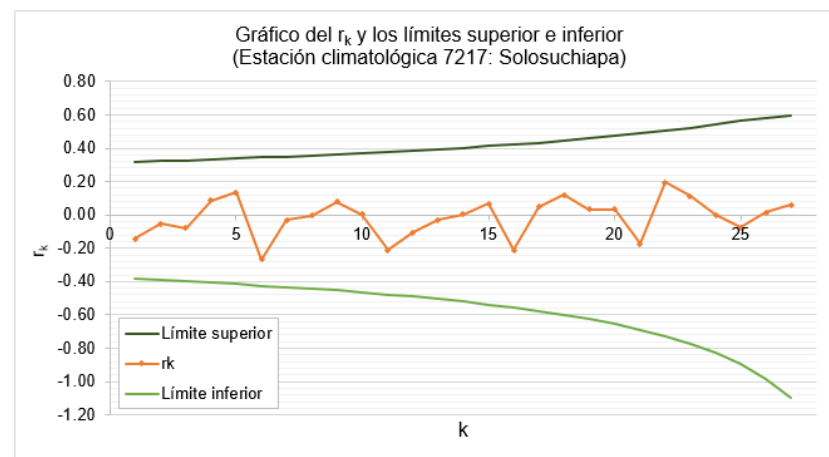
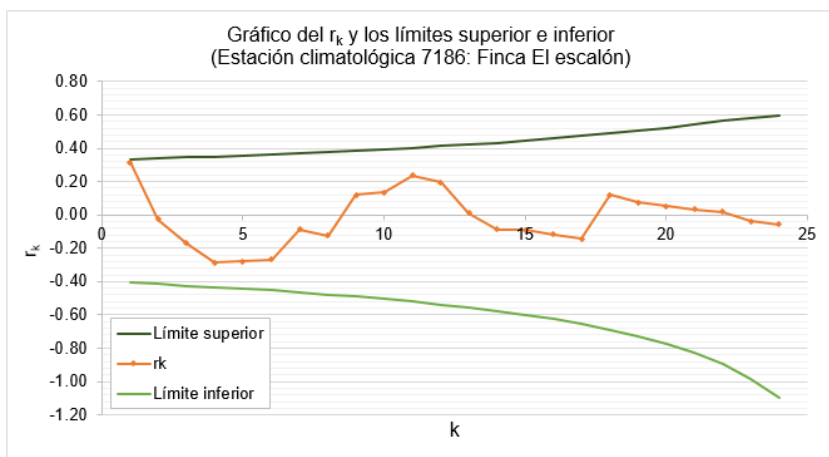
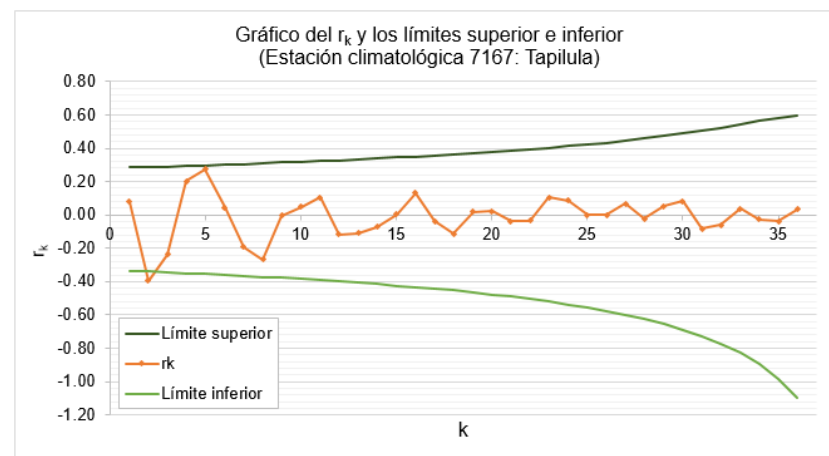
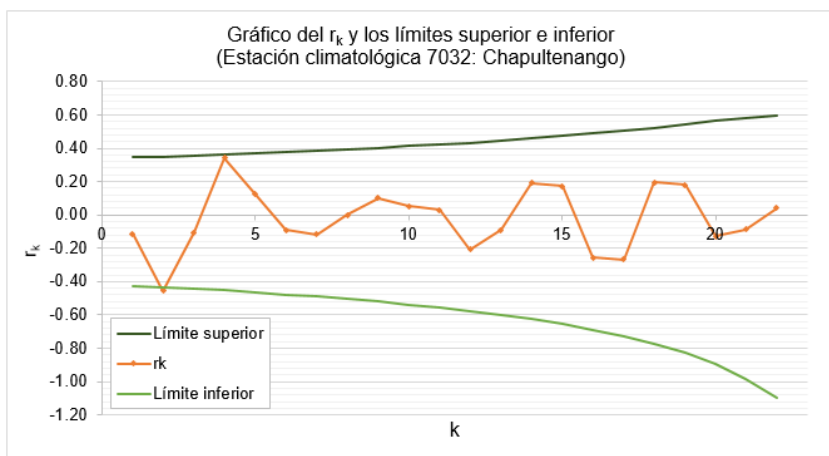


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 27024: La Huasteca)

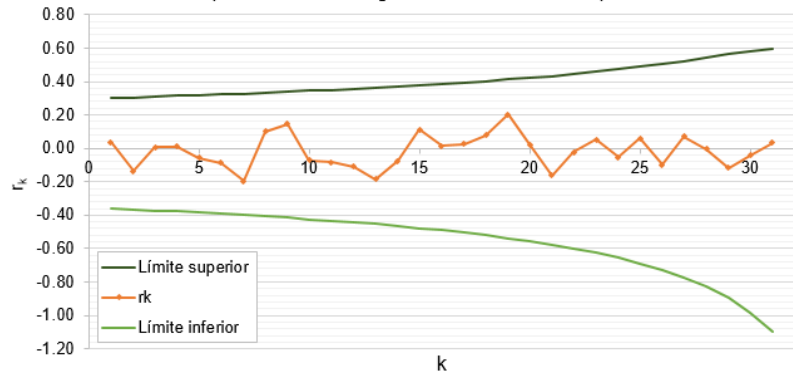


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 27044: Teapa (DGE))

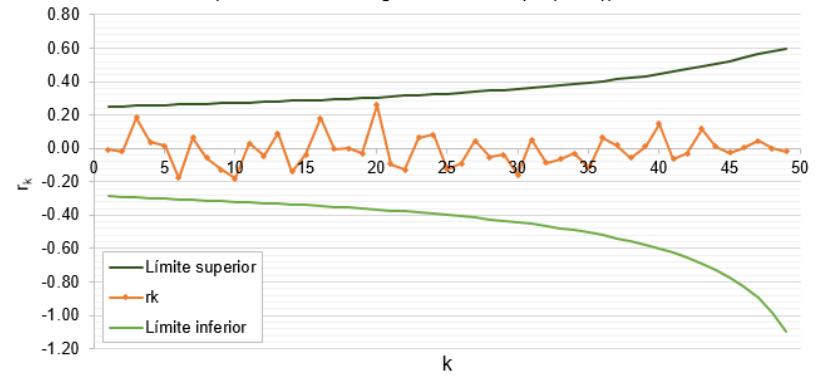


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 27045: Teapa (SMN))

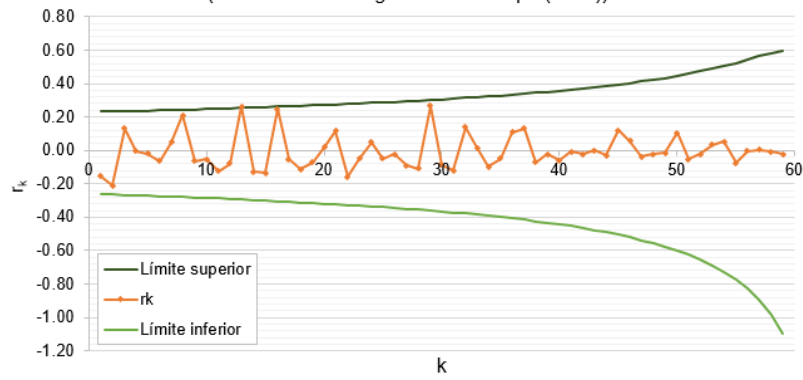
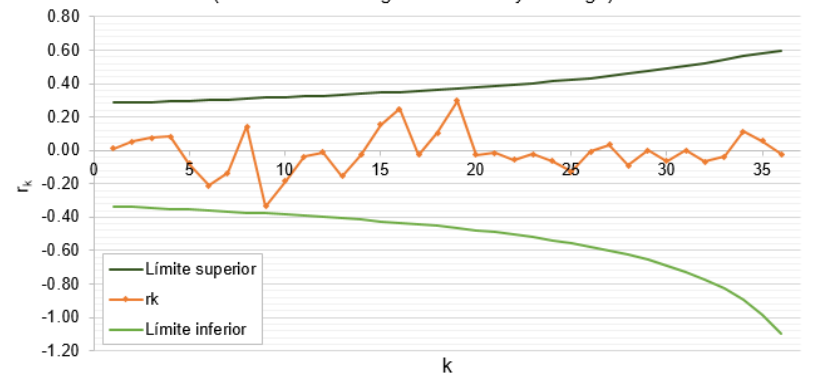
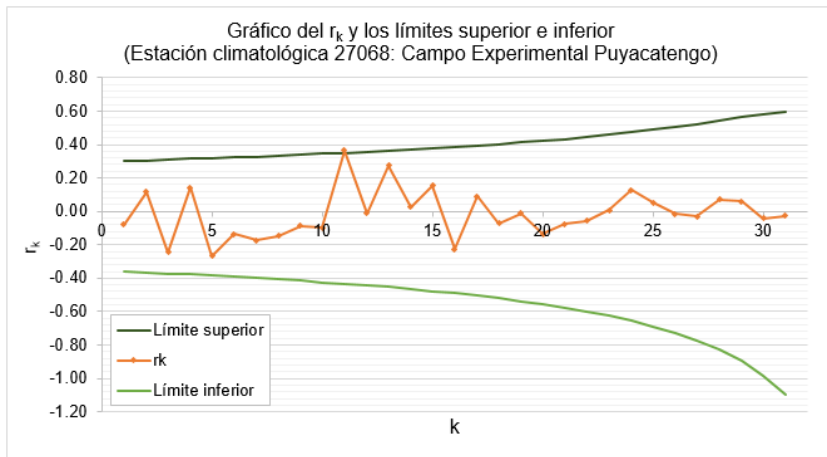


Gráfico del  $r_k$  y los límites superior e inferior  
(Estación climatológica 27061: Puyacatengo)





**Anexo 10.** Datos para la construcción de curva P-D-Tr de las estaciones climatológicas utilizadas en la cuenca 13001: Río Huicicila.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACION	P2	P6010	F	A	B	C
18006	Compostela	37.85	63.28	1.27	28.18	8.77	0.79
18010	El Refilion	38.39	68.53	1.40	27.61	8.61	0.78
18023	Miravalles	44.21	60.64	1.29	29.84	9.22	0.80
18025	Paso de Arocha	47.20	66.13	1.32	16.39	4.83	0.65
18038	Tepic	42.60	65.14	1.43	29.87	9.23	0.80
18040	Tetitlán (CFE)	36.04	46.44	1.18	27.26	8.50	0.78
18077	Cuastecomatillo	27.91	38.26	1.15	26.28	8.22	0.77
18079	Trigomil	49.11	65.80	1.21	34.16	10.32	0.83
18083	Cumbres de Huicicila	57.92	97.60	1.15	30.29	9.34	0.81

**Anexo 11.** Datos para la construcción de curva P-D-Tr de las estaciones climatológicas utilizadas en la cuenca 23016: Río Cintalapa.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACION	P2	P6010	F	A	B	C
7048	Finca El Triunfo	68.82	122.33	1.70	27.98	8.71	0.79
7053	Escuintla (DGE)	47.83	80.77	1.66	16.50	4.88	0.65
7348	Independencia	42.42	74.75	3.39	16.78	4.99	0.66
7390	Cacaluta	51.72	76.74	1.41	16.33	4.81	0.65
7393	Finca La Luz	64.56	120.15	1.98	30.51	9.40	0.81

**Anexo 12.** Datos para la construcción de curva P-D-Tr de las estaciones climatológicas utilizadas en la cuenca 25010: Río Pablillo.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACION	P2	P6010	F	A	B	C
19027	Iturbide	41.59	89.73	2.58	38.34	11.20	0.86
19034	Pablillo (SMN)	35.51	71.31	1.56	20.26	6.29	0.71
19035	Camacho	37.45	68.19	1.71	20.32	6.31	0.71
19091	Pablillo (DGE)	47.60	99.01	2.39	43.71	11.88	0.89
19100	San Francisco La carrera	45.06	66.53	1.40	22.91	7.18	0.74
19111	La Ascención	32.46	79.47	1.56	43.71	11.88	0.89
19144	Cieneguitas y crucitas	39.59	75.29	3.23	43.71	11.88	0.89
19147	Las crucitas	48.29	81.33	1.24	22.68	7.10	0.74
19155	La Poza	26.47	70.45	1.49	42.29	11.78	0.88
28060	Villa Mainero	42.68	73.55	1.55	22.55	7.06	0.73

**Anexo 13.** Datos para la construcción de curva P-D-Tr de las estaciones climatológicas utilizadas en la cuenca 28030: Río Actopan.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACION	P2	P6010	F	A	B	C
30003	Actopan	34.51	63.73	1.80	18.80	5.77	0.69
30007	Almolonga	39.43	69.53	1.54	26.45	8.27	0.77
30040	Chiconquiaco	80.72	235.04	1.16	43.71	11.88	0.89
30089	Las minas (CFE)	44.88	82.06	2.91	37.63	11.07	0.86
30097	Los pescadores (CFE)	45.76	96.00	2.46	43.71	11.88	0.89
30114	Naolinco de Victoria	66.75	111.61	1.76	39.50	11.41	0.87
30175	Temblanderas	62.51	98.72	1.35	43.71	11.88	0.89
30195	Emiliano Zapata (CFE)	43.74	98.53	1.28	29.69	9.18	0.80
30228	Jalapa de Enriquez (DGE)	53.04	95.39	1.32	36.87	10.91	0.85
30267	La Concepción	60.69	108.66	1.81	32.62	9.94	0.82
30452	Briones	53.67	95.61	1.36	36.62	10.86	0.85

**Anexo 14.** Datos para la construcción de curva P-D-Tr de las estaciones climatológicas utilizadas en la cuenca 28056: Río Valle Nacional.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACION	P2	P6010	F	A	B	C
20004	San Juan Atepec	40.47	69.63	3.47	43.71	11.88	0.89
20041	Ixtlán de Juárez	39.81	77.05	2.19	43.71	11.88	0.89
20042	Santa María Jacatepec	68.28	95.90	1.32	15.87	4.62	0.64
20064	San Pablo Macuilianguis	47.96	86.01	2.57	43.71	11.88	0.89
20114	San Lucas Arroyo Paloma	69.96	122.81	1.39	20.26	6.29	0.71
20136	Santiago Progreso	69.06	123.70	1.22	17.10	5.12	0.66
20175	Valle Nacional	68.02	109.53	1.33	16.36	4.82	0.65
20183	San Juan Yaee	77.80	118.40	1.43	38.01	11.14	0.86
20279	Soyalapa (CFE)	117.01	169.74	1.39	43.71	11.88	0.89

**Anexo 15.** Datos para la construcción de curva P-D-Tr de las estaciones climatológicas utilizadas en la cuenca 30032: Río Teapa.

CLAVE	NOMBRE DE LA ESTACION	P2	P6010	F	A	B	C
7032	Chapultenango	81.13	132.83	1.38	24.30	7.62	0.75
7167	Tapilula	66.63	124.89	1.58	27.28	8.51	0.78
7186	Finca El escalón	95.28	143.81	1.28	25.62	8.02	0.77
7217	Solosuchiapa	90.92	126.35	1.23	17.55	5.29	0.67
27024	La Huasteca	49.93	78.75	2.04	16.33	4.81	0.65
27044	Teapa (DGE)	59.23	88.86	1.28	15.93	4.64	0.65
27045	Teapa (SMN)	63.91	103.15	1.29	15.97	4.66	0.65
27061	Puyacatengo	63.42	105.11	1.57	16.42	4.84	0.65
27068	Campo Experimental Puyacatengo	66.29	94.27	1.28	16.30	4.80	0.65