



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

“ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LLUVIA, CASO DE  
APLICACIÓN: CUENCA DEL RÍO SANTA CATARINA, RH 24 BRAVO-  
CONCHOS.”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

NOÉ DAVID ALCARAZ BUSTOS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ



CIUDAD UNIVERSITARIA

2016

México, D.F.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/069/15

Señor  
NOÉ DAVID ALCARAZ BUSTOS  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. JOSÉ LUIS ARAGÓN HERNÁNDEZ, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA LLUVIA, CASO DE APLICACIÓN: CUENCA DEL RÍO SANTA CATARINA, RH 24 BRAVO-CONCHOS"**

- INTRODUCCIÓN
- I. ANTECEDENTES
- II. ZONA DE ESTUDIO
- III. METODOLOGÍA EMPLEADA
- IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

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

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 30 de julio del 2015.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.



*A mi familia*

*Por el apoyo, amor e ilusiones que depositaron en mí y que valieron para que llegara hasta este punto de mi vida.*

*A mi novia*

*Por el apoyo, la paciencia y el amor incondicional que me brindaste, y que me motivaron a concluir esta etapa académica.*

*A mis amigos y compañeros*

*Por los momentos inolvidables en los cuales aprendimos, nos divertimos y crecimos juntos.*

*A mis sinodales*

*Por su tiempo, dedicación y enseñanza.*



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ingeniería por permitir mi formación académica en sus aulas y con ello, darme la oportunidad de concluir satisfactoriamente mis estudios.

A mi director de tesis, Dr. José Luis Aragón Hernández, por la confianza y los conocimientos depositados en mí durante este proceso de aprendizaje y por su inagotable y amable disposición para asesorar mi trabajo.

A mis sinodales y profesores de la Facultad de Ingeniería, Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles, M. en I. Alba Beatriz Vázquez González, M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes e Ing. José Luis Esquivel Ávila, por las grandes enseñanzas impartidas durante sus cursos y por haber aceptado formar parte del grupo de evaluadores del presente trabajo.

A mi mamá Eva Bustos, por ser mi más grande ejemplo; por enseñarme el camino correcto que debía tomar, por compartir conmigo tus experiencias y de una manera directa o indirecta formar mi carácter y muchos aspectos importantes de lo que soy hoy en día, por estar aquí, preocupándote siempre por mí, entendiéndonos a nuestra manera y demostrándome que a pesar de los pesares eres una guerrera. Te amo, güereja.

A mi abuelo Felipe Bustos, por siempre creer en mí, por llenarme de motivación para terminar cada una de las metas que me he propuesto en la vida, por alentarme y apoyarme desde que tengo uso de razón, por tus consejos desde mi educación primaria para mejorar mi mala conducta. Gracias por estar aquí durante estos 24 años, sin condición. Te amo, abuelito.

A mi tía Ruth Bustos, por todo el apoyo brindado para mí y toda la familia; eres esa inmensa luz que encima de todo sigue ahí, sin apagarse, guiándonos a todos con tu amor y paciencia, Gracias tía, te amo.

A mis tíos Rubén Bustos, Benjamín Bustos, Adán Bustos, Álvaro Bustos y Pablo Bustos, por brindarme sus experiencias; por enseñarme los verdaderos significados de las palabras: valor, nobleza y humildad, y alentarme a querer ser como ustedes y compartir ese inmenso corazón que les sale del pecho. Los estimo y aprecio muchísimo a todos.

A mi abuelita Graciela Hernández, en paz descanse, porque gracias a ti he llegado hasta donde estoy ahora, por ser una grandísima parte de mí, por enseñarme a ser la persona que soy. Gracias por tanto, siempre te llevaré en mi mente y en mi corazón, te amo.

A mi novia Fernanda Flores, por acompañarme en estos últimos años de mi vida y ser parte fundamental de mi formación académica y personal, en los buenos y malos momentos, por el amor, la paciencia, el apoyo, la seguridad, la confianza y la motivación que has traído a mi vida. Te amo, chaparrita.

A mis primos, amigos y compañeros Aldo, Katia, Jair, Miguel, Uvaldo, Raúl, Osvaldo, Irving, Jorge Alberto, Hugo, Edgar, Ernesto, Karim, Carlos, Octavio, Gerardo, Jorge Salvador, Alberto, Ángel, y Alfredo, gracias por su amistad y apoyo incondicional, por llenar tanto las diferentes etapas de mi vida y formar gran parte de lo que soy ahora, por todo lo que me ha enseñado cada uno de ustedes, por todos los momentos que hemos compartido, buenos, no tan buenos, pero sobre todo alegres. Valoro y agradezco mucho la amistad de cada uno de ustedes, los quiero.





# RESUMEN

---

La variabilidad de la distribución espacial de la lluvia influye de forma importante en la estimación de láminas de lluvia asociadas a diferentes periodos de retorno, útiles para infinidad de estudios hidrológicos y diseños hidráulicos en la ingeniería de hoy en día.

Estas láminas de lluvia, permiten obtener un patrón de precipitación que se utiliza en el diseño de un sistema hidrológico; se basan en información histórica de la precipitación en un sitio, o pueden construirse utilizando las características generales de la precipitación en regiones adyacentes.

A través de los años, se ha logrado desarrollar métodos que nos permiten realizar estimaciones de láminas de lluvia de una manera aceptable, en las que se puede incluir la distribución espacial y temporal de la lluvia, basados principalmente en las propiedades estadísticas de la misma, mediante la utilización de funciones de distribución de probabilidad.

Hoy en día, para considerar la distribución espacial de la lluvia empleando datos puntuales, se cuenta con la calidad y cantidad suficiente de información para aplicar tres de los métodos más comúnmente utilizados para la estimación de tormentas de diseño:

1. Método tradicional
2. Factor de reducción por áreas
3. Simultaneidad de eventos

Cada uno de los métodos anteriores, cuenta con diferentes hipótesis y metodologías, que por ende, nos entregan diferentes láminas de lluvia, pero no debemos olvidar que son para un mismo fin, por ello, en este documento se explicará, aplicará y comparará cada uno de estos métodos, con la finalidad de obtener pruebas concluyentes de las ventajas e inconvenientes de los mismos.

A su vez, en busca de desarrollar métodos mucho más eficientes y sencillos de aplicación, se propone una nueva metodología que permita evitar la subestimación o sobreestimación en los diseños, la necesidad de recopilar o analizar excesiva información histórica de precipitaciones, así como, evitar la necesidad de suponer la simultaneidad de eventos meteorológicos en las cuencas. También, se considera importante analizar el comportamiento de la precipitación cuando se presentan fenómenos meteorológicos extremos, es decir, ciclones tropicales. Para ello, se aplicarán y compararán los cuatro métodos suponiendo la ocurrencia y no ocurrencia de un ciclón tropical.

Finalmente, se realiza la comparación y el análisis de resultados de los cuatro métodos descritos, para los casos con y sin huracanes, con la finalidad de concluir acerca de las ventajas o inconvenientes que podemos encontrar en cada uno de los métodos y ser capaces de llegar así a recomendaciones claras y útiles para la posterior utilización de cualquiera de ellos.



# ÍNDICE

---

RESUMEN .....	ix
ÍNDICE .....	xi
A. ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
B. ÍNDICE DE TABLAS .....	xv
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Justificación .....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Descripción .....	3
2. ANTECEDENTES .....	5
2.1 Precipitación pluvial .....	5
2.1.1 Tipos de lluvia .....	6
2.1.2 Ciclones tropicales .....	8
2.2 Medición de la lluvia .....	11
2.2.1 Pluviómetro .....	12
2.2.2 Pluviógrafo .....	13
2.2.3 Estaciones meteorológicas automáticas .....	15
2.2.4 Radar meteorológico .....	16
2.2.5 Satélite meteorológico .....	18
2.3 Variabilidad espacial de la lluvia .....	20
2.4 Lluvia media .....	21
2.4.1 Media aritmética .....	22
2.4.2 Polígonos de Thiessen .....	22
2.4.3 Método de las isoyetas .....	23
2.4.4 Inverso de la distancia .....	24
2.5 Pruebas de calidad .....	26
2.5.1 Pruebas de homogeneidad .....	26
2.5.2 Prueba de independencia lineal .....	32
2.6 Funciones de distribución de probabilidad .....	33
2.6.1 Propiedades de las funciones de distribución de probabilidad .....	33
2.6.2 Función de distribución normal .....	34
2.6.3 Función de distribución lognormal .....	35
2.6.4 Función de distribución exponencial .....	36
2.6.5 Función de distribución gamma .....	37
2.6.6 Función de distribución Gumbel .....	38

2.6.7	Función de distribución para dos poblaciones o doble Gumbel .....	39
2.6.8	Métodos de estimación de parámetros .....	40
2.6.9	Bondad del ajuste .....	42
2.7	Programa AX .....	44
2.8	Modelos lluvia-escurrimiento .....	51
2.8.1	Modelos de parámetros concentrados.....	52
2.8.2	Modelos de parámetros distribuidos .....	52
3.	ZONA DE ESTUDIO.....	54
3.1	Localización .....	54
3.2	Orografía.....	56
3.3	Climatología .....	58
3.4	Población.....	58
3.5	Flora y fauna.....	59
3.5.1	Flora.....	59
3.5.2	Fauna .....	59
3.6	Distribución espacial de la precipitación.....	59
3.7	Fenómenos meteorológicos históricos .....	61
3.7.1	Huracán Gilberto (1988).....	62
3.7.2	Huracán Emily (2005) .....	64
3.7.3	Huracán Alex (2010).....	65
3.8	Topografía .....	66
3.9	Hidrografía.....	68
3.10	Información climatológica .....	69
4.	METODOLOGÍA EMPLEADA.....	71
4.1	Método tradicional .....	71
4.2	Factor de reducción por área.....	75
4.3	Simultaneidad de eventos.....	79
4.4	Metodología propuesta.....	83
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	95
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	115
7.	REFERENCIAS.....	119

# A. ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2. 1 Tipos de lluvia.....	7
Figura 2. 2 Mapa de peligros por incidencia de ciclones. Fuente: CENAPRED.....	10
Figura 2. 3 Mapa de la probabilidad de ocurrencia de un ciclón tropical en la República Mexicana. Fuente: RE1 .....	11
Figura 2. 4 Pluviómetro.....	13
Figura 2. 5 Pluviógrafo .....	14
Figura 2. 6 Pluviograma .....	14
Figura 2. 7 Estación meteorológica automática.....	16
Figura 2. 8 Radar meteorológico.....	18
Figura 2. 9 Satélite meteorológico.....	20
Figura 2. 10 Áreas de influencia según el método de los polígonos de Thiessen .....	23
Figura 2. 11 Distribución y cálculo de la precipitación media con el método de las isoyetas .....	24
Figura 2. 12 Esquema para el método inverso de la distancia .....	25
Figura 2. 13 Función de distribución de probabilidad normal .....	35
Figura 2. 14 Función de distribución de probabilidad lognormal.....	36
Figura 2. 15 Función de distribución de probabilidad exponencial.....	37
Figura 2. 16 Función de distribución de probabilidad gamma.....	38
Figura 2. 17 Función de distribución de probabilidad Gumbel .....	39
Figura 2. 18 Función de distribución de probabilidad doble Gumbel.....	40
Figura 2. 19 Pantalla de inicio del programa AX.....	46
Figura 2. 20 Pantalla del programa AX, una vez cargada una muestra.....	46
Figura 2. 21 Cálculo global o individual con el programa AX.....	47
Figura 2. 22 Cálculo global con el programa AX .....	47
Figura 2. 23 Cálculo individual con el programa AX.....	48
Figura 2. 24 Función de distribución de probabilidad con el programa AX .....	49
Figura 2. 25 Error estándar de ajuste y parámetros estadísticos de la muestra.....	50
Figura 2. 26 Datos extrapolados en el Programa AX .....	51
Figura 3. 1 Localización de la cuenca del río Santa Catarina .....	55
Figura 3. 2 Localización de la región hidrológica 24 Bravo-Conchos .....	56
Figura 3. 3 Mapa de orografía del estado de Nuevo León .....	57
Figura 3. 4 Gráfica poblacional del estado de Nuevo León. Fuente: INEGI.....	58
Figura 3. 5 Distribución espacial de la lluvia sin huracán .....	60
Figura 3. 6 Distribución espacial de la lluvia con huracán .....	61
Figura 3. 7 Trayectoria del huracán Gilberto (1988) .....	63
Figura 3. 8 Trayectoria del huracán Emily (2005).....	65
Figura 3. 9 Trayectoria del huracán Alex (2010).....	66
Figura 3. 10 Modelo digital de terreno (LIDAR) con resolución espacial de 1x1 m y 5x5 m .....	67
Figura 3. 11 Hidrología superficial, escala 1:50, 000. Fuente INEGI.....	68
Figura 3. 12 Estaciones climatológicas y su área de influencia en la cuenca.....	69
Figura 5. 1 Factores de reducción de la muestra 1, según la metodología propuesta .....	96
Figura 5. 2 Factores de reducción por estación para distintos periodos de retorno .....	97
Figura 5. 3 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno.....	98
Figura 5. 4 Factores de reducción de cada uno de los métodos para distintos periodos de retorno.....	99
Figura 5. 5 Valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno con cada metodología, para la estación Rinconada.....	104

<i>Figura 5. 6 Valores de precipitación en cada una de las estaciones para un periodo de retorno de 10,000 años</i> .....	105
<i>Figura 5. 7 Láminas de precipitación (mm)</i> .....	106
<i>Figura 5. 8 Distribución espacial de la precipitación máxima anual del año 2010</i> .....	107
<i>Figura 5. 9 Distribución espacial de la precipitación máxima anual del año 2010, sin considerar la precipitación ocasionada por el huracán Alex</i> .....	108
<i>Figura 5. 10 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno, sin considerar huracanes</i> .....	110
<i>Figura 5. 11 Gráfica de las láminas de precipitación sin ciclones tropicales (mm)</i> .....	111
<i>Figura 5. 12 Distribución general espacial de la lluvia con huracán</i> .....	112
<i>Figura 5. 13 Distribución general espacial de la lluvia sin huracán</i> .....	112

## B. ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2. 1 Clasificación de huracanes. Fuente: CENAPRED.....	9
Tabla 2. 3 Distribución <i>t</i> de Student.....	29
Tabla 2. 4 Valores críticos del número de secuencias en el test de Wald-Wolfowitz, para muestras pequeñas.....	31
Tabla 2. 5 Probabilidades asociadas <i>p</i> auxiliares en la prueba de Wald-Wolfowitz.....	32
Tabla 3. 1 Área de Influencia de las estaciones climatológicas y área total de la cuenca.....	70
Tabla 3. 2 Principales características de las estaciones climatológicas.....	70
Tabla 4. 1 Precipitación máxima anual, en mm.....	73
Tabla 4. 2 Funciones de distribución de probabilidad con error estándar de ajuste mínimo.....	74
Tabla 4. 3 Precipitación máxima anual ( $PMA_{a1}$ ) asociada a diferentes periodos de retorno, con el método tradicional, en mm.....	74
Tabla 4. 4 Precipitación máxima anual media ( $PMAM_{a1}$ ) de la cuenca con el método tradicional, asociada a diferentes periodos de retorno.....	75
Tabla 4. 5 Precipitación media máxima anual, en mm.....	77
Tabla 4. 6 Precipitación media máxima anual asociada a distintos periodos de retorno con el método de los FRA.....	78
Tabla 4. 7 Factores de reducción por área.....	78
Tabla 4. 8 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con el método de los FRA, en mm.....	79
Tabla 4. 9 Suma de la precipitación máxima anual, en mm.....	81
Tabla 4. 10 Precipitación máxima anual asociada a distintos periodos de retorno con el método de simultaneidad de eventos.....	82
Tabla 4. 11 Factores de simultaneidad.....	82
Tabla 4. 12 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno por el método de simultaneidad de eventos, en mm.....	83
Tabla 4. 13 Valores de precipitación para los días en los que se presentó el valor máximo anual en cada estación, en mm.....	84
Tabla 4. 14 Valores de precipitación para cada una de las muestras, en el año 1982, en mm.....	85
Tabla 4. 15 Precipitación correspondiente a la muestra 1, en mm.....	86
Tabla 4. 16 Precipitación para las muestras hidrológicas 2-8, en mm.....	87
Tabla 4. 17 Funciones de distribución de probabilidad con error estándar de ajuste mínimo.....	88
Tabla 4. 18 Precipitación asociada a distintos periodos de retorno para la muestra 1, en mm.....	88
Tabla 4. 19 Precipitación asociada a distintos periodos de retorno para las distintas muestras hidrológicas, en mm.....	89
Tabla 4. 20 Factores de reducción de cada una de las estaciones meteorológicas y de la precipitación media asociada a diferentes periodos de retorno.....	90
Tabla 4. 21 Factores de reducción de acuerdo con la muestra hidrológica 2.....	90
Tabla 4. 22 Factores de reducción de acuerdo con la muestra hidrológica 5.....	91
Tabla 4. 23 Factores de reducción de acuerdo con la muestra hidrológica 6.....	91
Tabla 4. 24 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra 1, en mm.....	92
Tabla 4. 25 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra 2, en mm.....	92
Tabla 4. 26 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra hidrológica 5, en mm.....	93

<i>Tabla 4. 27 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra hidrológica 6, en mm.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 5. 1 Factores de reducción correspondientes a la muestra 1, según la metodología propuesta .....</i>	<i>95</i>
<i>Tabla 5. 2 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno .....</i>	<i>98</i>
<i>Tabla 5. 3 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, con el método tradicional, en mm.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 5. 4 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con el método de los FRA, en mm .....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 5. 5 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con el método de simultaneidad de eventos, en mm.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 5. 6 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 1, en mm.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 5. 7 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 2, en mm.....</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 5. 8 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 5, en mm.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 5. 9 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 6, en mm.....</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 5. 10 Láminas de precipitación media asociada a distintos periodos de retorno, en mm.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 5. 11 Valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno sin considerar huracanes, para las estaciones climatológicas, en mm .....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 5. 12 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno, sin considerar huracanes .....</i>	<i>109</i>
<i>Tabla 5. 13 Resumen de las láminas de lluvia sin ciclones tropicales (mm).....</i>	<i>110</i>





# 1. INTRODUCCIÓN

---

En hidrología, hoy en día el agua es una gran preocupación y conocer su comportamiento el principal objetivo. La lluvia, el escurrimiento, la acumulación y las mayores avenidas son algunas de las cuestiones que más interesa conocer a los ingenieros, se trata de predecir su comportamiento al presentarse en cualquier fenómeno atmosférico y estar así, siempre un paso adelante, para mejorar los diseños y brindar con ello una mayor seguridad, eficiencia y desarrollo de las obras hidráulicas.

Actualmente, el diseño de cualquier obra hidráulica requiere de un estudio hidrológico y por ende del manejo de diferentes métodos para la estimación de lluvias, cada uno de estos con aspectos particulares que los caracterizan. A través de los años, con la experiencia adquirida y los estudios realizados, se ha observado que aunque estos métodos entregan buenos resultados, en cuanto al diseño hidráulico se refiere, sería posible mejorarlos, y con ello evitar obras sobredimensionadas.

Por lo tanto, a los ingenieros les concierne buscar nuevas maneras o métodos que permitan agilizar su trabajo; simplificar estos métodos o en su caso mejorarlos, permitirá lograr mejores resultados y mayores beneficios para todos los involucrados.

Con base en lo mencionado anteriormente, en este trabajo, se planea encontrar una manera más eficiente para tratar la distribución espacial de la lluvia y poder manejar así, las láminas de lluvia asociadas a un periodo de retorno; esto se intentará realizando un análisis estadístico en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), localizada dentro de la cuenca del río Santa Catarina, en el estado de Nuevo León; se propone una nueva hipótesis y los resultados obtenidos se compararán con los métodos tradicionalmente utilizados, tomando en cuenta también la confiabilidad de dichos métodos con la presencia de ciclones tropicales y así poder llegar a diversas conclusiones y recomendaciones.

## 1.1 Justificación

La realización del estudio en la cuenca del río Santa Catarina, se debe a la alta vulnerabilidad y riesgo por inundación a la que está expuesta la población dentro de la cuenca, específicamente en el AMM, ya que Nuevo León es un estado que se ve regularmente amenazado por diferentes fenómenos meteorológicos (ciclones tropicales, frentes fríos, etc.). La mayoría de las ocasiones que se presentan este tipo de fenómenos, éstos se intensifican al verse influenciados por la accidentada topografía de nuestro país, lo que complica la predicción de la intensidad de lluvia y viento asociado que producirá a su paso; dependiendo de la rápida evolución de estos fenómenos, se puede traducir en acumulaciones de agua y escurrimientos repentinos en superficie, que afectan las actividades humanas y llegan a poner en riesgo la seguridad de la población. Así, estos eventos tienen un particular impacto en el estado de Nuevo León, pero sobre todo en la zona conurbada de las principales ciudades del estado, donde las características geográficas y topográficas magnifican las concentraciones del agua de lluvia.

Sin embargo, es también conocido que la ciudad de Monterrey y su área metropolitana han sufrido ya en forma recurrente de daños materiales y pérdidas de vidas humanas por avenidas extraordinarias.

En cuanto a los peligros de inundación, hay que mencionar que la creciente urbanización de la ciudad de Monterrey, también influye en el aumento de las concentraciones del agua de lluvia.

La urbanización por un lado reduce la infiltración por las superficies urbanas relativamente impermeables y por el otro lado, aumenta la velocidad del escurrimiento superficial. Además, en diversos estudios se ha mostrado el incremento en la cantidad de precipitación pluvial que ocurre en zonas urbanas.

Los problemas de inundaciones en el AMM son recurrentes. Las fuertes lluvias que eventualmente se registran en esta región de Nuevo León, provocan inundaciones principalmente en pasos a desnivel y algunas avenidas de la ciudad. Los cursos de agua que atraviesan la ciudad, son también puntos críticos y zonas generadoras de potenciales problemas de desalojo de las aguas producto de las lluvias y los escurrimientos de sus cuencas de aportación.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua, en el AMM se presentan entre cuatro y cinco tormentas severas cada año y también existen, en promedio 7.7 días con láminas de precipitación acumulada en 24 horas, mayores a los 50 mm. Estos eventos son sin duda generadores de grandes escurrimientos y potenciales inundaciones.

Como podemos ver, es de suma importancia contar cada día con mejores métodos que consideren los aspectos físicos del comportamiento espacial de la lluvia.

Esto implica la necesidad de realizar estudios mucho más eficientes, que nos generen datos mucho más confiables y además de realizarlos de una manera más cómoda o sencilla, para ello se propone el desarrollo de una metodología.

Esta metodología consiste en que, con base en los datos de lluvia que se registran en una estación, en un tiempo dado, se pueda conocer simultáneamente, la lluvia que se está concentrando en cualquiera de las demás estaciones, con esta información ser capaces de encontrar factores de reducción que nos ayuden a realizar análisis mucho más sencillos y eficientes.

Con esta metodología, se podría ahorrar el análisis de una gran cantidad de datos, ya que no es necesario contar con el registro histórico de todas las lluvias, de todos los años en todas las estaciones, basta con conocer o contar con el valor máximo en cada de una de estas, y el valor de las otras estaciones, para ese mismo día.

Además, se busca con este método poder mejorar los métodos actualmente utilizados, en cuanto a resultados o tormentas de diseño se refiere, es decir, lograr estimaciones de la lluvia más exactas que nos permitan encontrar el análisis óptimo para diseños más eficientes.

## 1.2 Objetivos

- Aplicar cada uno de los métodos tradicionalmente utilizados para la estimación de láminas de lluvia en el Área Metropolitana de Monterrey.
- Desarrollar y aplicar una nueva metodología útil para la estimación de láminas de lluvia en el Área Metropolitana de Monterrey.
- Aplicar las metodologías anteriores para la estimación de láminas de lluvia, pero suponiendo la ocurrencia y no ocurrencia de un ciclón tropical.
- Analizar y comparar los resultados de cada uno de los métodos tradicionalmente usados con los de la metodología propuesta, para los casos con y sin huracanes.

## 1.3 Descripción

A continuación se describe brevemente lo que se presenta en cada uno de los capítulos de este trabajo.

En el capítulo ANTECEDENTES, se describen los tipos de lluvia que existen, así como también de las principales características que definen a los ciclones tropicales. Se toca también, el tema de la variabilidad espacial de la lluvia y cuáles son los métodos de estimación de lluvia tradicionalmente utilizados; se describe brevemente su procedimiento, sus principales

características y las ventajas e inconvenientes con los que cuentan cada uno de ellos. Además, se presentan los métodos estadísticos de extrapolación que se utilizan comúnmente en hidrología; así como, las herramientas tecnológicas con las que se cuenta hoy en día, que nos ayudan a agilizar los procesos de diseño en la ingeniería

En el capítulo ZONA DE ESTUDIO, como su nombre lo indica, se describirán las características generales del estado de Nuevo León, como son, ubicación y principales límites o colindancias del estado y del AMM, el número de habitantes, tanto hombres como mujeres, que habitan actualmente en el estado, la ubicación y algunas características que describen particularmente a nuestra cuenca, etc. Por otro lado, se mencionan las principales lluvias históricas y ciclones en el estado; en seguida, se describe la información de interés para nuestro trabajo, como: datos topográficos e hidrográficos del estado, para así poder identificar los límites de la cuenca, la red de drenaje, etc.; finalmente, en este apartado también se analiza la información climatológica disponible para nuestra área en estudio, que entre otras, incluye la determinación del área de influencia de las estaciones climatológicas.

En la sección de MÉTODOS EMPLEADOS, se describen algunos de los métodos con los que actualmente contamos para el análisis y determinación de láminas de precipitación, asociados a distintos periodos de retorno, necesarios para cualquier diseño hidráulico o estudio hidrológico; se explica paso a paso su metodología y se encontrarán también, de manera resumida, los resultados de cada uno de estos métodos. De igual forma, en este apartado se desarrolla y aplica la metodología propuesta, de una manera más eficiente.

El capítulo de ANÁLISIS DE RESULTADOS, es el apartado más importante de este trabajo, ya que en él, es donde se verán las ventajas y limitaciones que se encontraron en cada uno de los métodos empleados. Además, se analizan las diferencias con la presencia o no de huracanes.

Finalmente, en CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se mencionan los resultados obtenidos en este trabajo, haciendo énfasis en las similitudes y diferencias, las ventajas e inconvenientes de la metodología propuesta, con respecto de los métodos tradicionales, con base en ello se dan algunas recomendaciones gracias a la experiencia adquirida con un análisis de este tipo.

## 2. ANTECEDENTES

---

La precipitación es el elemento principal con el que se trabajará en este trabajo, por lo tanto, es indispensable conocer las características esenciales de la misma. De esta manera, en este capítulo se incluyen diferentes conceptos que nos ayudarán a comprender mejor dicho elemento, como lo son: su descripción, herramientas que existen actualmente y que ayudan, por ejemplo, a registrar datos de precipitación diaria, horaria o de métodos que ayudan en la obtención de valores representativos para diversos estudios, como lo es conocer la variabilidad espacial y temporal de la lluvia en una cuenca o valores puntuales en la misma, como lo es la precipitación media.

Por otro lado, también existen métodos estadísticos, pruebas de calidad y software especializado en dichos campos, que sirven para el manejo y análisis de la información de una manera más rápida, eficiente y sencilla.

### 2.1 Precipitación pluvial

La precipitación pluvial se refiere a cualquier forma de agua, sólida o líquida, que cae de la atmósfera y alcanza la superficie de la Tierra.

La precipitación puede manifestarse como lluvia, llovizna, nieve, granizo o cellisca. La lluvia consiste de gotas de agua líquida con diámetro mayor a 0.5 mm. La llovizna está formada con gotas más pequeñas, de 0.25 mm o menos, que caen lentamente, por lo que rara vez la precipitación de este tipo supera 1 mm/h.

Por otra parte, el granizo está constituido por cuerpos esféricos, cónicos o irregulares de hielo con un tamaño que varía de 5 a más de 125 mm; la cellisca está formada por granos sólidos de agua, la cual se congela al atravesar una capa de aire con temperatura cercana a los 0° C.

La humedad se produce por la evaporación en la superficie del agua de océanos, mares, lagos, lagunas, ríos, arroyos y de los suelos, así como por la evapotranspiración de plantas y animales y siempre está presente en la atmósfera, aun en los días que el cielo está despejado. Ella corresponde a la cantidad de vapor de agua en el aire. Cuando existe un mecanismo que enfría el aire, este vapor se condensa y se transforma al estado líquido en forma de gotas, o bien, al estado sólido como cristales de hielo; ambos estados dan lugar a cuerpos muy pequeños (su diámetro es del orden de 0.02 mm) que en conjunto constituyen las nubes.

Para que ocurra la precipitación, se requiere que en las nubes exista un elemento (núcleo de condensación o de congelamiento) que propicie la unión de pequeños cuerpos (gotas de agua o cristales) que forman las nubes, a un tamaño tal que su peso exceda a los empujes debidos a las corrientes de aire ascendentes.

Estas gotas al caer también hacen que se junten otras por lo que el proceso se extiende como una reacción en cadena, generando la precipitación.

### 2.1.1 Tipos de lluvia

Existen 3 tipos de lluvia (figura 2.1):

- Orográfica. Se produce cuando el aire choca contra la ladera de una montaña y se ve obligado a ascender, al ascender se enfría y se originan precipitaciones. Este tipo de lluvias se producen en regiones montañosas (figura 2.1a).
- Convectiva. Tiene lugar cuando el aire que se encuentra sobre la superficie terrestre se calienta mucho, por lo tanto, es más ligero y asciende. En su ascenso se enfría y provoca precipitaciones (figura 2.1b). Estas lluvias son frecuentes en el Ecuador y en las zonas templadas en verano. Del mismo modo, la convectiva se forma con aire cálido que ascendió por ser más liviano que el aire frío que existe en sus alrededores. Esta última se presenta en áreas relativamente pequeñas, generalmente en zonas urbanas.
- Frontal.  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Frente cálido} \\ \text{Frente frío} \end{array} \right.$

Un frente cálido corresponde a un frente formado por una masa de aire cálido, que en su avance reemplaza a una masa de aire frío. En este proceso el aire cálido asciende por encima del aire más frío y origina la formación de cirrus (nubes a gran altura) y estratos (nubes a baja altura), que provocan precipitaciones no muy intensas (figura 2.1c).

Un frente frío corresponde a un frente formado por una masa de aire frío que se introduce como una cuña por debajo del aire caliente y lo hace ascender con rapidez provocando la formación de cumulonimbos (nubes de gran desarrollo vertical),

chubascos y tormentas, las que ocurren inmediatamente detrás del frente frío (figura 2.1c).

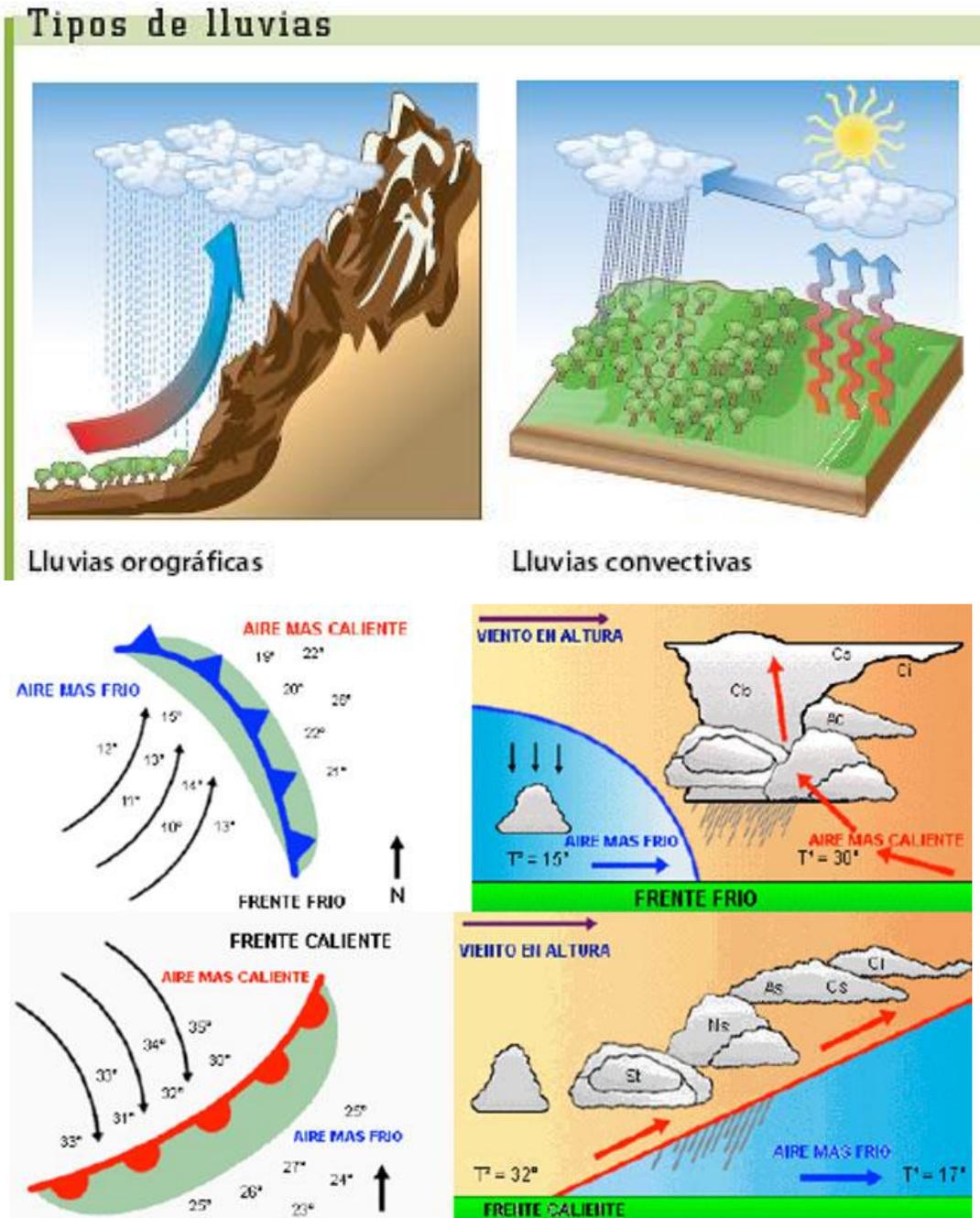


Figura 2. 1 Tipos de lluvia

## 2.1.2 Ciclones tropicales

Un ciclón tropical consiste en una gran masa de aire cálida y húmeda con vientos fuertes que giran en forma de espiral alrededor de una zona central de baja presión. Los ciclones tropicales generan lluvias intensas, vientos fuertes, oleaje importante y mareas de tormenta. Los ciclones tropicales presentan en planta un área casi circular y en el centro tienen la presión más baja. En 1988 la presión central del ciclón Gilberto fue de 888 milibares (mb).

Frecuentemente se desplazan con velocidades comprendidas entre 10 a 40 km/h. La energía de un ciclón es mayor conforme es más grande la diferencia de presiones entre su centro y su periferia; esta última es del orden de 1,013 mb. Los ciclones tropicales se clasifican de acuerdo con la presión que existe en su centro y/o con la velocidad de sus vientos (tabla 2.1).

Se les denomina depresión tropical (presión de 1,008 a 1,005 mb y/o velocidad de los vientos menor a 63 km/h), tormenta tropical (presión de 1,004 a 985 mb y/o velocidad del viento entre 63 y 118 km/h) y huracán (presión menor a 984 mb y/o velocidad del viento mayor a 119 km/h).

Tabla 2. 1 Clasificación de huracanes. Fuente: CENAPRED

Categoría	Presión central (mb)	Vientos (km/h)	Marea de tormenta (m)	Características de los posibles daños materiales e inundaciones	
Perturbación tropical	1008.1 a 1010			Ligera circulación de vientos.	
Depresión tropical	1004.1 a 1008	< 62		Localmente destructivo.	
Tormenta tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118	1.1	Tiene efectos destructivos.	
<b>H u r a c á n</b>	1	980.1 a 985	118.1 a 154	1.5	Ningún daño efectivo a los edificios. Daños principalmente a casas rodantes, arbustos y árboles. También algunas inundaciones de carreteras costeras y daños leves en los muelles.
	2	965.1 a 980	154.1 a 178	2.0 a 2.5	Provoca algunos daños en los techos, puertas y ventanas de los edificios. Daños considerables a la vegetación, casas rodantes y muelles. Las carreteras costeras se inundan de dos a cuatro horas antes de la entrada del centro del huracán. Las pequeñas embarcaciones en fondeadores sin protección rompen amarras.
	3	945.1 a 965	178.1 a 210	2.5 a 4.0	Provoca algunos daños estructurales a pequeñas residencias y construcciones auxiliares, con pequeñas fisuras en los muros de revestimiento. Destrucción de casas rodantes. Las inundaciones cerca de la costa destruyen las estructuras más pequeñas y los escombros flotantes dañan a las mayores. Los terrenos planos abajo de 1.5 m puede resultar inundados hasta 13 km de la costa o más.
	4	920.1 a 945	210.1 a 250	4.0 a 5.5	Provoca fisuras más generalizadas en los muros de revestimiento con derrumbe completo de toda la estructura del techo en las residencias pequeñas. Erosión importante de las playas, daños graves en los pisos bajos de las estructuras cercanas a las costa. Inundaciones de los terrenos planos bajos, abajo de 3 m situados hasta 10 km de las costa.
	5	< 920	> 250	> 5.5	Derrumbe total de los techos en muchas residencias y edificios industriales. Algunos edificios se desmoronan por completo y el viento se lleva las construcciones auxiliares pequeñas, incluyendo techos. Daños graves en los pisos bajos de todas las estructuras situadas a menos de 4.6 m por encima del nivel del mar y a una distancia de hasta 460 m de la costa.

Los ciclones tropicales se originan en el mar entre las latitudes 5° a 15°, tanto en el hemisferio norte como en el sur, en la época en que la temperatura del agua es mayor a los 26° C. La temporada de ciclones tropicales en la República Mexicana suele iniciarse en la primera quincena del mes de mayo para el océano Pacífico, mientras que en el Atlántico durante junio, terminando en ambos océanos a principios de noviembre; el mes más activo es septiembre.

La República Mexicana, debido a su ubicación entre los paralelos 16° y 32° latitud norte y por la gran extensión de litorales con que cuenta, es afectada por ciclones tanto en las costas del océano Pacífico como en las del Golfo de México y el Caribe. Por lo mismo, los asentamientos humanos cercanos a las costas, están expuestos a la influencia de las perturbaciones ciclónicas. En las figuras 2.2 y 2.3 se puede ver el riesgo al que está expuesto uno de los estados del país ante la presencia de ciclones tropicales.

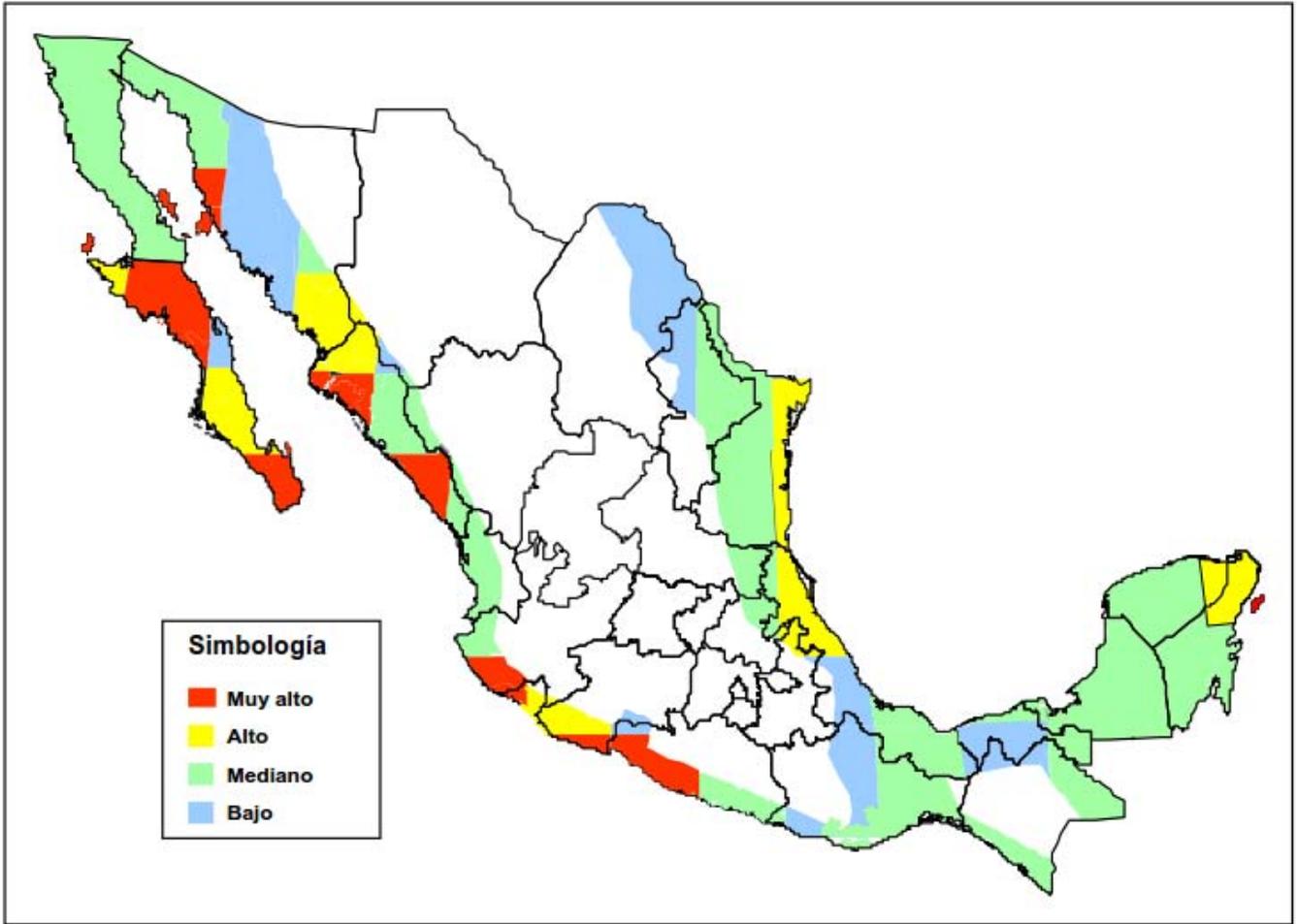


Figura 2. 2 Mapa de peligros por incidencia de ciclones. Fuente: CENAPRED

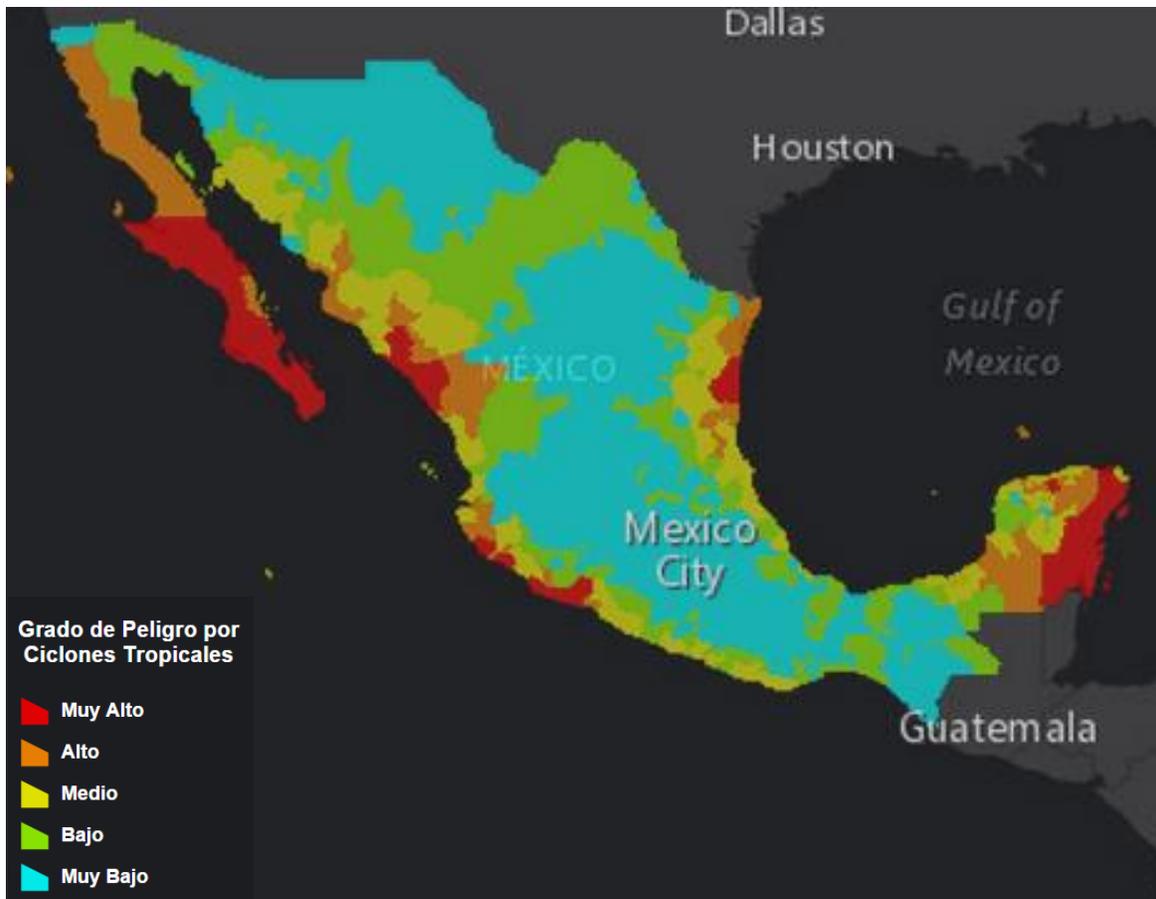


Figura 2. 3 Mapa de la probabilidad de ocurrencia de un ciclón tropical en la República Mexicana. Fuente: RE1

Las áreas afectadas regularmente abarcan más del 60 % del territorio nacional. Se ha observado que en México, entre mayo y noviembre, se presentan 25 ciclones en promedio con vientos mayores de 63 km/h, de los cuales, aproximadamente 15 ocurren en el océano Pacífico y 10 en el Atlántico. De éstos, anualmente 4 ciclones (dos del Pacífico y dos del Atlántico) inciden a menos de 100 km del territorio nacional.

## 2.2 Medición de la lluvia

La precipitación pluvial se mide en mm, que sería el espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación, sobre una superficie plana e impermeable y que equivale a litros de agua por metro cuadrado de terreno ( $l/m^2$ ).

Los instrumentos más habituales para la precipitación son el pluviómetro y el pluviógrafo, que en general sirven para medir la lluvia de manera puntual. Estos instrumentos deben ser

instalados en lugares apropiados donde no se produzcan interferencias de edificaciones, árboles, o elementos orográficos como rocas elevadas.

Por otro lado, podemos encontrar los radares y satélites meteorológicos, que en general miden la lluvia de forma distribuida en el espacio y tomando en cuenta la influencia del tiempo.

A partir de 1980 se está popularizando cada vez más la medición de la lluvia por medio de un radar meteorológico, que generalmente están conectados directamente con modelos matemáticos que permiten estimar la intensidad de lluvia en una zona y los caudales en una determinada sección de un río, todo ello en tiempo real.

A continuación se da una explicación más detallada de los sistemas actualmente utilizados para la medición de la precipitación, especialmente de la precipitación en forma de lluvia.

### 2.2.1 Pluviómetro

Es el instrumento más sencillo y más comúnmente empleado para medir la cantidad de lluvia.

Es un recipiente metálico de forma cilíndrica; en su parte superior tiene una boca circular que recibe el agua de lluvia, la cual pasa por medio de un embudo a otro recipiente, también cilíndrico, denominado colector, en el cual se almacena el agua para su posterior medición (figura 2.4).

Existen dos métodos para medir la lluvia recogida en el pluviómetro:

- Probeta
- Reglilla

El primero es más conveniente para los pluviómetros de lectura diaria, mientras que para los de lectura semanal o mensual es preferible el segundo.

La probeta, es un cilindro de vidrio o plástico transparente, sobre el cual está indicado el tamaño del pluviómetro con que debe ser empleada. Las graduaciones, finalmente grabadas, están separadas cada 0.2 milímetros de lluvia.

La reglilla, es de madera y sus graduaciones corresponden a milímetros y décimos de milímetro.

Las observaciones de precipitación se realizan diariamente a las 8 de la mañana. La cantidad de lluvia se cuenta desde las 8 de la mañana de ese día hasta las 8 de la mañana del día siguiente.

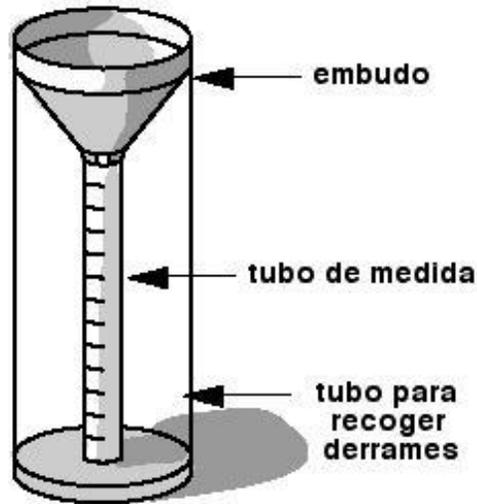


Figura 2. 4 Pluviómetro

## 2.2.2 Pluviógrafo

Por lo general, se utilizan tres tipos de pluviógrafos:

- De peso
- De balanza o depósito basculante
- De flotador, también denominado de sifón

Se utilizan para los siguientes fines:

- Determinar las horas de comienzo y terminación de la lluvia.
- Determinar la intensidad de la lluvia en cualquier momento.

Sólo el pluviógrafo de peso resulta satisfactorio para medir todo tipo de precipitación. La utilización de los otros dos tipos se limita en general a la medida de la lluvia.

Los pluviógrafos son dispositivos muy similares a los pluviómetros, con la diferencia de que tienen un mecanismo para producir un registro continuo de la precipitación (figura 2.5), este mecanismo está compuesto por un tambor que gira a velocidad constante sobre el que se coloca un papel graduado especialmente (figura 2.6), en el recipiente se coloca un flotador que se une mediante un juego de varillas a una plumilla que marca las alturas de precipitación en el papel, normalmente, el recipiente tiene capacidad de diez milímetros de lluvia, misma que al ser alcanzada, se vacía automáticamente por medio de un sifón. Esta descripción corresponde al pluviógrafo de sifón, de uso más común en México.



Figura 2. 5 Pluviógrafo

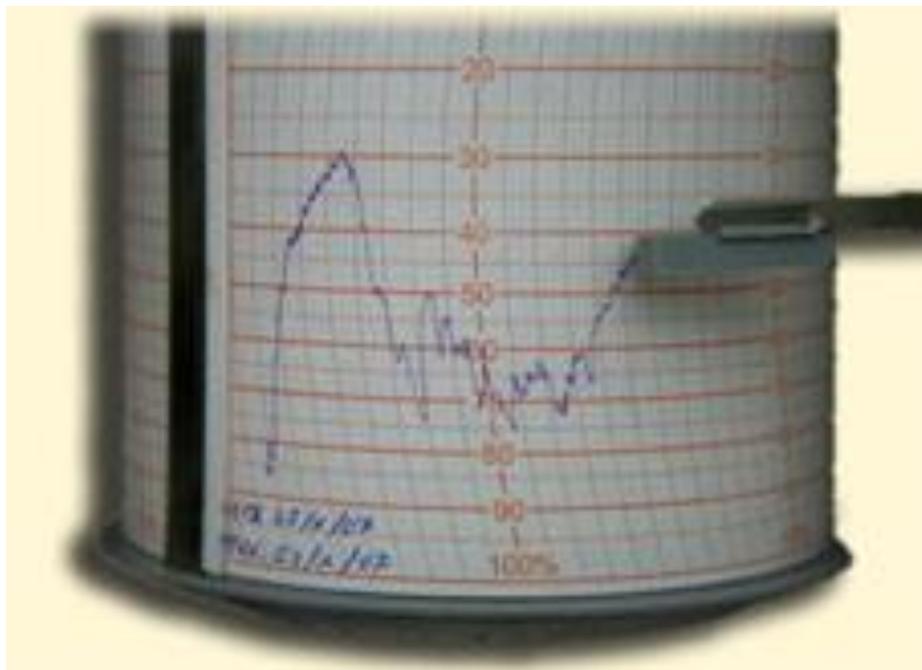


Figura 2. 6 Pluviograma

### 2.2.3 Estaciones meteorológicas automáticas

Una estación meteorológica automática (EMA) es una versión autónoma automatizada de la estación meteorológica tradicional, preparada tanto para ahorrar labor humana o realizar mediciones en áreas remotas o inhóspitas. Está compuesta por un conjunto de dispositivos electrónicos, mecánicos y un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática (figura 2.7).

Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 o 3 horas por estación.

El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso.

Las variables que generalmente se miden son:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura y humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación



Figura 2. 7 Estación meteorológica automática

### 2.2.4 Radar meteorológico

El radar es un sistema electrónico que permite detectar objetos fuera del alcance de la vista y determinar la distancia a que se encuentran proyectando sobre ellos ondas de radio. La palabra ‘radar’ corresponde a las iniciales de “Radio Detection And Ranging.”

Un radar meteorológico, es un tipo de radar usado en meteorología para localizar precipitaciones, calcular sus trayectorias y estimar sus tipos (lluvia, nieve, granizo, etc.), suele usarse junto con detectores de rayos, para ubicar la actividad mayor de una tormenta, de igual forma, utiliza los ecos de precipitaciones y de atmósfera para estimar la dirección y velocidad del viento en las zonas bajas de la atmósfera (figura 2.8). Además, los datos tridimensionales pueden analizarse para extraer la estructura de las tormentas y su potencial daño.

Los equipos de radar están compuestos por un transmisor, una antena, un receptor y un indicador. A diferencia de la radiodifusión, en la que el transmisor emite ondas de radio que son captadas por un receptor en una posición cualquiera, los transmisores y receptores de radar suelen hallarse juntos. El transmisor emite un haz de ondas electromagnéticas a través de una antena, que concentra las ondas en un haz coherente apuntando en la dirección deseada. Cuando las ondas chocan con un objeto que se halla en la trayectoria del haz, algunas se reflejan y forman una señal de eco. La antena capta la energía contenida en dicha señal y la envía al receptor.

Mediante un proceso de amplificación y tratamiento informático, el receptor del radar genera una señal en el dispositivo de visualización, por lo general una pantalla de computadora.

El funcionamiento de un radar meteorológico es similar al de un faro. La antena del radar gira continuamente para barrer, o iluminar, los blancos que se desea observar en un cierto volumen de la atmósfera. Después de un sofisticado procesamiento de la señal retornada por los ecos observados, el radar proporciona información valiosa sobre las características de estos ecos, que se pueden relacionar con la intensidad de la precipitación o con su velocidad respecto al radar.

Un radar meteorológico funciona de forma similar a otros tipos de radares, como los radares de los aeropuertos utilizados para localizar aviones, los radares marítimos de los barcos o los que utiliza la policía para detectar los vehículos que circulan demasiado rápido por la carretera.

En el caso de un radar meteorológico, el objetivo principal es observar la precipitación.

Hay dos tipos de radares:

- Radares fijos
- Radares móviles.

Los radares móviles son aquellos que se instalan en plataformas o armazones aéreos o satélites. Tienen la ventaja de trabajar con longitudes de onda más larga y de adaptarse o no provocar errores, sea cual sea la condición atmosférica en la que realicen sus tareas de observación. Este tipo de radares se utiliza con gran éxito en zonas de gran nubosidad o precipitaciones, ya que su sistema (las microondas no interactúan con el agua o la niebla que se encuentra en la atmósfera) resulta más preciso que el de los radares de tipo fijo.

En función de la señal transmitida se distinguen dos tipos de radares, el radar de pulsos y el radar de onda continua.

El radar de pulsos envía señales en ráfagas muy cortas (millonésimas de segundo) pero de una potencia muy elevada. Para poder determinar la distancia, el radar de pulsos mide el tiempo que la señal tarda en alcanzar el objetivo y volver al receptor (tiempo de vuelo).

A partir de este tiempo y la velocidad de propagación de una onda electromagnética se calcula la distancia. Muchos radares meteorológicos utilizan esta tecnología ya que es interesante localizar una tormenta o un huracán pero su velocidad no es tan elevada como para ser medida haciendo uso del radar.

Los radares de onda continua, como su nombre indica, utilizan señales continuas en vez de ráfagas cortas.



Figura 2. 8 Radar meteorológico

### 2.2.5 Satélite meteorológico

Los satélites meteorológicos proporcionan datos actualizados permanentemente de las condiciones meteorológicas que afectan a grandes áreas geográficas. Los servicios de predicción meteorológica dependen del flujo constante de imágenes tomadas por estos satélites (figura 2.9).

Los satélites meteorológicos se sitúan en dos tipos de órbitas: geoestacionarias y polares.

#### **Satélites meteorológicos geoestacionarios**

Actualmente, están operativos cinco satélites geoestacionarios idénticos, dispuestos en órbita geoestacionaria alrededor del Ecuador:

- GOES E (Este) y GOES W (Oeste) (USA)
- GMS (Japón)
- GOMS (Rusia)
- INSAT (India)
- METEOSAT (Agencia Espacial Europea, ESA)

Este grupo de satélites producen cada media hora imágenes actualizadas de toda la superficie terrestre, exceptuando las regiones polares.

Sus características comunes son:

- Alta resolución temporal: 30 minutos.
- Baja resolución espacial: 2.5 a 5 km/píxel
- Captan las bandas: visible, infrarrojo térmico y vapor de agua.

### **Satélites Meteorológicos de órbita polar**

Existen varios satélites de órbita polar con misiones meteorológicas. Los más conocidos son los de la serie “National Oceanographic and Atmospheric Administration” (NOAA).

Estos satélites siguen órbitas polares a una altitud sobre la Tierra de entre 833 y 870 km. Escanean todo el planeta en veinticuatro horas.

Los satélites de la NOAA más modernos, están equipados con radiómetros avanzados de resolución muy elevada (AVHRR) que escanean en cinco canales. Gracias al escáner AVHRR se pueden confeccionar mapas de la vegetación y de la formación de las nubes, así como medir la temperatura y la humedad de la atmósfera y de la Tierra; tienen una resolución espacial de 1 km, la cual resulta muy útil como sistema de cartografía de recursos naturales a gran escala, para confeccionar mapas de la vegetación y de la temperatura superficial global y regional; operan por parejas para garantizar que los datos que captan de cualquier región de la Tierra no tengan más de seis horas de desfase horario.

Además, del escáner AVHRR, disponen de los sensores TOMS, SBUV/2 y ERBE. El sensor TOMS mide la concentración de Ozono.

Todos estos instrumentos emiten más de 16,000 mediciones diarias, que se utilizan para los modelos de predicción meteorológica.



Figura 2. 9 Satélite meteorológico

## 2.3 Variabilidad espacial de la lluvia

La variabilidad espacial de la lluvia, lleva consigo dos aspectos fundamentales que es importante comprender antes de tratar con la misma; el primero de ellos consiste en que, según Willems y Berlamont (2002), existe una variabilidad de las propiedades estadísticas de la lluvia entre diferentes regiones geográficas y el segundo aspecto trata de la no uniformidad de la distribución espacial de la lluvia sobre las cuencas, este trabajo se enfocará en este último punto.

Por ejemplo, en una cuenca dos tormentas pueden tener una misma precipitación media, pero ello no implica que la distribución espacial sea la misma. A pesar de esto, en la práctica generalmente se supone que la lluvia se distribuye de forma uniforme, pero la intensidad de lluvia empleada, se mide en forma puntual, y sólo puede ser representativa para áreas pequeñas.

Debido a esto, surgen métodos que nos permiten estimar la lluvia en áreas más extensas, transformando la altura de lluvia puntual en una altura de lluvia equivalente para un área determinada.

Así, el método tradicional, considera los valores de lluvia máximos anuales puntuales, a partir de los cuales se determina una precipitación media o se distribuye con el método de los polígonos de Thiessen, con lo que los cálculos tienden a sobrestimar la precipitación debido a que precisamente en este método no se está tomando en cuenta el efecto de la no simultaneidad de las lluvias, es decir, el hecho de que los máximos no se presenten en el mismo día en todas las estaciones climatológicas consideradas.

El método de los factores de reducción por áreas (FRA), es una manera de determinar la intensidad de lluvia en áreas grandes. El FRA se define como el factor que aplicado al valor de lluvia puntual para una duración y periodo de retorno determinado, proporciona la lluvia espacial sobre un área para la misma duración y periodo de retorno (Estévez et al, 2010).

Por lo tanto, hoy en día el concepto de factores de reducción por área es el que proporciona el marco más eficaz para estudiar la variabilidad espacio-temporal de diferentes procesos hidrológicos.

Por otro lado, existe un método más reciente, llamado simultaneidad de eventos (Fuentes et al, 2014) en el cual se ha observado que, parecido al método tradicional, sus cálculos tienden a sobreestimar la precipitación, ya que su metodología consiste en relacionar la lluvia máxima anual total que cae en la cuenca con respecto a la lluvia máxima anual de una estación.

La planeación y el diseño de obras hidráulicas están relacionadas con eventos hidrológicos futuros, cuyo tiempo de ocurrencia o magnitud no pueden predecirse, ya que no están gobernados por leyes físicas o químicas conocidas, sino por las leyes de azar. Es por ello que la probabilidad y la estadística juegan un papel muy importante para pronosticar eventos hidrológicos.

Debido a que en hidrología se cuenta con periodos muy cortos de precipitaciones para poder estimar la lluvia de diseño de una avenida, se requiere buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad teóricas la que se ajuste mejor a los datos medidos, y usar esta función para poder extrapolar los eventos de diseño, ya sea por medios gráficos o por medio de la obtención de los parámetros de dicha función.

## 2.4 Lluvia media

Existen distintas maneras en las cuales podemos calcular la lluvia media, a continuación se describen los más comunes:

- Media aritmética

- Polígonos de Thiessen
- Método de las isoyetas
- Inverso de la distancia

### 2.4.1 Media aritmética

La precipitación media se puede obtener por la media aritmética definida por la expresión:

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

Donde  $h_p$  es la precipitación media,  $n$  el número de años, y  $h_{pi}$  la  $i$ -ésima altura de precipitación.

### 2.4.2 Polígonos de Thiessen

Este método permite estimar la precipitación media sobre la superficie de una cuenca hidrológica (figura 2.10), a partir de la ecuación:

$$h_p = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n (h_{pi} * A_i) \quad (2.2)$$

Donde  $h_p$  es la precipitación media,  $A_c$  el área de la cuenca,  $h_{pi}$  el valor de la precipitación puntual que se presenta en la  $i$ -ésima estación, y  $A_i$  el área de influencia de la estación  $i$ , definida a partir de los polígonos de Thiessen.

El área de influencia de cada estación  $A_i$  se define al construir triángulos en cuyos vértices están localizadas las tres estaciones más cercanas entre sí.

A continuación, se trazan líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos y, por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto.

Con este proceso, cada estación pluviométrica quedara rodeada por líneas rectas, formando un polígono de forma irregular y el área encerrada por esta figura, será la superficie de influencia de la estación correspondiente  $A_i$ .

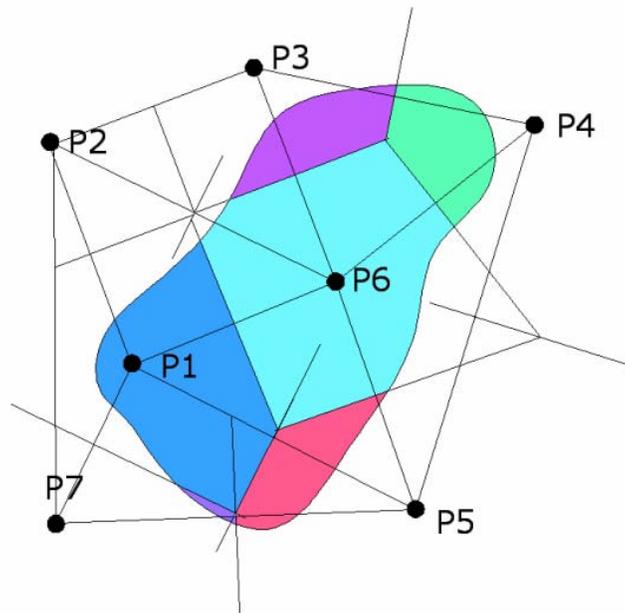


Figura 2. 10 Áreas de influencia según el método de los polígonos de Thiessen

### 2.4.3 Método de las isoyetas

Consiste en trazar, con la información disponible en las estaciones climatológicas, líneas que unen los puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas (figura 2.11). De esta forma la precipitación media se evalúa con la expresión:

$$h_p = \frac{1}{A_c} \sum_{i=1}^n (h_{pi} * A_i) \quad (2.3)$$

Donde  $h_p$  es la precipitación media,  $A_c$  el área de la cuenca;  $h_{pi}$  la altura de precipitación promedio entre las dos isoyetas adyacentes de análisis, y  $A_i$  el área comprendida entre dos isoyetas consecutivas.

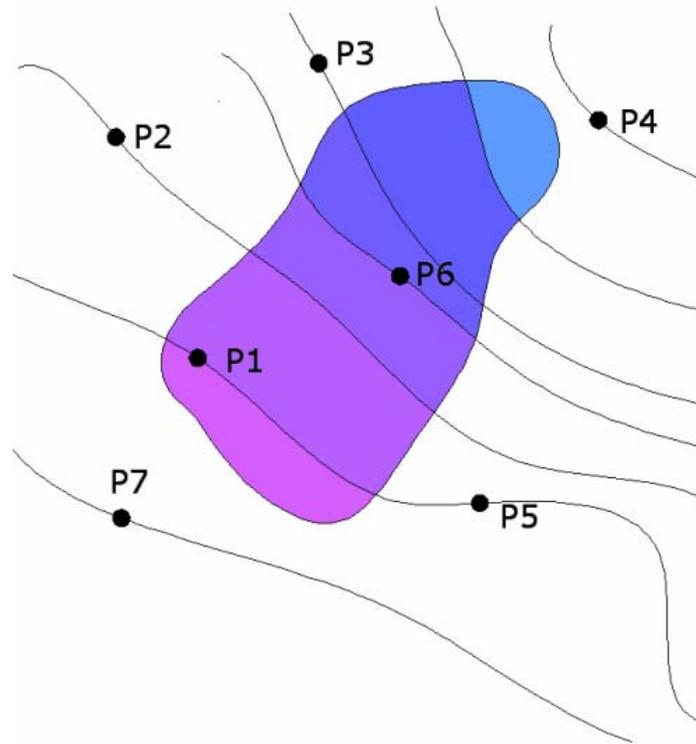


Figura 2. 11 Distribución y cálculo de la precipitación media con el método de las isoyetas

### 2.4.4 Inverso de la distancia

La precipitación es un fenómeno que tiene un fuerte componente geográfico, el estudio de la existencia de patrones espaciales puede contribuir al asentamiento de bases que contribuyan al estudio de la variabilidad de la lluvia.

La interpolación espacial es un procedimiento matemático utilizado para estimar el valor de un atributo, en este caso, la precipitación, en una localidad o 'celda' a partir de valores obtenidos en puntos de medición. En el caso de la precipitación, la interpolación espacial transforma un número finito de observaciones de las estaciones climatológicas, en un espacio continuo de manera que su patrón espacial sea comparable con aquel presentado por las observaciones puntuales de origen; la calidad de los resultados de la interpolación espacial del campo de precipitación, depende fundamentalmente de la calidad de los datos, del número y distribución de las estaciones climatológicas utilizadas y del método de interpolación.

Dentro de la literatura se encuentran diferentes métodos de interpolación. Éstos son clasificados en globales y locales, de acuerdo con la cantidad de información que utilizan, y en exactos e inexactos, según el valor de las estimaciones respecto a los datos de origen.

El método inverso de la distancia (figura 2.12) pertenece al grupo de interpoladores locales y es el más utilizado de los mismos, algunas de sus características son:

- Es un método inexacto
- Los valores estimados son promedios de los “n” valores conocidos
- Se pueden usar una infinita variedad de algoritmos, cuyas variaciones incluyen:
  - La naturaleza de la función de distancia
  - La variación del número de puntos utilizados
  - La dirección en la cual se seleccionan
- Objeciones del método:
  - Rango de datos interpolado limitado por el rango de los datos conocidos (no se observan datos fuera de estos límites)
  - Determinar cuántos puntos se incluyen en el promedio
  - Cómo manejar datos irregularmente distribuidos
  - Como manejar los efectos de borde

Su fórmula general es:

$$h_p = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{h_{p_i}}{[d - d_i]^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{[d - d_i]^2}} \quad (2.4)$$

Dónde  $h_p$  es el valor interpolado,  $[d-d_i]$  la distancia entre el punto desconocido y el conocido ( $d_i$ ) y  $h_{p_i}$  es el valor de la variable en el punto  $d_i$ .

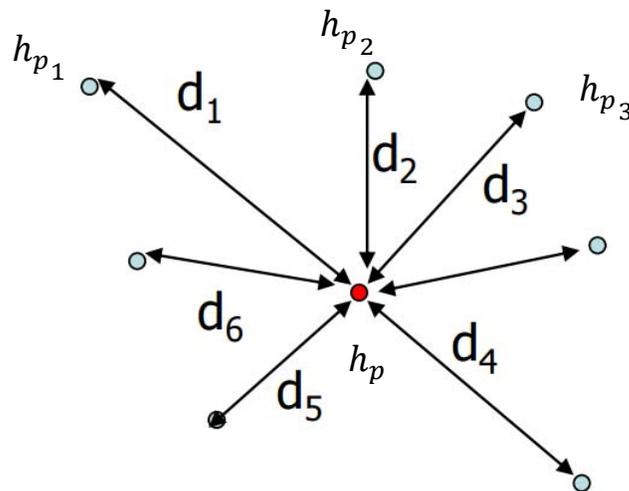


Figura 2. 12 Esquema para el método inverso de la distancia

## 2.5 Pruebas de calidad

Lo primero que se tiene que hacer para el análisis de los datos es revisar la calidad y cantidad de la información, por ejemplo, que la información sea continua en épocas de lluvias.

Las fases de planeación, diseño, construcción y operación de los aprovechamientos hidráulicos están siempre relacionados con eventos hidrológicos futuros. La complejidad de los procesos físicos de estos, hace casi imposible tener estimaciones confiables de diseño basadas en las leyes de la mecánica o la física, ya sea porque estos métodos son insuficientes o porque el modelo matemático resultante es muy complicado. Una alternativa en el análisis hidrológico es la aplicación de los conceptos de la teoría de probabilidad y estadística.

En dichos análisis de probabilidad y estadística, existen pruebas de calidad que nos sirven para dar confiabilidad y veracidad de los métodos y resultados presentados en cualquier estudio.

A continuación se presentan algunas de estas pruebas de calidad.

### 2.5.1 Pruebas de homogeneidad

Los parámetros estadísticos de las series hidrológicas, como la media, la desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o en la varianza, o cuando ocurren saltos negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de la homogeneidad.

En general, la falta de homogeneidad de los datos es inducida por las actividades humanas como la deforestación, apertura de nuevas áreas de cultivo, rectificación de cauce, construcción de embalses y reforestación. También es producto de los procesos naturales súbitos, como incendios forestales, terremotos, deslizamiento de laderas y erupciones volcánicas.

Las pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla con base a su probabilidad de ocurrencia, si dicha probabilidad es pequeña, será concluido que la serie es inhomogénea; si es grande, la decisión es que es homogénea.

Cuando es posible especificar la distribución que sigue la hipótesis nula y las alternativas, las pruebas no paramétricas son lo más indicado. Las pruebas no paramétricas son de hecho menos rigurosas que las paramétricas, pero mucho más sencillas de realizar, entre las primeras se presentarán las pruebas de Helmer y la de Wald-Wolfowitz, y entre las segundas la prueba de la  $t$  de Student y la de Cramer.

### 2.5.1.1 Prueba estadística de Helmert

Con fines prácticos, se puede decir que una serie de lluvias anuales y en general, cualquier serie climatológica, presenta como alternativas a la homogeneidad, los cambios bruscos (saltos) de su valor medio, la tendencia o alguna forma de oscilación.

La prueba de Helmert consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) es creada. En contraste, si una desviación es seguida por otra de signo contrario, un cambio será registrado (C). Cada año, excepto el primero, definirán una secuencia o un cambio.

Para que la serie sea homogénea, se debe cumplir que la diferencia entre el número de secuencias y el número de cambios en el registro deberá estar dentro de los límites de un error probable, que depende de la longitud del registro (n), esto es:

$$|S - C| = +\sqrt{n - 1} \quad (2.5)$$

Si el número de secuencias es mayor que el número de cambios, algún tipo de variación en la media o una tendencia en los datos crean la inconsistencia del registro. Tal condición se puede desarrollar con un cambio en el emplazamiento de la estación pluviométrica. Si por el contrario, el número de cambios resulta mayor que el de las secuencias, alguna forma de oscilación del valor medio estará presente y su causa deberá ser investigada con más detalle.

### 2.5.1.2 Prueba estadística de la t de Student

Cuando la causa de la pérdida de homogeneidad de la serie es probable que sea un abrupto cambio en la media, la prueba paramétrica de la t de Student es especialmente útil. La prueba es poderosa para detectar la inconsistencia en la media, además de ser un test robusto, excepto cuando la longitud de los dos periodos seleccionados para comparación de sus medias son desiguales, pues entonces la distribución de los datos puede no ser sesgada. Se entiende que un test es robusto cuando es insensible a la forma de la función de distribución de probabilidades de la serie. Debido a lo anterior, se recomienda que al aplicar la prueba de la t de Student, los valores de  $n_1$  y  $n_2$  de cada media que se compara,  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$ , sean similares.

La estadística de la prueba de t de Student está definida por la ecuación siguiente:

$$t_d = \frac{X_1 - X_2}{\left[ \frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.6)$$

Siendo  $s_1^2$  y  $s_2^2$  las varianzas de  $X_i$  en los periodos de registro, respectivamente. Entonces  $n_1 s_1^2$  puede ser calculada como la ecuación:

$$n_1 s_1^2 = \sum_1^{n_1} X_i^2 - \frac{1}{n_1} \left( \sum_1^{n_1} X_i \right)^2 \quad (2.7)$$

Y similarmente  $n_2 s_2^2$ .

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la t de la distribución de t de Student de dos colas y con  $v=n_1+n_2-2$  grados de libertad y con un 5% de nivel de significancia. Los valores de t se tienen en la tabla 2.3 que se muestra a continuación:

Tabla 2. 2 Distribución t de Student

k \ P	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,975	0,99	0,995	0,9995
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,38	1,96	3,078	6,314	12,71	31,8	63,7	637
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,06	1,39	1,886	2,920	4,30	6,96	9,92	31,6
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,25	1,638	2,353	3,18	4,54	5,84	12,9
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,19	1,533	2,132	2,78	3,75	4,60	8,61
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,16	1,476	2,015	2,57	3,36	4,03	6,86
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,13	1,440	1,943	2,45	3,14	3,71	5,96
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,12	1,415	1,895	2,36	3,00	3,50	5,40
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,11	1,397	1,860	2,31	2,90	3,36	5,04
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,10	1,383	1,833	2,26	2,82	3,25	4,78
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,09	1,372	1,812	2,23	2,76	3,17	4,59
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,09	1,363	1,796	2,20	2,72	3,11	4,44
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,08	1,356	1,782	2,18	2,68	3,06	4,32
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,08	1,350	1,771	2,16	2,65	3,01	4,22
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,08	1,341	1,761	2,14	2,62	2,98	4,14
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,07	1,337	1,753	2,13	2,60	2,95	4,07
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,07	1,333	1,746	2,12	2,58	2,92	4,02
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,07	1,330	1,740	2,11	2,57	2,90	3,96
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,07	1,328	1,734	2,10	2,55	2,88	3,92
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,07	1,325	1,729	2,09	2,54	2,86	3,88
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,06	1,323	1,725	2,09	2,53	2,84	3,85
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,06	1,321	1,721	2,08	2,52	2,83	3,82
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,06	1,319	1,717	2,07	2,51	2,82	3,79
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,06	1,318	1,714	2,07	2,50	2,81	3,77
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,06	1,316	1,711	2,06	2,49	2,80	3,74
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,06	1,315	1,708	2,06	2,48	2,79	3,72
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,06	1,314	1,706	2,06	2,48	2,78	3,71
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,06	1,313	1,703	2,05	2,47	2,77	3,69
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,06	1,311	1,701	2,05	2,47	2,76	3,67
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,05	1,310	1,699	2,04	2,46	2,76	3,66
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,05	1,303	1,697	2,04	2,46	2,75	3,65
∞	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,04	1,282	1,645	1,96	2,33	2,58	3,29

P ( $T \leq t$ ) para k grados de libertad. Por ejemplo, para k = 2 grados de libertad, P ( $T \leq 0,142$ ) = 0,55. P ( $T \geq 0,142$ ) = 0,45.

Si y sólo si, el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que el de la t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias, es evidencia de inconsistencia o falta de homogeneidad.

### 2.5.1.3 Prueba estadística de Cramer

Algunas veces puede ser más conveniente comparar la media de toda la serie y la media de una cierta parte del registro, para investigar la homogeneidad; para tal propósito la prueba estadística de Cramer es bastante útil, además de ser complementaria de la prueba de t de Student, ya que esta última no es recomendable cuando  $n_1$  y  $n_2$  no son parecidos.

En la prueba de Cramer,  $\bar{X}$  y  $S$  son respectivamente la media y la desviación típica del registro total de  $n$  valores, definidas por las siguientes ecuaciones. Por otra parte,  $\bar{X}_k$  es la media del subperíodo de  $n^1$  valores, es decir que:

$$x_k = \frac{\sum_{i=k+1}^{i=k+n} x_i}{n^1} \quad (2.8)$$

$$T_k = \frac{(x_k - \bar{x})}{S} \quad (2.9)$$

$$t_k = \left\{ \frac{n^1(n-2)}{n - n^1[1 + (T_k)^2]} \right\}^{\frac{1}{2}} (T_k) \quad (2.10)$$

La estadística  $t_k$  tiene distribución t de Student de dos colas con  $v=n-2$  grados de libertad y es utilizada en la misma forma que la estadística de  $t_d$ .

### 2.5.1.4 Prueba estadística de Wald- Wolfowitz

Esta prueba permite determinar si existe alguna diferencia entre las dos series que se analizan (la estación en estudio y ña estación auxiliar), se deba tal diferencia a tendencia central, variabilidad, oblicuidad o cualquier cosa, es decir, esta prueba descubre cualquier clase de discrepancia entre las series que se analizan. Para aplicar la prueba a los datos precedentes de dos series de lluvias anuales de tamaños  $n_1$  y  $n_2$ , se ordenan todos los valores ( $n_1+n_2$ ) en forma creciente y se determina el número de secuencias o rachas de la serie ordenada. Una secuencia se define como cualquier sucesión de valores de la misma serie, los cuales se indican como X para la estación en que se investiga la homogeneidad y con Y para la estación auxiliar.

Cuando las muestras son pequeñas ( $n_1, n_2 \leq 20$ ) la tabla 2.4 presenta los valores críticos del número de secuencias, de manera que si se encontró un numero de rachas ( $r$ ) igual o menor

que el valor tabulado, las series serán diferentes debido a una cierta causa, en un nivel de significancia del 5%

Tabla 2. 3 Valores críticos del número de secuencias en el test de Wald-Wolfowitz, para muestras pequeñas

n1	n2																		
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2											2	2	2	2	2	2	2	2	2
3					2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3
4				2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4
5			2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5
6		2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	6	6
7		2	2	3	3	3	4	4	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
8		2	3	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	7
9		2	3	3	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	7	8	8	8
10		2	3	3	4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	8	8	8	8	9
11		2	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	9
12	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	7	8	8	8	9	9	9	10	10
13	2	2	3	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	9	10	10	10	10
14	2	2	3	4	5	5	6	7	7	8	8	9	9	9	10	10	10	11	11
15	2	3	3	4	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	11	12
16	2	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	9	10	10	11	11	11	12	12
17	2	3	4	4	5	6	7	7	8	9	9	10	10	11	11	11	12	12	13
18	2	3	4	5	5	6	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13
19	2	3	4	5	6	6	7	8	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	13
20	2	3	4	5	6	6	7	8	9	9	10	10	11	12	12	13	13	13	14

Cuando  $n_1$  o  $n_2 > 20$ , no se puede utilizar la tabla anterior, entonces se evalúa la estadística z, igual a:

$$z = \frac{\left| r - \left( \frac{2N_1N_2}{N_1 + N_2} + 1 \right) \right| - 0.50}{\frac{2N_1N_2(2N_1N_2 - N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)^2(N_1 + N_2 - 1)}} \tag{2. 11}$$

Si el valor calculado de z, tiene una probabilidad asociada “p” leída directamente en la tabla 2.8, igual o menor que el nivel de significancia adoptado, las series serán diferentes y por lo tanto, si se sabe que una de ellas es homogénea, la otra será la inhomogénea.

Tabla 2. 4 Probabilidades asociadas p auxiliares en la prueba de Wald-Wolfowitz

Z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007

## 2.5.2 Prueba de independencia lineal

La prueba de independencia lineal o de Anderson, proporciona información acerca del tipo de muestra, es decir, si los datos representan variables aleatorias, y la relación entre un año y su antecesor, con dos años anteriores y hasta n-1 años anteriores; un registro se considera

linealmente independiente si al menos el 90 % del correlograma se encuentra dentro de los límites de confianza y se comprueba que no tienen relación con los datos de años anteriores.

## 2.6 Funciones de distribución de probabilidad

Para poder hacer deducciones probabilísticas en relación con alguna variable hidrológica de interés, es necesario estudiar primero la forma de caracterizar a las poblaciones de las que la muestra de estudio forma parte. Con este objeto, se definen algunas funciones típicas que permiten caracterizar estadísticamente a la población, así como la forma de calcular sus parámetros.

Entre las funciones de distribución de probabilidad más usadas en hidrología se destacan las siguientes:

- Normal
- Lognormal
- Exponencial
- Gamma
- Gumbel
- Doble Gumbel

### 2.6.1 Propiedades de las funciones de distribución de probabilidad

Se define a la función de distribución de probabilidad asociada a una variable aleatoria  $u$ , que puede tomar valores en el campo de los números reales, como la probabilidad de que dicha variable tome valores menores o iguales que un valor fijo  $x$  para toda  $x$  comprendida entre los reales, esto es:

$$F_u(x) = Prob \{u \leq x\} \quad u, x \in R \quad (2.12)$$

De acuerdo con la definición, si se conoce la función de distribución de probabilidad de una variable aleatoria, la probabilidad de que la variable tome valores en un intervalo  $(a, b)$ , se calcula como:

$$prob(a \leq u \leq b) = Fu(a) - Fu(b) \quad (2.13)$$

En resumen, la función de distribución de probabilidad de la población de valores posibles de una variable cualquiera,  $u$ ,  $F_u(X)$ , corresponde a la idea de la frecuencia relativa acumulada asociada a los valores de una muestra, y mide la probabilidad de que  $u$  tome valores menores o iguales que un valor especificado  $x$ .

## 2.6.2 Función de distribución normal

Es una función de distribución de probabilidad muy importante y mayormente usada. Su ecuación matemática es la siguiente:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.14)$$

Y la función de densidad de probabilidad se define de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}; \quad -\infty < x < \infty \quad (2.15)$$

Dónde  $\mu$  es la media,  $\sigma$  la desviación estándar y  $x$  una variable aleatoria.

La función de distribución de probabilidad normal es una curva con forma de campana, con eje de simetría en el punto correspondiente al promedio del universo  $\mu$ . La distancia entre el eje de simetría de la campana y el punto de inflexión de la curva es igual a  $\sigma$ , la desviación estándar de la población. El área total debajo de la curva es igual a 1 (figura 2.13).

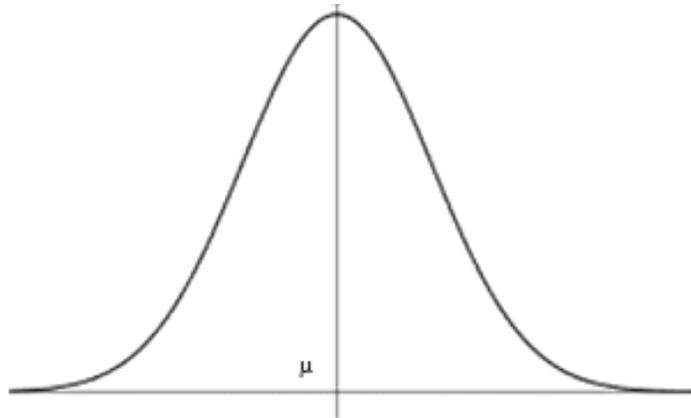


Figura 2. 13 Función de distribución de probabilidad normal

### 2.6.3 Función de distribución lognormal

Si la variable aleatoria  $Y=\log X$  está normalmente distribuida, entonces se dice que  $X$  está distribuida en forma lognormal. La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln-\alpha}{\beta}\right)^2} dx \quad (2.16)$$

Y su función de densidad de probabilidad presenta la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln-\alpha}{\beta}\right)^2} \quad (2.17)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la función de distribución de probabilidad, estos parámetros corresponden a la media y desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria. La podemos ver en la figura 2.14 que se muestra a continuación:

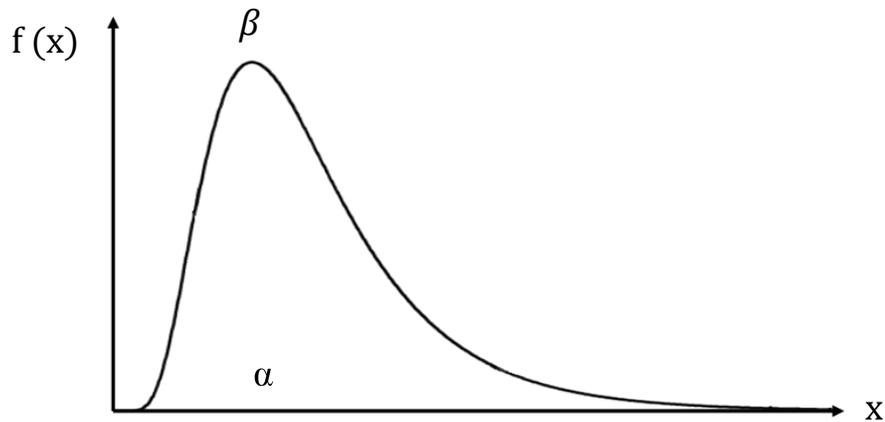


Figura 2. 14 Función de distribución de probabilidad lognormal

Esta distribución tiene la ventaja sobre la distribución normal de que está limitada ( $X > 0$ ) y de que la transformación log tiende a reducir la asimetría positiva comúnmente encontrada en información hidrológica, ya que al tomar logaritmos se tiene una reducción en una proporción mayor en los números grandes. Las desventajas de esta distribución, son que cuenta solamente con dos parámetros en la función, y que se requiere que los logaritmos de los datos sean simétricos con respecto a la media.

### 2.6.4 Función de distribución exponencial

Está definida por:

$$F(h) = 1 - e^{-y} \quad (2.18)$$

Dónde:  $F(x)$  es la probabilidad de que  $c \leq h$  y “y” una variable reducida, que se calcula como:

$$y = \frac{x - \beta}{\alpha} \quad (2.19)$$

En la cual,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros que definen la función exponencial;  $\alpha$  es la desviación estándar y  $\beta$  la cota inferior

Los parámetros estadísticos de esta función son la media:  $\mu = \alpha + \beta$  y la varianza:  $\sigma^2 = \alpha^2$ . Su representación gráfica es la siguiente (figura 2.15):

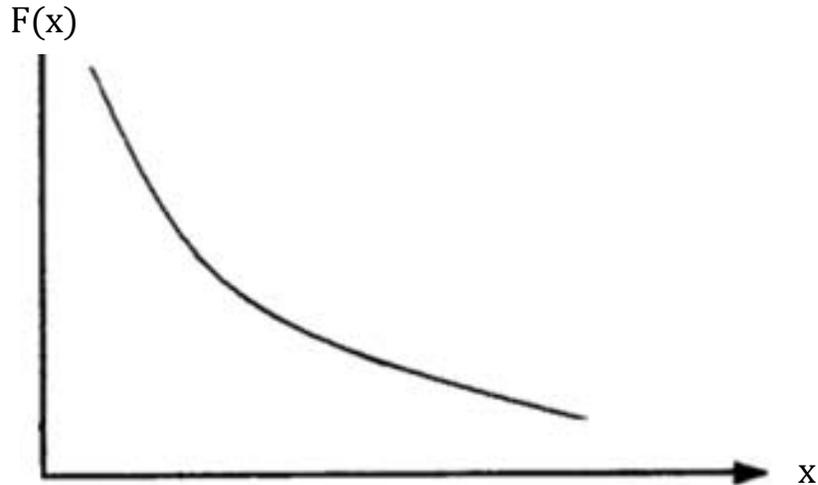


Figura 2. 15 Función de distribución de probabilidad exponencial

La función de distribución exponencial se utiliza para describir los tiempos de interarribo de choques aleatorios a sistemas hidrológicos, tales como volúmenes de escurrimiento que entra en los ríos a medida que la lluvia lava los contaminantes localizados en la superficie del río. La ventaja de esta distribución, radica en que es fácil estimar sus parámetros a partir de la información observada y esta distribución se adapta muy bien a estudios teóricos. La desventaja es que es necesario que la ocurrencia de cada evento sea completamente independiente de sus vecinos.

### 2.6.5 Función de distribución gamma

La función de densidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \left\{ \frac{x - \delta_1}{\alpha_1} \right\}^{\beta_1 - 1} e^{-\frac{x - \delta_1}{\alpha_1}} \quad (2.20)$$

Donde  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  y  $\delta_1$  son los parámetros de la función y  $\Gamma(\beta_1)$  es la función Gamma.

Su función de distribución de probabilidad es igual a:

$$F(x) = \frac{1}{\Gamma(\beta_1)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)} \left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)^{\beta_1-1} dx \quad (2.21)$$

La distribución Gamma se utilizó en hidrología por primera vez en 1924 por Foster para describir la distribución de probabilidad de picos de gastos máximos anuales.

La gráfica que la representa es la siguiente (figura 2.16):

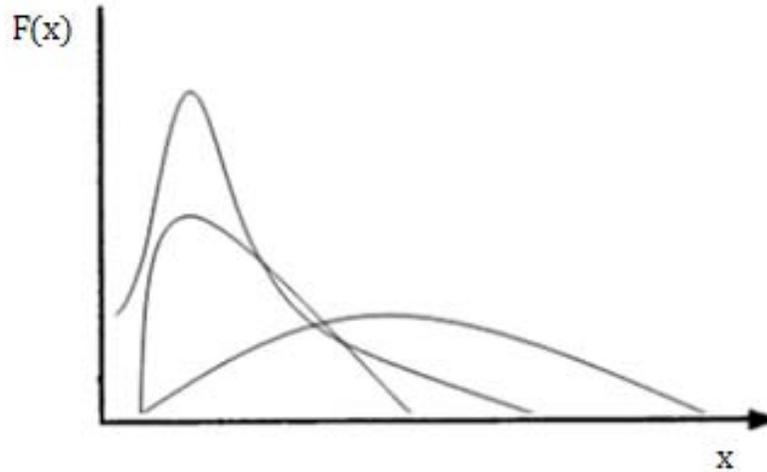


Figura 2. 16 Función de distribución de probabilidad gamma

## 2.6.6 Función de distribución Gumbel

En los estudios realizados para eventos hidrológicos extremos se incluye la selección de una secuencia de observación ya sean máximas o mínimas de un conjunto de datos, por ejemplo, en el estudio de los gastos pico en una estación hidrométrica, se utilizan solamente los valores máximos registrados cada año, entre todos los valores registrados. Es por ello que se utiliza la función de valores extremos o también llamada Gumbel en hidrología, ya que esta función de distribución se utiliza para determinar la probabilidad de que se presenten grandes avenidas, debido a que se ha demostrado teóricamente que se ajusta a los valores máximos.

La función de distribución de probabilidad se representa por la siguiente ecuación:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (2.22)$$

La función de densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (2.23)$$

Dónde  $\alpha$  es el parámetro de forma,  $\beta$  el parámetro de escala y  $x$  una variable aleatoria.

La gráfica representativa de esta función es la siguiente (figura 2.17):

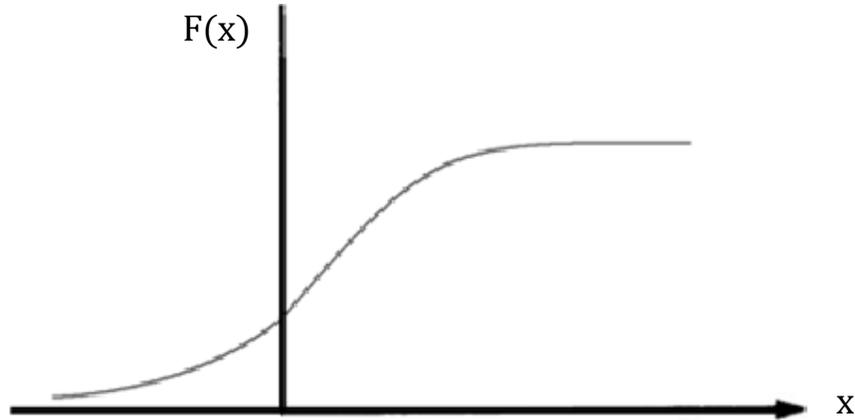


Figura 2. 17 Función de distribución de probabilidad Gumbel

La distribución de probabilidad Gumbel se utiliza para el estudio de los gastos máximos anuales en un río o de precipitaciones máximas anuales en una cuenca, y por lo tanto para la determinación de avenidas de diseño.

### 2.6.7 Función de distribución para dos poblaciones o doble Gumbel

En nuestro país, existen diversos lugares donde los gastos máximos anuales pertenecen a dos poblaciones diferentes, debido a ciclones que se presentan en ciertas zonas y por las precipitaciones relacionadas con los fenómenos meteorológicos dominantes de la región. Esta variación también se ve reflejada en zonas, donde se tienen datos de gastos producidos por las precipitaciones y otros por gastos provenientes de deshielos. En estas situaciones se dice que llegamos a tener dos poblaciones para una misma zona de estudio.

Es por ello que fue necesario desarrollar la función de distribución Doble Gumbel, dada por la siguiente expresión:

$$F(x) = p \left( e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \right) + (1 - p) \left( -e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right) \quad (2.24)$$

Donde  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  son los parámetros correspondientes a la población no ciclónica y  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  corresponden a la ciclónica,  $p$  es la probabilidad de que en un año cualquiera, el gasto máximo no sea producido por una tormenta ciclónica.

Los valores  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  se obtienen ajustando una función Gumbel a los datos de la primera población y los valores de  $\alpha_2$  y  $\beta_2$  ajustando otra función de Gumbel a los datos de la segunda población.

Los parámetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  definen una cierta inclinación de las curvas, entre más pequeñas más fuerte es la inclinación, y  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  son parámetros de escala, el valor más grande que pueden tomar es el máximo valor de la muestra, obtenido para las poblaciones 1 y 2.

Su representación gráfica es la siguiente (figura 2.18):

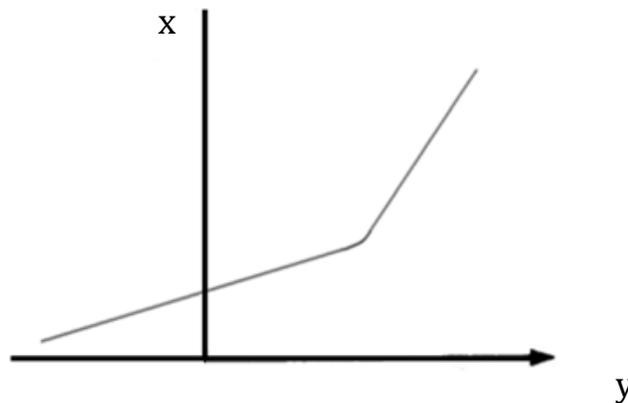


Figura 2. 18 Función de distribución de probabilidad doble Gumbel

Donde se aprecia claramente un salto brusco, por los valores de los gastos no ciclónicos y los ciclónicos.

### 2.6.8 Métodos de estimación de parámetros

Actualmente, existen los siguientes métodos de estimación de parámetros:

{  
   Momentos  
   Máxima verosimilitud  
   Momentos de probabilidad pesada  
   Momentos L  
   Máxima entropía

Una función de distribución de probabilidad, es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria, y esto lo realiza mediante el ajuste de dicha función a los datos de una muestra; en el proceso de ajuste se deben llevar a cabo dos procedimientos importantes: el primero es encontrar el tipo de función de distribución de probabilidad más adecuado para la muestra de datos, y el segundo, obtener los parámetros con los que cuenta la función elegida.

En hidrología, una elección apresurada de cualquiera de las funciones de distribución de probabilidad puede traer consigo consecuencias indeseables, como por ejemplo, el caso de un proyecto sobre diseñado y costoso o bien, proyectos subdiseñados y riesgosos.

Por lo tanto, el ajuste de las funciones de distribución se puede realizar mediante diversos métodos, a continuación se describen 2 de ellos, que son con los que trabaja el programa AX.

### *2.6.8.1 Método de los momentos*

Una forma de estimar los parámetros de una función de distribución de probabilidad, para que se ajuste al conjunto de datos, consiste en igualar los valores de las características estadísticas de la muestra, con los de la población, esto es, hacer que la media de los valores muestreados sea igual a la de la función de distribución (a la que se llamará primer momento), seguido de que las varianzas sean iguales (segundo momento), seguido del coeficiente de asimetría (tercer momento), continuando así hasta establecer tantas ecuaciones como parámetros tenga la función.

### *2.6.8.2 Método de máxima verosimilitud*

Este método supone que el mejor parámetro de una función debe ser aquel que maximiza la probabilidad de ocurrencia de la muestra observada. Se utiliza la función de verosimilitud  $L(X)$ . Mientras mayor sea esta función mayor será el ajuste de la función de distribución a los datos.

La función de verosimilitud es el producto de los valores de la función de densidad de probabilidad teórica, calculada para cada valor  $x_i$  de la muestra, es decir:

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i) = f(x_1) * f(x_2) * f(x_3) * \dots * f(x_n) \quad (2.25)$$

Dónde  $\prod_{i=1}^n$  es el operador que indica el producto de los valores que comprende.

Debido a que varias funciones de densidad de probabilidad son exponenciales, es conveniente trabajar con la función logaritmo de la función de verosimilitud:

$$H = \ln L = \sum_{i=1}^n \ln[f(x_i)] \quad (2.26)$$

De esta manera, para poder estimar los valores de los parámetros de la función que hacen máxima a la función H, se deriva dicha función con respecto a cada uno de los parámetros y el resultado se iguala a cero. Al igualar a cero cada una de las derivadas, se tendrán tantas ecuaciones como parámetros tenga la función de probabilidad, y de estas se despejan los parámetros para hacer el ajuste respectivo.

Este método, teóricamente, es el más correcto para ajustar funciones de distribución de probabilidad a datos, ya que arroja los estimativos de parámetros más eficientes (Aquellos que estiman los parámetros de la población con los menores errores promedio), sin embargo, para algunas distribuciones de probabilidad, no existe una solución matemática y al maximizar la función logaritmo de verosimilitud resulta bastante complicado, es por ello, que en general el método de los momentos es más fácil de aplicar que el método de la máxima verosimilitud y resulta ser el más apropiado para los análisis prácticos en hidrología.

## 2.6.9 Bondad del ajuste

### 2.6.9.1 Análisis gráfico

Este método es el más sencillo, y consiste simplemente en observar una gráfica donde se dibujará cada una de las diferentes funciones de distribución junto con los puntos medios de la muestra de datos, por lo tanto, aquella función que mejor se ajuste visualmente a estos valores medios, será la seleccionada.

Este método es subjetivo, y por ende no es recomendable, aunque si lo llegará a aplicar una persona con experiencia podría ser el mejor de los métodos.

### 2.6.9.2 Método de los mínimos cuadrados

El método de ajuste por mínimos cuadrados consiste en estimar los parámetros de la función de distribución seleccionada, que hagan mínima la expresión:

$$e = \sqrt{(x - \hat{x})^2} \tag{2.27}$$

Dónde  $F(X_i)$  es la función de distribución en estudio, valuada en  $X_i$  y  $P(X_i)$  la probabilidad “observada” de la muestra, que se estima mediante la fórmula de Weibull.

$$P(x_i) = \frac{n + 1 - m}{n + 1} \tag{2.28}$$

Dónde:  $n$  es el número de datos y  $m$  el número de orden que ocupa  $X_i$  en la serie de los datos, si se ordenan de mayor a menor.

### 2.6.9.3 Error estándar de ajuste

En general, se suele estar más preocupado por los datos estadísticos que por las mediciones individuales en un grupo de datos, deseando ver promedios, varianzas, rangos, proporciones, valores máximos o mínimos, u otras estadísticas, pero lo que a menudo no se logra apreciar totalmente es que las estadísticas también se comportan de una manera aleatoria, similar a la de las mediciones individuales, y esto se mide con el error estándar.

El error estándar se define como: la desviación estándar de la población de valores de una estadística muestral en un análisis repetido o su estimación. Se encarga de medir la variabilidad o dispersión de los valores observados alrededor de las recta de regresión y se puede obtener dividiendo la desviación estándar de la población entre la raíz cuadrada del tamaño de la muestra.

Por ejemplo, el error estándar de la media mide la diferencia que puede existir entre la media verdadera y la estadística que se informa. En términos más generales, podemos hablar del

"error estándar de la estimación" cada vez que se informa una cantidad estadística estimada. Cuando se calcula un dato estadístico único, es posible calcular el error estándar de la estimación. Comúnmente, cuanto mayor sea el tamaño de la muestra, menor será el error estándar de una cantidad estimada.

Lo anteriormente mencionado lo podemos apreciar en la siguiente ecuación:

$$SE_{\hat{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.25)$$

Donde  $s$  es la desviación estándar (es decir, la estimación basada en la muestra de la desviación estándar de la población),  $n$  el tamaño (número de individuos de la muestra).

O también:

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \hat{x})^2}{n - n_p}} \quad (2.26)$$

Donde  $n_p$  son los parámetros de la función de distribución de probabilidad.

## 2.7 Programa AX

Para realizar el análisis estadístico, y ajustar las funciones de distribución de probabilidad a una serie de tiempo (muestra), se empleó el programa de ajuste de funciones de distribución de probabilidad AX, elaborado por el CENAPRED y que permite obtener los eventos para determinados periodos de retorno (Jiménez, 1992). Este programa calcula el error estándar de cada una de las funciones de ajuste con respecto a la muestra, también estima la mejor función de ajuste con sus parámetros.

Las funciones de probabilidad que se contemplan en el empleo de este programa son:

- Normal
- Lognormal
- Exponencial
- Gamma
- Gumbel

- Doble Gumbel.

Los métodos de estimación de parámetros que emplea son:

- Método de momentos
- Máxima verosimilitud

Además, las funciones Log normal y Gamma pueden calcularse para dos o tres parámetros. Asimismo, al realizar el ajuste de las funciones de distribución de probabilidad, el programa indica cual es el error cuadrático generado.

Después de introducir los datos de una serie de tiempo, se puede elegir cualquiera de las siguientes opciones:

- Cálculo global. Ajusta la muestra a todas las funciones de distribución de probabilidad mencionadas y muestra una tabla con el error cuadrático de cada una, resaltando el error mínimo y la función de probabilidad que lo genera.
- Cálculo individual. Permite ajustar una determinada función de probabilidad, muestra los resultados en una tabla, y los datos se pueden interpolar o extrapolar para cualquier periodo de retorno deseado.

La información sobre el funcionamiento del programa se puede consultar en el manual de operación, elaborado por Jiménez (1992).

A continuación, se presenta el procedimiento con una serie de instrucciones e imágenes que permitirán conocer de forma general el manejo y funcionamiento de dicho programa:

1. Al ejecutar el programa se abre la pantalla de inicio (figura 2.19).

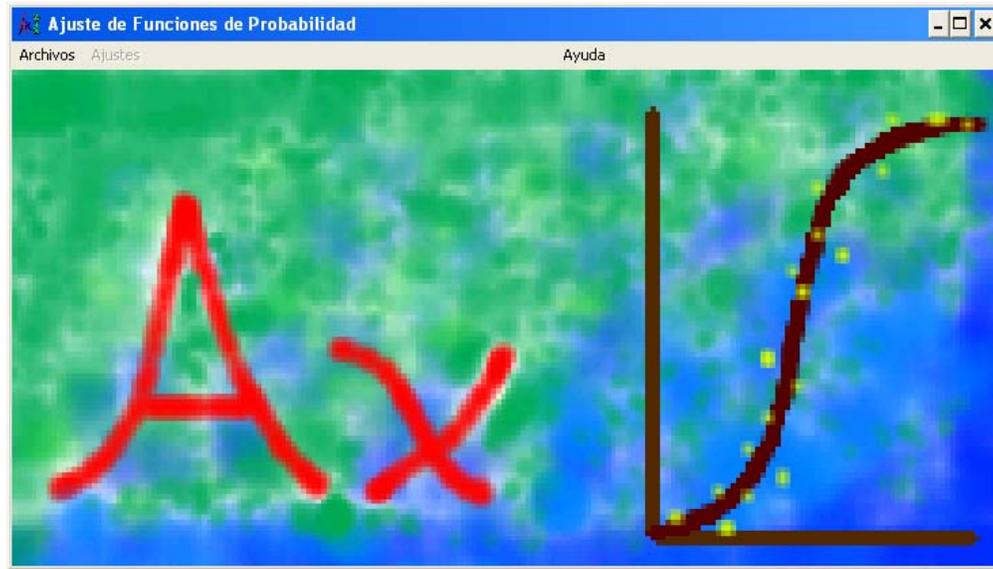


Figura 2. 19 Pantalla de inicio del programa AX

2. Al abrir el archivo con la muestra (datos de lluvia), el programa nos habilita el menú “Ajustes” (figura 2.20)

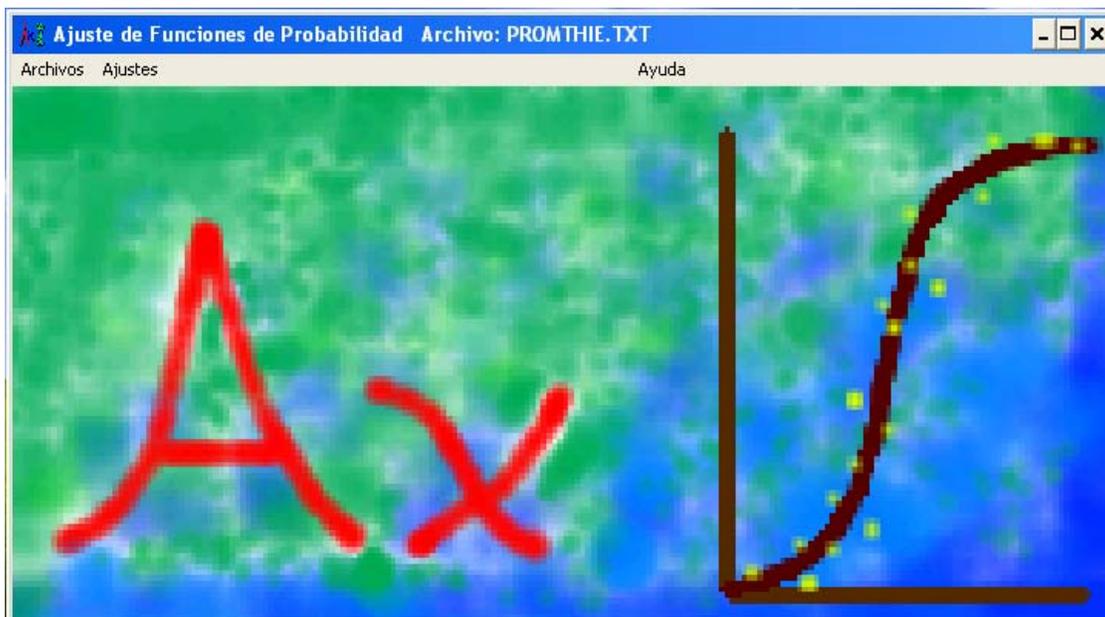


Figura 2. 20 Pantalla del programa AX, una vez cargada una muestra

3. En el menú ajustes se puede elegir un “cálculo global” o un “cálculo individual”, (figura 2.21). La primera opción calcula el error estándar de ajuste de cada una de las funciones de distribución de probabilidad (figura 2.22).

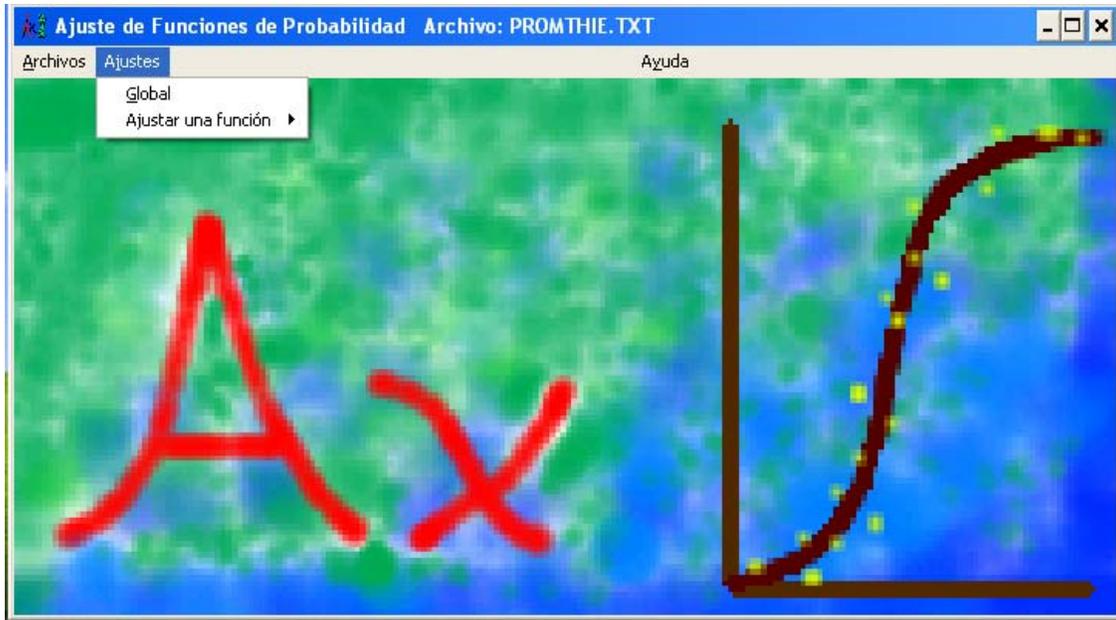


Figura 2. 21 Cálculo global o individual con el programa AX

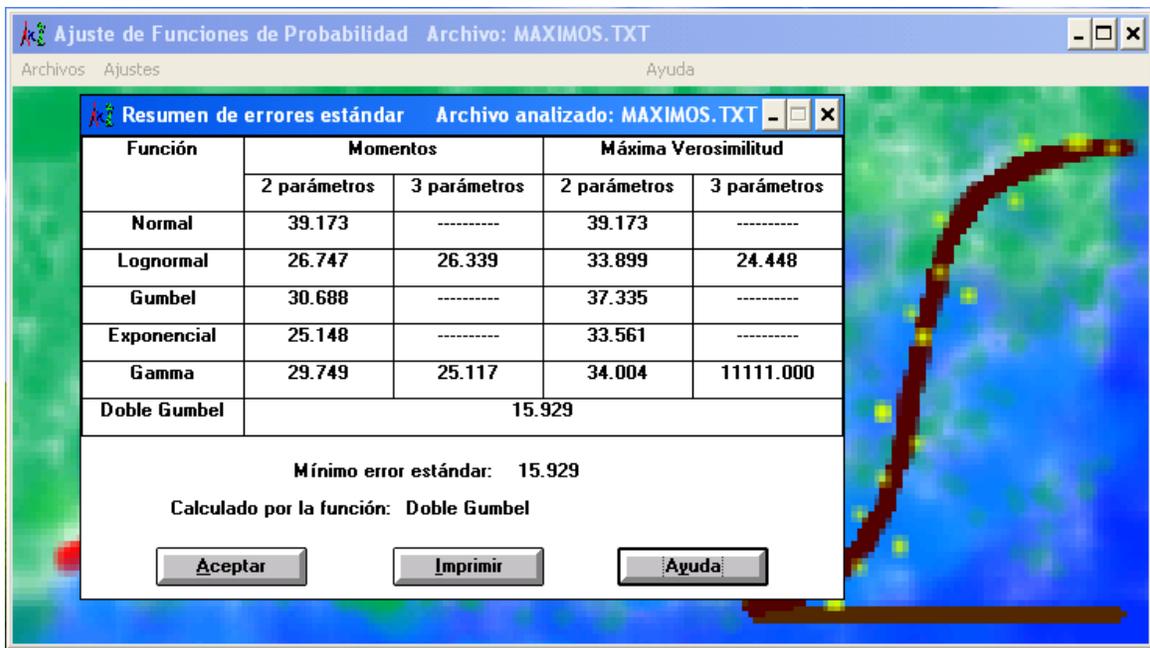


Figura 2. 22 Cálculo global con el programa AX

4. Con la función de distribución de probabilidad con menor error estándar de ajuste se realiza el cálculo individual, es decir, se determinan los parámetros de dicha función de distribución de probabilidad (figura 2.23).

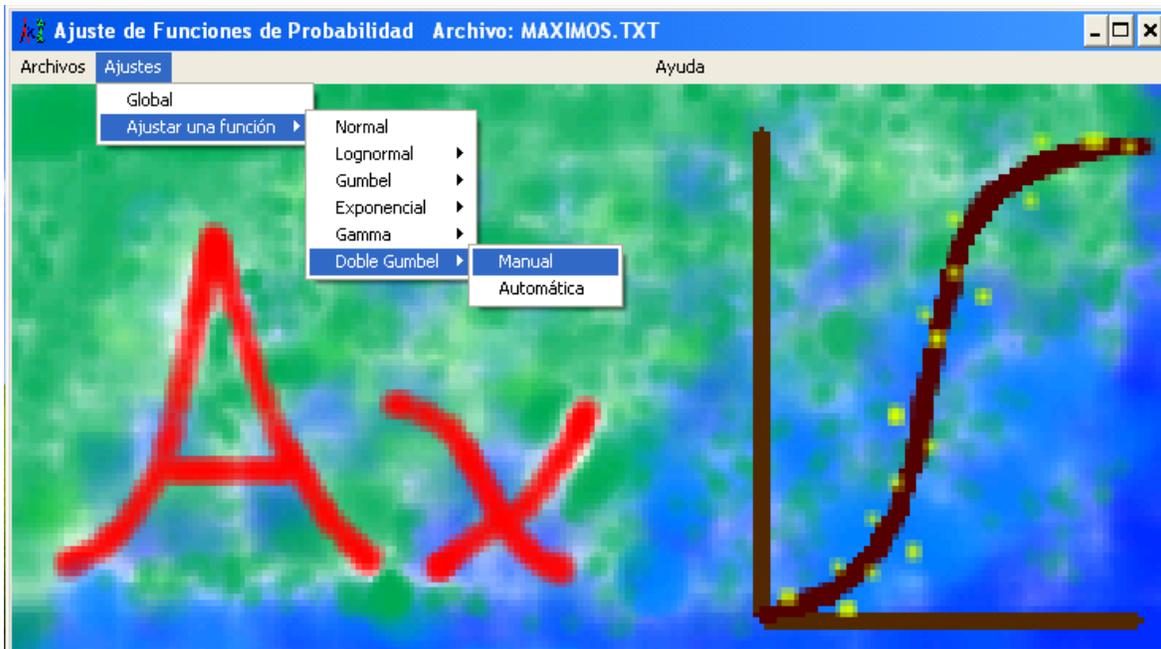


Figura 2. 23 Cálculo individual con el programa AX

A continuación, el programa muestra la gráfica de la función de distribución de probabilidad, los datos de la muestra y algunos de los parámetros y variables que necesita la ecuación matemática de dicha función (figura 2.24).

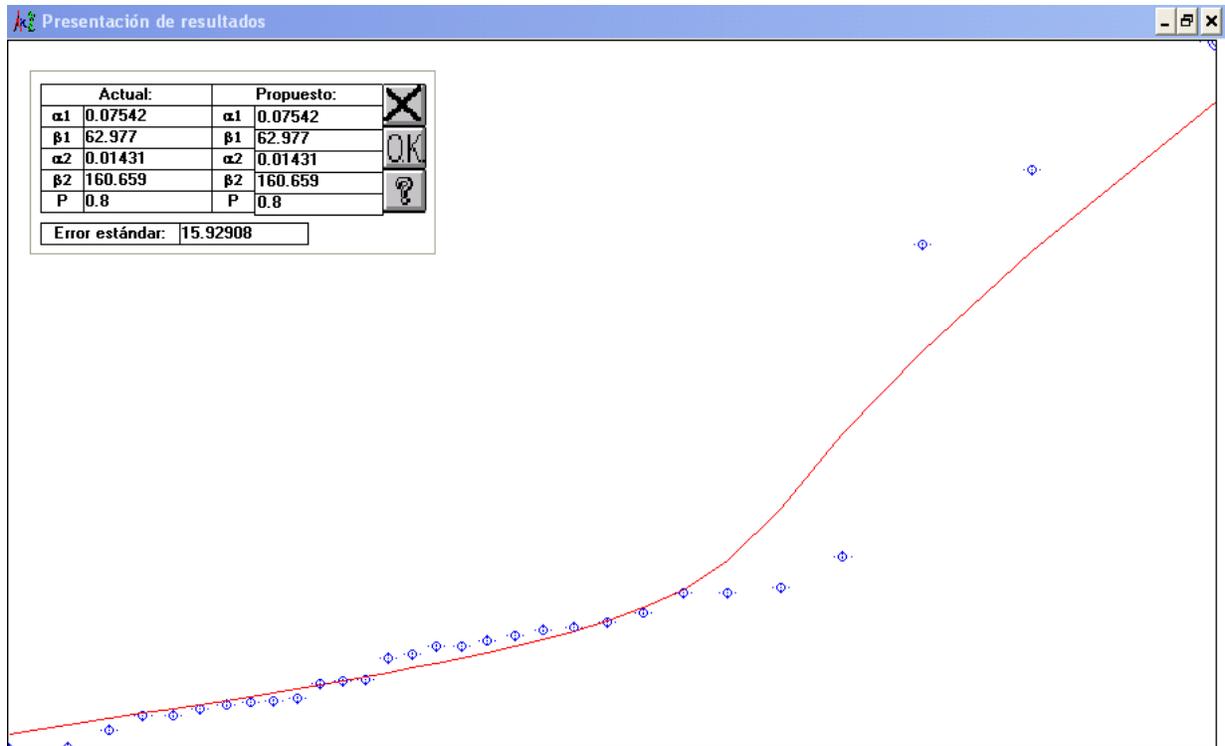


Figura 2. 24 Función de distribución de probabilidad con el programa AX

Por último, muestra los errores cuadráticos y los parámetros estadísticos de la muestra que se produjeron durante el cálculo (figura 2.25).

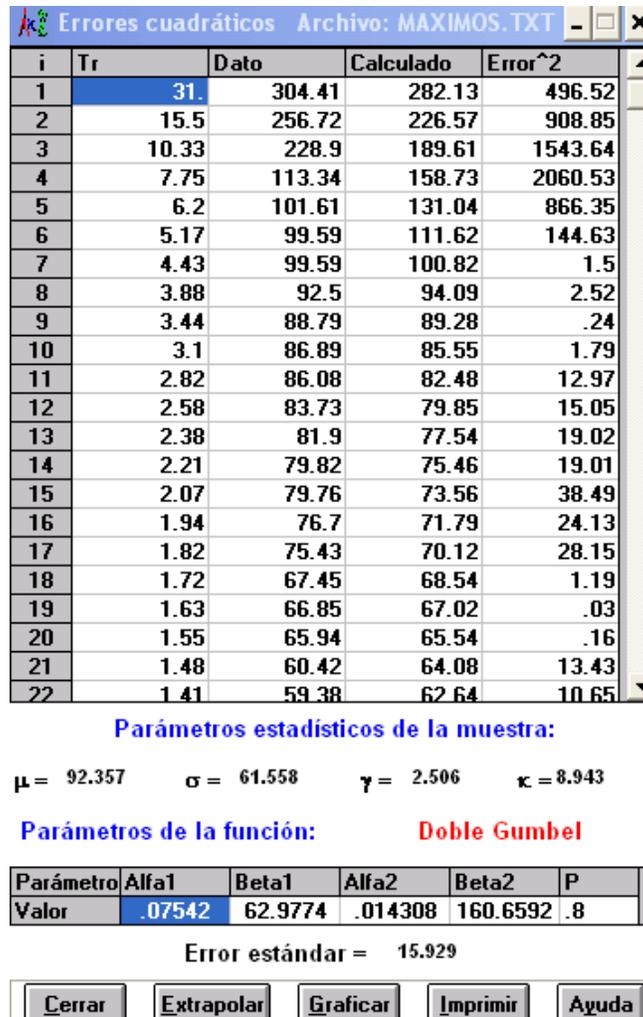


Figura 2. 25 Error estándar de ajuste y parámetros estadísticos de la muestra

- Utilizar la función de distribución de probabilidad para extrapolar los datos para los diferentes periodos de retorno (figura 2.26).

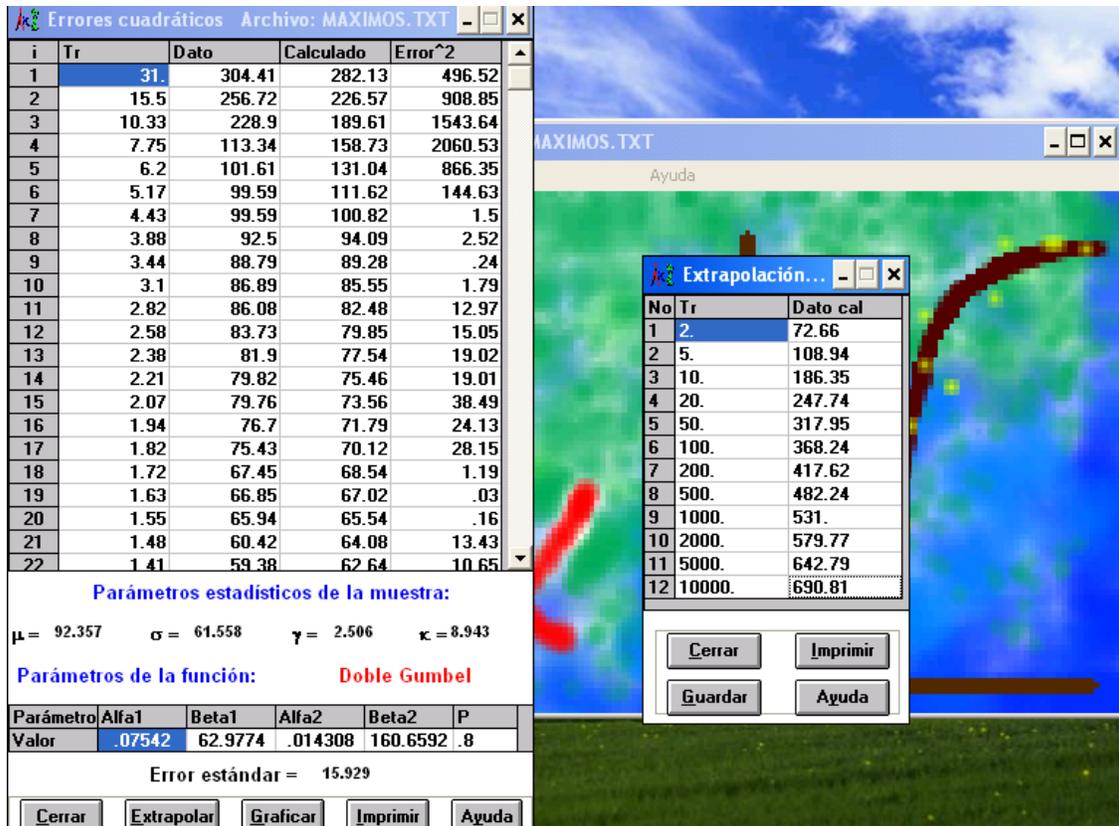


Figura 2. 26 Datos extrapolados en el Programa AX

## 2.8 Modelos lluvia-escurrimiento

Un modelo hidrológico se define como una simplificación de un sistema natural tal como el proceso lluvia-escurrimiento, y sus componentes sobre una cuenca. Los modelos hidrológicos pueden por un lado ser de parámetros concentrados o distribuidos, dependiendo del esquema de discretización espacial utilizado para describir las características de las cuencas, y por el otro de base física o ser conceptuales, dependiendo del grado de analogía matemática empleada en su análisis.

Para entender la relación causal entre lluvia y escurrimiento, se han desarrollado modelos matemáticos que permiten obtener la respuesta de la cuenca (escurrimiento) al estímulo de una entrada al sistema (precipitación). Tales esquemas, conocidos como modelos lluvia-escurrimiento, se utilizan con fines de simulación o bien para hacer pronósticos en tiempo real de las avenidas durante las tormentas, a partir de la información de la precipitación que simultáneamente se está generando en la cuenca.

Por un lado, en este trabajo se obtendrán láminas de precipitación asociadas a diferentes periodos de retorno y por otro, en función del tipo de modelo, se requieren unas ciertas características de la tormenta de diseño; en este caso es necesario distribuir temporalmente las láminas obtenidas con algún método.

## 2.8.1 Modelos de parámetros concentrados

En un modelo hidrológico tradicional se considera que el escurrimiento se produce por la precipitación excedente. A este componente del gasto se le denomina escurrimiento directo o superficial, y a la porción del volumen de precipitación que la produce se le llama precipitación en exceso o efectiva. Mediante una función de transferencia, tal volumen se convierte en escurrimiento directo y, tras sumarle el gasto base, se obtiene el hidrograma de escurrimiento total. Un esquema como el anterior corresponde a los modelos hidrológicos de parámetros concentrados, los cuales utilizan promedios espaciales tanto de las características fisiográficas como de la precipitación en la cuenca.

Los modelos de parámetros concentrados han sido, hasta años recientes, los modelos más comunes para el procesamiento hidrológico en las cuencas debido a la imposibilidad práctica de contar con información espacialmente distribuida de las características de la cuenca y de las tormentas. En este tipo de modelos, las variables y los parámetros representan valores promedios de cada una de las propiedades de la cuenca (área, pendiente, tipos de suelo, cobertura, etc.) sin considerar la topología de la cuenca y su red de corrientes. Un modelo de parámetros concentrados representa a la cuenca como una unidad caracterizada por un número reducido de variables y parámetros, cuyos promedios pueden determinarse empírica o físicamente (Maidment, 1988). Estos modelos se emplean generalmente en la descripción y análisis de la relación lluvia-escurrimiento (Chow et al, 1988).

La unidad básica de un modelo de parámetros concentrados es la cuenca, y se considera la respuesta unitaria de ella como un todo, de tal manera que todos sus atributos son promediados. Los modelos de parámetros concentrados, por tanto, no toman en cuenta explícitamente la variabilidad espacial de las entradas, salidas y de las características de la cuenca y están generalmente estructurados para utilizar valores promedio de las características de las cuencas que afectan la estimación del volumen del escurrimiento. Promediar los parámetros implica promediar implícitamente los procesos representados a través de estos parámetros y pueden conducir a errores significativos si se utilizan para pronóstico en tiempo real, aunque permiten una aproximación generalmente aceptable para propósitos de diseño.

## 2.8.2 Modelos de parámetros distribuidos

La modelación hidrológica distribuida, en cambio, considera la variabilidad espacial de las propiedades físicas y de la precipitación, al dividir la cuenca en microcuencas o celdas. Naturalmente, el desarrollo que ha tenido lugar en los campos de teledetección y sistemas de información geográfica ha facilitado el manejo de información espacialmente distribuida.

En la década de 1960 se hizo posible la integración de diferentes componentes del ciclo hidrológico debido a la revolución digital. El primer intento para modelar el ciclo hidrológico entero fue hecho por Crawford and Linsley (1966) mediante el Modelo de Stanford.

Debido a las limitaciones computacionales o a la insuficiencia de los datos, la práctica común, hasta hace algunos años, ha sido la de emplear representaciones agregadas por lo que no se había podido establecer una base de datos para la utilización de los modelos distribuidos.

Si el modelo es distribuido debe subdividir la cuenca en elementos más pequeños. Este fenómeno frecuentemente da lugar a modelos agregados a nivel de subcuencas, los cuales intentan representar las condiciones y variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos de la cuenca. De esta manera, cualquier modelo agregado puede convertirse en un modelo semi-distribuido.

En el modelo distribuido la variación espacial de las características y los procesos están explícitamente considerados, mientras que en los modelos agregados estas variaciones espaciales son promediadas o ignoradas.

Las características del terreno, de su cobertura, del suelo y de los cauces varían a lo largo y a lo ancho de la cuenca. Un modelo distribuido permite considerar los rasgos dominantes en las propiedades de cada una de las unidades areales en que se divide la cuenca; un modelo distribuido también permite el análisis de los distintos elementos que influyen en la respuesta hidrológica y que pueden ser modificados por la intervención humana en la cuenca o en parte de ella. Este es el caso de la modificación de la vegetación y del uso del suelo. Con una calibración adecuada, el modelo distribuido permite obtener una aproximación cuantitativa de la modificación de la respuesta hidrológica de la cuenca, ante eventos de precipitación extrema, a causa de estas intervenciones.

El modelo distribuido puede también obtener simultáneamente los caudales en diferentes puntos de la cuenca. En estos casos, el modelo puede servir para una mejor evaluación del riesgo, pues permite conocer el estado del sistema en cualquier punto de la red de drenaje.

## 3. ZONA DE ESTUDIO

---

### 3.1 Localización

La zona de estudio es la cuenca del río Santa Catarina, localizada en los estados de Nuevo León y Coahuila. Dentro de la cuenca se localiza el AMM.

La cuenca del río Santa Catarina queda comprendida entre las coordenadas geográficas  $100^{\circ} 41' 35''$  y  $99^{\circ} 56' 7''$  de longitud Oeste y entre las coordenadas  $25^{\circ} 19' 10''$  y  $25^{\circ} 45' 16''$  de latitud Norte (figura 3.1). La cuenca tiene un área aproximada de  $1,800.1 \text{ km}^2$ .

Por su parte, el estado de Nuevo León colinda al norte con el estado de Texas, al sur y suroeste con el estado de San Luis Potosí, limita al este con Tamaulipas, y por el oeste Coahuila y Zacatecas (figura 3.1).

A su vez, la cuenca del río Santa Catarina, forma parte de la Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos; su cauce principal es el río Bravo y es la frontera entre los Estados Unidos de América y los Estados Unidos Mexicanos; comprende desde las ciudades del Paso Texas y Ciudad Juárez, Chihuahua, hasta su desembocadura en el golfo de México.

La Región Hidrológica número 24 Bravo-Conchos, está limitada al norte por los Estados Unidos de América, al sur por las Regiones Hidrológicas números 35 Mapimí, 36 Nazas-Aguanaval y 37 El Salado; al este por la Región Hidrológica número 25 San Fernando- Soto la Marina y al oeste las Regiones Hidrológicas números 9 Sonora Sur, 10 Sinaloa y 34 Cuencas Cerradas del Norte.

En la región hidrológica están comprendidas partes de las entidades mexicanas de Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo León y Tamaulipas; tiene una superficie de escurrimiento de 226,275 kilómetros cuadrados (figura 3.2)

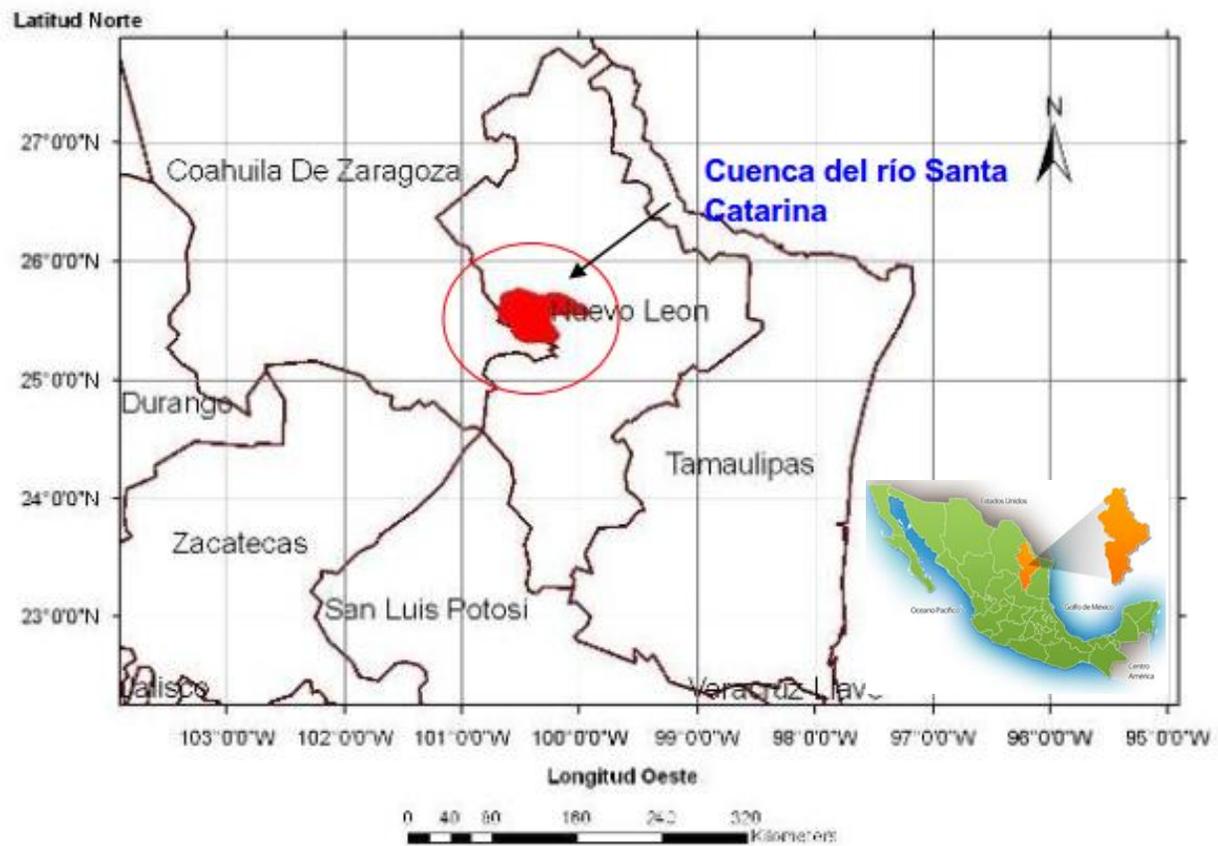


Figura 3. 1 Localización de la cuenca del río Santa Catarina



Figura 3. 2 Localización de la región hidrológica 24 Bravo-Conchos

Dado que la superficie de la cuenca se encuentra en su gran mayoría en el estado de Nuevo León, en los apartados siguientes se hará una descripción general del estado.

## 3.2 Orografía

La superficie de Nuevo León que forma parte de las provincias: Sierra Madre Oriental, Grandes Llanuras de Norteamérica y Llanura Costera del Golfo Norte.

En el AMM, está el cerro de la Silla con 1, 800 metros sobre el nivel del mar (msnm) y hacia el sur hay una serie de sierras conformadas por rocas de origen sedimentario (se forman en las playas, los ríos y océanos y en donde se acumulan la arena y barro) donde se encuentra el cerro El Morro con 3,710 msnm, que es la mayor altitud del estado.

Al norte hay extensos lomeríos, interrumpidos por algunas sierras aisladas, que forman valles entre serranías, localmente se les denomina potreros como San José de la Popa.

Asimismo, hay una gran llanura conocida como población Anáhuac, la altura más baja es de 100 metros y se localiza al este, en el límite con estado de Tamaulipas.

En resumen, se cuenta con la siguiente información orográfica en el estado: Cerro El Morro con 3,710 msnm, cerro El Potosí con 3,700 m, Picacho San Onofre con 3,540 m, Sierra El Viejo

con 3,500 m, Sierra Potrero de Ábrego con 3460 m, Sierra Los Toros con 3,200m, Cerro Grande de la Ascensión con 3,200 m y el Cerro de la Silla con 1,800 m (figura 3.3).

En cuanto a la pendiente o inclinación de la cuenca, en la parte norte y este del estado es plana y forma parte de las Llanuras de Norteamérica. Al sur de esta llanura y hasta la Sierra Madre Oriental, el terreno está más inclinado y forma parte de la Llanura Costera del Golfo Norte. El sur de NL es parte del Altiplano mexicano. En la cabecera municipal, la mayor altura es la del municipio Dr. Arroyo, a 720 msnm, y la más baja es la del municipio Los Aldamas, a 90 msnm. Monterrey se encuentra a 540 msnm.

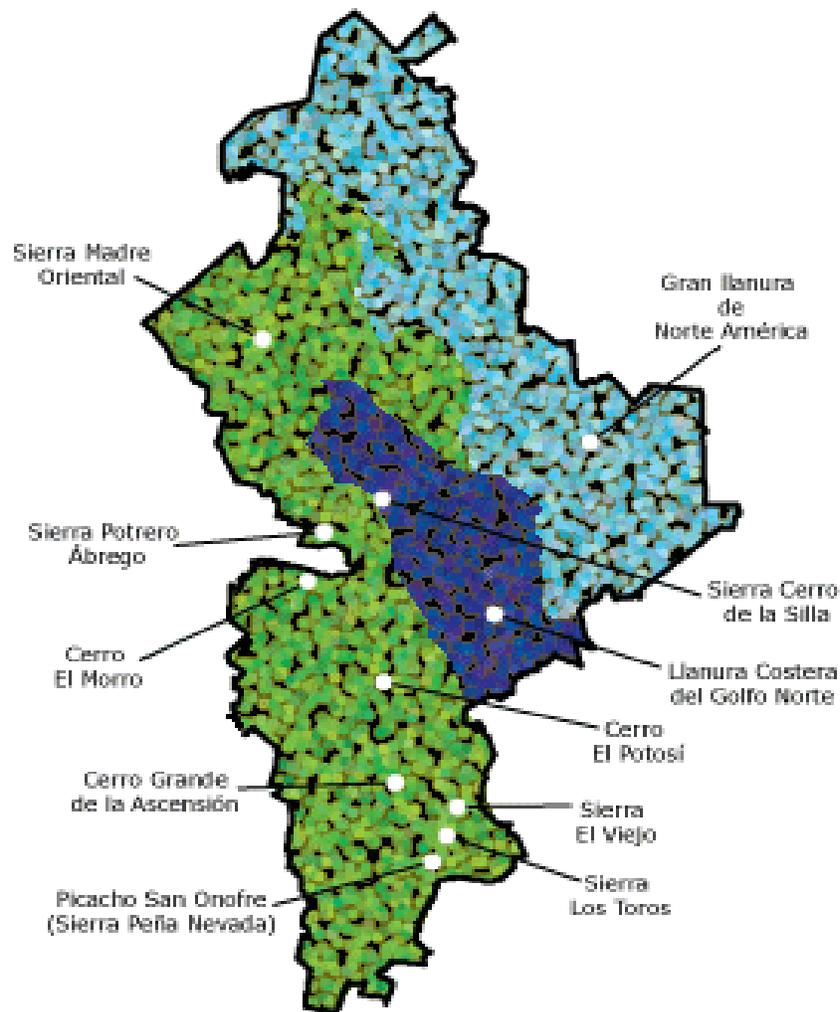


Figura 3. 3 Mapa de orografía del estado de Nuevo León.

### 3.3 Climatología

El 68 % del estado presenta clima seco y semiseco, el 20 % cálido subhúmedo y se encuentra en la región perteneciente a la llanura costera del Golfo norte, el 7 % es templado subhúmedo y se localiza en las partes altas de la sierras y el restante 5 %, presenta clima muy seco hacia la Sierra Madre Occidental.

La temperatura media anual es alrededor de 20°C, la temperatura máxima promedio es de 32°C y se presenta en los meses de mayo a agosto, la temperatura mínima promedio es de 5°C y se presenta en el mes de enero.

La precipitación media estatal es de 650 mm anuales, las lluvias se presentan en verano, entre los meses de agosto y septiembre.

El clima seco y semiseco que predomina en el estado, es una limitante para la agricultura, sin embargo se cultiva maíz, sorgo, trigo, frijol avena y cebada principalmente con riego.

### 3.4 Población

Al año 2010, en promedio, en el estado de Nuevo León vivían 73 personas/km<sup>2</sup>. Actualmente, Nuevo León cuenta con una población de 4, 653, 458 habitantes, de los cuales, 2, 333, 273 (50.14 %) son mujeres y 2, 320, 185 (49.86 %) son hombres; ocupa el lugar número 8 a nivel nacional por su número de habitantes.

La figura 3.4 nos muestra la distribución del estado de Nuevo León por edad y por sexo.



Figura 3. 4 Gráfica poblacional del estado de Nuevo León. Fuente: INEGI

El 95% de la población es urbana y el 5% restante es rural.

## 3.5 Flora y fauna

### 3.5.1 Flora

Nuevo León se localiza en una región predominantemente semiárida, presenta condiciones geográficas que le permiten una vegetación diversa. Los matorrales ocupan más de la mitad de la superficie del estado, mientras que los bosques de coníferas y encinos se encuentran en las zonas altas. La agricultura ocupa 28% de la superficie del estado.

### 3.5.2 Fauna

En la zona de matorral habitan: zorra gris, rata canguro, murciélago, cuervo, pájaro carpintero, zopilote, águila real, víbora de cascabel, tortuga del desierto y falso camaleón, mientras que en la zona de bosque se encuentran: gato montés, oso negro, musaraña, zorrillo, cacomixtle, ardilla, venado cola blanca, topo, ratón de campo y lechuza de campanario.

## 3.6 Distribución espacial de la precipitación

La distribución espacial de la precipitación está íntimamente ligada con la orografía, así como con la distribución de los rasgos más prominentes de la circulación atmosférica. Las montañas actúan como barreras que impiden la penetración de toda la humedad acarreada por los vientos de las capas bajas de la atmósfera al interior del país, al mismo tiempo que hacen aumentar la cantidad de lluvia en sus vertientes expuestas a vientos húmedos, así como en sus partes más elevadas del interior, por ascenso y enfriamiento adiabático del aire.

La gran altitud media de los rasgos prominentes del relieve alcanza a niveles superiores de la atmósfera en donde las condiciones de humedad y de circulación son distintas que a niveles bajos.

La distribución espacial y temporal de las precipitaciones a escala regional es necesaria para una variedad de usos científicos y aplicaciones sociales tales como estudios y diagnósticos climáticos, gestión del agua para la agricultura y la energía, mitigación de sequía, control de inundaciones y estudios hidrológicos. Para conocer la distribución espacial y temporal de la lluvia, es necesario el monitoreo hidrológico. En este sentido existen redes pluviométricas que son las más comunes en los países en desarrollo.

Existen otras alternativas, como el uso de radares y satélites, pero su empleo aún se encuentra en desarrollo. Sin embargo, la literatura técnica indica que las redes pluviométricas tienen menor sesgo, por lo que prevalecerá sobre cualquier estimación satelital en aquellas regiones con una densa red pluviométrica, mientras que en las áreas sin datos o los grandes cuerpos de agua, las estimaciones satelitales van a tener un peso mayor en el producto final.

En este trabajo, nos enfocaremos en la distribución espacial de la lluvia. Para mostrar la importancia de la distribución espacial de la lluvia, en la figura 3.5 se muestra el evento de lluvia (típico) del 02 de marzo del 2001 y en la figura 3.6 el evento de lluvia del día 30 de junio del 2010, provocado por el huracán.

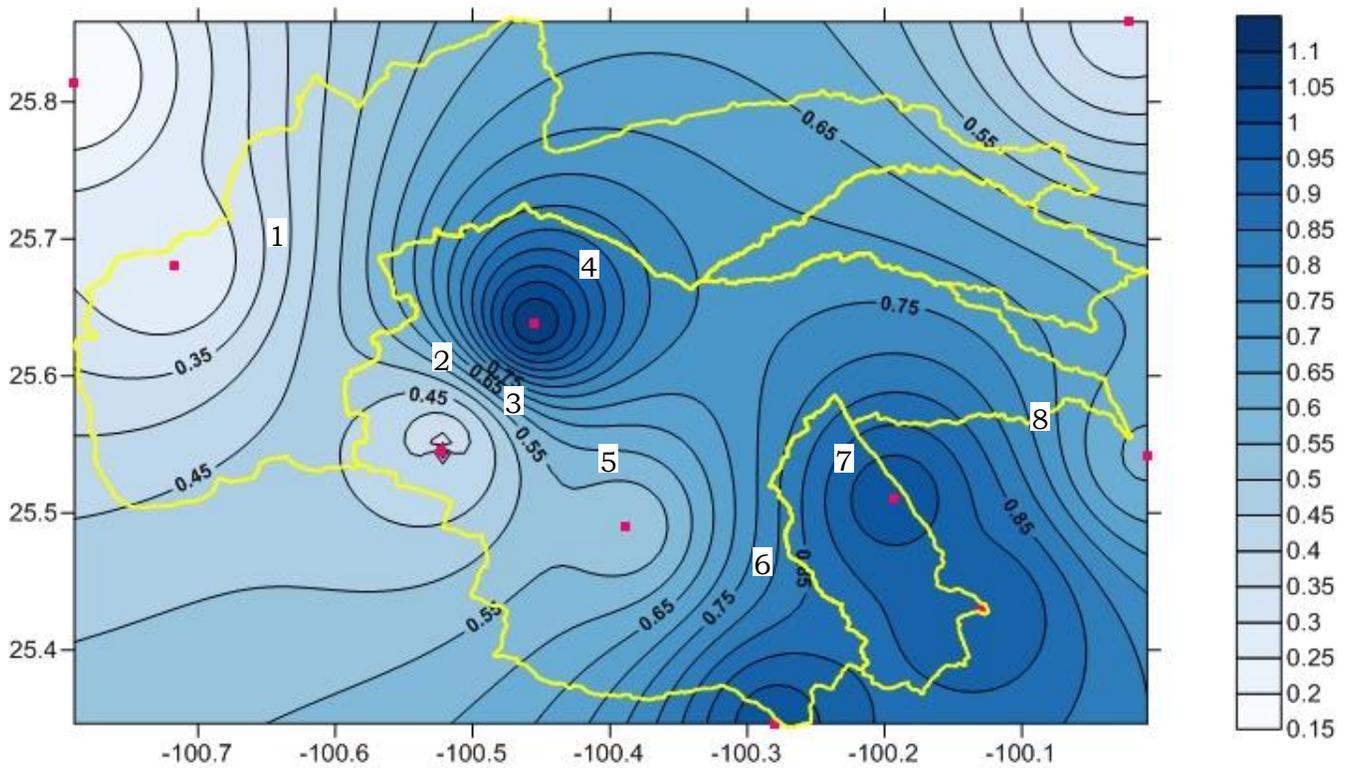


Figura 3. 5 Distribución espacial de la lluvia sin huracán

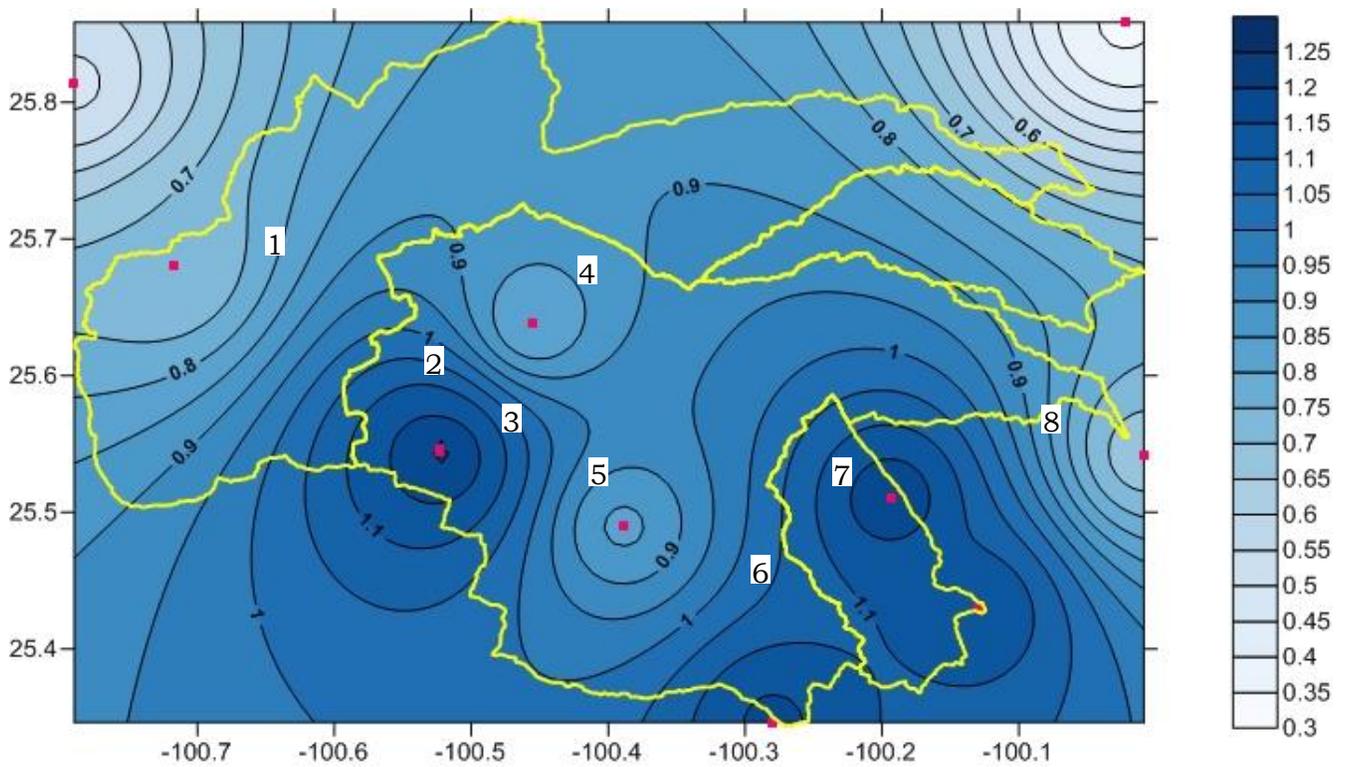


Figura 3. 6 Distribución espacial de la lluvia con huracán

Las estaciones climatológicas utilizadas son: 1 Rinconada, 2 La Cruz, 3 Agua Blanca, 4 La Huastequita, 5 El Pajonal, 6 Laguna de Sánchez, 7 El Cerrito y 8 San Bartolo.

De las figuras anteriores se pueden observar las diferencias en la variabilidad espacial de la lluvia con la ocurrencia (2001) y no ocurrencia (2010) de huracán en la cuenca en estudio. Esto es, en el primer caso la precipitación se concentra en la estación climatológica, mientras que en el segundo caso, la distribución es más uniforme.

### 3.7 Fenómenos meteorológicos históricos

Para un análisis más efectivo, resulta importante conocer los problemas recurrentes con los que cuenta la zona de estudio; por ello podemos comenzar con los problemas relacionados con la lluvia, como las inundaciones que se han presentado históricamente y que se presentan actualmente en el AMM.

Las fuertes lluvias que eventualmente se registran en esta región de Nuevo León, provocan inundaciones principalmente en pasos a desnivel y algunas avenidas de la ciudad.

Los cursos de agua que atraviesan la ciudad son también puntos críticos y zonas generadoras de potenciales problemas de desalojo de las aguas producto de las lluvias y los escurrimientos de sus cuencas de aportación.

Así, en las cercanías y ribera del río Santa Catarina y los arroyos Topo Chico y La Cieneguita, se presentan en forma continua problemas de inundaciones. Las avenidas Morones Prieto, Garza Sada, Constitución y Revolución, entre otras de las principales vías de circulación, son también ocasionalmente afectadas.

Tanto los eventos producto de la propia temporada de lluvias, como los asociados con eventos ciclónicos tienen potencial daño para el AMM. Como hechos históricos podemos encontrar las inundaciones registradas en los años de 1612, 1636, 1642, 1644, 1648, 1716, 1752, 1782, 1810, 1833, 1881, 1938. Más sin embargo, la gran inundación de 1909 es la que ha quedado registrada como el más grande desastre, ocurrido hasta la fecha. Con respecto a ese evento, se habla de entre cuatro y seis mil víctimas fatales y más de 200 hectáreas de cultivos impactadas (Lozano et al, 2011).

En cuanto a daños generados por ciclones tropicales (huracanes), además del denominado Huracán Seis en 1909, se pueden contar también los desastres generados por Beulah en 1967, Gilberto, un huracán que llegó a categoría 5, en 1988 (con más de 200 personas muertas) y Emily en 2005. Estos eventos son aún recordados y sin duda establecen un referente sobre los umbrales máximos de precipitación y escurrimiento que se pueden esperar en la región. Sin embargo, los eventos extraordinarios de precipitación generados recientemente con el huracán Alex, provocaron eventos de escurrimiento importantes desde el 30 de junio hasta el 7 de julio, los cuales generaron daños a vialidades, puentes y alcantarillas y viviendas. De acuerdo con información del Observatorio de Inundaciones de Dartmouth (RE2), se reportaron seis muertes y cerca de 8,000 damnificados. El evento fue producido por la entrada del mencionado meteoro y cubrió más de 200,000 km<sup>2</sup> en su totalidad.

En cuanto a precipitación acumulada se refiere, Alex generó mayores volúmenes que el propio Gilberto. En la estación Estanzuela se reportaron 890 mm mientras que la lluvia media en todo el estado fue de 242 mm. El huracán Alex generó una lluvia máxima diaria de 446.5 mm, un valor muy parecido al generado por Gilberto en 1988.

Como parte de las estrategias de control de los escurrimientos en el río Santa Catarina, el Gobierno del Estado construyó, en el sitio conocido como Corral de Palmas, una presa de control de avenidas conocida como “rompepicos”, misma que ha podido reducir la magnitud de los escurrimientos máximos sobre el río Santa Catarina.

### 3.7.1 Huracán Gilberto (1988)

Gilberto se formó el 8 de septiembre de 1988 como la depresión tropical #12 de la temporada, cerca de las Islas de Barlovento. Al continuar su desplazamiento sobre las aguas cálidas de 27

°C del Caribe, la depresión se intensificó a tormenta tropical el 9 de septiembre, y recibió su nombre. Este patrón de intensificación continuó hasta transformar al sistema en un huracán intenso (mayor a la categoría 3 en la escala de Saffir-Simpson) el 10 de septiembre, coincidiendo con el pico climatológico de actividad de las temporadas de huracanes del océano Atlántico, contaba con vientos de 240 km/h, que hacían en ese momento a Gilbert un huracán categoría cuatro.

Al alejarse de la costa de Jamaica, Gilbert comenzó de nuevo a intensificarse rápidamente. El huracán acababa de alcanzar la categoría cinco (máxima) al momento de pasar sobre Gran Caimán. La intensificación de Gilbert continuó hasta alcanzar sus vientos máximos de 296 km/h. Esto lo colocó como el tercer huracán con vientos más intensos desde que se tiene registro.

Gilberto tocó tierra por segunda ocasión el 14 de septiembre en la península de Yucatán, en México, como un huracán de categoría cinco (figura 3.9); provocó inundaciones devastadoras en el noreste de México (particularmente en Monterrey donde se desbordó el río Santa Catarina); provocó un total 318 muertes: 202 en México, 45 en Jamaica, 30 en Haití, 12 en Guatemala, 5 en Venezuela y la República Dominicana, 3 en Estados Unidos y 2 en Costa Rica y Nicaragua.



Figura 3. 7 Trayectoria del huracán Gilberto (1988)

### 3.7.2 Huracán Emily (2005)

La Depresión Tropical cinco se formó en el océano Atlántico la tarde del 10 de julio. En la tarde del 11 de julio, se reforzó y fue llamada Tormenta Tropical Emily. Al principio estaba previsto que se reforzaría rápidamente y se movió hacia el noroeste por las Antillas Mayores; Emily cambió su trayectoria hacia el oeste aproximadamente hacia las islas de Barlovento, restando una tormenta tropical moderada. La tormenta languideció moviéndose rápidamente hacia el oeste, y luchó con el mantenimiento de su forma.

Por la tarde del 13 de julio, Emily se reforzó rápidamente y alcanzó la fuerza de huracán pasando por Trinidad y Tobago y entrando en el mar Caribe del este. El día 14 de julio Emily tocó tierra al norte de Granada; los vientos de Emily aumentaron brevemente, ascendiendo a la Categoría 4 a principios del 15 de julio. Durante el día, la fuerza de la tormenta fluctuó enormemente, debilitándose a la Categoría 2 y luego reforzándose a la categoría 4. El 16 de julio, Emily se reforzó bastante, convirtiéndolo en el primer huracán categoría 5 el mes de julio en el océano Atlántico, con vientos máximos sostenidos de 260 km/h.

La tormenta ligeramente debilitada siguió hacia el oeste, y se debilitó a un huracán Categoría 4, pasando por el sur de Jamaica y, el 17 de julio, por las Islas Caimán. El huracán Emily siguió su pista casi directa al noroeste, debilitándose un poco, pero permaneciendo en la categoría 4 hasta que golpeó Cozumel a las 2 h 30 min (hora del verano del este) el 18 de julio. Los vientos sostenidos eran de 215 km/h, y el ojo pasó directamente sobre Cozumel.

La segunda vez que tocó tierra Emily como un fuerte huracán categoría 3 trajo daño significativo a la costa de noreste de México. En la comunidad de pesca de Laguna Madre, más del 80 % de los edificios fueron destruidos como consecuencia del fuerte oleaje que ocasionó la tormenta. También se dieron inundaciones internas en Monterrey (figura3.8).



Figura 3. 8 Trayectoria del huracán Emily (2005)

### 3.7.3 Huracán Alex (2010)

El huracán Alex fue el primer ciclón tropical de la temporada de huracanes en el Atlántico de 2010. Formado a partir de una intensa onda tropical, se desarrolló lentamente en el mar Caribe y se desplazó hacia el Oeste mientras se organizaba e intensificaba hasta tocar tierra al norte de la Ciudad de Belice. Su tránsito sobre tierra en la península de Yucatán lo debilitó, pero volvió a ganar intensidad de tormenta tropical al reingresar al mar en el golfo de México.

Alex era un sistema de grandes dimensiones, con un diámetro de fuerte convección de más de 700 km al momento de tocar tierra en la noche del 26 de junio en la costa central de Belice, a escasos kilómetros al norte de ciudad de Belice. Su tránsito sobre tierra provocó que Alex fuera degradado a depresión tropical en las primeras horas del 27 de junio. Esa misma tarde, el centro de circulación de Alex volvió a situarse sobre el mar al salir al golfo de México; mantuvo su gran diámetro de convección intensa, y unas horas después de ser ascendido a la categoría de huracán, presentaba un impresionante diámetro de unos 900 km y se confirmaba que el centro de Alex tocaba tierra como huracán de categoría 2 en el municipio de Soto la Marina, Tamaulipas, con vientos de 165 km/h y una presión atmosférica mínima de 947 hPa (figura 3.9).

El huracán Alex representa uno de los más potentes ciclones tropicales que ha impactado a México de los últimos 40 años. Además de amplias inundaciones, Alex provocó daños considerables y la pérdida de vidas humanas en los estados del Noreste de México.



Figura 3. 9 Trayectoria del huracán Alex (2010)

### 3.8 Topografía

Para determinar algunas características fisiográficas de la cuenca, se recopiló información topográfica consistente en:

- Modelos Digitales de Terreno tipo LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) con resolución espacial de 5x5 m.
- Modelos Digitales de Terreno tipo LIDAR con resolución espacial de 1x1 m (figura 3.10).

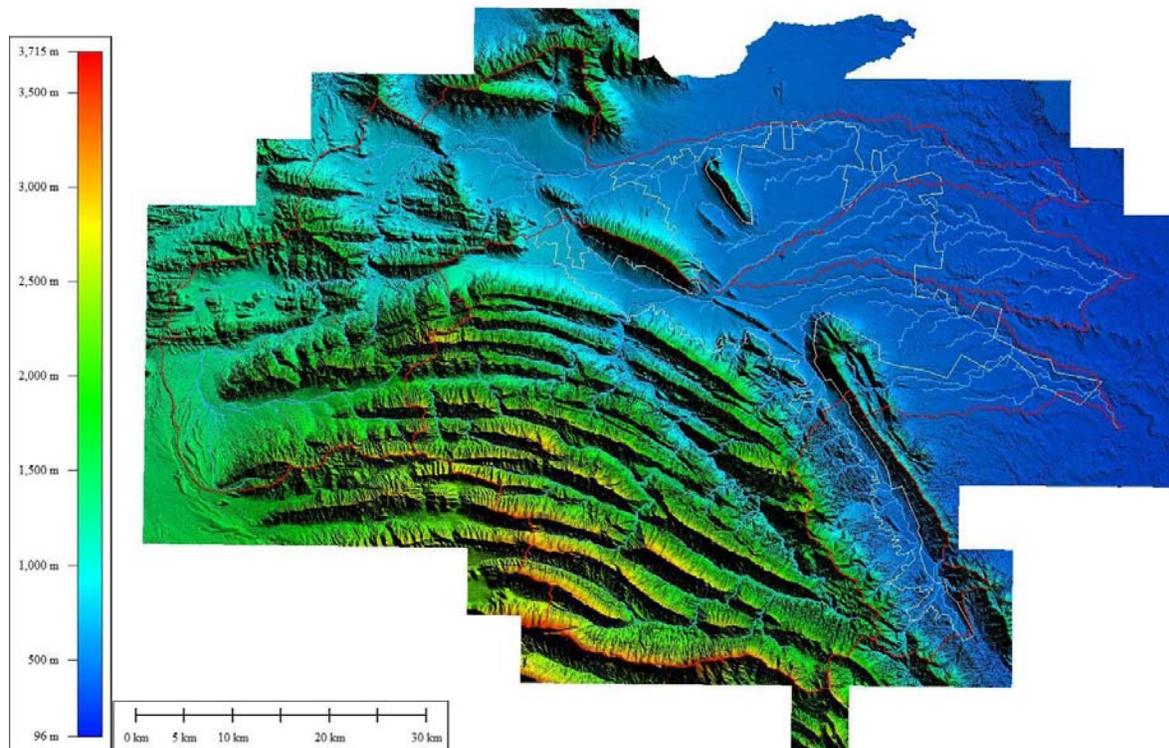


Figura 3. 10 Modelo digital de terreno (LIDAR) con resolución espacial de 1x1 m y 5x5 m

Con esta información y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), primero se definió un punto de salida, a partir del cual se determinó el parteaguas de la cuenca, posteriormente, también se pudo definir red de drenaje de la misma (figura 3.10).

### 3.9 Hidrografía

La mayoría de los ríos que atraviesan Nuevo León, no tiene corriente permanente, excepto en las partes medias y bajas, y ninguno es navegable. Casi todos nacen en la Sierra Madre Oriental y desembocan en el río Bravo o en los ríos San Fernando y Soto la Marina en Tamaulipas.

El río Santa Catarina, nace en la sierra de San José en el municipio de Santiago a 2,369 m.s.n.m., se precipita por el cañón del mismo nombre, pasando por la ciudad, atraviesa los municipios de Santa Catarina, Garza García, Monterrey y Guadalupe, para internarse en el de Juárez y Cadereyta de Jiménez; se le unen por la margen derecha el cañón Ballesteros, Arroyo El Capitán, el río La Silla, el Arroyo los Naranjos-Sabinas y el Arroyo Los Álamos por la margen izquierda el cañón San pablo y el Arroyo del Obispo, para desembocar finalmente en el río San Juan. Su pendiente general es de 24 m/km y en el tramo de la zona urbana es de 8 m/km, lo cual hace que sus escurrimientos sean con velocidades altas (figura 3.11).



Figura 3. 11 Hidrología superficial, escala 1:50,000. Fuente INEGI

### 3.10 Información climatológica

Para recopilar la información climatológica de la zona de estudio, fue necesario identificar las estaciones climatológicas que se encuentran dentro o próximas al parteaguas de la cuenca. Después, con base en los años de registro de cada estación se determinaron las más adecuadas, tomando en cuenta aquellas que cumplieran con mínimo 30 años continuos de información.

Así, en la figura 3.12 y en la tabla 3.1 se presentan las estaciones que se utilizarán en este trabajo. El área de influencia de cada una de ellas se determinó con el método de los polígonos de Thiessen.

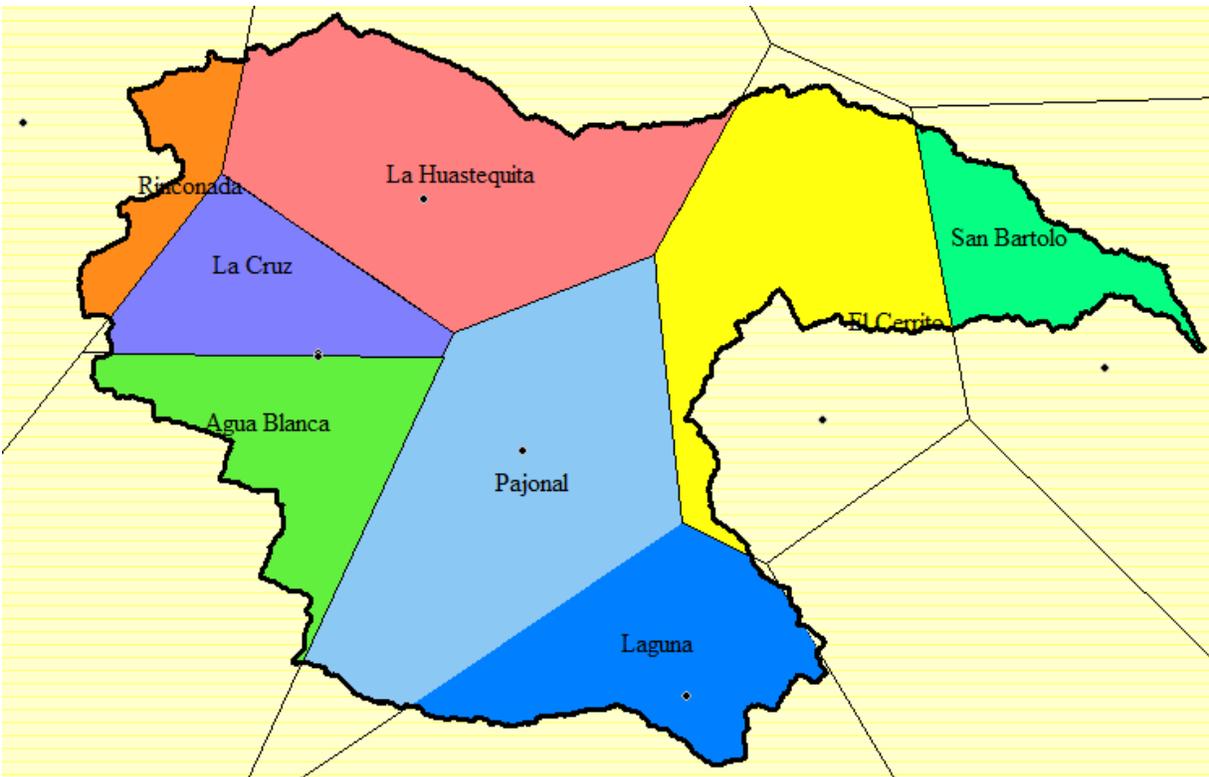


Figura 3. 12 Estaciones climatológicas y su área de influencia en la cuenca

Tabla 3. 1 Área de Influencia de las estaciones climatológicas y área total de la cuenca

Estaciones	Área de influencia (Km <sup>2</sup> )
Rinconada	70.02
Laguna de Sánchez	213.20
El Pajonal	412.40
La Cruz	154.31
Agua Blanca	180.99
El Cerrito	272.52
La Huastequita	384.55
San Bartolo	112.96
<b>Área total (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>1,800.95</b>

En la tabla 3.2 se presentan la clave, el nombre, el periodo y años disponibles de precipitación diaria, la ubicación y elevación de las estaciones climatológicas utilizadas.

Tabla 3. 2 Principales características de las estaciones climatológicas

Clave	Nombre	Fecha		Años		Coordenadas Geográficas		Elevación (m)
		Inicio	Fin	Totales	Efectivos	Longitud (°)	Latitud (°)	
<b>19054</b>	RINCONADA	01/06/1944	31/12/2011	67.0	61.1	-100.717500	25.681111	1000.0
<b>19033</b>	LAGUNA DE SÁNCHEZ	01/04/1947	31/12/2011	64.0	58.5	-100.280000	25.346111	1879.0
<b>19018</b>	EL PAJONAL	01/06/1954	31/12/2011	57.0	53.9	-100.388889	25.489722	2576.0
<b>19031</b>	LA CRUZ	01/06/1954	31/10/2011	57.0	51.4	-100.523056	25.546389	2224.0
<b>19002</b>	AGUA BLANCA	01/05/1957	31/12/2011	54.0	38.5	-100.523056	25.544167	2193.0
<b>19015</b>	EL CERRITO	01/07/1957	31/12/2011	54.0	42.9	-100.193333	25.510000	510.0
<b>19096</b>	LA HUASTEQUITA	01/11/1975	31/12/2011	36.0	33.6	-100.455000	25.638611	720.0
<b>19174</b>	SAN BARTOLO	01/04/1982	31/12/2011	29.0	22.4	-100.008611	25.542222	326.0

## 4. METODOLOGÍA EMPLEADA

---

Los métodos que se describen a continuación, son los que actualmente se utilizan para definir láminas de lluvia empleando procedimientos estadísticos; con cualquiera de ellos es posible obtener la precipitación media asociada a cualquier periodo de retorno, sólo que cada uno utilizando diferentes hipótesis.

La aplicación de cualquiera de las metodologías, implica realizar las siguientes acciones a la información recopilada de la precipitación diaria:

- a) Revisar la calidad y cantidad de la información.
- b) Determinar la muestra de lluvia máxima anual acumulada en 24 horas.
- c) Aplicar pruebas de calidad.

De esta manera, para la zona de estudio debemos mencionar que las muestras recopiladas son homogéneas e independientes; por lo tanto, se puede continuar con el análisis estadístico correspondiente.

### 4.1 Método tradicional

Con este método se supone que la precipitación máxima anual ocurre simultáneamente en toda la cuenca. El procedimiento para determinar la precipitación asociada a un periodo de retorno se describe a continuación:

- a) Se selecciona el periodo de retorno para el diseño.
- b) Para cada una de las estaciones seleccionadas, se obtiene la muestra de precipitación máxima anual en 24 h.

- c) Se aplican las pruebas de calidad a la muestra de precipitación
- d) Se ajustan distintas funciones de distribución de probabilidad a la muestra.
- e) Se selecciona la función de distribución de probabilidad con error estándar de ajuste mínimo.
- f) Con la función de distribución de probabilidad seleccionada en el paso e, se calcula para cada estación, la precipitación correspondiente al periodo de retorno seleccionado en el paso a ( $PMA_{a1}$ ).
- g) Si es el caso, se calcula la precipitación media en la cuenca ( $PMAM_{a1}$ ).

Por lo tanto, en la tabla 4.1, se presentan los valores de la precipitación máxima anual para cada una de las estaciones con influencia en la zona de estudio. Cabe mencionar que algunos de los valores de la tabla, fueron completados mediante promedios y ecuaciones de correlación.

Tabla 4. 1 Precipitación máxima anual, en mm

Año	19054	19033	19018	19031	19002	19015	19096	19174
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El Pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
1982	38.00	82.47	69.00	40.00	22.78	77.88	35.00	36.30
1983	40.00	72.00	80.00	60.00	44.00	116.00	98.00	87.00
1984	37.83	85.00	68.00	40.32	68.00	99.50	56.00	39.00
1985	56.00	30.00	54.00	40.00	40.00	95.00	27.00	48.10
1986	38.28	57.00	42.00	43.00	43.00	228.00	60.00	105.00
1987	61.00	40.00	83.00	59.00	43.00	83.00	60.00	105.00
1988	287.00	345.00	326.00	188.00	48.50	330.50	135.50	37.00
1989	21.00	60.00	56.50	54.80	31.50	92.00	62.00	51.50
1990	20.00	47.00	74.00	46.00	33.50	82.50	63.00	62.00
1991	26.00	40.00	36.00	45.20	44.00	84.00	54.50	118.00
1992	29.00	50.00	30.00	45.30	42.50	59.50	38.00	49.00
1993	46.00	40.50	47.00	70.00	55.00	108.00	42.00	65.50
1994	15.00	32.00	80.00	80.00	46.50	91.00	35.00	66.50
1995	9.00	48.00	48.00	102.00	42.00	143.00	143.00	62.50
1996	23.00	98.00	32.00	104.00	28.37	97.00	109.00	94.00
1997	31.00	50.00	48.80	80.00	32.00	79.80	82.00	127.30
1998	79.00	60.00	78.00	60.00	83.00	192.00	92.00	149.40
1999	64.00	70.00	59.50	51.00	70.00	91.48	125.00	257.70
2000	35.00	79.24	21.00	40.00	65.00	170.00	125.00	92.50
2001	24.00	151.00	83.00	25.00	68.00	118.00	205.00	78.50
2002	67.00	145.00	102.00	65.00	135.00	114.00	76.00	93.50
2003	100.00	48.00	95.00	60.00	160.00	93.68	114.00	136.00
2004	43.00	66.30	32.00	42.00	30.00	93.68	75.00	45.50
2005	173.00	286.50	293.00	115.00	250.00	330.00	236.00	218.00
2006	52.00	65.00	60.00	60.00	126.00	65.00	69.00	223.00
2007	40.00	93.00	27.00	60.00	30.00	58.00	43.00	186.00
2008	33.00	92.00	66.00	60.00	69.00	90.00	87.00	82.00
2009	24.00	57.00	41.00	40.00	42.00	57.00	24.00	52.00
2010	231.00	310.00	260.00	350.00	400.00	315.00	315.00	224.50
2011	23.00	95.00	63.00	91.00	65.00	136.00	110.00	61.00

Así, ajustando las diferentes funciones de distribución de probabilidad del programa AX, con el procedimiento descrito en el apartado 2.7, en la tabla 4.2 se muestran las funciones de distribución de probabilidad que presentaron un mejor ajuste para cada una de las muestras de las estaciones climatológicas.

Tabla 4. 2 Funciones de distribución de probabilidad con error estándar de ajuste mínimo

Estaciones climatológicas	Función de distribución de probabilidad
Rinconada	Doble Gumbel
Laguna de Sánchez	Doble Gumbel
El Pajonal	Doble Gumbel
La Cruz	Doble Gumbel
Agua Blanca	Doble Gumbel
El Cerrito	Doble Gumbel
La Huastequita	Doble Gumbel
San Bartolo	Doble Gumbel

Como podemos ver, la función de distribución de probabilidad con menor error estándar de ajuste fue la “Doble Gumbel”, esto se debe a que las muestras de las estaciones climatológicas, son muestras consideradas como de dos poblaciones, es decir, la información recopilada tiene la característica de contar con dos tipos de datos, ya que en la zona de estudio se presentan dos tipos de lluvias: las normales o cotidianas y las ocasionadas por ciclones tropicales.

Con respecto a lo mencionado en el inciso a, se utilizaron los periodos de retorno de 2 a 10,000 años, valores que el programa AX proporciona por defecto; los valores estimados se observan en la tabla 4.3.

Además, en la última columna de la misma tabla, se presenta la suma de la precipitación máxima anual asociada a los distintos periodos de retorno ( $SPMA_{a1}$ ) de todas las estaciones, esto es, el total de la precipitación sobre la cuenca.

Tabla 4. 3 Precipitación máxima anual ( $PMA_{a1}$ ) asociada a diferentes periodos de retorno, con el método tradicional, en mm

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo	$SPMA_{a1}$
10,000	653.43	757.79	811.34	748.41	845.29	634.54	608.54	361.91	5,421.25
5,000	603.80	707.85	752.99	693.65	780.01	597.55	571.52	348.49	5,055.86
2,000	542.50	640.74	675.49	617.69	699.38	551.85	517.84	330.10	4,575.59
1,000	495.42	590.41	616.24	560.73	636.98	517.04	478.04	316.25	4,211.11
500	447.99	539.88	557.43	503.32	574.58	481.95	437.93	302.30	3,845.38
200	385.04	472.77	478.80	427.26	491.78	435.30	384.94	283.88	3,359.77
100	336.96	421.42	418.74	369.08	428.54	399.74	344.41	269.80	2,988.69
50	287.97	369.11	357.52	309.74	364.08	363.46	303.12	255.47	2,610.47
20	219.55	296.10	272.09	226.94	274.11	312.83	245.72	235.51	2,082.85
10	159.67	232.21	197.32	154.56	195.34	268.57	196.70	218.14	1,622.51
5	74.46	123.98	99.65	83.32	86.74	186.27	135.72	185.59	975.73
2	37.82	65.12	57.46	55.44	49.39	99.50	74.64	82.24	521.61

Finalmente, la precipitación media para la cuenca por el método de los polígonos de Thiessen y promedio aritmético, para cada periodo de retorno se presenta en la tabla 4.4.

**Tabla 4. 4 Precipitación máxima anual media (PMAM<sub>a1</sub>) de la cuenca con el método tradicional, asociada a diferentes periodos de retorno**

Periodo de retorno	PMAM <sub>a1</sub> (mm)	
	Aritmético	Thiessen
10,000	677.66	698.64
5,000	631.98	651.84
2,000	571.95	589.62
1,000	526.39	542.48
500	480.67	495.24
200	419.97	432.48
100	373.59	384.52
50	326.31	335.64
20	260.36	267.46
10	202.81	208.08
5	121.97	125.05
2	65.20	68.20

Los valores mostrados tanto en la tabla 4.3 como en la 4.4, serán la referencia para los otros métodos que se presentarán en este capítulo, a sabiendas, que estos son los valores máximos que se pueden presentar.

## 4.2 Factor de reducción por área

Con este método se supone que las precipitaciones máximas anuales no ocurren de forma simultánea en toda la cuenca, lo que se busca es tomar en cuenta estas precipitaciones máximas anuales mediante la precipitación media diaria en la cuenca.

La relación entre los resultados obtenidos bajo la hipótesis de precipitaciones máximas simultáneas y los que se obtienen con la suposición anterior, permite obtener factores de reducción por área (FRA). El procedimiento se describe a continuación:

- a) Se selecciona el periodo de retorno para el diseño.
- b) Se calcula la precipitación media diaria de la cuenca.
- c) Se determina la precipitación media máxima anual (PMMA).

- d) A la muestra obtenida en el inciso c, se le ajustan distintas funciones de distribución de probabilidad.
- e) Se selecciona la función de distribución de probabilidad con el mínimo error estándar de ajuste.
- f) Se estima la precipitación media máxima anual asociada a los diferentes periodos de retorno ( $PMMA_{a2}$ ).
- g) Se obtienen los factores de reducción por área para cada periodo de retorno, como:  $FRA = PMMA_{a2} / PMAM_{a1}$ .
- h) La precipitación máxima anual de cada estación se ajusta con los factores de reducción por área.
- i) Si es el caso, se determina la precipitación media de la cuenca.

La aplicación de este método en la zona de estudio, parte de la recopilación de la precipitación diaria en cada una de las estaciones climatológicas, con lo cual, se determinó la precipitación media diaria con el método aritmético y el método de los polígonos de Thiessen, y posteriormente la precipitación media máxima anual (PMMA). La serie resultante se muestra en la tabla 4.5.

Tabla 4. 5 Precipitación media máxima anual, en mm

Año	PMMA (mm)	
	Aritmético	Thiessen
1982	13.63	19.23
1983	38.56	28.39
1984	24.03	19.95
1985	19.69	24.05
1986	56.38	66.06
1987	32.66	41.98
1988	187.56	212.87
1989	35.31	38.69
1990	32.44	38.14
1991	38.74	37.40
1992	22.31	23.20
1993	35.38	38.67
1994	29.69	33.95
1995	54.13	70.51
1996	45.53	48.22
1997	34.00	37.94
1998	80.46	79.71
1999	55.15	38.94
2000	59.25	65.50
2001	89.56	110.27
2002	84.80	82.48
2003	48.23	55.81
2004	17.08	22.20
2005	199.56	235.13
2006	35.38	40.80
2007	36.17	39.27
2008	47.88	46.84
2009	27.88	27.70
2010	276.75	268.55
2011	62.75	69.15

El ajuste de las diferentes funciones de distribución de probabilidad con el programa AX a la serie de la tabla 4.5, dio como resultado que la función de distribución de probabilidad con el mínimo error estándar de ajuste fue la doble Gumbel. Los valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno con el empleo de esta función de distribución de probabilidad, se muestran en la tabla 4.6.

Tabla 4. 6 Precipitación media máxima anual asociada a distintos periodos de retorno con el método de los FRA

Periodo de retorno	PMMA <sub>a2</sub> (mm)	
	Aritmético	Thiessen
10,000	612.28	623.59
5,000	568.92	582.89
2,000	509.30	524.55
1,000	465.94	480.46
500	421.91	436.37
200	363.47	377.86
100	318.89	333.22
50	273.39	287.69
20	209.91	224.16
10	154.37	168.57
5	77.93	86.45
2	41.34	44.38

Continuando con el procedimiento descrito, los factores de reducción por área se obtienen dividiendo los valores de la tabla 4.6 entre los valores de la tabla 4. El resultado se presenta en la tabla 4.7.

Tabla 4. 7 Factores de reducción por área

Periodo de retorno	PMAM <sub>a1</sub> (mm)		PMMA <sub>a2</sub> (mm)		FRA	
	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen
10,000	677.66	698.64	612.28	623.59	0.90	0.89
5,000	631.98	651.84	568.92	582.89	0.90	0.89
2,000	571.95	589.62	509.30	524.55	0.89	0.89
1,000	526.39	542.48	465.94	480.46	0.89	0.89
500	480.67	495.24	421.91	436.37	0.88	0.88
200	419.97	432.48	363.47	377.86	0.87	0.87
100	373.59	384.52	318.89	333.22	0.85	0.87
50	326.31	335.64	273.39	287.69	0.84	0.86
20	260.36	267.46	209.91	224.16	0.81	0.84
10	202.81	208.08	154.37	168.57	0.76	0.81
5	121.97	125.05	77.93	86.45	0.64	0.69
2	65.20	68.20	41.34	44.38	0.63	0.65

Diferentes autores han indicado que los factores de reducción por área son independientes de los periodos de retorno. En este caso, se observa un comportamiento similar salvo en los periodos de retorno de 2-10 años.

Finalmente, la precipitación máxima anual asociada a distintos periodos de retorno con el método de los factores de reducción por área, se obtiene multiplicando dichos factores por la precipitación máxima anual presentada en la tabla 4.3, el resultado se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4. 8 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con el método de los FRA, en mm

Periodo de retorno	Promedio Aritmetico							
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	590.39	684.68	733.07	676.21	763.74	573.32	549.83	327.00
5,000	545.55	639.56	680.35	626.73	704.76	539.90	516.38	314.87
2,000	490.16	578.93	610.32	558.10	631.91	498.61	467.88	298.25
1,000	447.62	533.45	556.79	506.63	575.53	467.16	431.92	285.74
500	404.77	487.80	503.65	454.76	519.15	435.45	395.68	273.14
200	347.89	427.16	432.61	386.04	444.34	393.30	347.80	256.49
100	304.45	380.76	378.34	333.47	387.20	361.18	311.18	243.77
50	260.19	333.50	323.03	279.86	328.96	328.40	273.88	230.82
20	198.37	267.53	245.84	205.05	247.67	282.65	222.01	212.79
10	144.27	209.81	178.28	139.65	176.49	242.66	177.72	197.10
5	67.28	112.02	90.04	75.28	78.37	168.30	122.63	167.69
2	34.17	58.84	51.92	50.09	44.63	89.90	67.44	74.31

Periodo de retorno	Polígonos de Thiessen							
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	583.24	676.39	724.19	668.02	754.49	566.38	543.17	323.03
5,000	538.94	631.81	672.11	619.14	696.22	533.36	510.13	311.06
2,000	484.23	571.91	602.93	551.34	624.25	492.57	462.22	294.64
1,000	442.20	526.99	550.05	500.50	568.56	461.50	426.69	282.28
500	399.87	481.89	497.55	449.25	512.86	430.18	390.89	269.83
200	343.68	421.99	427.37	381.37	438.95	388.54	343.59	253.39
100	300.76	376.15	373.76	329.43	382.51	356.80	307.41	240.82
50	257.04	329.46	319.12	276.47	324.97	324.42	270.56	228.03
20	195.97	264.29	242.86	202.56	244.67	279.23	219.33	210.21
10	142.52	207.27	176.12	137.96	174.36	239.72	175.57	194.71
5	66.46	110.66	88.95	74.37	77.42	166.26	121.14	165.65
2	33.76	58.13	51.29	49.48	44.08	88.81	66.62	73.41

## 4.3 Simultaneidad de eventos

Este método supone que la suma de la precipitación máxima anual de las estaciones consideradas, se distribuye de forma proporcional a la precipitación máxima anual en cada una de las estaciones. Es decir, donde se presenta la lluvia máxima anual mayor, el factor de simultaneidad será mayor y viceversa.

De igual forma que en los métodos anteriores, a continuación se describe el procedimiento.

- a) Se selecciona el periodo de retorno para el diseño.
- b) Se determina la precipitación máxima anual para cada estación.

- c) Para cada año, se suman los valores de la precipitación máxima anual de todas las estaciones (SPMA).
- d) A la muestra obtenida en el inciso c, se le ajustan distintas funciones de distribución de probabilidad.
- e) Se selecciona la función de distribución de probabilidad con el mínimo error estándar de ajuste.
- f) Se determinan los valores de precipitación asociados a los diferentes periodos de retorno (SPMA<sub>a3</sub>).
- g) Se obtienen los factores de simultaneidad, como:  $FS = SPMA_{a3} / SPMA_{a1}$
- h) La precipitación máxima anual de cada estación se ajusta con los factores de simultaneidad.
- i) Si es el caso, se determina la precipitación media de la cuenca.

Con la ayuda del método tradicional se determina la suma de la precipitación máxima anual asociada a los distintos periodos de retorno (SPMA<sub>a1</sub>).

La aplicación de este método en la zona de estudio, implica sumar, para cada año, la precipitación máxima anual de las estaciones climatológicas seleccionadas, el resultado se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4. 9 Suma de la precipitación máxima anual, en mm

<b>Año</b>	<b>SPMA (mm)</b>
1982	401.43
1983	597.00
1984	493.65
1985	390.10
1986	616.28
1987	534.00
1988	1,697.50
1989	429.30
1990	428.00
1991	447.70
1992	343.30
1993	474.00
1994	446.00
1995	597.50
1996	585.37
1997	530.90
1998	793.40
1999	788.68
2000	627.74
2001	752.50
2002	797.50
2003	806.68
2004	427.48
2005	1,901.50
2006	720.00
2007	537.00
2008	579.00
2009	337.00
2010	2,405.50
2011	644.00

El ajuste de las diferentes funciones de distribución de probabilidad con el programa AX a la serie de la tabla 4.9, dio como resultado que la función de distribución de probabilidad con el mínimo error estándar de ajuste fue la doble Gumbel. Los valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno con el empleo de esta función de distribución de probabilidad se muestran en la tabla 4.10.

**Tabla 4. 10 Precipitación máxima anual asociada a distintos periodos de retorno con el método de simultaneidad de eventos**

<b>Periodo de retorno</b>	<b>SPMA<sub>a3</sub> (mm)</b>
10,000	5,375.57
5,000	4,997.47
2,000	4,501.22
1,000	4,117.21
500	3,736.16
200	3,227.35
100	2,838.92
50	2,442.54
20	1,889.70
10	1,406.46
5	827.20
2	555.59

Continuando con el procedimiento descrito, los factores de simultaneidad se obtienen dividiendo los valores de la tabla 4.10 (SPMA<sub>a3</sub>) entre los valores de la tabla 4.3 (SPMA<sub>a1</sub>). El resultado se presenta en la tabla 4.11.

**Tabla 4. 11 Factores de simultaneidad**

<b>Periodo de retorno</b>	<b>SPMA<sub>a1</sub> (mm)</b>	<b>SPMA<sub>a3</sub> (mm)</b>	<b>FS</b>
10,000	5,421.25	5,375.57	0.99
5,000	5,055.86	4,997.47	0.99
2,000	4,575.59	4,501.22	0.98
1,000	4,211.11	4,117.21	0.98
500	3,845.38	3,736.16	0.97
200	3,359.77	3,227.35	0.96
100	2,988.69	2,838.92	0.95
50	2,610.47	2,442.54	0.94
20	2,082.85	1,889.70	0.91
10	1,622.51	1,406.46	0.87
5	975.73	827.20	0.85
2	521.61	555.59	1.07

Finalmente, la precipitación máxima anual asociada a distintos periodos de retorno con el método de simultaneidad de eventos se obtiene multiplicando dichos factores por la precipitación máxima presentada en la tabla 4.3, el resultado se muestra en la tabla 4.12.

**Tabla 4. 12 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno por el método de simultaneidad de eventos, en mm**

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	647.92	751.40	804.50	742.10	838.17	629.19	603.41	358.86
5,000	598.71	701.89	746.65	687.81	773.44	592.51	566.70	345.55
2,000	537.93	635.34	669.80	612.49	693.49	547.20	513.48	327.32
1,000	491.25	585.44	611.05	556.01	631.61	512.68	474.01	313.59
500	444.22	535.33	552.73	499.08	569.74	477.89	434.24	299.75
200	381.80	468.79	474.77	423.66	487.64	431.63	381.70	281.49
100	334.12	417.87	415.21	365.97	424.93	396.37	341.51	267.53
50	285.54	366.00	354.51	307.13	361.01	360.40	300.57	253.32
20	217.70	293.61	269.80	225.03	271.80	310.19	243.65	233.53
10	158.32	230.25	195.66	153.26	193.69	266.31	195.04	216.30
5	73.83	122.94	98.81	82.62	86.01	184.70	134.58	184.03
2	37.50	64.57	56.98	54.97	48.97	98.66	74.01	81.55

## 4.4 Metodología propuesta

Con la finalidad de cumplir con el objetivo propuesto, en este apartado se propone otra manera de tratar los datos de la precipitación. Con ella, se pretende hacer un análisis integral de la lluvia para obtener una precipitación asociada a distintos periodos de retorno más apegada a la realidad, es decir, que contemple el proceso físico de como ocurre la precipitación.

Para ello se supone que la precipitación no se distribuye de forma simultánea en toda la cuenca, es decir, considera la distribución espacial de la lluvia.

Para cumplir con la hipótesis propuesta, se describe el procedimiento, empleando para ello la información de la zona de estudio.

1. Para el año 1.

- a) Para la estación 1, se identifica el día en que se presentó la precipitación máxima.
- b) En las estaciones 2-n se determina la precipitación que ocurrió el día en que se presentó la precipitación máxima de la estación 1.
- c) Para la estación 2, se identifica el día en que se presentó la precipitación máxima.
- d) En las estaciones 1, 3-n se determina la precipitación que se presenta el día en que ocurrió la precipitación máxima en la estación 2.
- e) Repetir el procedimiento anterior para todas las estaciones.

El punto 1 del procedimiento descrito, se aplica en la zona de estudio y para el año 1982, considerando las estaciones climatológicas seleccionadas; el resultado es el que se muestra en la tabla 4.13.

Tabla 4. 13 Valores de precipitación para los días en los que se presentó el valor máximo anual en cada estación, en mm

Año 1982	Fecha	Estaciones							
		19054	19033	19018	19031	19002	19015	19096	19174
19054	09/10/1982	38	0	4	8.2	0	0	0	0
19033	*	0	82.47	0	0	0	0	0	0
19018	20/09/1982	0	0	69	40	0	0	0	0
19031	20/09/1982	0	0	69	40	0	0	0	0
19002	*	0	0	0	0	22.78	0	0	0
19015	25/02/1982	4	0	14.1	7.2	0	77.88	0	0
19096	05/07/1982	0	0	10	17.4	0	0	35	0
19174	20/06/1982	0	0	0	0	0	0.5	0	36.3

\*Se utilizó el promedio de los valores máximos anuales.

Los valores de la diagonal principal corresponden a la precipitación máxima anual según el método tradicional.

2. Se determina el promedio de la precipitación en cada una de las estaciones (fila inferior de la tabla 4.14), con estos valores se genera la muestra 1.

3. Con el valor máximo (celda en color oscuro de la muestra 1) se forma la muestra 2.

4. Para cada fecha, se determina la precipitación media con el método aritmético y con el método de los polígonos de Thiessen (columna "Pmedia"). El valor máximo de cada método da lugar a la muestra 3 y muestra 4 respectivamente (celdas en color naranja de la tabla 4.14).

5. Con la precipitación promedio en cada una de las estaciones (paso 2) se determina la precipitación media de la cuenca con el promedio aritmético dando lugar a la muestra 5, y con el método de los polígonos de Thiessen, se obtendrá la muestra 6 (celdas color verde de la tabla 4.14).

6. Se determina la precipitación media con el método de los polígonos de Thiessen, a partir de la precipitación máxima anual de cada estación, con lo cual se genera la muestra 7 (celda color amarillo de la tabla 4.14).

7. La suma de los valores máximos anuales da lugar a la muestra 8 (celda color azul de la tabla 4.14).

8. El procedimiento anterior se repite para cada año.

Tabla 4. 14 Valores de precipitación para cada una de las muestras, en el año 1982, en mm

Año 1982	Fecha	Estaciones								Pmedia		Máximos
		19054	19033	19018	19031	19002	19015	19096	19174	Aritmético	Thiessen	
19054	09/10/1982	38	0	4	8.2	0	0	0	0	6.28	3.10	38.00
19033	*	0	82.47	0	0	0	0	0	0	10.31	9.76	82.47
19018	20/09/1982	0	0	69	40	0	0	0	0	13.63	19.23	69.00
19031	20/09/1982	0	0	69	40	0	0	0	0	2.85	2.29	40.00
19002	*	0	0	0	0	22.78	0	0	0	12.90	15.79	22.78
19015	25/02/1982	4	0	14.1	7.2	0	77.88	0	0	7.80	11.25	77.88
19096	05/07/1982	0	0	10	17.4	0	0	35	0	4.60	2.35	35.00
19174	20/06/1982	0	0	0	0	0	0.5	0	36.3	PMmáxTh	54.29	
PM <sub>arit</sub>	9.00	5.25	10.31	20.76	14.10	2.85	9.80	4.38	4.54	SPMA	401.43	
PM <sub>Th</sub>	10.37											

De esta manera, en la tabla 4.15 se presentan los valores correspondientes a la muestra 1, y en la tabla 4.16, los valores de las muestras 2 a la 8. En la fila 1, aparecen los datos del caso analizado.

Tabla 4. 15 Precipitación correspondiente a la muestra 1, en mm

Año	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
1982	5.25	10.31	20.76	14.10	2.85	9.80	4.38	4.54
1983	15.13	27.38	10.00	28.75	7.50	35.69	13.88	42.56
1984	12.46	27.88	8.50	9.58	20.63	19.75	7.00	4.88
1985	7.63	6.63	12.75	8.55	10.25	23.69	4.13	7.95
1986	12.66	23.25	21.75	22.50	18.63	104.44	24.94	13.13
1987	14.38	20.25	26.75	14.19	5.38	41.75	20.00	51.25
1988	215.25	261.88	245.00	44.50	37.45	252.31	101.63	4.63
1989	4.13	27.25	12.69	15.20	15.44	50.50	27.25	20.50
1990	5.88	13.00	27.75	13.66	13.50	20.75	9.13	7.75
1991	7.13	23.31	25.00	7.75	30.75	38.94	34.06	17.69
1992	7.13	8.75	11.63	19.91	14.69	9.31	10.75	18.94
1993	10.00	10.44	26.88	8.75	33.25	53.51	19.75	34.13
1994	7.50	9.00	30.75	27.06	25.56	37.25	33.25	26.00
1995	1.13	7.06	24.00	25.75	18.44	71.69	72.00	31.25
1996	6.25	37.75	23.21	37.80	3.55	54.06	36.88	41.55
1997	7.63	9.19	16.00	21.28	9.13	29.23	22.00	33.49
1998	50.63	35.63	51.81	39.13	55.38	123.88	29.00	68.78
1999	11.38	22.75	30.88	20.38	43.94	11.44	24.38	96.64
2000	18.13	14.91	2.63	5.00	36.75	81.06	57.00	39.70
2001	13.00	80.95	52.88	4.25	38.38	69.75	104.63	48.64
2002	39.13	69.28	55.19	45.54	79.00	75.00	18.88	62.96
2003	41.63	15.80	40.50	17.50	40.00	23.42	52.88	39.13
2004	13.88	17.03	10.13	15.50	11.38	11.71	13.38	8.31
2005	130.38	218.26	221.56	20.38	189.13	249.04	177.50	42.25
2006	13.00	21.79	17.20	7.50	36.63	29.83	25.00	27.88
2007	26.82	40.79	41.05	19.78	31.90	61.11	37.75	31.78
2008	12.25	25.25	33.25	27.50	38.88	44.75	45.50	51.75
2009	3.88	22.58	16.25	18.50	18.00	12.46	6.25	15.19
2010	169.88	272.75	202.13	266.50	306.63	277.50	178.75	169.56
2011	10.38	22.00	31.00	46.39	32.13	73.31	47.50	39.21

Tabla 4. 16 Precipitación para las muestras hidrológicas 2-8, en mm

Año	Muestras						
	2	3	4	5	6	7	8
1982	20.76	13.63	19.23	9.00	10.37	54.29	401.43
1983	42.56	38.56	28.39	22.61	20.37	81.90	597.00
1984	27.88	22.79	19.95	13.83	13.41	66.85	493.65
1985	23.69	19.69	24.05	10.20	10.73	48.70	390.10
1986	104.44	56.38	66.06	30.16	33.98	79.76	616.28
1987	51.25	32.66	41.98	24.24	24.64	67.45	534.00
1988	261.88	187.56	212.87	145.33	163.22	228.90	1697.50
1989	50.50	35.31	38.69	21.62	23.89	59.11	429.30
1990	27.75	32.44	38.14	13.93	16.22	60.42	428.00
1991	38.94	38.74	37.40	23.08	26.79	54.03	447.70
1992	19.91	22.31	23.20	12.64	12.05	42.26	343.30
1993	53.51	35.38	38.67	24.59	26.32	58.29	474.00
1994	37.25	54.13	70.51	24.55	27.65	59.38	446.00
1995	72.00	54.13	70.51	31.41	38.62	86.08	597.50
1996	54.06	45.53	48.22	30.13	32.28	75.43	585.37
1997	33.49	34.00	37.94	18.49	19.01	65.94	530.90
1998	123.88	80.46	79.71	56.78	56.22	99.59	793.40
1999	96.64	55.15	38.94	32.72	29.36	92.50	788.68
2000	81.06	59.25	65.50	31.90	34.12	83.73	627.74
2001	104.63	89.56	110.27	51.56	62.36	113.34	752.50
2002	79.00	84.80	82.48	55.62	53.53	101.61	797.50
2003	52.88	48.23	55.81	33.86	35.57	99.59	806.68
2004	17.03	16.50	22.20	12.66	12.49	56.51	427.48
2005	249.04	199.56	235.13	156.06	180.63	256.72	1901.50
2006	36.63	35.30	40.80	22.35	22.95	79.82	720.00
2007	70.43	55.68	61.87	36.37	39.47	86.89	537.00
2008	51.75	47.88	46.84	34.89	37.08	76.70	579.00
2009	22.58	27.88	27.70	14.14	14.11	41.73	337.00
2010	306.63	276.75	268.55	230.46	229.62	304.41	2405.50
2011	73.31	62.75	69.15	37.74	41.01	88.79	644.00

8. A las muestras obtenidas en los pasos anteriores, se les ajustan distintas funciones de distribución de probabilidad.

9. Se selecciona la función de distribución de probabilidad con el mínimo error estándar de ajuste. En la tabla 4.17, se muestra la relación de funciones de distribución de probabilidad seleccionadas para cada una de las muestras analizadas.

**Tabla 4. 17 Funciones de distribución de probabilidad con error estándar de ajuste mínimo**

<b>Muestras estadísticas</b>	<b>Función de distribución de probabilidad</b>
Muestra 1	Doble Gumbel
Muestra 2	Doble Gumbel
Muestra 3	Doble Gumbel
Muestra 4	Doble Gumbel
Muestra 5	Doble Gumbel
Muestra 6	Doble Gumbel
Muestra 7	Doble Gumbel
Muestra 8	Doble Gumbel

10. Se estima la precipitación asociada a los diferentes periodos de retorno con las funciones de distribución de probabilidad seleccionadas. Los resultados, se muestran en la tabla 4.18 para la muestra 1 y para las muestras 2 a la 8 en la tabla 4.19.

**Tabla 4. 18 Precipitación asociada a distintos periodos de retorno para la muestra 1, en mm**

<b>Periodo de retorno</b>	<b>Estaciones climatológicas</b>								<b>Pmedia</b>	
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	a Huastequit	San Bartolo	Aritmético	Thiessen
10,000	534.91	717.51	670.76	635.78	748.93	645.65	392.28	349.48	586.91	592.46
5,000	492.23	668.13	617.55	579.32	689.16	599.75	366.33	324.10	542.07	547.84
2,000	438.89	596.54	551.05	508.75	606.97	541.69	331.47	290.38	483.22	489.42
1,000	398.10	543.05	500.19	454.78	546.73	498.49	305.12	264.60	438.88	445.39
500	357.32	489.76	449.33	400.82	486.02	454.61	278.97	238.82	394.46	401.29
200	303.19	418.78	381.85	329.10	405.47	396.47	244.00	204.71	335.45	342.68
100	261.85	364.47	330.25	274.25	343.77	352.04	217.35	178.53	290.31	297.88
50	219.65	309.18	277.64	218.34	280.91	306.74	190.14	151.91	244.31	252.20
20	160.76	232.00	204.24	140.35	193.20	243.53	152.19	114.89	180.15	188.48
10	109.21	164.44	139.96	72.16	116.47	188.28	119.03	83.88	124.18	132.82
5	32.16	49.33	51.29	29.96	45.07	102.42	66.99	53.06	53.79	59.06
2	12.40	21.26	24.28	17.11	22.72	42.76	27.10	27.69	24.42	26.30

Tabla 4. 19 Precipitación asociada a distintos periodos de retorno para las distintas muestras hidrológicas, en mm

Periodo de retorno	2	3	4	5	6	7	8
10,000	699.78	612.28	623.59	535.6	555.1	690.81	5375.57
5,000	651.86	568.92	582.89	493.6	514.3	642.79	4997.47
2,000	587.46	509.30	524.55	441.1	460.2	579.77	4501.22
1,000	538.79	465.94	480.46	400.9	418.8	531.00	4117.21
500	490.11	421.91	436.37	360.9	377.7	482.24	3736.16
200	425.53	363.47	377.86	307.6	322.7	417.62	3227.35
100	376.29	318.89	333.22	266.9	280.7	368.24	2838.92
50	326.03	273.39	287.69	225.4	237.9	317.95	2442.54
20	255.92	209.92	224.16	167.4	178.2	247.74	1889.70
10	194.74	154.39	168.61	116.7	125.9	186.35	1406.46
5	109.64	79.89	89.91	49.26	53.8	108.94	827.20
2	52.90	43.07	46.88	25.95	27.61	72.66	555.59

Comparando la precipitación asociada a distintos periodos de retorno de la tabla 4.14, 4.16, y 4.19, con los valores obtenidos con el método tradicional, con los factores de reducción por área y con el método de simultaneidad de eventos, se observa lo siguiente:

- Dado que las tormentas presentadas son convectivas (locales), es obvio observar que en su gran mayoría el día que se presenta la precipitación máxima en una estación, en las otras estaciones se presentaron valores menores.
- Los valores de la muestra 3 y 4, aunque no se determina la precipitación media diaria, que es la que conlleva más tiempo y esfuerzo, corresponden a los valores de precipitación media diaria del método de los factores de reducción por área.
- Los valores de la muestra 7 representan la precipitación media para el método tradicional.
- Los valores de la muestra 8 representan los valores de la precipitación total máxima anual utilizados en el método de simultaneidad de eventos.

Con lo anterior, se demuestra que la metodología propuesta es capaz de analizar de una manera integral a la precipitación, con cualquiera de los métodos actualmente utilizados y con la ventaja de requerir menor cantidad de información.

11. Por último, para obtener los factores de reducción, se considerarán sólo las muestras que no se analizaron en los apartados 4.1-4.3, ya que, como se mencionó, algunas de ellas fueron analizadas en los otros métodos, por lo tanto, en lo que sigue sólo se analizarán las muestras restantes (1,2,5 y 6).

Así, los factores de reducción de la muestra 1, se obtienen dividiendo los valores obtenidos con el análisis propuesto (tabla 4.18) entre los valores de precipitación máximos anuales ajustados del método tradicional (tabla 4.3 y tabla 4.4). Los resultados obtenidos de la muestra 1, se presentan en la tabla 4.20.

**Tabla 4. 20 Factores de reducción de cada una de las estaciones meteorológicas y de la precipitación media asociada a diferentes periodos de retorno**

Periodo de retorno	Estaciones climatológicas								Pmedia	
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo	Aritmético	Thiessen
10,000	0.82	0.95	0.83	0.85	0.89	1.02	0.64	0.97	0.87	0.85
5,000	0.82	0.94	0.82	0.84	0.88	1.00	0.64	0.93	0.86	0.84
2,000	0.81	0.93	0.82	0.82	0.87	0.98	0.64	0.88	0.84	0.83
1,000	0.80	0.92	0.81	0.81	0.86	0.96	0.64	0.84	0.83	0.82
500	0.80	0.91	0.81	0.80	0.85	0.94	0.64	0.79	0.82	0.81
200	0.79	0.89	0.80	0.77	0.82	0.91	0.63	0.72	0.80	0.79
100	0.78	0.86	0.79	0.74	0.80	0.88	0.63	0.66	0.78	0.77
50	0.76	0.84	0.78	0.70	0.77	0.84	0.63	0.59	0.75	0.75
20	0.73	0.78	0.75	0.62	0.70	0.78	0.62	0.49	0.69	0.70
10	0.68	0.71	0.71	0.47	0.60	0.70	0.61	0.38	0.61	0.64
5	0.43	0.40	0.51	0.36	0.52	0.55	0.49	0.29	0.44	0.47
2	0.33	0.33	0.42	0.31	0.46	0.43	0.36	0.34	0.37	0.39

De forma similar, para la muestra 2, los factores de reducción se obtienen dividiendo el valor máximo promedio de la precipitación asociada a distintos periodos de retorno (muestra 2, tabla 4.19) entre la precipitación media anual máxima asociada a distintos periodos de retorno (PMAM<sub>a1</sub>, tabla 4.4). El resultado se presenta en la tabla 4.21.

**Tabla 4. 21 Factores de reducción de acuerdo con la muestra hidrológica 2**

Periodo de retorno	PMAM <sub>a1</sub> (mm)	2 (mm)	FR
10,000	677.66	699.78	1.03
5,000	631.98	651.86	1.03
2,000	571.95	587.46	1.03
1,000	526.39	538.79	1.02
500	480.67	490.11	1.02
200	419.97	425.53	1.01
100	373.59	376.29	1.01
50	326.31	326.03	1.00
20	260.36	255.92	0.98
10	202.81	194.74	0.96
5	121.97	109.64	0.90
2	65.20	52.9	0.81

Para la muestra 5 y 6, los factores de reducción se obtienen dividiendo los valores de precipitación asociada a distintos periodos de retorno de la tabla 4.19 correspondientes a la muestra 5 y 6 (columnas en color verde), entre los valores de la precipitación media anual máxima asociada a distintos periodos de retorno (tabla 4.4). El resultado de la muestra 5 se presenta en la tabla 4.22, mientras que el correspondiente a la muestra 6 se presenta en la tabla 4.23.

Tabla 4. 22 Factores de reducción de acuerdo con la muestra hidrológica 5

Periodo de retorno	Aritmético (mm)	PM <sub>arit</sub> (mm)	FR
10,000	677.66	535.62	0.79
5,000	631.98	493.61	0.78
2,000	571.95	441.09	0.77
1,000	526.39	400.92	0.76
500	480.67	360.92	0.75
200	419.97	307.62	0.73
100	373.59	266.88	0.71
50	326.31	225.37	0.69
20	260.36	167.43	0.64
10	202.81	116.71	0.58
5	121.97	49.26	0.40
2	65.20	25.95	0.40

Tabla 4. 23 Factores de reducción de acuerdo con la muestra hidrológica 6

Periodo de retorno	Thiessen (mm)	PM <sub>Th</sub> (mm)	FR
10,000	698.64	555.06	0.79
5,000	651.84	514.29	0.79
2,000	589.62	460.15	0.78
1,000	542.48	418.75	0.77
500	495.24	377.67	0.76
200	432.48	322.65	0.75
100	384.52	280.69	0.73
50	335.64	237.9	0.71
20	267.46	178.18	0.67
10	208.08	125.89	0.61
5	125.05	53.8	0.43
2	68.20	27.61	0.40

Finalmente, la precipitación máxima anual asociada a distintos periodos de retorno con la metodología propuesta, correspondiente a la muestra 1, 2, 5 y 6, se obtiene multiplicando dichos factores por la precipitación máxima presentada en la tabla 4.3.

El resultado de la muestra 1 se presenta en la tabla 4.24, el de la muestra 2 en la tabla 4.25, el de la muestra 5 en la tabla 4.26 y el de la muestra 6 en la tabla 4.27.

**Tabla 4. 24 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra 1, en mm**

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	534.91	717.51	670.76	635.78	748.93	645.65	392.28	349.48
5,000	492.23	668.13	617.55	579.32	689.16	599.75	366.33	324.10
2,000	438.89	596.54	551.05	508.75	606.97	541.69	331.47	290.38
1,000	398.10	543.05	500.19	454.78	546.73	498.49	305.12	264.60
500	357.32	489.76	449.33	400.82	486.02	454.61	278.97	238.82
200	303.19	418.78	381.85	329.10	405.47	396.47	244.00	204.71
100	261.85	364.47	330.25	274.25	343.77	352.04	217.35	178.53
50	219.65	309.18	277.64	218.34	280.91	306.74	190.14	151.91
20	160.76	232.00	204.24	140.35	193.20	243.53	152.19	114.89
10	109.21	164.44	139.96	72.16	116.47	188.28	119.03	83.88
5	32.16	49.33	51.29	29.96	45.07	102.42	66.99	53.06
2	12.40	21.26	24.28	17.11	22.72	42.76	27.10	27.69

**Tabla 4. 25 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra 2, en mm**

Periodo de retorno	Promedio Aritmetico							
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	674.76	782.53	837.83	772.84	872.89	655.26	628.41	373.73
5,000	623.51	730.96	777.57	716.30	805.48	617.06	590.18	359.87
2,000	560.21	661.66	697.54	637.86	722.21	569.87	534.75	340.88
1,000	511.59	609.69	636.36	579.04	657.78	533.92	493.65	326.57
500	462.62	557.51	575.63	519.75	593.34	497.68	452.23	312.17
200	397.61	488.20	494.43	441.21	507.84	449.51	397.51	293.15
100	347.96	435.18	432.41	381.13	442.53	412.79	355.65	278.61
50	297.37	381.16	369.19	319.85	375.97	375.33	313.02	263.81
20	226.72	305.77	280.97	234.35	283.06	323.04	253.74	243.20
10	164.88	239.79	203.76	159.61	201.72	277.34	203.12	225.26
5	76.89	128.03	102.90	86.04	89.57	192.35	140.15	191.65
2	39.05	67.25	59.34	57.25	51.00	102.75	77.08	84.92

**Tabla 4. 26 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra hidrológica 5, en mm**

<b>Periodo de retorno</b>	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	516.47	598.96	641.28	591.54	668.12	501.54	480.99	286.05
5,000	477.24	559.49	595.16	548.26	616.52	472.30	451.73	275.45
2,000	428.79	506.44	533.91	488.22	552.79	436.18	409.30	260.91
1,000	391.58	466.66	487.08	443.20	503.47	408.67	377.84	249.96
500	354.09	426.72	440.59	397.82	454.15	380.93	346.14	238.94
200	304.34	373.68	378.44	337.71	388.70	344.06	304.26	224.38
100	266.33	333.09	330.97	291.72	338.72	315.95	272.22	213.25
50	227.61	291.74	282.58	244.82	287.77	287.28	239.59	201.92
20	173.53	234.04	215.06	179.37	216.66	247.26	194.22	186.15
10	126.20	183.54	155.96	122.16	154.40	212.28	155.47	172.42
5	58.85	97.99	78.76	65.86	68.56	147.23	107.27	146.69
2	29.89	51.47	45.42	43.82	39.04	78.64	59.00	65.00

**Tabla 4. 27 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con los factores de reducción correspondientes a la muestra hidrológica 6, en mm**

<b>Periodo de retorno</b>	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	519.14	602.06	644.60	594.61	671.58	504.14	483.48	287.53
5,000	479.71	562.38	598.24	551.10	619.71	474.75	454.07	276.87
2,000	431.01	509.06	536.67	490.75	555.65	438.44	411.42	262.26
1,000	393.61	469.08	489.60	445.50	506.08	410.78	379.80	251.26
500	355.92	428.93	442.87	399.88	456.50	382.91	347.93	240.17
200	305.91	375.61	380.40	339.45	390.72	345.84	305.83	225.54
100	267.71	334.81	332.69	293.23	340.47	317.59	273.63	214.35
50	228.79	293.25	284.05	246.09	289.26	288.77	240.83	202.97
20	174.43	235.25	216.17	180.30	217.78	248.54	195.22	187.11
10	126.86	184.49	156.77	122.80	155.20	213.38	156.28	173.31
5	59.16	98.50	79.17	66.20	68.91	147.99	107.83	147.45
2	30.05	51.74	45.65	44.05	39.24	79.05	59.30	65.34



## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

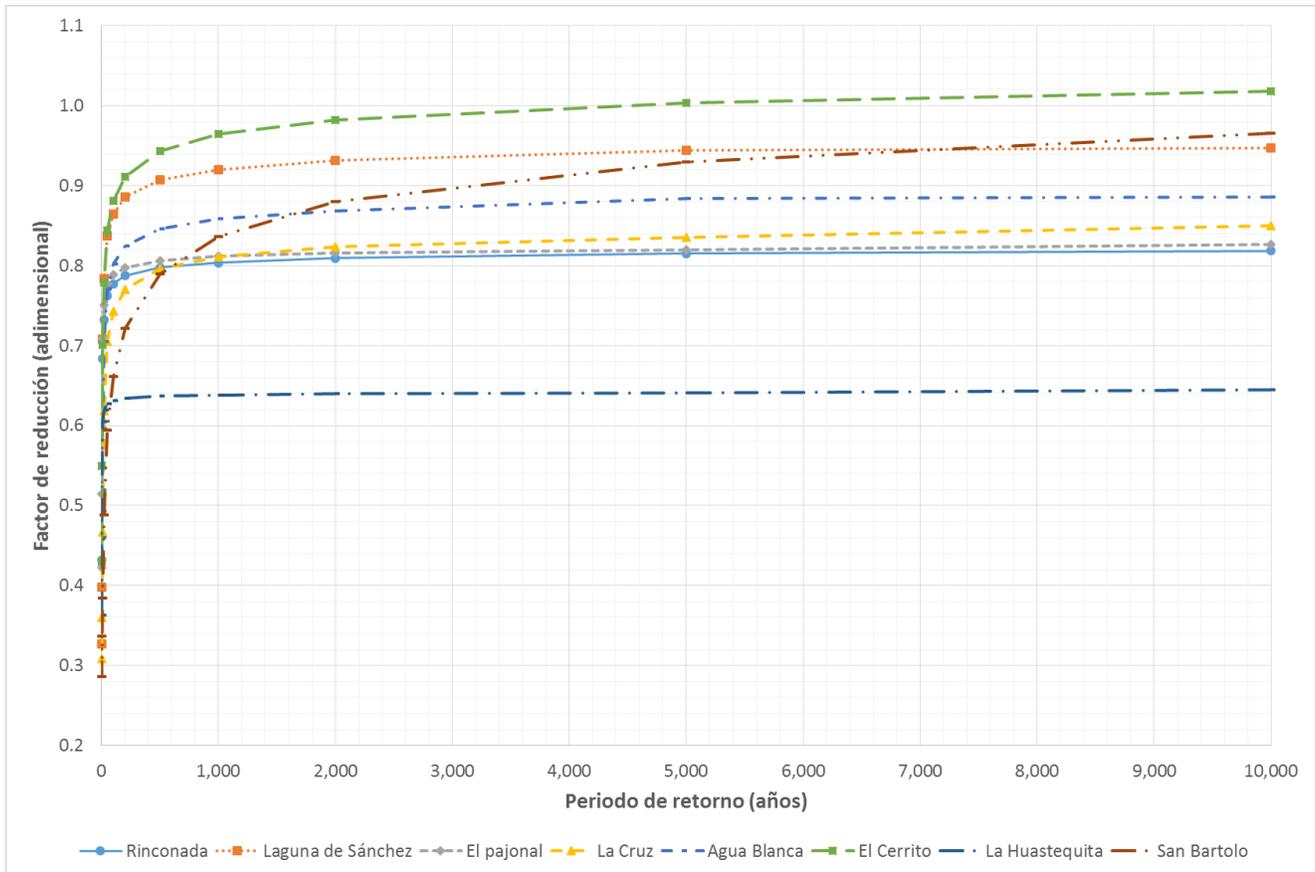
---

Con la finalidad de hacer una comparación de la precipitación y los correspondientes factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno, resultado de la aplicación de los distintos métodos a la cuenca del río Santa Catarina, en este apartado se resumen dichos resultados, primero los valores por estación, y posteriormente los valores correspondientes a la precipitación media de la cuenca.

De esta manera, en la tabla 5.1 y figura 5.1 se presentan los factores de reducción correspondientes a la muestra 1, obtenidos mediante la metodología propuesta, para cada una de las estaciones climatológicas.

Tabla 5. 1 Factores de reducción correspondientes a la muestra 1, según la metodología propuesta

Periodo de retorno	Estaciones climatológicas							
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	0.82	0.95	0.83	0.85	0.89	1.02	0.64	0.97
5,000	0.82	0.94	0.82	0.84	0.88	1.00	0.64	0.93
2,000	0.81	0.93	0.82	0.82	0.87	0.98	0.64	0.88
1,000	0.80	0.92	0.81	0.81	0.86	0.96	0.64	0.84
500	0.80	0.91	0.81	0.80	0.85	0.94	0.64	0.79
200	0.79	0.89	0.80	0.77	0.82	0.91	0.63	0.72
100	0.78	0.86	0.79	0.74	0.80	0.88	0.63	0.66
50	0.76	0.84	0.78	0.70	0.77	0.84	0.63	0.59
20	0.73	0.78	0.75	0.62	0.70	0.78	0.62	0.49
10	0.68	0.71	0.71	0.47	0.60	0.70	0.61	0.38
5	0.43	0.40	0.51	0.36	0.52	0.55	0.49	0.29
2	0.33	0.33	0.42	0.31	0.46	0.43	0.36	0.34



**Figura 5. 1 Factores de reducción de la muestra 1, según la metodología propuesta**

De la figura 5.1, se puede ver que las estaciones climatológicas presentan un comportamiento similar, a excepción de la estación San Bartolo.

Además, en la figura 5.2 se muestra el comportamiento de los factores de reducción de cada una de las estaciones climatológicas, en función del periodo de retorno. De manera general, el factor de reducción aumenta conforme aumenta el periodo de retorno, es decir, es dependiente de este último.

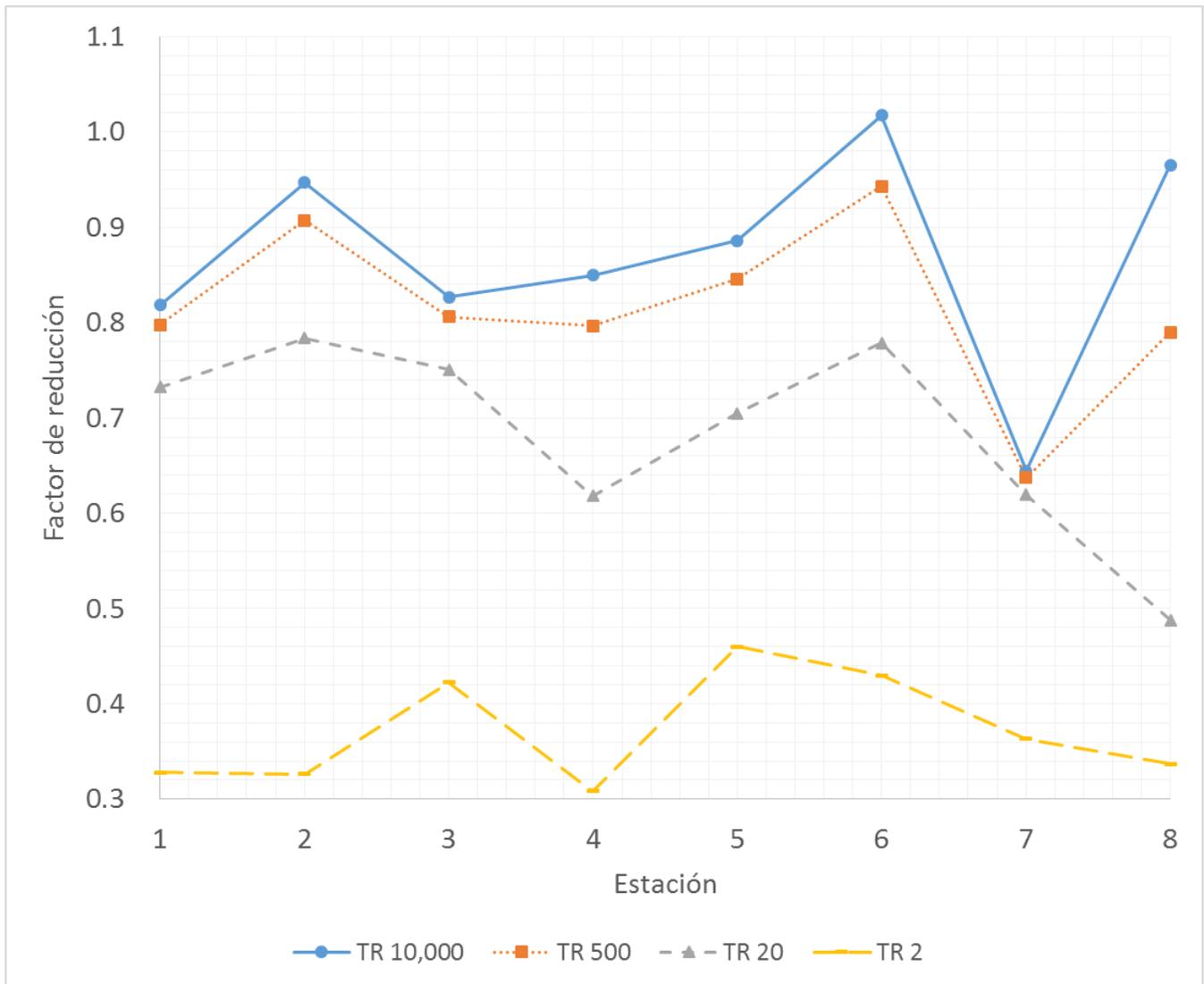


Figura 5.2 Factores de reducción por estación para distintos periodos de retorno

Las estaciones climatológicas son: 1 Rinconada, 2 La Cruz, 3 Agua Blanca, 4 La Huastequita, 5 El Pajonal, 6 Laguna de Sánchez, 7 El Cerrito y 8 San Bartolo.

De forma similar, en la tabla 5.2 y figura 5.3, se encuentran los factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno, correspondientes a cada uno de los métodos presentados en este trabajo.

Tabla 5. 2 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno

Periodo de retorno	FRA		FS	Metodología propuesta				
	Aritmético	Thiessen		Pmedia		Muestras		
				Aritmético	Thiessen	2	5	6
10,000	0.90	0.89	0.99	0.87	0.85	1.03	0.79	0.79
5,000	0.90	0.89	0.99	0.86	0.84	1.03	0.78	0.79
2,000	0.89	0.89	0.98	0.84	0.83	1.03	0.77	0.78
1,000	0.89	0.89	0.98	0.83	0.82	1.02	0.76	0.77
500	0.88	0.88	0.97	0.82	0.81	1.02	0.75	0.76
200	0.87	0.87	0.96	0.80	0.79	1.01	0.73	0.75
100	0.85	0.87	0.95	0.78	0.77	1.01	0.71	0.73
50	0.84	0.86	0.94	0.75	0.75	1.00	0.69	0.71
20	0.81	0.84	0.91	0.69	0.70	0.98	0.64	0.67
10	0.76	0.81	0.87	0.61	0.64	0.96	0.58	0.61
5	0.64	0.69	0.85	0.44	0.47	0.90	0.40	0.43
2	0.63	0.65	1.07	0.37	0.39	0.81	0.40	0.40

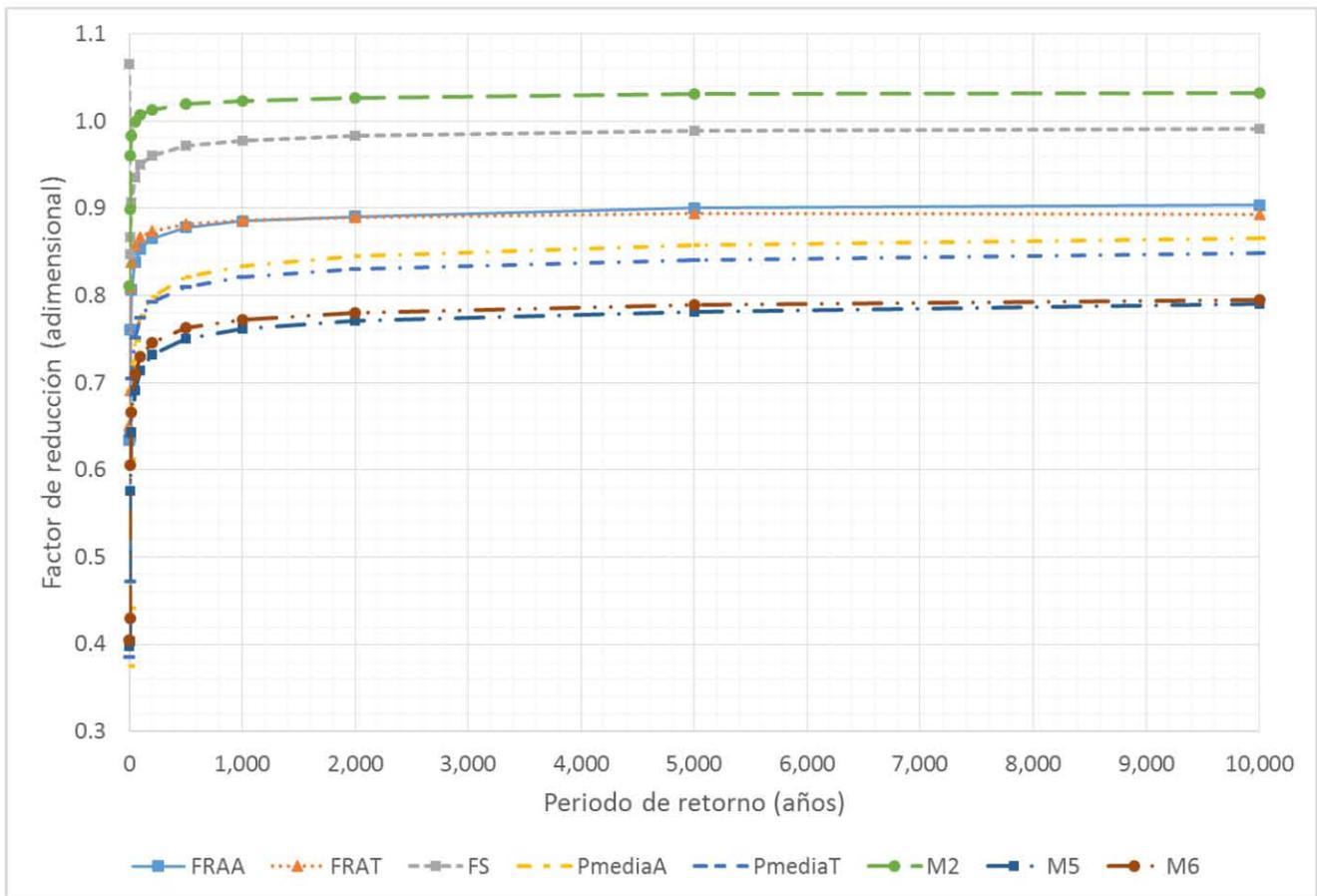


Figura 5. 3 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno

De la figura 5.3, se observa que los factores de reducción presentan un comportamiento similar. De estos, los factores obtenidos con el método de simultaneidad de eventos, presentan

los valores mayores, en cambio, los obtenidos con las muestras 5 y 6 de la metodología propuesta, presentan los valores menores.

Además, en la figura 5.4, se muestra una comparación de los factores de reducción de cada uno de los métodos analizados en función del periodo de retorno. De forma general, el valor del factor de reducción, es dependiente del periodo de retorno, esto es, para periodos de retorno mayores, factores de reducción mayores y viceversa.

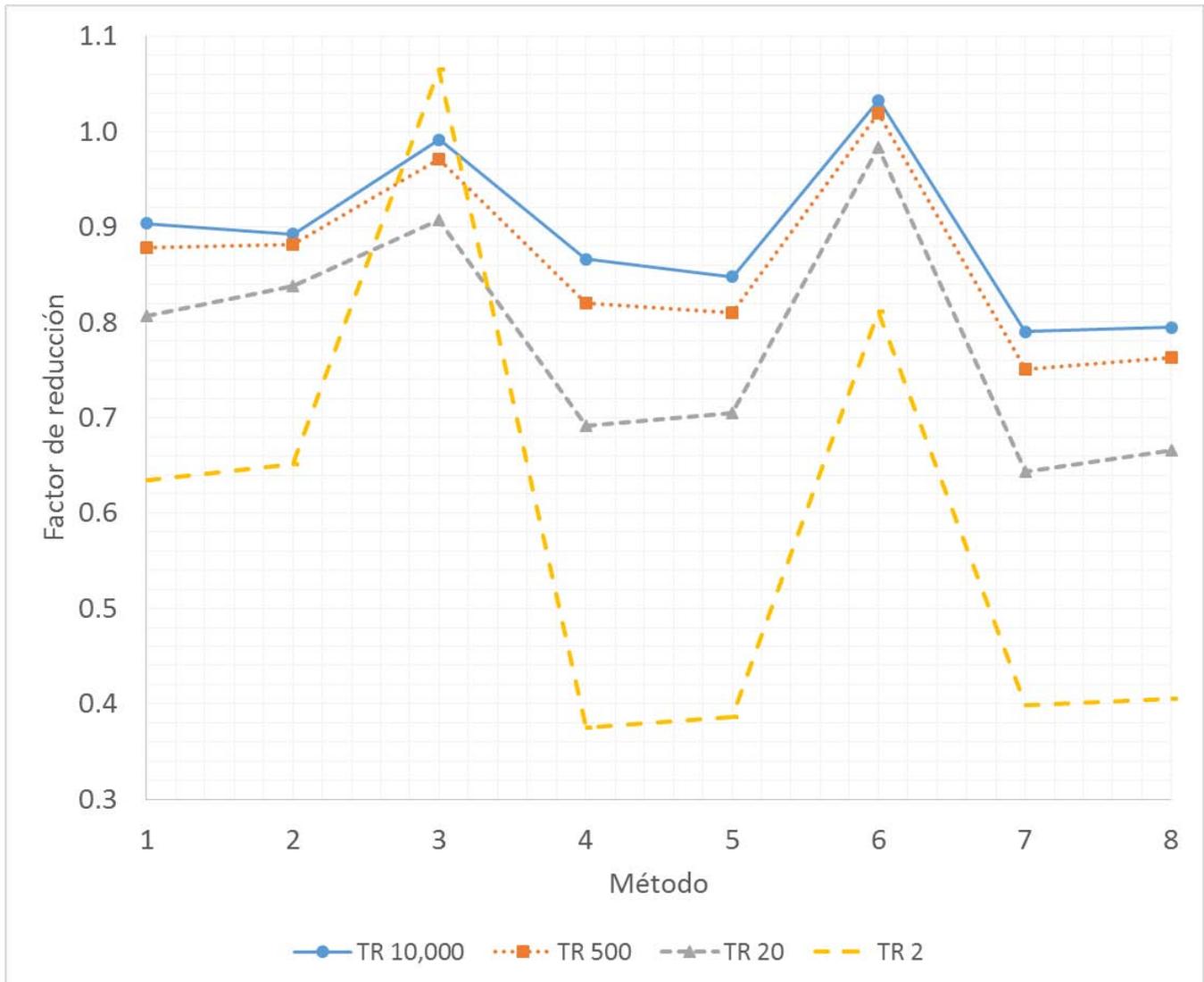


Figura 5. 4 Factores de reducción de cada uno de los métodos para distintos periodos de retorno

Los métodos utilizados son: 1 FRAA, 2 FRAT, 3 FS, 4 PmediaA, 5 PmediaT, 6 M2, 7 M5 y 8 M6.

De forma análoga, se presentan los valores de precipitación para cada metodología, correspondientes a cada estación climatológica. Así, en la tabla 5.3 se muestran los valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno con el método tradicional, en la tabla 5.4 los valores de precipitación con el método de los factores de reducción por área, en la tabla 5.5 con el método de simultaneidad de eventos, en la tabla 5.6, los correspondientes a la muestra 1, en la tabla 5.7 a la muestra 2, en la tabla 5.8 a la muestra 5 y en la tabla 5.9 a la muestra 6; las cuatro últimas tablas son resultado de la metodología propuesta.

**Tabla 5. 3 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, con el método tradicional, en mm**

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo	SPMA <sub>a,1</sub>
10,000	653.43	757.79	811.34	748.41	845.29	634.54	608.54	361.91	5,421.25
5,000	603.80	707.85	752.99	693.65	780.01	597.55	571.52	348.49	5,055.86
2,000	542.50	640.74	675.49	617.69	699.38	551.85	517.84	330.10	4,575.59
1,000	495.42	590.41	616.24	560.73	636.98	517.04	478.04	316.25	4,211.11
500	447.99	539.88	557.43	503.32	574.58	481.95	437.93	302.30	3,845.38
200	385.04	472.77	478.80	427.26	491.78	435.30	384.94	283.88	3,359.77
100	336.96	421.42	418.74	369.08	428.54	399.74	344.41	269.80	2,988.69
50	287.97	369.11	357.52	309.74	364.08	363.46	303.12	255.47	2,610.47
20	219.55	296.10	272.09	226.94	274.11	312.83	245.72	235.51	2,082.85
10	159.67	232.21	197.32	154.56	195.34	268.57	196.70	218.14	1,622.51
5	74.46	123.98	99.65	83.32	86.74	186.27	135.72	185.59	975.73
2	37.82	65.12	57.46	55.44	49.39	99.50	74.64	82.24	521.61

**Tabla 5. 4 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con el método de los FRA, en mm**

Periodo de retorno	Promedio Aritmetico							
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	590.39	684.68	733.07	676.21	763.74	573.32	549.83	327.00
5,000	545.55	639.56	680.35	626.73	704.76	539.90	516.38	314.87
2,000	490.16	578.93	610.32	558.10	631.91	498.61	467.88	298.25
1,000	447.62	533.45	556.79	506.63	575.53	467.16	431.92	285.74
500	404.77	487.80	503.65	454.76	519.15	435.45	395.68	273.14
200	347.89	427.16	432.61	386.04	444.34	393.30	347.80	256.49
100	304.45	380.76	378.34	333.47	387.20	361.18	311.18	243.77
50	260.19	333.50	323.03	279.86	328.96	328.40	273.88	230.82
20	198.37	267.53	245.84	205.05	247.67	282.65	222.01	212.79
10	144.27	209.81	178.28	139.65	176.49	242.66	177.72	197.10
5	67.28	112.02	90.04	75.28	78.37	168.30	122.63	167.69
2	34.17	58.84	51.92	50.09	44.63	89.90	67.44	74.31

Periodo de retorno	Polígonos de Thiessen							
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	583.24	676.39	724.19	668.02	754.49	566.38	543.17	323.03
5,000	538.94	631.81	672.11	619.14	696.22	533.36	510.13	311.06
2,000	484.23	571.91	602.93	551.34	624.25	492.57	462.22	294.64
1,000	442.20	526.99	550.05	500.50	568.56	461.50	426.69	282.28
500	399.87	481.89	497.55	449.25	512.86	430.18	390.89	269.83
200	343.68	421.99	427.37	381.37	438.95	388.54	343.59	253.39
100	300.76	376.15	373.76	329.43	382.51	356.80	307.41	240.82
50	257.04	329.46	319.12	276.47	324.97	324.42	270.56	228.03
20	195.97	264.29	242.86	202.56	244.67	279.23	219.33	210.21
10	142.52	207.27	176.12	137.96	174.36	239.72	175.57	194.71
5	66.46	110.66	88.95	74.37	77.42	166.26	121.14	165.65
2	33.76	58.13	51.29	49.48	44.08	88.81	66.62	73.41

Tabla 5. 5 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno con el método de simultaneidad de eventos, en mm

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	647.92	751.40	804.50	742.10	838.17	629.19	603.41	358.86
5,000	598.71	701.89	746.65	687.81	773.44	592.51	566.70	345.55
2,000	537.93	635.34	669.80	612.49	693.49	547.20	513.48	327.32
1,000	491.25	585.44	611.05	556.01	631.61	512.68	474.01	313.59
500	444.22	535.33	552.73	499.08	569.74	477.89	434.24	299.75
200	381.80	468.79	474.77	423.66	487.64	431.63	381.70	281.49
100	334.12	417.87	415.21	365.97	424.93	396.37	341.51	267.53
50	285.54	366.00	354.51	307.13	361.01	360.40	300.57	253.32
20	217.70	293.61	269.80	225.03	271.80	310.19	243.65	233.53
10	158.32	230.25	195.66	153.26	193.69	266.31	195.04	216.30
5	73.83	122.94	98.81	82.62	86.01	184.70	134.58	184.03
2	37.50	64.57	56.98	54.97	48.97	98.66	74.01	81.55

**Tabla 5. 6 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 1, en mm**

<b>Periodo de retorno</b>	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	534.91	717.51	670.76	635.78	748.93	645.65	392.28	349.48
5,000	492.23	668.13	617.55	579.32	689.16	599.75	366.33	324.10
2,000	438.89	596.54	551.05	508.75	606.97	541.69	331.47	290.38
1,000	398.10	543.05	500.19	454.78	546.73	498.49	305.12	264.60
500	357.32	489.76	449.33	400.82	486.02	454.61	278.97	238.82
200	303.19	418.78	381.85	329.10	405.47	396.47	244.00	204.71
100	261.85	364.47	330.25	274.25	343.77	352.04	217.35	178.53
50	219.65	309.18	277.64	218.34	280.91	306.74	190.14	151.91
20	160.76	232.00	204.24	140.35	193.20	243.53	152.19	114.89
10	109.21	164.44	139.96	72.16	116.47	188.28	119.03	83.88
5	32.16	49.33	51.29	29.96	45.07	102.42	66.99	53.06
2	12.40	21.26	24.28	17.11	22.72	42.76	27.10	27.69

**Tabla 5. 7 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 2, en mm**

<b>Periodo de retorno</b>	<b>Promedio Aritmetico</b>							
	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	674.76	782.53	837.83	772.84	872.89	655.26	628.41	373.73
5,000	623.51	730.96	777.57	716.30	805.48	617.06	590.18	359.87
2,000	560.21	661.66	697.54	637.86	722.21	569.87	534.75	340.88
1,000	511.59	609.69	636.36	579.04	657.78	533.92	493.65	326.57
500	462.62	557.51	575.63	519.75	593.34	497.68	452.23	312.17
200	397.61	488.20	494.43	441.21	507.84	449.51	397.51	293.15
100	347.96	435.18	432.41	381.13	442.53	412.79	355.65	278.61
50	297.37	381.16	369.19	319.85	375.97	375.33	313.02	263.81
20	226.72	305.77	280.97	234.35	283.06	323.04	253.74	243.20
10	164.88	239.79	203.76	159.61	201.72	277.34	203.12	225.26
5	76.89	128.03	102.90	86.04	89.57	192.35	140.15	191.65
2	39.05	67.25	59.34	57.25	51.00	102.75	77.08	84.92

**Tabla 5. 8 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 5, en mm**

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	516.47	598.96	641.28	591.54	668.12	501.54	480.99	286.05
5,000	477.24	559.49	595.16	548.26	616.52	472.30	451.73	275.45
2,000	428.79	506.44	533.91	488.22	552.79	436.18	409.30	260.91
1,000	391.58	466.66	487.08	443.20	503.47	408.67	377.84	249.96
500	354.09	426.72	440.59	397.82	454.15	380.93	346.14	238.94
200	304.34	373.68	378.44	337.71	388.70	344.06	304.26	224.38
100	266.33	333.09	330.97	291.72	338.72	315.95	272.22	213.25
50	227.61	291.74	282.58	244.82	287.77	287.28	239.59	201.92
20	173.53	234.04	215.06	179.37	216.66	247.26	194.22	186.15
10	126.20	183.54	155.96	122.16	154.40	212.28	155.47	172.42
5	58.85	97.99	78.76	65.86	68.56	147.23	107.27	146.69
2	29.89	51.47	45.42	43.82	39.04	78.64	59.00	65.00

**Tabla 5. 9 Precipitación máxima anual asociada a diferentes periodos de retorno, correspondientes a la muestra 6, en mm**

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	519.14	602.06	644.60	594.61	671.58	504.14	483.48	287.53
5,000	479.71	562.38	598.24	551.10	619.71	474.75	454.07	276.87
2,000	431.01	509.06	536.67	490.75	555.65	438.44	411.42	262.26
1,000	393.61	469.08	489.60	445.50	506.08	410.78	379.80	251.26
500	355.92	428.93	442.87	399.88	456.50	382.91	347.93	240.17
200	305.91	375.61	380.40	339.45	390.72	345.84	305.83	225.54
100	267.71	334.81	332.69	293.23	340.47	317.59	273.63	214.35
50	228.79	293.25	284.05	246.09	289.26	288.77	240.83	202.97
20	174.43	235.25	216.17	180.30	217.78	248.54	195.22	187.11
10	126.86	184.49	156.77	122.80	155.20	213.38	156.28	173.31
5	59.16	98.50	79.17	66.20	68.91	147.99	107.83	147.45
2	30.05	51.74	45.65	44.05	39.24	79.05	59.30	65.34

Con la intención de lograr una comparación e interpretación más efectiva entre los valores de precipitación entregados por cada metodología, en la figura 5.5, se analizan los valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno de la estación Rinconada, y en la figura 5.6, se muestra la comparación de los valores de precipitación para un periodo de retorno de 10,000 años.

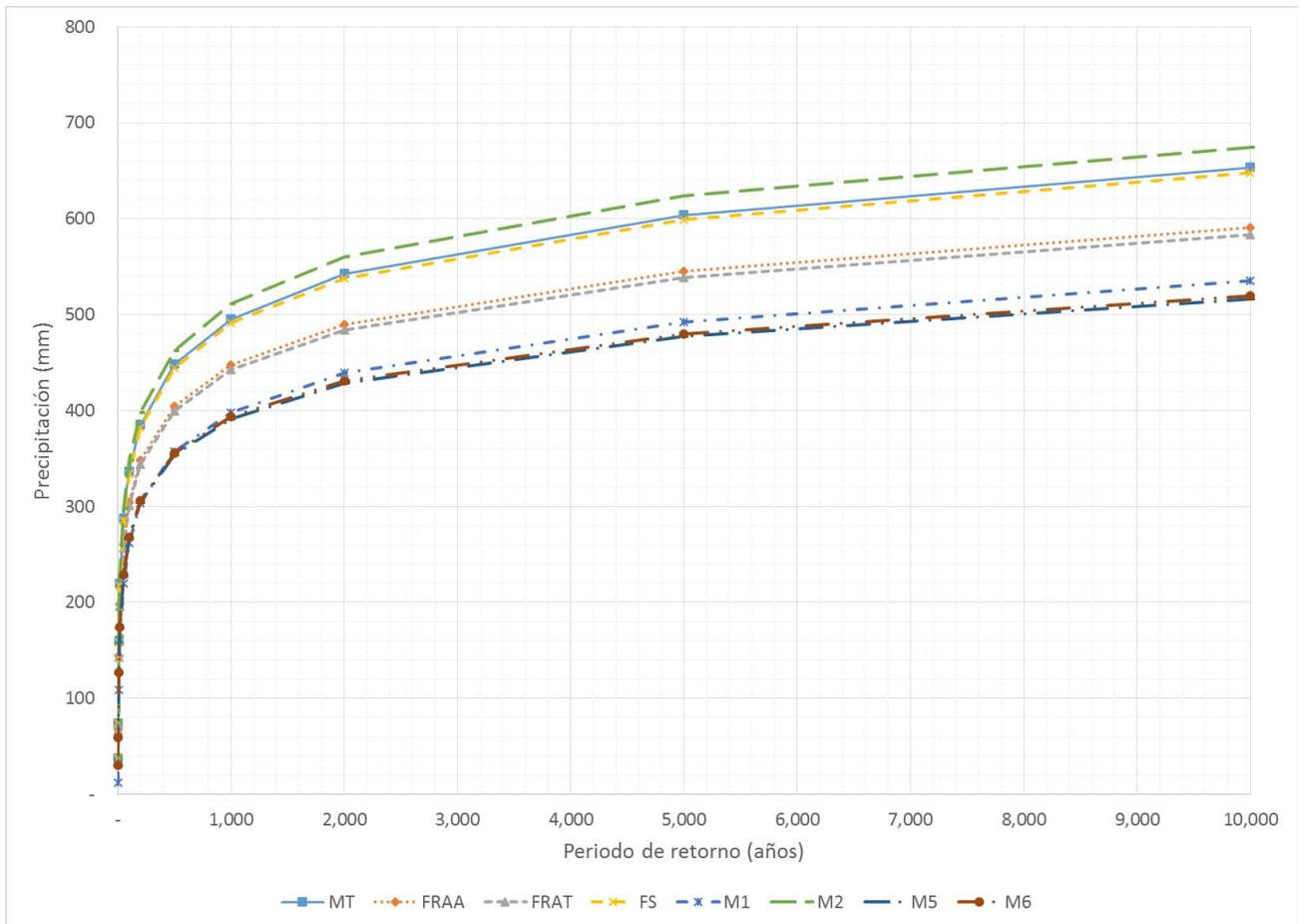


Figura 5. 5 Valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno con cada metodología, para la estación Rinconada

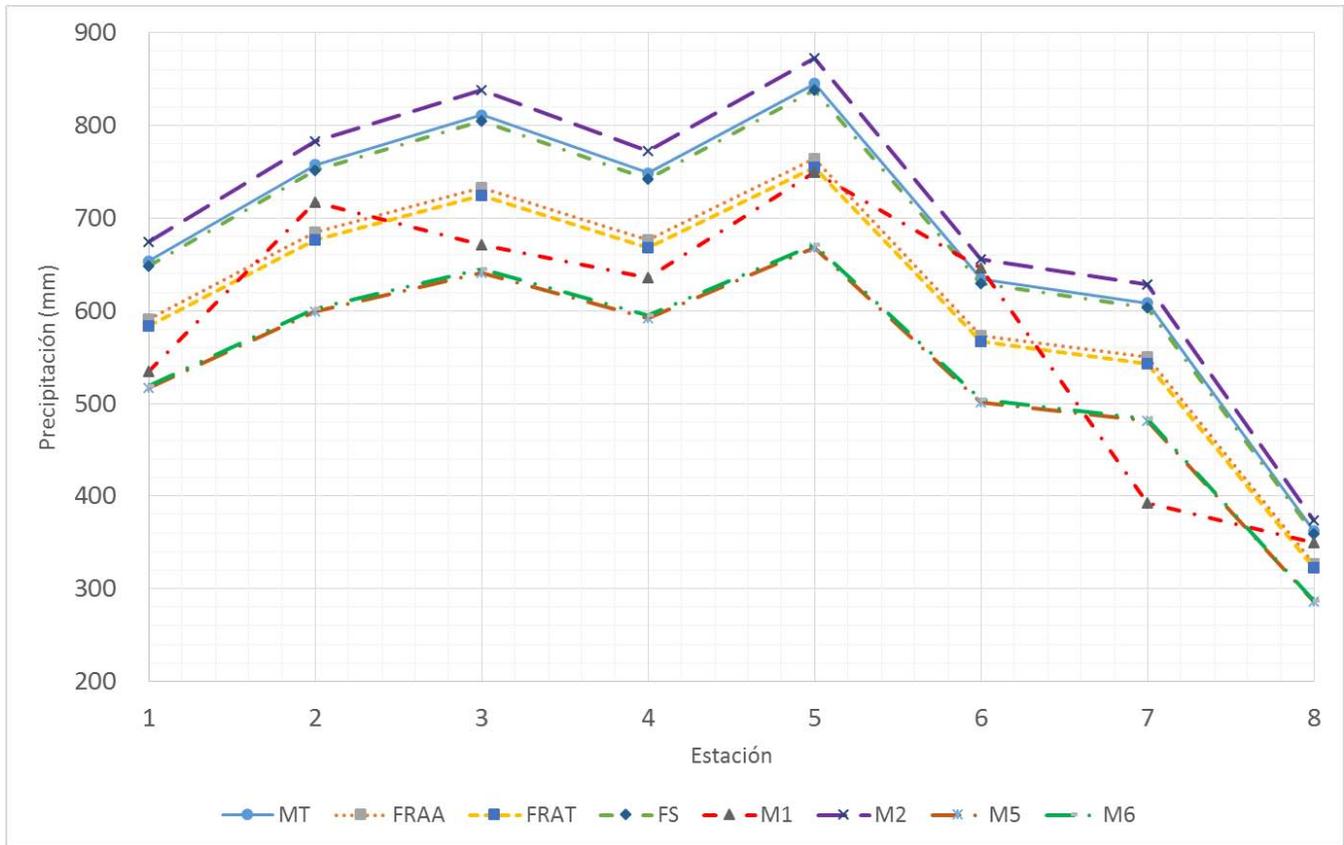


Figura 5. 6 Valores de precipitación en cada una de las estaciones para un periodo de retorno de 10,000 años

De la figura 5.5 y 5.6, se observa que en general, los valores de precipitación por estación climatológica presentan una tendencia similar, simplemente diferenciándose por pequeñas dispersiones dependiendo del método utilizado. Tanto los valores de precipitación como los factores de reducción se pueden dividir en tres grupos: el grupo 1 (valores mayores) compuesto por el método tradicional y el método de simultaneidad de eventos, el grupo 2 (valores intermedios), formado por el método de los factores de reducción por área, y el grupo 3 (valores menores) lo integran la muestra 5 y 6, correspondientes a la metodología propuesta.

También, se comparan las láminas de precipitación media obtenida con cada método. Estos resultados se presentan en la tabla 5.10 y figura5.7.

Tabla 5. 10 Láminas de precipitación media asociada a distintos periodos de retorno, en mm

Periodo de retorno	M.Tradicional		FRA		FS		M2	M5	M6
	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Aritmético	Thiessen
10,000	677.66	698.64	612.28	623.59	671.95	692.75	699.78	535.62	555.06
5,000	631.98	651.84	568.92	582.89	624.68	644.31	651.86	493.61	514.29
2,000	571.95	589.62	509.30	524.55	562.65	580.04	587.46	441.09	460.15
1,000	526.39	542.48	465.94	480.46	514.65	530.38	538.79	400.92	418.75
500	480.67	495.24	421.91	436.37	467.02	481.18	490.11	360.92	377.67
200	419.97	432.48	363.47	377.86	403.42	415.43	425.53	307.62	322.65
100	373.59	384.52	318.89	333.22	354.87	365.25	376.29	266.88	280.69
50	326.31	335.64	273.39	287.69	305.32	314.04	326.03	225.37	237.90
20	260.36	267.46	209.91	224.16	236.21	242.66	255.92	167.43	178.18
10	202.81	208.08	154.37	168.57	175.81	180.37	194.74	116.71	125.89
5	121.97	125.05	77.93	86.45	103.40	106.02	109.64	49.26	53.80
2	65.20	68.20	41.34	44.38	69.45	72.65	52.90	25.95	27.61

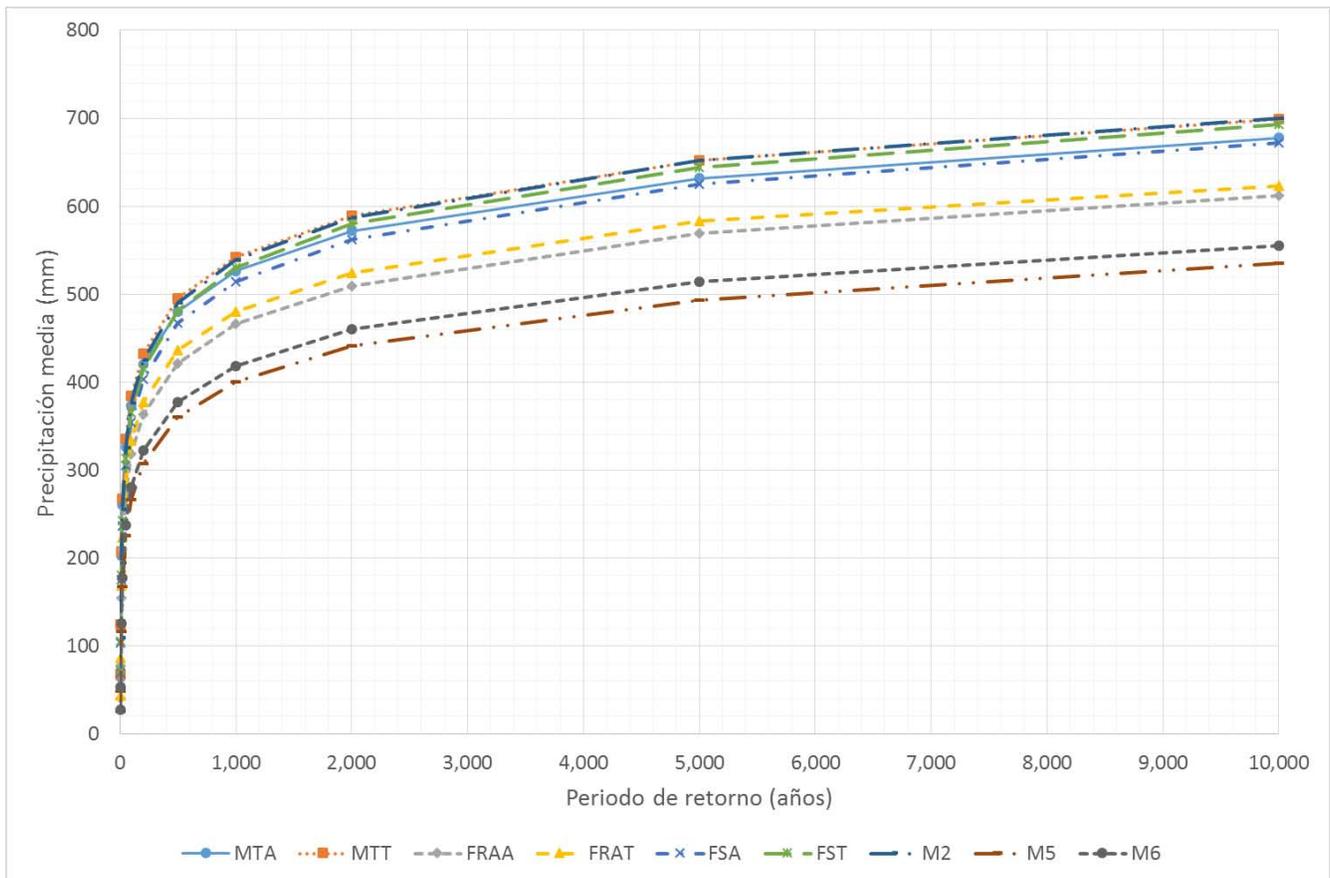


Figura 5. 7 Láminas de precipitación (mm)

De la tabla 5.10, se observa que las láminas de precipitación media de los distintos métodos tienen valores diferentes, pero no por ello quiere decir que alguna de ellas sea errónea, ya que,

como se ha explicado anteriormente, cada uno de los métodos analizados en este trabajo cuenta con hipótesis diferentes.

De la figura 5.7, se observa que las láminas de precipitación media de los distintos periodos de retorno tienen un comportamiento similar, con valores diferentes pero muy cercanos entre sí, aunque, según los resultados de la muestra 5 y 6 de la metodología propuesta, se obtienen valores de precipitación menores, ya que, al considerar la distribución espacial de la lluvia en la cuenca, se obtendrían diseños más apegados a la realidad, y por tanto, más económicos, pero no, menos seguros.

Como se hizo hincapié en el desarrollo del trabajo, la cuenca en estudio fue afectada con precipitación provocada por ciclones tropicales, y como es sabido, la precipitación de tipo ciclónica abarca grandes extensiones, con lo cual, probablemente se deja sin efecto a las hipótesis supuestas en cada uno de los métodos.

Para ilustrar lo anterior, en la figura 5.8 se muestra la distribución espacial de la precipitación máxima anual en el año 2010 (año en que se presentó el huracán Alex) y en la figura 5.9, para el mismo año, se presenta la precipitación máxima anual pero sin considerar la precipitación ocasionada por el huracán Alex.

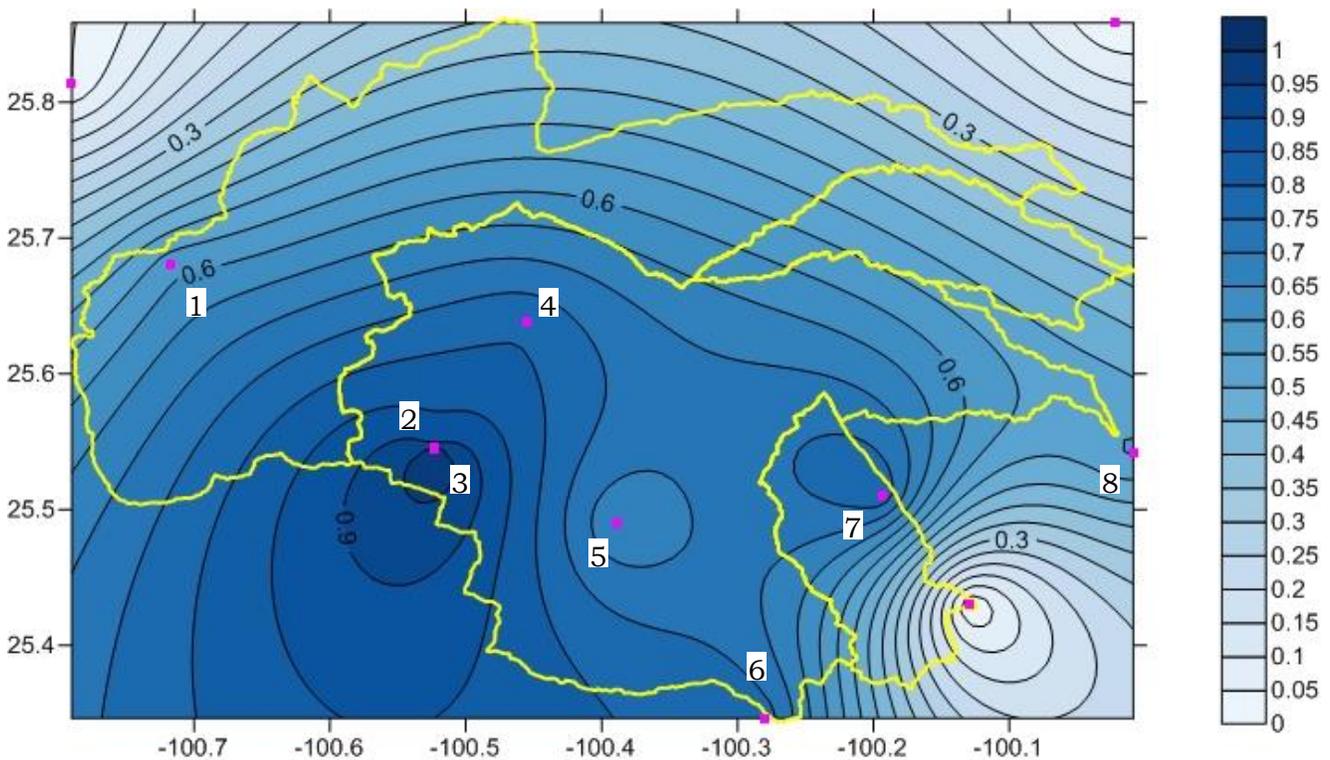


Figura 5. 8 Distribución espacial de la precipitación máxima anual del año 2010

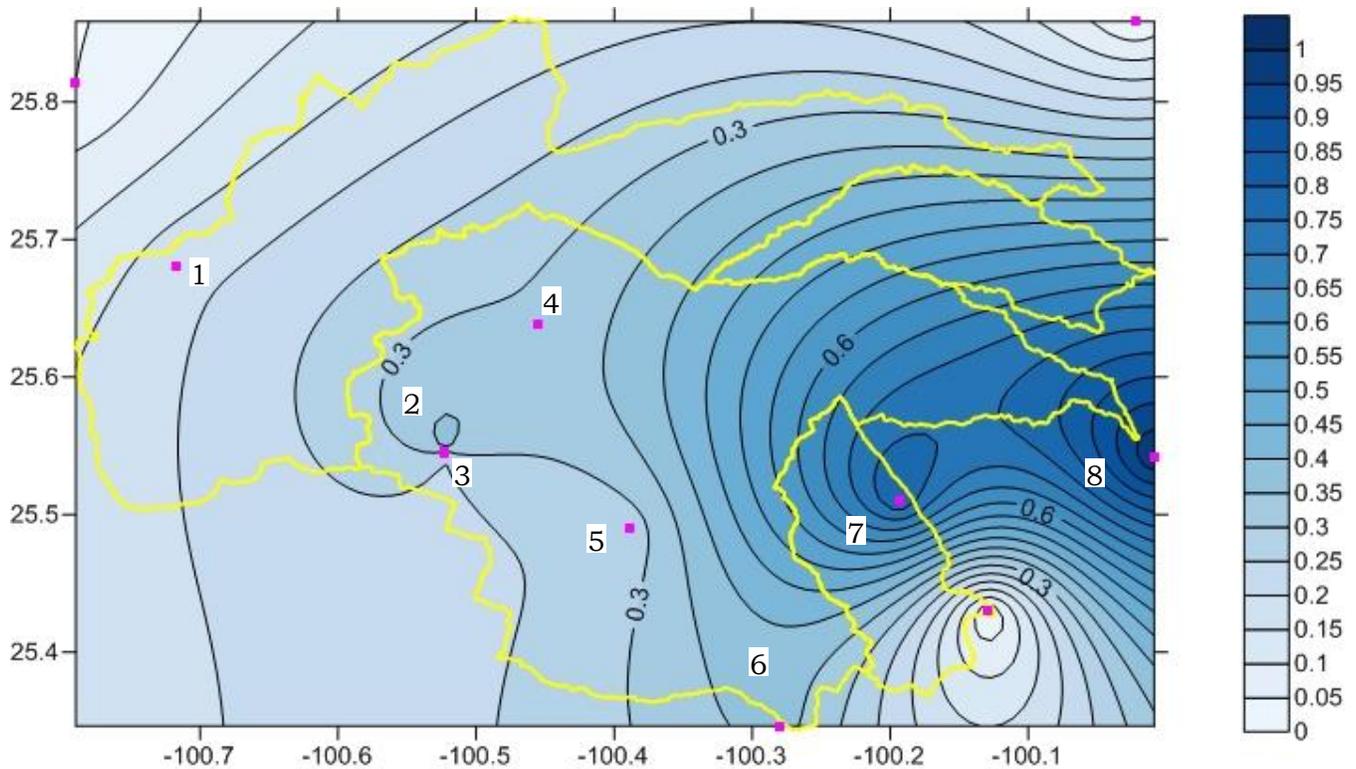


Figura 5. 9 Distribución espacial de la precipitación máxima anual del año 2010, sin considerar la precipitación ocasionada por el huracán Alex

De la figura 5.8 y 5.9, se puede ver la gran diferencia que presenta la distribución espacial de la precipitación con la ocurrencia y no ocurrencia de un ciclón tropical.

Por ello, con la finalidad de descartar esta posibilidad, se repitió el mismo análisis sin considerar dichos eventos. Así, en la tabla 5.11, se presentan los valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno para cada una de las estaciones climatológicas, en la tabla 5.12 y figura 5.10 se presentan los factores de reducción para cada uno de los métodos empleados y en la tabla 5.13 y figura 5.11 se muestran los valores de precipitación media.

**Tabla 5. 11 Valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno sin considerar huracanes, para las estaciones climatológicas, en mm**

Periodo de retorno	Rinconada	Laguna de Sánchez	El pajonal	La Cruz	Agua Blanca	El Cerrito	La Huastequita	San Bartolo
10,000	218.17	227.82	148.23	192.36	320.80	350.92	296.95	436.32
5,000	199.11	226.03	142.95	181.66	299.47	335.26	294.50	412.55
2,000	177.60	221.27	136.46	167.52	272.50	313.09	287.57	383.19
1,000	160.82	214.71	130.92	156.81	252.42	296.39	278.20	360.82
500	144.79	204.87	125.15	146.11	232.11	279.70	264.95	338.27
200	124.84	187.59	117.16	131.94	205.18	257.59	241.00	308.48
100	110.46	171.75	110.71	121.20	184.59	240.67	219.19	285.67
50	96.61	154.46	103.79	110.42	163.61	223.47	195.44	262.44
20	78.97	130.05	93.66	96.04	134.38	199.57	161.93	230.09
10	65.98	110.66	84.91	84.93	109.15	179.04	135.30	202.04
5	53.02	90.38	74.62	73.35	76.06	148.54	107.43	155.87
2	34.75	61.12	55.81	55.85	46.35	94.15	67.17	77.74

**Tabla 5. 12 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno, sin considerar huracanes**

Periodo de retorno	FRA		FS	Metodología propuesta				
	Aritmético	Thiessen		Pmedia		Muestras		
				Aritmético	Thiessen	2	5	6
10,000	0.75	0.61	0.57	0.60	0.71	0.70	0.36	0.59
5,000	0.72	0.63	0.57	0.59	0.69	0.70	0.37	0.56
2,000	0.70	0.66	0.56	0.58	0.65	0.70	0.38	0.53
1,000	0.67	0.67	0.56	0.57	0.63	0.70	0.39	0.50
500	0.65	0.68	0.57	0.55	0.60	0.71	0.40	0.48
200	0.62	0.69	0.57	0.53	0.57	0.72	0.40	0.45
100	0.61	0.68	0.58	0.51	0.54	0.74	0.40	0.43
50	0.59	0.67	0.62	0.49	0.52	0.76	0.39	0.42
20	0.57	0.65	0.71	0.46	0.48	0.80	0.38	0.40
10	0.56	0.62	0.82	0.43	0.44	0.84	0.37	0.38
5	0.57	0.61	1.01	0.40	0.41	0.89	0.37	0.38
2	0.62	0.61	1.07	0.36	0.36	0.76	0.38	0.39

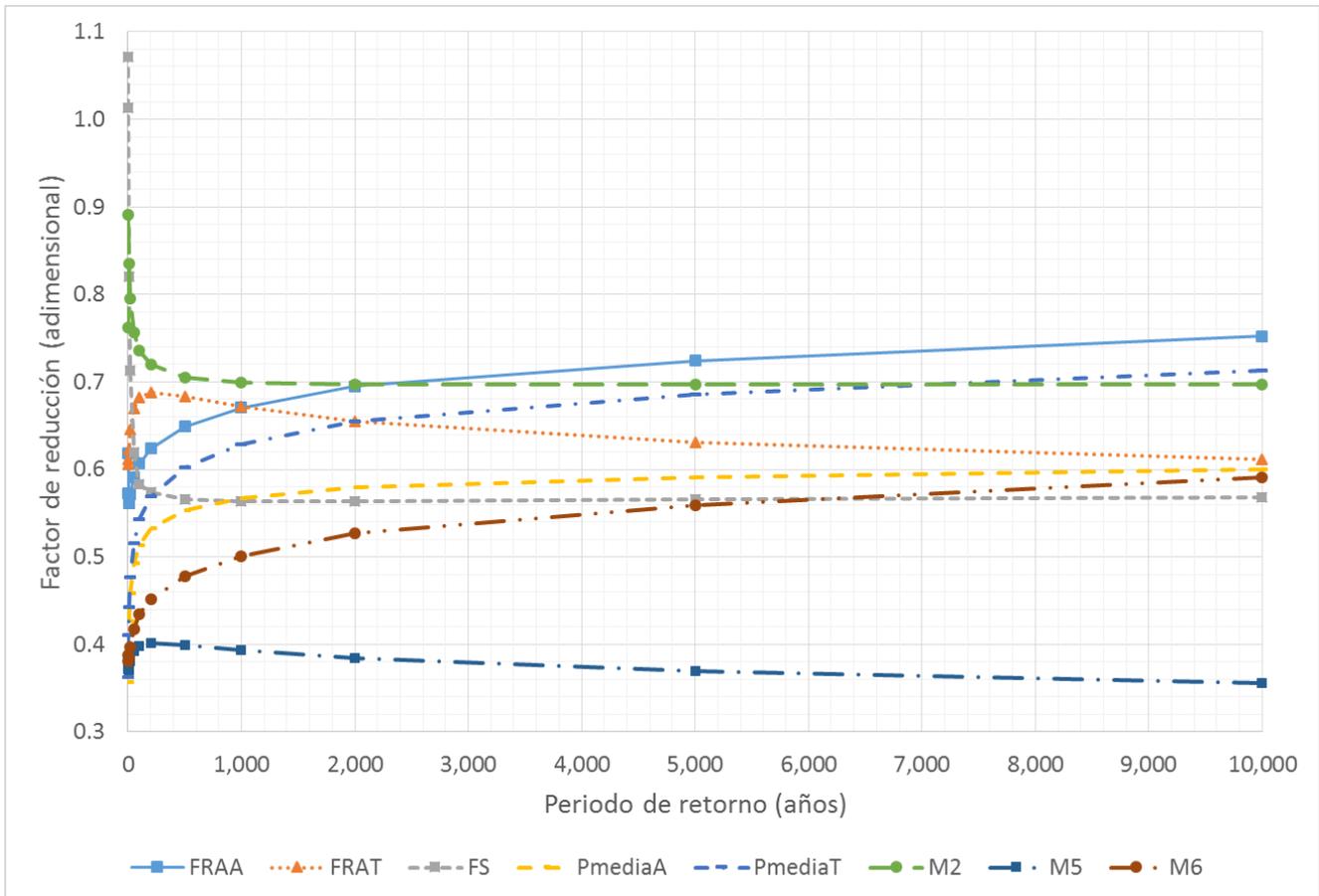


Figura 5. 10 Factores de reducción asociados a distintos periodos de retorno, sin considerar huracanes

Tabla 5. 13 Resumen de las láminas de lluvia sin ciclones tropicales (mm)

Periodo de retorno	M.Tradicional		FRA		FS		M2		M5	M6
	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen
10,000	273.95	261.99	206.13	160.29	155.54	148.75	191.01	182.67	97.38	154.84
5,000	261.44	252.39	189.31	159.29	148.09	142.96	182.11	175.80	96.48	141.23
2,000	244.90	238.90	170.21	156.53	137.99	134.61	170.59	166.41	94.17	125.88
1,000	231.39	227.34	155.21	152.65	130.38	128.10	161.83	159.00	91.09	113.94
500	216.99	214.50	140.79	146.51	122.85	121.44	153.06	151.30	86.72	102.53
200	196.72	195.60	122.71	134.47	112.89	112.25	141.54	140.73	78.92	88.37
100	180.53	180.05	109.57	122.88	105.35	105.07	132.80	132.45	71.92	78.19
50	163.78	163.72	96.81	109.72	101.50	101.46	123.95	123.90	64.33	68.39
20	140.59	140.85	80.40	90.90	100.30	100.49	111.77	111.98	53.61	55.95
10	121.50	122.01	68.18	75.95	99.62	100.04	101.47	101.90	45.10	46.81
5	97.41	98.97	55.84	60.49	98.66	100.24	86.81	88.20	36.18	37.72
2	61.62	64.28	38.11	38.95	66.01	68.85	46.94	48.96	23.21	24.95

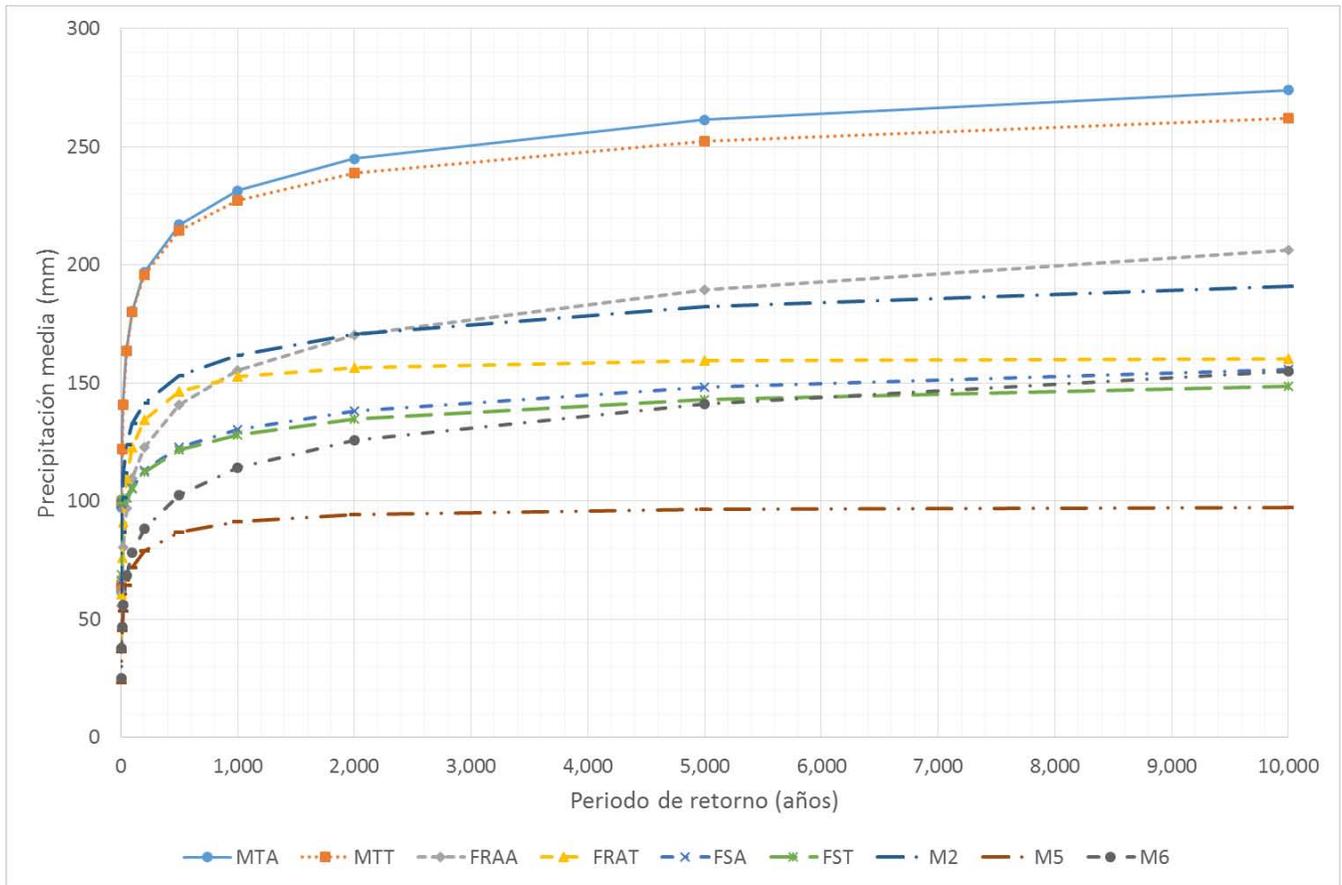


Figura 5. 11 Gráfica de las láminas de precipitación sin ciclones tropicales (mm)

De las figuras anteriores, se observa que cuando no se considera la precipitación correspondiente a los ciclones tropicales, la dispersión de los valores tanto de la precipitación media como de los factores de reducción es mayor, es decir, no presentan comportamientos similares como en el caso en el cual sí se considera la precipitación de tipo ciclónica.

Finalmente, en la figura 5.12 se presenta la distribución espacial de la precipitación asociada a un periodo de retorno de 500 años, considerando la precipitación de los ciclones tropicales y en la figura 5.13 sin considerar dicha precipitación.

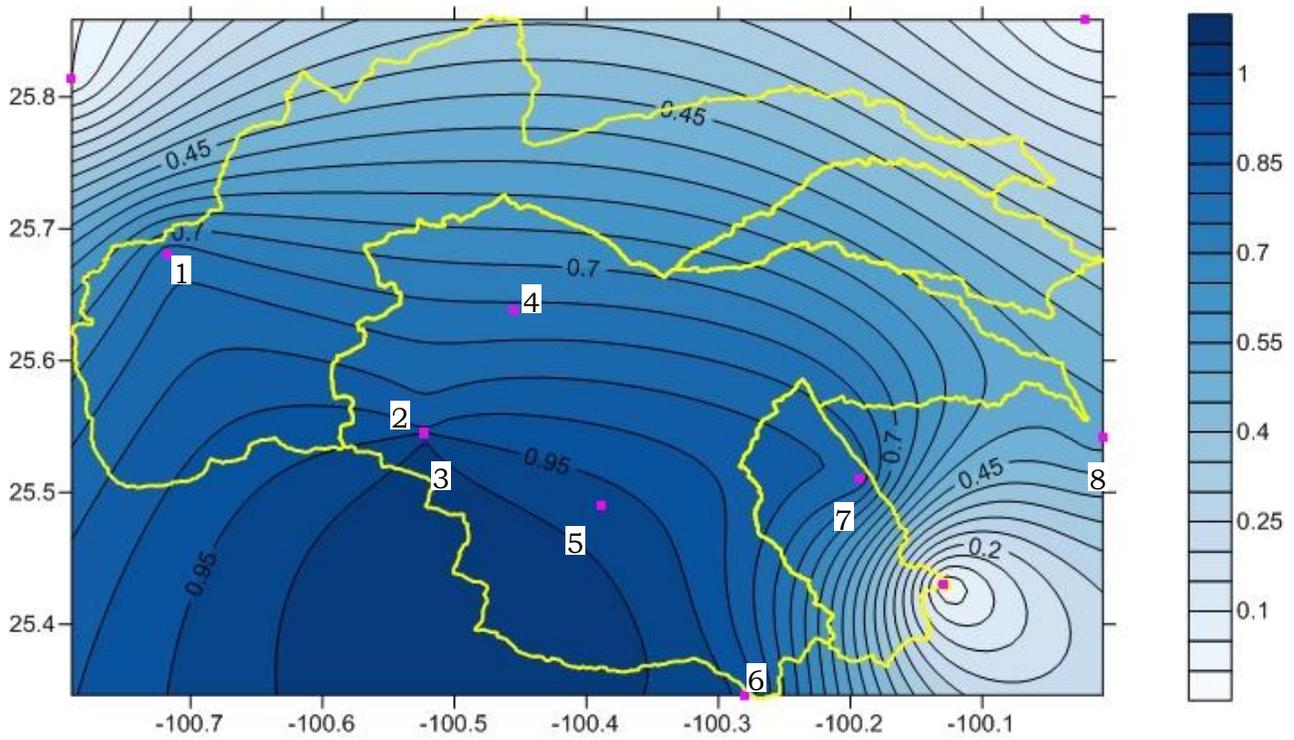


Figura 5. 12 Distribución general espacial de la lluvia con huracán

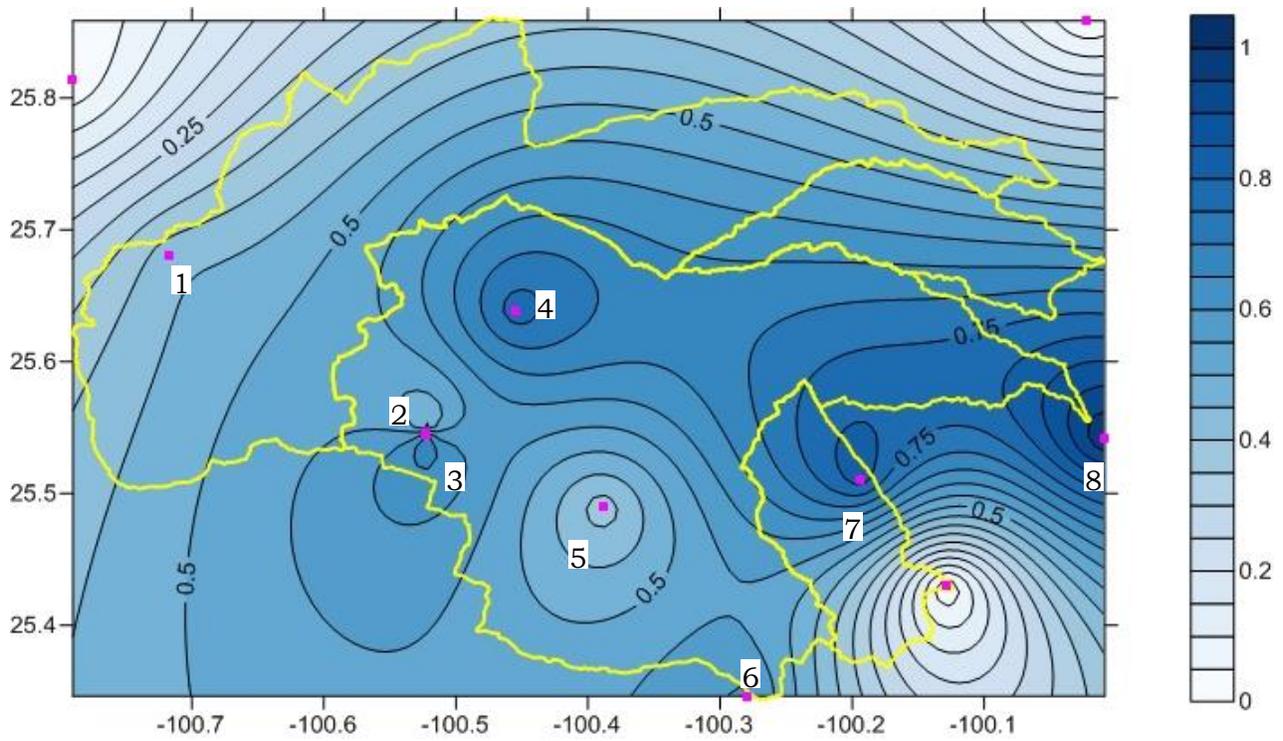


Figura 5. 13 Distribución general espacial de la lluvia sin huracán

Es necesario resaltar, que el comportamiento de la distribución espacial de la precipitación, es similar al presentado en el apartado 3.6 Distribución espacial de la lluvia, para cada periodo de retorno y para cada metodología.

Con los resultados anteriores, se puede observar claramente lo que representa la ocurrencia y no ocurrencia de un huracán en cuanto a la distribución espacial de la lluvia se refiere. Ello implicaría que en función del tamaño de una cuenca, bajo la influencia de ciclones tropicales, algunas hipótesis pierden su validez, ya que, la precipitación ciclónica abarca extensiones importantes con precipitación bastante uniforme.



## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

Con la finalidad de concluir de una manera concreta dicho trabajo, se mencionan a continuación las ideas principales obtenidas al término del mismo.

Primero que nada, se debe estar plenamente consciente que la principal intención de este trabajo fue proponer una nueva metodología, capaz de realizar un análisis integral de la variabilidad en la distribución espacial de la lluvia, para la estimación de láminas de precipitación utilizadas en infinidad de estudios hidrológicos y diseños hidráulicos en la ingeniería de hoy en día. Dicha intención fue posible gracias a la comparación entre cada uno de los métodos actualmente utilizados con la nueva metodología.

Antes que nada, cabe mencionar que en cada uno de los métodos se cuenta con un análisis con promedio aritmético y otro con el método de los polígonos de Thiessen; recordando que la diferencia entre estos, solamente es que en el método de los polígonos de Thiessen se considera el área de influencia de las estaciones climatológicas; realmente no existe gran diferencia en los resultados obtenidos con cada uno de estos, como se pudo apreciar, así que, será decisión propia del ingeniero cuál de estos dos procedimientos utilizar.

Como se muestra en el trabajo, cada uno de los métodos cuenta con hipótesis diferentes y con sus propias metodologías, que recordando, con el método tradicional, se supone que la precipitación máxima anual ocurre simultáneamente en toda la cuenca; con el método de los factores de reducción por área, se supone que las precipitaciones máximas anuales no ocurren de forma simultánea en toda la cuenca, lo que se busca es tomar en cuenta estas precipitaciones máximas anuales mediante la precipitación media diaria en la cuenca; el método de simultaneidad de eventos supone que la suma de la precipitación máxima anual de las estaciones consideradas, se distribuye de forma proporcional a la precipitación máxima anual en cada una de las estaciones. Es decir, donde se presenta la lluvia máxima anual mayor, el factor de simultaneidad será mayor y viceversa y por último, con la metodología propuesta se supone que la precipitación no se distribuye de forma simultánea en toda la cuenca, es decir, considera la distribución espacial de la lluvia.

Sin embargo, algunas de ellas requieren el manejo de una mayor cantidad de información o de cierto tipo de cálculos, como es el caso del método de los factores de reducción por área y el de simultaneidad de eventos, ya que con estos, es necesario contar con la precipitación diaria de todo el periodo de análisis, que en comparación con la metodología propuesta, esta sólo requiere contar con los días en los cuales se presentó el valor máximo de precipitación en cada una de las estaciones climatológicas, o comparando también con el método tradicional, en el cual sólo se necesitan los valores de precipitación máximos anuales en cada estación climatológica.

Del análisis realizado, se concluye que los resultados obtenidos se pueden agrupar en 3 grupos: el grupo 1 (valores mayores) compuesto por el método tradicional y el método de simultaneidad de eventos, el grupo 2 (valores intermedios), formado por el método de los factores de reducción por área, y el grupo 3 (valores menores) lo integran la muestra 5 y 6, correspondientes a la metodología propuesta.

Con esto, se puede dar una idea de cuál de los métodos es mejor utilizar, tomando en cuenta sus hipótesis, a la hora de buscar evitar la subestimación o sobreestimación en los diseños, sin que esto intervenga en la seguridad de los mismos.

También, se puede observar que cada una de las hipótesis en las que se basan los métodos, son coherentes y por lo tanto válidas, cumpliendo con comportamientos relativamente similares, así que depende de cada uno de los ingenieros inclinarse por alguno de ellos, de acuerdo con el tipo de análisis que estén realizando o el tiempo que se pueda invertir en ello.

La precipitación provocada por un huracán abarca grandes extensiones de tierra, mientras que la precipitación convectiva se da en áreas más pequeñas.; por ello, se consideró de interés analizar este comportamiento.

De esta forma, se realizó un análisis sin considerar la precipitación de tipo ciclónica, con la cual, algunas de las hipótesis podrían no tener ningún sentido en dicho estudio. De donde, se concluye que la distribución espacial de la precipitación es más uniforme al incluir los eventos de huracán, en caso contrario a la precipitación más localizada.

En cuanto a los valores de precipitación y factores de reducción obtenidos bajo esta suposición, se aprecia que, tanto en las tablas como en las gráficas presentadas, los valores numéricos proporcionados por las distintas metodologías son menores.

Así pues, con la realización de dicho trabajo, se llega a la conclusión de que con cualquiera de los métodos utilizados se pueden obtener láminas de lluvia similares, basadas en la probabilidad y estadística, que como se pudo observar, son capaces de analizar la distribución espacial de la precipitación en una cuenca, con la finalidad proporcionar valores de precipitación asociados a distintos periodos de retorno para su uso en infinidad de estudios hidrológicos y diseños hidráulicos.

Se logró cumplir con cada uno de los objetivos propuestos en cada uno de los capítulos de este trabajo, de una manera integral, con lo cual, finalmente, es posible brindar las siguientes recomendaciones:

Antes que nada, es necesario que en un futuro se realicen muchos más estudios y trabajos similares a este, donde se logre generalizar el análisis de la lluvia aún más de lo que se pudo lograr con este trabajo, con la finalidad de llegar así, a análisis mucho más rápidos, eficientes y cómodos para los ingenieros, y por ende, se cuente con mejores estudios hidrológicos y diseños hidráulicos útiles para toda la sociedad.

Finalmente, con lo comparado y observado en dicho trabajo, se recomienda realizar un análisis completo de la variabilidad de la distribución espacial de la lluvia, realizando el estudio por medio de la metodología propuesta con la cual, se pueden considerar cuatro hipótesis diferentes de una manera rápida y sencilla, sin la necesidad de contar con gran cantidad de información climatológica.

Posteriormente, en función de las características de la zona de estudio (información topográfica, hidrográfica, climatológica, social y de hechos históricos) seleccionar cual hipótesis es la más conveniente para el estudio en cuestión.



## 7. REFERENCIAS

---

### BIBLIOGRÁFICAS

1. Aparicio, J. (2010). Fundamentos de hidrología de superficie. Limusa, México, 303 pp.
2. Campos, D. F. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
3. CENAPRED (2001). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México.
4. Chow, V. T., Maidment D. R. y Mays L. W. (1988). Hidrología Aplicada. Mc Graw Hill.
5. Domínguez, R. y Franco, C. (2002). Análisis regional para la obtención de precipitaciones de diseño asociadas a duraciones menores de 2 horas. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
6. Escalante, C. y Reyes, L. (2002). Técnicas estadísticas en hidrología. Facultad de Ingeniería, UNAM.
7. Estévez, J., García, A. y Ayoso, J. (2010). Estimation of areal reduction factors in the province of Córdoba (Southern Spain). Memorias del XIV International Congress on Project Engineering. Madrid España.
8. Fuentes, O., Franco, V., De Luna, F., Aragón, J., Vélez, L. y Morales, H. (2014). Caracterización fluvial e hidráulica de las inundaciones en México. Instituto de Ingeniería, UNAM.
9. Garcés, A. (2008). Estimación de tormentas de diseño considerando la variación de la distribución espacial de la lluvia. Aplicación al sistema principal de drenaje de la zona metropolitana del valle de México. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM.
10. González., S. (2012). Estimación de factores de reducción por área. Aplicación a la cuenca del río Pánuco. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM.

11. Jiménez, M. (1997) Manual de operación de los programas AX.EXE y CARACHID.EXE (para hidrología), México, CENAPRED.
12. Lozano, D., Ramírez, A., Bremer, M., Reyes, C., Pérez, X., Vela, P. Yopez, F., Rodríguez, M., Rivera, L., Jurado, D., Salazar, M., Calatayud, X. y Arteaga, A. (2011). Estudios de impacto a lo largo del río Santa Catarina por el huracán Alex. TEC de Monterrey.
13. Palacios, S., (2013). Tormentas de diseño en el río Grijalva. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
14. Springall, R., (1970). Hidrología (Primera parte). México, Instituto de Ingeniería, UNAM.
15. Tipacamú, G., Gómez, F. y Domínguez, R. (1992). Determinación de factores de reducción por área para el cálculo de la precipitación media de una tormenta de diseño. Aplicación a dos cuencas del río Grijalva, XII Congreso Nacional de Hidráulica, México.
16. Barón, J. y Téllez, F. Apuntes de Bioestadística
17. Willems P. y Berlamont J. (2002). Accounting for the spatial rainfall variability in urban modelling applications. *Water Science and Technology*, 45 (2), 105-112.

## ELECTRÓNICAS

1. RE1. <http://www.cyclocane.com/es/>
2. RE2. [www.dartmouth.edu/~floods](http://www.dartmouth.edu/~floods)
3. RE3. <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2013/09/17/918932>
4. RE4. [http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n\\_Gilbert](http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Gilbert)
5. RE5. [http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n\\_Emily\\_\(2005\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Emily_(2005))
6. RE6. [http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n\\_Alex\\_%282010%29](http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Alex_%282010%29)
7. RE7. <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2013/09/17/918932>
8. RE8. [http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n\\_Gilbert](http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Gilbert)
9. RE9. [http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n\\_Emily\\_\(2005\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Emily_(2005))
10. RE10. [http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n\\_Alex\\_%282010%29](http://es.wikipedia.org/wiki/Hurac%C3%A1n_Alex_%282010%29)
11. RE11.  
<http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/radarmeteorologico.html>
12. RE12.  
<http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/1esobiologia/1quincena5/paginas/satelites.htm>
13. RE13. [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/sat\\_mete.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad3/sat_mete.htm)
14. RE14. <http://cenca.imta.mx/pdf/PrincipiosyFundamentosdeHidrologiaSuperficial.pdf>
15. RE15. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25783/39418>
16. RE16. [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5192916](http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5192916)