

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

---



**EVALUACIÓN DE LAS IMPLICACIONES DEL CAMBIO  
CLIMÁTICO EN LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-  
DURACIÓN-FRECUENCIA EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA**

**POR:**

**ING. ALAN FERNANDO PEÑA BALDERAS**

**TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. HUMBERTO SILVA HIDALGO**

**CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO**

**DICIEMBRE DE 2019**



Evaluación de las implicaciones del cambio climático en la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en el Estado de Chihuahua. Tesis presentada por Alan Fernando Peña Balderas como requisito parcial para obtener el grado Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:

**M.I. Javier González Cantú**  
Director de la Facultad de Ingeniería

**Dr. Alejandro Villalobos Aragón**  
Secretario de Investigación y Posgrado

**M.I. Miguel Ángel González Nuñez**  
Coordinador(a) Académico

**Dr. Humberto Silva Hidalgo**  
Director(a) de Tesis

**Diciembre 2019**

Fecha

Comité:

**Dr. Humberto Silva Hidalgo**  
**Dra. Guadalupe Irma Graciela Estrada Gutiérrez**  
**Dr. Adán Pinales Munguía**  
**Dr. Juan Carlos Burillo Montúfar**

© Derechos Reservados  
**Ing. Alan Fernando Peña  
Balderas**  
Ave 7ª Norte #715 Sector Norte  
Delicias, Chih. México

Diciembre 2019



**ING. ALÁN FERNANDO PEÑA BALDERAS**  
Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Humberto Silva Hidalgo** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“EVALUACIÓN DE LAS IMPLICACIONES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CONSTRUCCIÓN DE CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA”**.

## **ÍNDICE**

**Dedicatoria**

**Agradecimientos**

**Resumen**

**Índice de contenido**

**Índice de figuras**

**Índice de tablas**

### **1. Introducción**

1.1 Planteamiento del problema

1.2 Alcances y objetivos

1.3 Hipótesis

1.4 Justificación

### **2. Base de datos de precipitación máxima de estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua**

2.1 Inventario de información

2.2 Análisis gráfico de series de tiempo de estaciones climatológicas

### **3. Marco teórico**

3.1 Metodología que se plantea para identificar evidencias de cambio climático en registros de precipitación

3.2 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHIHUAHUA

**4. Análisis para identificar evidencias de cambio climático en las estaciones climatológicas**

- 4.1 Análisis de normalidad
- 4.2 Análisis de homogeneidad
- 4.3 Identificación de punto de inflexión temporal y asociada a posible presencia de cambio climático en las series de tiempo

**5. Construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua**

- 5.1 Ajuste de los datos de precipitación máxima a funciones de probabilidad mediante el software Ax
- 5.2 Construcción de curvas intensidad-duración-frecuencia para precipitaciones máximas mediante las fórmulas de Cheng Lung Chen y F.C. Bell
- 5.3 Análisis de existencia de cambio en la intensidad de las tormentas en las series de tiempo

**6. Conclusiones y recomendaciones**

- 6.1 Conclusiones
- 6.2 Recomendaciones

**Bibliografía**

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
*"Naturam subiecit aliis"*

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UACH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih., México. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00  
[www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)

## **Dedicatoria**

A:

### ***Mi madre Martha Peña***

*Por darme la vida, por quererme y creer en mí y siempre apoyarme. Gracias por el apoyo en todo momento, por los consejos y valores que han hecho que sea una persona de bien.*

### ***Mis hermanos Miguel y Perla Peña***

*Por estar conmigo y apoyarme siempre en todos los aspectos, los quiero. Gracias por impulsarme a seguir adelante y nunca desistir en su apoyo a pesar de los malos momentos que se han presentado.*

### ***Mis amigos***

*Yair Rodríguez, Yamilé Rodríguez, Sergio “Jamón” Alvarado, César “Bambucha” Escajeda, Abigail García, Alexa Melgar, América Tarango, Alfredo Mota, Mauricio Martínez y Vicente Vargas, por apoyarme y darme ánimos a pesar de las adversidades.*

*Finalmente quiero agradecer a los maestros, en especial al Dr. Humberto Silva y la Dra. Guadalupe Estrada, así como el Dr. Adán Pinales y el Dr. Juan Burillo, quienes con su enseñanza marcaron una etapa de mi vida durante el estudio de mi posgrado, así como su apoyo en la elaboración de esta investigación.*

## **Agradecimientos**

Gracias a mi familia por el apoyo tan grande que me dieron para terminar mi maestría a pesar de las dificultades que se presentaron, sin ustedes esto y los logros que he conseguido no hubieran sido posibles.

Agradezco especialmente a mi mamá, por fungir como padre y madre y enseñarme buenos valores para que sea una persona de bien y a mi hermana por ayudarme a superar los problemas que surgieron.

Mi sincera admiración a la Dra. Guadalupe Estrada, Dr. Adán Pinales y Dr. Juan Burillo por fungir como asesores de esta investigación y por sus enseñanzas a lo largo de la maestría.

Quiero dar las gracias a mi director de tesis, el Dr. Humberto Silva Hidalgo por su asesoramiento y apoyo en la realización de esta investigación, y por confiar en mí desde la realización de la tesis de licenciatura, así como también por sus enseñanzas a lo largo de la maestría.

Gracias a CONACYT por brindarme una beca para continuar con mis estudios de posgrado.

Gracias a Fundación Telmex por brindarme una beca, ya que, así como a mí, apoya a cientos de estudiantes universitarios de México y con ello podemos cumplir nuestras metas.

Y finalmente quiero agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua por haberme brindado mis estudios de licenciatura, así como del posgrado, ya que sin los conocimientos brindados no sería lo que soy hoy en día.

## Resumen

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son una herramienta que relaciona la intensidad, la duración y la frecuencia (probabilidad de ocurrencia) de las lluvias. Se emplean para la obtención de caudales de diseño para el dimensionamiento de obras hidráulicas. Si un diseño de las curvas está subestimado o sobreestimado se pueden tener consecuencias económicas, así como sociales. Para la construcción de curvas existen diferentes metodologías que se basan en información de estaciones meteorológicas, la selección adecuada va depender de la información disponible.

Debido a que las curvas IDF representan las características más relevantes de las tormentas que ocurren en una zona, es importante conocer la influencia del cambio climático en la lluvia. El objetivo principal de esta investigación fue examinar las implicaciones que puede tener el cambio climático en la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia en el Estado de Chihuahua, ya que de acuerdo a Modelos de Circulación General (MCG) se ha concluido que el cambio climático en México provocará incrementos moderados en la temperatura de superficie y modificaciones sustanciales en la precipitación.

En la construcción de curvas IDF es necesario contar con registros históricos de lluvias máximas, obtenidos de pluviógrafos y pluviómetros. En total se recopilaron 35 estaciones con datos de precipitación máxima en 24 horas y 22 con datos en 1 hora. De las estaciones recopiladas se analizaron solamente las que contaran con registro de largo plazo, resultando 35 estaciones con registros máximos en 24 horas y solamente 3 con registros máximos en 1 hora.

La metodología planteada para identificar evidencias de cambio climático en registros de precipitación consiste en realizar pruebas de normalidad y homogeneidad a los registros históricos de las estaciones para analizar si se presenta en algunas estaciones la posibilidad de dos poblaciones en la serie de tiempo que muestre una posible evidencia de cambio climático. Para poder identificar esta evidencia se debe encontrar una tendencia a la alta del parámetro

de la precipitación que se manifieste en un incremento de la intensidad de las tormentas. Después del análisis se procedió a ajustar los datos de precipitación a funciones de distribución de probabilidad mediante el software Ax y posteriormente construir las curvas IDF mediante la fórmula de Cheng Lung Chen y F. C. Bell.

Al realizar el análisis de las estaciones, resultó que, de las 35 estaciones con registros máximos en 24 horas, solo 11 presentaron no homogeneidad, que se puede asociar a la presencia de dos poblaciones y que en 15 de las 38 estaciones se encontró que la serie de tiempo presenta tendencia a incrementarse, aunque solo en 4 se pudo observar persistencia.

Se analizó una estación demostrando lo que podría suceder en las curvas IDF en las estaciones que muestran tendencia a la alta en la precipitación máxima en 24 horas, en la máxima en 1 hora o en ambas, y las que presentan un comportamiento no homogéneo con aumento en el periodo más actual, encontrando un ligero incremento en las precipitaciones máximas. Respecto a este análisis se puede decir que en general, en las series de tiempo analizadas, no se muestra evidencia contundente de cambio climático en los registros máximos de las estaciones del Estado de Chihuahua, sin embargo, en algunas estaciones la tendencia es a la alta, lo que provoca un cambio en las curvas que debería incorporarse al diseño hidráulico.



## Índice de Contenido

Dedicatoria.....	V
Agradecimientos .....	VI
Resumen .....	VII
Índice de Contenido .....	IX
Índice de Figuras .....	XII
Índice de Tablas .....	XIV
<b>1. Introducción .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1. Planteamiento del problema .....</b>	<b>19</b>
<b>1.2. Alcances y objetivos.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.1. Objetivo general.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.2. Objetivos particulares .....</b>	<b>20</b>
<b>1.3. Hipótesis .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4. Justificación .....</b>	<b>21</b>
<b>2. Base de datos de precipitación máxima de estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Inventario de información .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1.1. Estaciones con datos de precipitación máxima en 24 horas .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1.2. Estaciones con datos de precipitación máxima en 1 hora .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2. Análisis gráfico de series de tiempo de estaciones climatológicas..</b>	<b>24</b>
<b>3. Marco teórico .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. Metodología que se plantea para identificar evidencias de cambio climático en registros de precipitación.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1.1. Pruebas de normalidad .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.1.1. Kolmogorov-Smirnov.....</b>	<b>30</b>



3.1.1.2.	Ryan-Joiner .....	32
3.1.1.3.	D' Agostino .....	33
3.1.1.4.	Coeficiente de correlación de Pearson .....	34
3.1.2.	Pruebas de homogeneidad .....	36
3.1.2.1.	Pruebas paramétricas .....	37
3.1.2.1.1.	t de Student.....	37
3.1.2.1.2.	Cramer.....	39
3.1.2.2.	Pruebas no paramétricas .....	40
3.1.2.2.1.	Secuencias.....	40
3.1.2.2.2.	Helmert.....	41
3.1.3.	Pruebas de consistencia, tendencia y persistencia .....	42
3.2.	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) .....	45
3.2.1.	Ajuste a datos de precipitación mediante funciones de distribución de probabilidad.....	46
3.2.2.	Fórmulas de Cheng Lung Chen y F.C. Bell .....	49
4.	Análisis para identificar evidencias de cambio climático en las estaciones climatológicas .....	52
4.1.	Análisis de normalidad .....	54
4.2.	Análisis de homogeneidad.....	58
4.3.	Identificación de punto de inflexión temporal y asociada a posible presencia de cambio climático en las series de tiempo .....	62
5.	Construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua.....	73
5.1.	Ajuste de los datos de precipitación máxima a funciones de probabilidad mediante el software Ax.....	73



<b>5.2. Construcción de curvas intensidad-duración-frecuencia para precipitaciones máximas mediante las fórmulas de Cheng Lung Chen y F.C. Bell.....</b>	<b>77</b>
<b>5.3. Análisis de existencia de cambio en la intensidad de las tormentas en las series de tiempo.....</b>	<b>83</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>87</b>
<b>6.1. Conclusiones.....</b>	<b>87</b>
<b>6.2. Recomendaciones.....</b>	<b>88</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>89</b>



## Índice de Figuras

Figura 2.1. Estaciones climatológicas con datos de precipitación máxima en 1 y 24 horas del Estado de Chihuahua. ....	23
Figura 2.2. Análisis gráfico de la estación climatológica Abraham González. ....	25
Figura 3.1. Metodología que se plantea para identificar evidencias de cambio climático en registros de precipitación.....	28
Figura 3.2. Prueba del coeficiente de correlación serial según Anderson para persistencia (Campos, 1984).....	45
Figura 4.1. Estaciones climatológicas analizadas con precipitación máxima en 1 y 24 horas del Estado de Chihuahua. ....	53
Figura 4.2. Prueba del coeficiente de correlación de Pearson aplicada en la estación Abraham González. ....	56
Figura 4.3. Análisis gráfico de la estación Abraham González.....	64
Figura 4.4. Análisis gráfico de la estación Casas Grandes. ....	65
Figura 4.5. Análisis gráfico de la estación Bachíniva. ....	66
Figura 4.6. Análisis gráfico de la estación El Sitio. ....	67
Figura 4.7. Análisis gráfico de la estación Parrita.....	68
Figura 4.8. Análisis gráfico de la estación Camargo. ....	69
Figura 4.9. Análisis gráfico de la estación Cd. Juárez.....	70
Figura 4.10. Análisis gráfico de la estación Fco. I Madero. ....	71
Figura 4.11. Análisis gráfico de la estación Moris. ....	72
Figura 5.1. Captura de datos de la estación Chihuahua mediante software Ax. ...	74
Figura 5.2. Resumen de los errores estándar de las funciones de distribución de probabilidad para la estación Chihuahua. ....	75
Figura 5.3. Extrapolación de la información de lluvia de la estación Chihuahua para distintos periodos de retorno $T_r$ .....	75



Figura 5.4. Datos calculados mediante la función gamma de tres parámetros del método de máxima verosimilitud para la estación Chihuahua.....	76
Figura 5.5. Comparación de ajuste realizado y datos originales de la estación Chihuahua.....	77
Figura 5.6. Serie de tiempo de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chihuahua.....	79
Figura 5.7. Serie de tiempo de precipitación máxima en 1 hora de la estación Chihuahua.....	80
Figura 5.8. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua con el registro completo e incompleto para un periodo de retorno de 25 años. ....	82
Figura 5.9. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua con el registro completo e incompleto para un periodo de retorno de 100 años. ...	82
Figura 5.10. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua con el registro completo e incompleto para un periodo de retorno de 500 años. ...	83
Figura 5.11. Estaciones climatológicas con posible afectación a curvas Intensidad-Duración-Frecuencia del Estado de Chihuahua.....	86



## Índice de Tablas

Tabla 2.1. Estaciones con datos de precipitación máxima anual en 24 horas. ....	22
Tabla 2.2. Estaciones con datos de precipitación máxima anual en 1 hora. ....	24
Tabla 3.1. Valores de Dcr para distintos niveles de significancia. ....	32
Tabla 3.2. Valor crítico de la prueba del coeficiente de correlación de Pearson. ...	35
Tabla 3.3. Valores de t para la distribución de t de Student. ....	39
Tabla 3.4. Rango del número de secuencias (u) para un registro homogéneo. ....	41
Tabla 3.5. Funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología. ....	48
Tabla 4.1. Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov aplicada en la estación Abraham González. ....	54
Tabla 4.2. Resultados de la prueba de Ryan-Joiner aplicada en la estación Abraham González. ....	54
Tabla 4.3. Resultados de la prueba de D' Agostino aplicada en la estación Abraham González. ....	55
Tabla 4.4. Resultados de la prueba del coeficiente de correlación de Pearson aplicada en la estación Abraham González. ....	55
Tabla 3.5. Resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 1 hora. ....	56
Tabla 4.6. Resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 24 horas. ....	57
Tabla 4.7. Resultados de la prueba de homogeneidad de Helmer aplicada en la estación Abraham González. ....	58
Tabla 4.8. Resultados de la prueba de homogeneidad de las Secuencias aplicada en la estación Abraham González. ....	59
Tabla 4.9. Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 1 hora. ....	60



Tabla 4.10. Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 24 horas. ....	61
Tabla 4.11. Clasificación de estaciones climatológicas de acuerdo a los resultados de las pruebas de homogeneidad. ....	63
Tabla 4.12. Estaciones climatológicas del tipo I. ....	63
Tabla 4.13. Estaciones climatológicas del tipo II. ....	65
Tabla 4.14. Estaciones climatológicas del tipo III. ....	66
Tabla 4.15. Estaciones climatológicas del tipo IV. ....	67
Tabla 4.16. Estaciones climatológicas del tipo V. ....	68
Tabla 4.17. Estaciones climatológicas del tipo VI. ....	69
Tabla 4.18. Estaciones climatológicas del tipo VII. ....	70
Tabla 4.19. Estaciones climatológicas del tipo VIII. ....	71
Tabla 4.20. Estaciones climatológicas del tipo IX. ....	72
Tabla 5.1. Resultados de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua usando el registro completo. ....	81
Tabla 5.2. Resultados de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua usando el registro incompleto. ....	81
Tabla 5.3. Evaluación de las estaciones que podrían tener efecto en curvas Intensidad-Duración-Frecuencia por posible cambio climático. ....	85



## 1. Introducción

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son una herramienta para relacionar de manera matemática la intensidad con la duración y la frecuencia de las lluvias categorizándolas mediante periodos de retorno (inverso de la probabilidad de ocurrencia), es decir, el intervalo de recurrencia de una tormenta.

Estas curvas, proporcionan parámetros muy importantes para el correcto diseño de obras hidráulicas. Se construyen a partir de registros de precipitación obtenidos de pluviógrafos y pluviómetros, así como de estaciones meteorológicas automáticas (EMAS). El pluviógrafo produce un registro continuo de precipitación obteniendo datos de precipitación máxima en un periodo de una hora, de 24 horas o cualquier otro intervalo de tiempo, en tanto que el pluviómetro registra de manera discreta la precipitación ocurrida en 24 horas (Aparicio, 2005).

En la construcción de las curvas IDF es necesario contar con registros históricos de lluvias máximas, para ello es imprescindible que los datos sean confiables, por lo que estos deben cumplir con criterios de probabilidad como homogeneidad y consistencia. Una serie de datos es llamada homogénea si es una muestra estadísticamente representativa de una única población. Si la serie es no homogénea por causas antropogénicas, se le debe hacer ajustes o correcciones de manera que las estimaciones de la muestra sean válidas para parámetros aplicados a una población. En caso contrario, la no homogeneidad puede ser representativa de alguna variación natural, por ejemplo, cambio climático.

Para poder realizar las pruebas de homogeneidad se deben realizar primeramente pruebas de normalidad, como Kolmogorov-Smirnov (Boström y Tomberg, 2004), Ryan-Joiner (Thomas *et al.*, 1976), D' Agostino (D'Agostino *et al.*, 1990) y Coeficiente de Correlación de Pearson (Helsel y Hirsch, 2002), para determinar el tipo de prueba estadística a aplicar, paramétrica o no paramétrica (Álvarez y Montaña, 2017).



La consistencia se analiza con la técnica de la curva masa doble, elaborando una comparación entre la serie de estudio y una serie patrón que no presente ningún problema de homogeneidad o cambio (Lobo, 2004). En cuanto a la tendencia y la persistencia suelen analizarse mediante gráficas de las series de tiempo, analizando si existe una tendencia hacia un patrón o si existe un equilibrio en los datos. Una vez evaluados estos criterios, los registros de precipitación se proceden a ajustar a funciones de distribución de probabilidad como son: normal, lognormal, Gumbel, doble Gumbel, exponencial y gamma (Pizarro *et al.*, 2013).

Existen diversas metodologías para la construcción de curvas IDF, como el método intensidad-periodo de retorno, regresión lineal múltiple, Chow, Témez, etc. Sin embargo, la escasez de registros de lluvia exige utilizar fórmulas como la de Cheng Lung Chen y la de F. C. Bell (Pereyra-Díaz *et al.*, 2005). Este último desarrolló una ecuación generalizada de intensidad-duración-frecuencia, combinando las razones; lámina de lluvia-frecuencia con la lámina de lluvia-duración, mientras que Chen relacionó los tres parámetros, intensidad-duración-periodo de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas empleando factores relacionados con lluvias acumuladas en distintas duraciones, y considerando el clima de la zona a estudiar (Pereyra-Díaz *et al.*, 2005).

Las curvas IDF, representan las características más relevantes de las tormentas que ocurren en una zona, por los efectos probables del cambio climático (Acevedo y Proveda, 2011). Las proyecciones de los modelos climáticos han sugerido que habrá una mayor intensidad de precipitaciones y con ello un efecto sobre la construcción de las curvas IDF -aunque con variaciones regionales- (Groisman, 2005). En países como en Estados Unidos, Inglaterra y China, el análisis probabilístico de avenidas máximas comenzó a estudiarse a mediados del siglo pasado utilizando funciones de distribución de probabilidad de dos y tres parámetros de ajuste (Campos, 2015). Estados Unidos maneja el modelo Log-Pearson tipo III, Inglaterra actualmente emplea logística generalizada y China aplica Pearson. Cada uno de estos países emplea funciones de probabilidad diferente debido a que se



han adaptado a la información con la que cuentan, con el fin de obtener el mejor ajuste en el diseño de curvas (Campos, 2010).

Cabe mencionar que Grum (2006) en Estados Unidos, utilizó los resultados de simulación del modelo climático regional de área limitada de alta resolución, creado en Hamburgo (HIRHAM), para evaluar posibles cambios en la amplitud y la frecuencia máxima de eventos de una hora. Según sus resultados, el periodo de retorno para una intensidad máxima en una hora en el clima de 1979 a 1996, se reducirá a la mitad aproximadamente en el periodo del 2071 a 2100, según muestran las predicciones.

Mailhot (2007) estudió la modificación de los eventos de precipitación extrema, empleando el modelo climático regional canadiense (CRCM) con simulaciones de control (1961-1990) y futura (2041-2070) en una región de Canadá, al sur de Quebec. Al comparar los registros de precipitación disponibles con los datos del CRCM encontró que son coherentes con los datos observados teniendo en cuenta la diferencia entre las escalas espaciales comparadas. El análisis de correlación espacial entre la serie simulada de control y la futura sugieren que, para una determinada duración, las correlaciones espaciales disminuirán en el clima futuro los eventos de precipitación extrema que puede ser el resultado de más sistemas meteorológicos convectivos más localizados.

El cambio climático ha sido analizado en México por Magaña *et al.* (2015) mediante Modelos de Circulación General (MCG) y de los mismos se obtuvo que se experimentarán incrementos moderados en la temperatura de superficie en la mayoría de las regiones de este país, así como modificaciones sustanciales en la precipitación. La variación de estos cambios es sumamente difícil de predecir, pero sí es posible decir que tendrán un gran impacto en la temporada de lluvias en México. Por tanto, se espera que habrá un cambio en las curvas IDF para el diseño de obras hidráulicas, que debe ser considerado para evitar problemas en la construcción de infraestructura hidráulica. Estos diseños se basan en la consideración de la probabilidad de eventos extremos, la estimación del riesgo se



apoya en ver hacia el futuro las probabilidades de falla. Si el cambio climático trae como consecuencia el incremento o disminución de estas probabilidades se presentará un riesgo de falla incluso en las obras bien diseñadas (Mesa, 2006).

Se espera que el cambio climático reduzca en promedio 15.2 % la precipitación media anual de México (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012), cifra importante en una nación que enfrenta en buena parte de su territorio condiciones de escasez, y de no adoptarse medidas importantes, no sólo habrá una implicación en el diseño de curvas IDF, sino también un riesgo en el abastecimiento de agua potable y de producción de alimentos. Uno de los Estados más afectados en el norte del país, puede llegar a ser Chihuahua y que al presentar condiciones áridas representa una zona de estrés hídrico, que muestra una variabilidad en la precipitación mes con mes con sequías e inundaciones. Se espera que la precipitación media anual de este Estado disminuirá un 21.3 % según lo señalan Martínez-Austria y Patiño-Gómez (2012).

### **1.1. Planteamiento del problema**

El problema que se presenta debido al cambio climático es que actualmente no se conoce la influencia que éste tendrá sobre las curvas IDF en el Estado de Chihuahua, ya sea que afecte o no tenga un impacto significativo en su construcción.

Las curvas IDF pueden tener consecuencias en la construcción de una obra hidráulica, al dimensionarla sin considerar la variabilidad del cambio climático en su construcción. Se espera que el cambio climático tenga efectos sobre ellas debido a que existe una gran variabilidad en las lluvias en el Estado de Chihuahua, provocando sequías e inundaciones, lo que sugiere que se debe tener especial cuidado al diseñar obras hidráulicas para contener y controlar los escurrimientos torrenciales.

Por ello, la finalidad de esta investigación es evaluar los efectos del cambio climático que afecten el diseño y comportamiento de las curvas IDF de precipitaciones



máximas en el Estado de Chihuahua empleadas para el diseño de obras hidráulicas y así evitar consecuencias sociales y económicas debido a las fallas que se pudieran presentar en ellas.

## **1.2. Alcances y objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

- Examinar las implicaciones que puede tener el cambio climático en la construcción de curvas intensidad-duración-frecuencia en el Estado de Chihuahua.

### **1.2.2. Objetivos particulares**

- Recopilar y organizar series de tiempo de información de precipitación máxima diaria y horaria obtenida de estaciones climatológicas y automatizadas.
- Realizar pruebas de homogeneidad, consistencia, significancia, tendencia y persistencia a los datos de lluvia.
- Verificar por métodos estadísticos, si se observa evidencia de cambio climático, si hay alguna tendencia o persistencia en los datos de lluvia.
- Aplicar un ajuste a los datos de precipitación recabados mediante funciones de distribución de probabilidad de manera convencional.
- Identificar punto de inflexión temporal y ajustar progresivamente los datos de precipitación a funciones de distribución de probabilidad para verificar si hay cambio climático franco o tendencia y persistencia en las series de tiempo.
- Comparar los ajustes estadísticos aplicados a la información de precipitación.
- Construir curvas intensidad-duración-frecuencia para estaciones del Estado de Chihuahua mediante las fórmulas de Cheng Lung Chen y F. C. Bell.
- Analizar si existe cambio en la intensidad de las tormentas en la serie de tiempo.
- Identificar si existe una variación debido al cambio climático en las curvas intensidad-duración-frecuencia construidas.



- Generar recomendaciones en la evaluación del impacto del cambio climático en el diseño de curvas intensidad-duración-frecuencia.

### **1.3. Hipótesis**

El cambio climático afecta a la construcción de curvas intensidad-duración-frecuencia en el Estado de Chihuahua.

### **1.4. Justificación**

En la presente investigación se evalúan las implicaciones del cambio climático en la construcción de curvas IDF mediante las metodologías de Cheng Lung Chen y F. C. Bell, en el Estado de Chihuahua, así como la verificación de su comportamiento y las consecuencias que conllevan en una zona árida y en el diseño de las obras hidráulicas para evitar consecuencias en caso de que la obra fallara debido a un mal dimensionamiento causado por cálculo de gastos máximos que no consideraren el impacto del cambio climático.

## **2. Base de datos de precipitación máxima de estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua**

### **2.1. Inventario de información**

Los registros de precipitación máxima en 24 horas y en 1 hora se recopilaron de instituciones en el Estado de Chihuahua, principalmente de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) así como de la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS). Los datos de precipitación obtenidos son de un periodo de 1960-2018 (precipitación máxima en 24 horas) y de un periodo más corto para la información de precipitación máxima en 1 hora. La información de las estaciones se dividió en dos grupos, estaciones con información en 24 horas y con información en 1 hora, considerando que algunas estaciones tienen información en ambos intervalos de tiempo.



### 2.1.1. Estaciones con datos de precipitación máxima en 24 horas

Las estaciones disponibles con información de precipitación máxima en 24 horas se muestran con sus coordenadas en la Tabla 2.1 y su ubicación en el Estado de Chihuahua se presenta en la Figura 2.1 (se muestran las estaciones con datos de precipitación máxima en 1 y 24 horas).

Tabla 2.1. Estaciones con datos de precipitación máxima anual en 24 horas.

Estación	Longitud (X)	Latitud (Y)
ABRAHAM GONZALEZ (CNA)	-107.4714	28.4861
ASCENSION (SMN)	-107.9964	31.0928
BACHINIVA (CNA)	-107.2636	28.7763
BISMARCK (CNA)	-107.5670	31.2333
CAMARGO (CNA)	-105.1720	27.6865
CASAS GRANDES (CNA)	-107.9315	30.3765
CD. JUAREZ (CNA)	-106.4199	31.7238
CHIHUAHUA (CNA)	-106.0307	28.6708
COLINA (CNA)	-105.3717	27.5776
COYAME (SMN)	-105.2581	29.4592
CREEL (CNA)	-107.6345	27.7558
CUAUHTEMOC (CNA)	-106.8392	28.3967
DELICIAS (CNA)	-105.4672	28.1978
EL SITIO (SMN)	-106.2878	27.5706
EL TINTERO (CNA)	-107.4578	29.8472
FRANCISCO I. MADERO (CNA)	-105.6264	28.1630
GUACHOCHI (CFE)	-107.0700	26.8194
GUADALUPE Y CALVO (CNA)	-106.9939	26.0776
JIMENEZ (CNA)	-104.9144	27.1410
LAS LAJAS (CNA)	-106.9647	29.9429
LUIS L. LEON (CNA)	-105.2809	28.9842
MORIS (CNA)	-108.5221	28.1473
NOROGACHI (CFE)	-107.1256	27.2875
OJINAGA (CNA)	-104.4110	29.5652
PARRAL (CNA)	-105.6766	26.9187
PARRITA (SMN)	-106.4167	29.3667
PEÑITAS (CNA)	-108.0931	29.2517
SAMALAYUCA (SMN)	-106.4764	31.3425
TACUBAYA (SMN)	-104.5578	28.3233
TEMOSACHIC (CNA)	-107.8279	28.9550
TUBARES (CNA)	-107.9797	26.9425
URIQUE (CNA)	-107.9088	27.2219
VALLE DE ZARAGOZA (CNA)	-105.8073	27.4548
VILLA AHUMADA (SMN)	-106.5122	30.6186
VILLA CORONADO (SMN)	-105.1600	26.7386

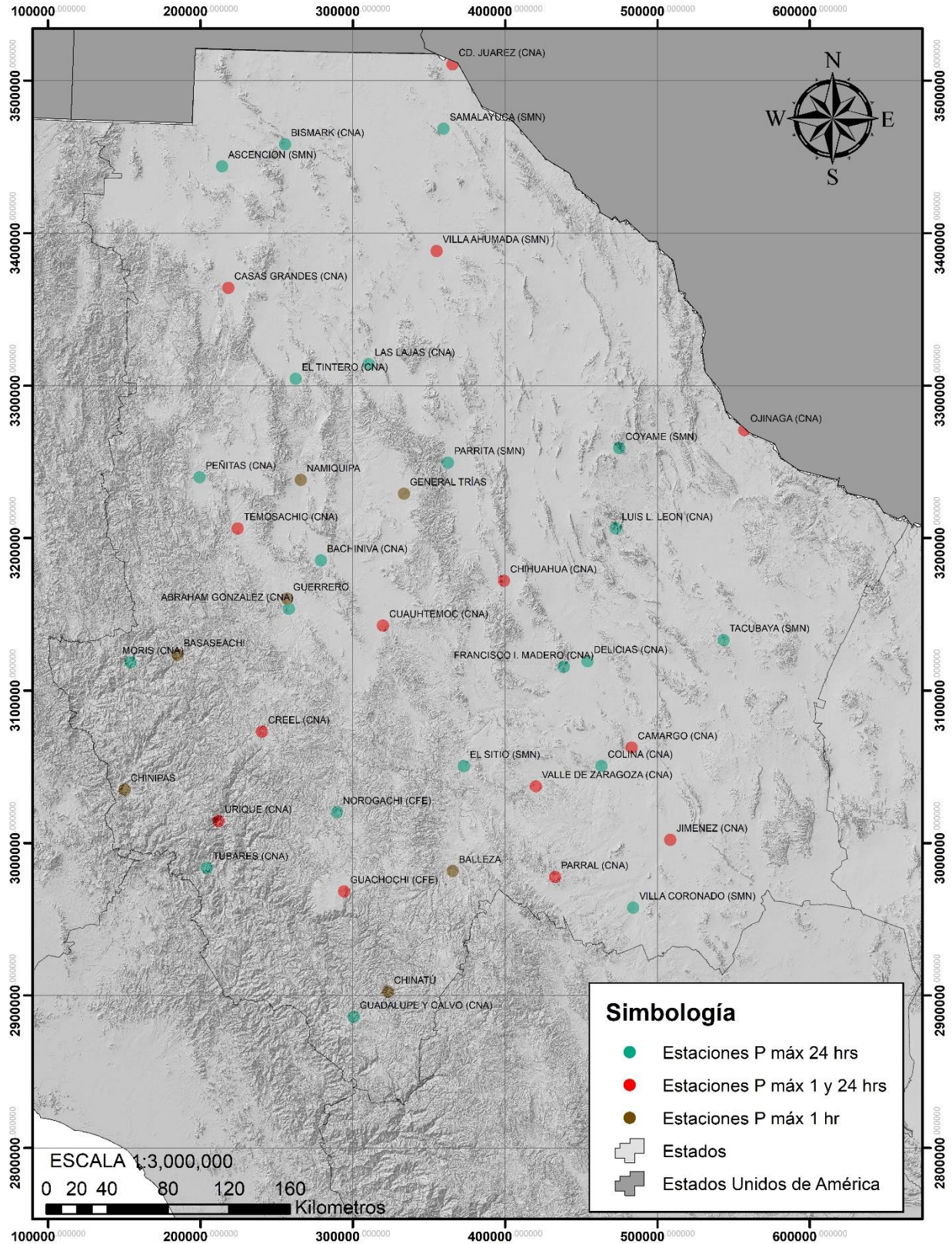


Figura 2.1. Estaciones climatológicas con datos de precipitación máxima en 1 y 24 horas del Estado de Chihuahua.



### 2.1.2. Estaciones con datos de precipitación máxima en 1 hora

Las estaciones con información de precipitación máxima en 1 hora se muestran con sus coordenadas en la Tabla 2.2 y se pueden apreciar en la Figura 2.1.

Tabla 2.2. Estaciones con datos de precipitación máxima anual en 1 hora.

Estación	Longitud (X)	Latitud (Y)
CHINATÚ	-106.7707	26.2295
CHINIPAS	-108.5363	27.3926
BALLEZA	-106.3539	26.9494
CAMARGO	-105.1720	27.6865
GUERRERO	-107.4842	28.5458
MADERA	108.1414	29.1900
NUEVO CASAS GRANDES	-107.9315	30.3765
TEMÓSACHIC	-107.8279	28.9550
VALLE DE ZARAGOZA	-105.8073	27.4548
JIMÉNEZ	-104.9144	27.1410
VILLA AHUMADA	-106.5122	30.6186
OJINAGA	-104.4110	29.5652
CREEL	-107.6345	27.7558
GENERAL TRÍAS	-106.7117	29.1800
NAMIQUIPA	-107.4092	29.2503
JUÁREZ	-106.4199	31.7238
CUAUHTÉMOC	-106.8392	28.3967
BASASEACHI	-108.2092	28.1990
URIQUE	-107.9088	27.2219
GUACHOCHI	-107.0700	26.8194
PARRAL	-105.6766	26.9187
CHIHUAHUA	-106.0307	28.6708

### 2.2. Análisis gráfico de series de tiempo de estaciones climatológicas

El análisis gráfico de las series de tiempo de estaciones climatológicas consiste en analizar el comportamiento de los parámetros de la misma; en este caso, el de la precipitación máxima en 1 y 24 horas. La figura para el análisis es una gráfica de precipitación máxima (mm) contra tiempo (año), en el cual se coloca, la serie de tiempo, la evolución promedio, la tendencia de la serie, su media y su periodo móvil. Cada uno de ellos se explica a continuación:



**Serie de tiempo:** Las series de tiempo consisten en los datos de algún parámetro climatológico, en este caso, precipitación máxima en 1 y 24 horas.

**Evolución promedio:** Línea que describe el comportamiento del promedio de la serie a través de los años.

**Tendencia:** Línea que describe el patrón de los datos de la serie.

**Media:** Promedio de la serie de tiempo.

**Periodo móvil:** Línea que describe la estacionalidad, a través de ella se conocen las variaciones o ciclos en la serie de tiempo.

En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de las propiedades anteriormente mencionadas con la precipitación máxima anual en 24 horas de la estación Abraham González.

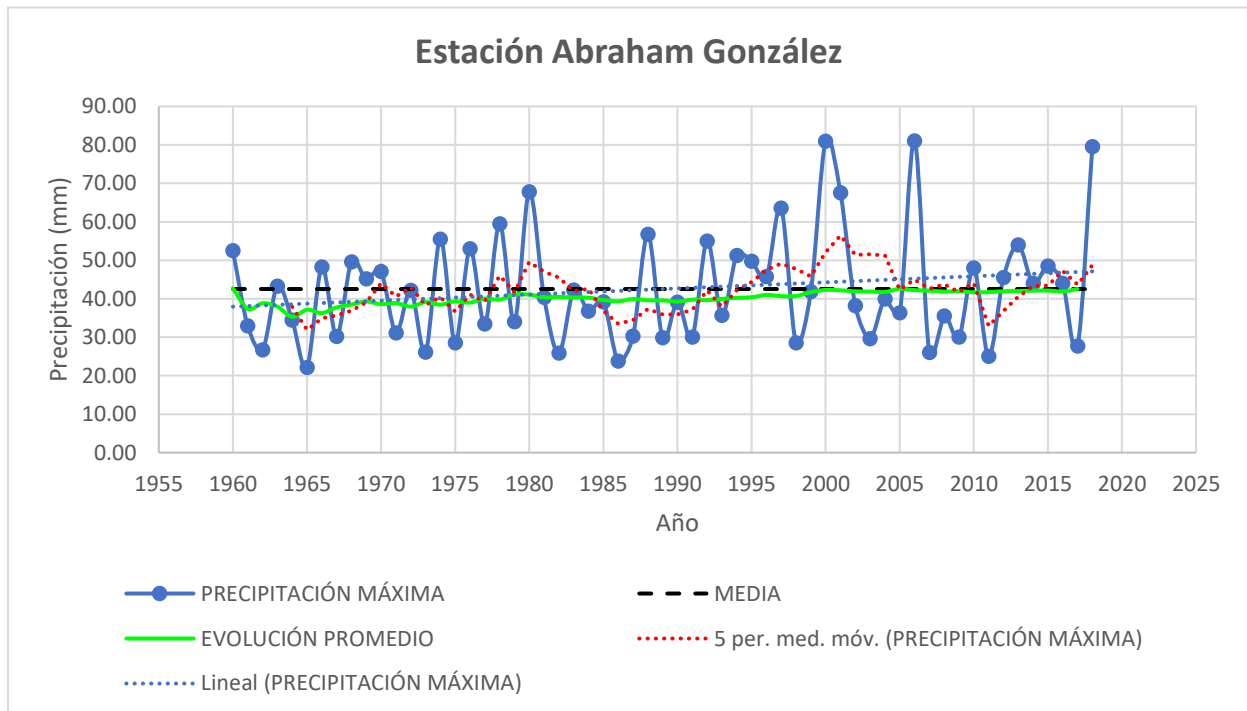


Figura 2.2. Análisis gráfico de la estación climatológica Abraham González.



Es importante mencionar que el análisis gráfico se puede elaborar para toda la serie de tiempo o solo para una parte de la misma. En esta obra se emplea para toda la serie y en algunas estaciones para dos muestras por separado, debido a que, para identificar la evidencia de cambio climático en una serie de tiempo es necesario encontrar un punto de inflexión en el que el comportamiento de la precipitación cambie, y mediante pruebas de homogeneidad observar si existe o no probable evidencia del cambio. La explicación de lo mencionado se complementa en el capítulo 4.

### **3. Marco teórico**

#### **3.1. Metodología que se plantea para identificar evidencias de cambio climático en registros de precipitación**

Para el diseño de las curvas IDF de las estaciones del Estado de Chihuahua se recopiló información en la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de datos de precipitación, máxima diaria y máxima en 1 hora. Se organizaron las series de tiempo de cada estación para obtener la máxima precipitación por año tanto diaria como horaria.

Se elaboró un mapa mediante el software ArcGis 10.3 para organizar las estaciones y así contar con un inventario de ellas para determinar los años con los que se cuenta información. Se analizó la información para determinar si los valores organizados cumplen con criterios de homogeneidad, consistencia, tendencia y persistencia. En primera instancia se determinó si los datos presentan normalidad (pruebas de Kolmogorov-Smirnov, Ryan-Joiner, D' Agostino y Pearson) para aplicar pruebas estadísticas de homogeneidad mediante métodos paramétricos (Cramer y t de Student) y no paramétricos (Helmert y secuencias).

Seguido de determinar los parámetros de probabilidad, se ajustaron los datos mediante un software especializado que analiza las series de tiempo con los métodos de momento y máxima verosimilitud para encontrar el mejor ajuste de acuerdo con la variable precipitación y considerando el periodo de retorno. Los



ajustes aplicados fueron mediante funciones de distribución de probabilidad, tales como distribución normal, lognormal, Gumbel, doble Gumbel, exponencial y gamma, y de ese análisis se tomó el que mejor ajuste tuviera, es decir, contara con menor error.

Las metodologías que se utilizaron para la construcción de las curvas IDF fueron las de Cheng Lung Chen y F. C. Bell descritas por Campos (1984).

Las curvas se construyeron para periodos de retorno de 2, 5, 10, 50, 100, 500, 1,000 y 10, 000 años.

Se elaboraron gráficas que relacionan los años con la precipitación máxima diaria y horaria para analizar si se observa evidencia de la presencia del cambio climático y si hay un impacto en la intensidad de las lluvias y por tanto en la construcción de las curvas.

Mediante el análisis del comportamiento de las lluvias en las estaciones se buscó determinar el punto de inflexión en el que comienzan a observarse los efectos del cambio climático en las intensidades máximas de precipitación en el Estado de Chihuahua.

En la Figura 3.1 se muestra la metodología planteada.

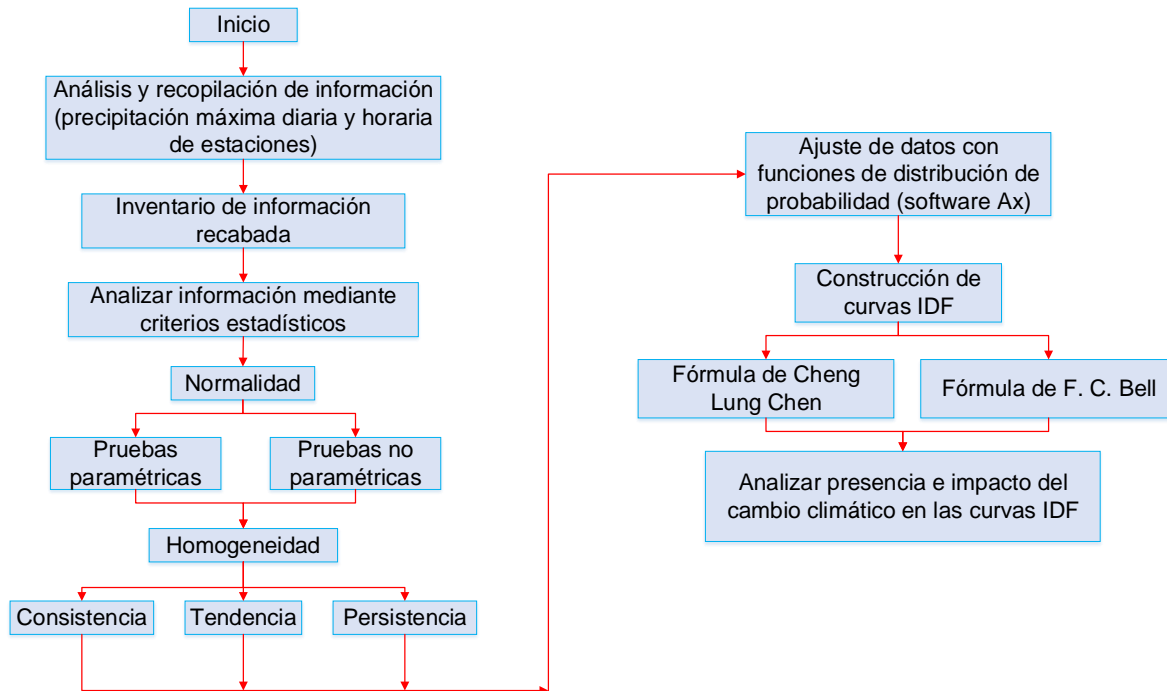


Figura 3.1. Metodología que se plantea para identificar evidencias de cambio climático en registros de precipitación

Para poder realizar la construcción de curvas IDF es necesario recabar y analizar la información de precipitación máxima, cuyas series de tiempo cumplan con criterios de probabilidad como homogeneidad, consistencia, tendencia y persistencia. Para determinar la homogeneidad de una serie de tiempo es necesario aplicar pruebas de normalidad para aplicar pruebas paramétricas o no paramétricas, según corresponda. Las pruebas de normalidad más funcionales son, Kolmogorov-Smirnov (Boström y Tomberg, 2004), que prueba el grado de concordancia entre la distribución de datos de una muestra y una distribución teórica específica, la de Ryan-Joiner (Thomas *et al.*, 1976), que correlaciona los datos de la serie con los valores normales de la misma, de D' Agostino (D'Agostino *et al.*, 1990), que prueba si los valores se comportan de manera regular mediante un intervalo de factores de significancia, que determina si la serie se comporta de manera normal y por último la prueba del coeficiente de correlación de Pearson (Helsel y Hirsch, 2002), que correlaciona el grado de covariación de una serie de tiempo a estudiar y así determinar si su comportamiento es normalizado.



Las pruebas paramétricas se aplican cuando existe normalidad en la serie de datos, y en el caso contrario, las no paramétricas. Las no paramétricas óptimas son las de Helmert (Campos-Aranda, 2015) y secuencias (Thom, 1971). La primera consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie de tiempo con respecto a su valor medio. La segunda, cuenta el número de secuencias arriba y debajo respecto a la mediana y mediante una tabla de rangos se determina si cumple o no con homogeneidad. Las pruebas paramétricas más confiables son la *t* de Student (Campos-Aranda, 2015), cuando se presenta un cambio abrupto en la media de los datos, ya que permite detectar la inconsistencia en la misma y la de Cramer (WMO, 1971), cuando es conveniente comparar la media de toda la serie con respecto a la media de una porción del registro.

La construcción de curvas IDF se puede realizar con diversas metodologías. Sin embargo, la escasez de información hace apropiado el uso de la fórmula de Cheng Lung Chen y la de F. C. Bell. La metodología de Bell (ecuación 3.1) consiste en una ecuación generalizada de intensidad-duración-frecuencia, combinando los parámetros; lámina de lluvia-frecuencia con la lámina de lluvia-duración dentro del intervalo de 5 a 120 minutos de duración, y utilizada para periodos de retornos cortos, entre 2 y 100 años. Se expresa matemáticamente como:

$$P_{Tr}^t = (0.35 \ln Tr + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_2^{60} \quad (3.1)$$

Donde  $P_{Tr}^t$ , es la precipitación en mm de una duración de *t* minutos, *Tr*, es el periodo de retorno en años y  $P_2^{60}$ , la precipitación de duración de 60 minutos (1 hora) y un periodo de retorno de 2 años.

Chen relaciona tres parámetros (ecuación 3.2), intensidad-duración-periodo de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas, en periodos de retorno mayores a 1 año, empleando factores relacionados con lluvias acumuladas en distintas duraciones, y considerando el clima de la zona a estudiar y se expresa como:



$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})t}{60(t+b)^c} \quad (3.2)$$

Donde,  $F$ , es el cociente de lluvia periodo de retorno, equivalente a  $P_t^{100}/P_t^{10}$  y  $P$ , es el cociente lluvia duración  $P_1^{100}/P_{24}^{10}$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros en función de  $P$  que se determinan mediante el monograma propuesto por Chen o por ecuaciones propuestas por Domínguez y Franco (2002). El parámetro  $P$  es un valor muy estudiado y existen recomendaciones para su valor que varía de acuerdo a las condiciones climatológicas de la zona de estudio (González y Mora, 2013).

Al construir las curvas es conveniente analizar si se presenta el cambio climático, así como los efectos e implicaciones que pudiera tener en las curvas IDF y las consecuencias en el diseño y construcción de obras hidráulicas importantes.

### 3.1.1. Pruebas de normalidad

Las pruebas de normalidad se utilizan para determinar si los datos de una población o muestra se ajustan a una distribución normal. La principal razón por la cual es necesario determinar si una serie de datos se ajusta a una distribución normal, es para determinar qué tipo de pruebas estadísticas pueden ser empleadas en la serie, paramétricas o no paramétricas. Si los datos se ajustan a una distribución normal, se utilizarán pruebas paramétricas, en caso contrario deberán aplicarse pruebas no paramétricas. La hipótesis nula ( $H_0$ ) para todas las pruebas de normalidad es que los datos se ajustan a una distribución normal (Helsel & Hirsch, 2002).

#### 3.1.1.1. Kolmogorov-Smirnov

La prueba de Kolmogórov-Smirnov compara la función de distribución acumulada empírica ( $F_n$ ) de los datos de la muestra con la distribución esperada ( $F_0$ ), si los datos fueran normales. La prueba rechaza la hipótesis de normalidad si la diferencia observada es considerablemente grande (Boström y Tomberg, 2004).

Hipótesis:



$H_0$ : Los datos analizados siguen una distribución normal.

$H_1$ : Los datos analizados no siguen una distribución normal.

El parámetro estadístico empleado en esta prueba es el  $D_n$ , el cual se obtiene empleando la ecuación 3.3.

$$D_n = \max|F(x) - S_n(x)| \quad (3.3)$$

Donde:

$D_n$  = Estadístico de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

$F(x)$  = Distribución normal.

$S_n(x)$  = Distribución empírica.

La distribución empírica se obtiene mediante la ecuación 3.4.

$$P(x)_e = \frac{i-a}{n+1-2a} \quad (3.4)$$

Donde:

$P(x)_e$  = Probabilidad empírica.

$i$  = Número de dato.

$a$  = Coeficiente que varía de acuerdo al autor que lo propuso, se usa el valor de 0.4 propuesto por Cunnane (1987).

$n$  = Número de datos.

Cuanto mayor sea la diferencia entre la distribución empírica y la distribución teórica, mayor será el valor de  $D_n$ . Para tomar la decisión entre las dos hipótesis es necesario obtener el valor de  $D_{cr}$ , el cual depende del número de valores. Para un



número de valores mayor a 35 la ecuación que se emplea varía de acuerdo al nivel de significancia, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Valores de  $D_{cr}$  para distintos niveles de significancia.

$n/\alpha$	0.01	0.05	0.1	0.15	0.2
>35	$1.63/\sqrt{n}$	$1.36/\sqrt{n}$	$1.22/\sqrt{n}$	$1.14/\sqrt{n}$	$1.07/\sqrt{n}$

Generalmente suele usarse un nivel de significancia de 0.05.

El criterio para la toma de decisión entre las dos hipótesis es el siguiente:

$$\text{Si } D \leq D_{cr} \rightarrow \text{Se acepta } H_0$$

$$\text{Si } D > D_{cr} \rightarrow \text{Se rechaza } H_0$$

### 3.1.1.2. Ryan-Joiner

La prueba de Ryan-Joiner establece que los datos se ajustan a una distribución normal si  $R_p > C_v(n)$  (Thomas *et al.*, 1976).  $R_p$  está dado por la ecuación 3.5:

$$R_p = \frac{\sum Y_i b_i}{\sqrt{s^2(n-1) \sum b_i^2}} \quad (3.5)$$

Donde:

$R_p$  = Estadístico de la prueba de Ryan-Joiner.

$Y$  = Datos de la serie de tiempo.

$b_i$  = Cuantil normal.

$s$  = Desviación estándar.

$n$  = Número de datos.

Para una significancia del 5 %,  $C_v(n)$  se obtiene mediante la ecuación 3.6.



$$Cv(n) = 1.0063 - \frac{0.1288}{\sqrt{n}} - \frac{0.6118}{n} + \frac{1.3505}{n^2} \quad (3.6)$$

El criterio para la toma de decisión entre las dos hipótesis es el siguiente:

$$Si Rp > Cv(n) \rightarrow Se acepta H_0$$

$$Si Rp \leq Cv(n) \rightarrow Se rechaza H_0$$

### 3.1.1.3. D' Agostino

Para poder determinar si los datos se ajustan a una distribución normal, en esta prueba es necesario calcular la probabilidad P de dos colas, considerando la prueba de asimetría y prueba de curtosis. Si  $P > 0.05$ , entonces se acepta la hipótesis nula (D'Agostino *et al.*, 1990).

La prueba consiste en obtener el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis para poder obtener los parámetros  $Z_a$  y  $Z_c$ . Las pruebas de asimetría están dadas por las ecuaciones 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10, respectivamente.

Prueba de asimetría

$$Z_a = \frac{\text{Coeficiente de asimetría}}{s.e.} \quad (3.7)$$

$$s.e. = \sqrt{\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n+1)(n+3)}} \quad (3.8)$$

Prueba de curtosis

$$z_c^2 = \frac{\text{Curtosis}}{s.e.} \quad (3.9)$$

$$s.e. = \sqrt{\frac{6n}{(n-2)(n-3)(n+3)(n+5)}} \quad (3.10)$$

El estadístico de D'Agostino está dado por la ecuación 3.11.



$$\text{Estadístico} = Z_a^2 + Z_c^2 \quad (3.11)$$

El estadístico de D'Agostino se compara con la probabilidad de dos colas; si dicha probabilidad es mayor que el estadístico de D'Agostino, la muestra sigue una distribución normal.

#### **3.1.1.4. Coeficiente de correlación de Pearson**

En esta prueba se emplea un gráfico de probabilidades en el cual se relacionan los datos de la muestra contra los cuantiles normales. Para ello es necesario obtener la probabilidad empírica (ecuación 3.4) y después ajustar dicha probabilidad a una distribución normal y con ello obtener los cuantiles normales (Helsel y Hirsch, 2002).

El coeficiente de correlación de la gráfica de la muestra contra cuantiles normales se debe comparar con un valor crítico, el cual está dado por el número de datos de la muestra (Tabla 3.2). Si el coeficiente de correlación de la muestra es mayor que el valor crítico, la muestra sigue una distribución normal.



Tabla 3.2. Valor crítico de la prueba del coeficiente de correlación de Pearson.

n	Nivel de significancia ( $\alpha$ )					
	0.005	0.01	0.025	0.05	0.1	0.25
3	0.867	0.869	0.872	0.879	0.891	0.924
4	0.813	0.824	0.846	0.868	0.894	0.931
5	0.807	0.826	0.856	0.88	0.903	0.934
6	0.82	0.838	0.866	0.888	0.91	0.939
7	0.828	0.85	0.877	0.898	0.918	0.944
8	0.84	0.861	0.887	0.906	0.924	0.948
9	0.854	0.871	0.894	0.912	0.93	0.952
10	0.862	0.879	0.901	0.918	0.934	0.954
11	0.87	0.886	0.907	0.923	0.938	0.957
12	0.876	0.892	0.912	0.928	0.942	0.96
13	0.885	0.899	0.918	0.932	0.945	0.962
14	0.89	0.905	0.923	0.935	0.948	0.964
15	0.896	0.91	0.927	0.939	0.951	0.965
16	0.899	0.913	0.929	0.941	0.953	0.967
17	0.905	0.917	0.932	0.944	0.954	0.968
18	0.908	0.92	0.935	0.946	0.957	0.97
19	0.914	0.924	0.938	0.949	0.958	0.971
20	0.916	0.926	0.94	0.951	0.96	0.972
21	0.918	0.93	0.943	0.952	0.961	0.973
22	0.923	0.933	0.945	0.954	0.963	0.974
23	0.925	0.935	0.947	0.956	0.964	0.975
24	0.927	0.937	0.949	0.957	0.965	0.976
25	0.929	0.939	0.951	0.959	0.966	0.976
26	0.932	0.941	0.952	0.96	0.967	0.977
27	0.934	0.943	0.953	0.961	0.968	0.978
28	0.936	0.944	0.955	0.962	0.969	0.978
29	0.939	0.946	0.956	0.963	0.97	0.979
30	0.939	0.947	0.957	0.964	0.971	0.979
31	0.942	0.95	0.958	0.965	0.972	0.98
32	0.943	0.95	0.959	0.966	0.972	0.98
33	0.944	0.951	0.961	0.967	0.973	0.981
34	0.946	0.953	0.962	0.968	0.974	0.981
35	0.947	0.954	0.962	0.969	0.974	0.982
36	0.948	0.955	0.963	0.969	0.975	0.982
37	0.95	0.956	0.964	0.97	0.976	0.983
38	0.951	0.957	0.965	0.971	0.976	0.983
39	0.951	0.958	0.966	0.971	0.977	0.983
40	0.953	0.959	0.966	0.972	0.977	0.984
41	0.953	0.96	0.967	0.973	0.977	0.984
42	0.954	0.961	0.968	0.973	0.978	0.984
43	0.956	0.961	0.968	0.974	0.978	0.984
44	0.957	0.962	0.969	0.974	0.979	0.985
45	0.957	0.963	0.969	0.974	0.979	0.985
46	0.958	0.963	0.97	0.975	0.98	0.985
47	0.959	0.965	0.971	0.976	0.98	0.986
48	0.959	0.965	0.971	0.976	0.98	0.986
49	0.961	0.966	0.972	0.976	0.981	0.986
50	0.961	0.966	0.972	0.977	0.981	0.986
55	0.965	0.969	0.974	0.979	0.982	0.987
60	0.967	0.971	0.976	0.98	0.984	0.988
65	0.969	0.973	0.978	0.981	0.985	0.989
70	0.971	0.975	0.979	0.983	0.986	0.99
75	0.973	0.976	0.981	0.984	0.987	0.99
80	0.975	0.978	0.982	0.985	0.987	0.991
85	0.976	0.979	0.983	0.985	0.988	0.991
90	0.977	0.98	0.984	0.986	0.988	0.992
95	0.979	0.981	0.984	0.987	0.989	0.992
100	0.979	0.982	0.985	0.987	0.989	0.992



### 3.1.2. Pruebas de homogeneidad

Las pruebas estadísticas de homogeneidad son aquellas que presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla en base a su probabilidad de ocurrencia. Si dicha probabilidad es pequeña, será concluido que la serie es no homogénea; si es grande, la decisión es que es homogénea. La regla específica además la probabilidad límite (nivel de significancia  $\alpha$ ), bajo la cual la hipótesis de homogeneidad o nula será rechazada y entonces, alguna hipótesis alternativa será aceptada (Campos, 1984).

Cuando es posible especificar la distribución que sigue la hipótesis nula y las alternativas, las pruebas paramétricas deben ser utilizadas, en caso contrario las llamadas 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 presentaran la prueba de Helmert y la de Secuencias, y entre las segundas la prueba de la t de Student y la de Cramer (Campos, 1984).

De acuerdo a Campos (1984) las pruebas estadísticas pueden clasificarse en función de la información que requieren para ser aplicadas, comúnmente en los siguientes dos grupos:

- Pruebas estadísticas que se aplican a los datos de la serie cuya homogeneidad se investiga, son ejemplos de ellas, las pruebas de Helmert, de las Secuencias, de la t de Student y de Cramer.
- Pruebas estadísticas que requieren para su aplicación del apoyo de otra estación cercana, por ejemplo, la prueba de Wald-Wolfowitz.

La homogeneidad de una serie se puede perder por muchos motivos, los cuales se pueden clasificar en dos grupos: primero, las debidas a cambios físicos en la propia estación pluviométrica y segundo, las originadas por las modificaciones o cambios en el medio ambiente (Campos, 1984). Las causas principales de pérdida de homogeneidad de una serie de lluvias son:



1. Cambio en la localización del pluviómetro.
2. Cambio en la forma de exposición, o reposición del aparato.
3. Cambio en el procedimiento de observación, o reemplazo del operador.
4. Construcción de embalses en las cercanías.
5. Deforestaciones y reforestaciones en la zona.
6. Deseccación de pantanos.
7. Apertura de nuevas áreas al cultivo en los alrededores.
8. Industrialización en áreas circundantes.

Con respecto a la primera causa mencionada, el U.S. Environmental Data Service indica que una estación deberá ser nuevamente identificada cuando se mueve o desplaza 8 Km en distancia y/o 30 metros en elevación.

### **3.1.2.1. Pruebas paramétricas**

Las pruebas paramétricas son aquellas que se utilizan cuando es posible especificar en la serie de tiempo la distribución que sigue la hipótesis nula y las alternativas, es decir, que presente homogeneidad en los datos. Las pruebas paramétricas consisten en análisis rigurosos y las más comunes son la prueba de la t de Student y la de Cramer.

#### **3.1.2.1.1. 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 muy útil para detectar la inconsistencia en la media.

La prueba consiste en dividir la serie de tiempo en dos subconjuntos, preferentemente del mismo tamaño o similares y con ello comparar las medias de las mismas para determinar si vienen de la misma población.

La prueba t de Student está definida por la ecuación 3.12:



$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ \frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (3.12)$$

Donde:

$t_d$  = Estadístico de t de Student.

$n_1, n_2$  = Número de datos de los subconjuntos.

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$  = Media de cada uno de los subconjuntos.

$s_1, s_2$  = Varianzas de cada uno de los subconjuntos.

El valor de  $t_d$  se compara generalmente con el valor de t de la distribución de Student de dos colas y con grados de libertad  $v = n_1 + n_2 - 2$ , y con un 5% de nivel de significancia. Los valores de t se tienen en la Tabla 3.3.

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



Tabla 3.3. Valores de  $t$  para la distribución de  $t$  de Student.

Grados de libertad	Nivel de significancia		Grados de libertad	Nivel de significancia	
	5%*	5%**		5%*	5%**
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101
2	2.920	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.080
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.860	2.306	25	1.708	2.060
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.228	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.048
12	1.782	2.179	29	1.699	2.045
13	1.771	2.160	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.753	2.131	60	1.671	2.000
16	1.746	2.120	120	1.658	1.980
17	1.740	2.110	$\infty$	1.645	1.960

\* PRUEBA DE UNA COLA

\*\* PRUEBA DE DOS COLAS

### 3.1.2.1.2. Cramer

La prueba de Cramer es muy útil cuando se desea verificar homogeneidad en el registro de la serie para  $i = 1, 2, \dots, n$ ; así como comparar la media de toda la serie de tiempo y la media de una cierta parte del registro. Es importante mencionar que esta prueba es complementaria de la prueba de la  $t$  de Student, ya que la prueba de Cramer se puede aplicar cuando  $n_1$  y  $n_2$  no son parecidos.

La prueba de Cramer está definida por las ecuaciones 3.13 y 3.14.

$$\tau_k = \frac{(\bar{x}_k - \bar{x})}{s} \quad (3.13)$$

$$t_k = \left\{ \frac{n'(n-2)}{n-n'[1+(\tau_k)^2]} \right\}^{1/2} (\tau_k) \quad (3.14)$$



Donde:

$\bar{x}$  = Media de la serie de tiempo completa.

$\bar{x}_k$  = Media de cierta parte de la serie de tiempo.

S = Desviación estándar de la serie de tiempo completa.

$\tau_k$  = Relación entre la diferencia de medias y la desviación estándar.

$n'$  = Número de datos de cierta parte de la serie de tiempo.

$n$  = Número de datos de la serie de tiempo completa.

$t_k$  = Estadístico de la prueba de Cramer.

El valor de  $t_k$  se compara de igual manera con el valor de  $t$  de la distribución de Student de dos colas y con grados de libertad  $v = n_1 - n_2 - 2$ , y con un 5% de nivel de significancia con los datos de la Tabla 3.3.

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

### **3.1.2.2. Pruebas no paramétricas**

Las pruebas no paramétricas son aquellas que se utilizan cuando no es posible especificar en la serie de tiempo la distribución que sigue la hipótesis nula y las alternativas, es decir, que no presenta homogeneidad en los datos. Las pruebas no paramétricas más comunes son la prueba de las Secuencias y la de Helmer.

#### **3.1.2.2.1. Secuencias**

Esta prueba es bastante común y muy sensitiva; se realiza contando el número de secuencias o rachas ( $u$ ) arriba o bajo la mediana de la serie de tiempo. El valor de la mediana si  $n$  es par se obtiene ordenando los datos respecto a su magnitud y



seleccionando el valor central, si  $n$  es impar, se obtiene la media de los dos valores centrales. Usando el valor de la mediana, se marca con A si es mayor y con B si es menor, cada dato o evento de la serie; las secuencias o sucesión de valores de A o B son contabilizadas y para concluir que la serie es homogénea el número de secuencias ( $u$ ) debe estar comprendido entre el rango que se marca en la Tabla 3.4, para el número de años de registro ( $n$ ).

*Tabla 3.4. Rango del número de secuencias ( $u$ ) para un registro homogéneo.*

Número de datos $n$	Rango de $u$		
12	5	-	8
14	5	-	10
16	6	-	11
18	7	-	12
20	8	-	13
22	9	-	14
24	9	-	16
26	10	-	17
28	11	-	18
30	12	-	19
32	13	-	20
34	14	-	21
36	15	-	22
38	16	-	23
40	16	-	25
50	22	-	30
60	26	-	36
70	31	-	41
80	35	-	47
100	45	-	57

### **3.1.2.2.2. Helmert**

La prueba de Helmert es sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie de tiempo 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. Sin embargo, si una desviación es seguida por otra de signo contrario, un cambio (C) será registrado. Cada año, excepto el primero, definirán una secuencia o un cambio.

Si la serie es homogénea, la diferencia entre el número de secuencias (S) y el número de cambios (C) en el registro deberá ser cero, dentro de los límites de un



error probable, el cuál de hecho, depende de la longitud del registro ( $n$ ). La prueba de Helmer está definida por la ecuación 3.15.

$$S - C = \pm\sqrt{n - 1} \quad (3.15)$$

Donde:

$S$  = Número de secuencias en la serie de tiempo.

$C$  = Número de cambios en la serie de tiempo.

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 secuencias, alguna forma de oscilación del valor medio estará presente y su causa deberá ser investigada a detalle (Campos, 1984).

### **3.1.3. Pruebas de consistencia, tendencia y persistencia**

Las pruebas de consistencia son las pruebas de homogeneidad de una serie de tiempo, son sinónimos, sin embargo, en análisis climatológicos se utiliza el término homogeneidad y en los análisis hidrológicos se emplea el término consistencia de la serie, ambos indican un cambio en la cantidad de lluvia medida por la estación, por alguna de las causas mencionadas en el punto 3.1.2.

Antes de analizar cualquier tipo de análisis a series de tiempo de escurrimiento o precipitación, es conveniente revisar la aleatoriedad o no aleatoriedad de la misma; uno de los estadísticos empleados para tal fin es el de la persistencia, el cual es una característica no aleatoria de las series cronológicas.

La persistencia es una característica no aleatoria de las series de tiempo y refleja la tendencia que se puede observar en el registro para un año con gran cuantía sea seguido por otro que tenga un valor alto en lugar de otra de valor reducido. La



persistencia toma en consideración las secuencias cíclicas (años húmedos y secos en el caso de la lluvia) (Silva, 2019).

La ausencia de persistencia implica que los datos de cada serie no muestran correlación o dependencia serial, de tal forma, una serie de escurrimiento anuales aleatorios tiene un coeficiente de correlación serial de orden 1 diferentes de cero debido únicamente a la variación de muestreo, lo cual, según Campos (1987) se puede indicar que valores de  $r_1 < 0.30$  procedentes de registros cortos, no son estadísticamente diferentes de cero. En cambio, en series que presentan una fuerte persistencia, el valor de  $r_1$  puede ser próximo a la unidad y aunque las magnitudes negativas de  $r_1$  son posibles, rara vez ocurren en las series hidrológicas, ya que se requiere que grandes valores en la serie, sean seguidos por magnitudes pequeñas y viceversa.

La persistencia es cuantificada por medio del coeficiente de correlación serial de orden  $k$ , el cual indica qué tan fuertemente es afectado un evento por el anterior,  $k$  es el desfaseamiento o retraso entre eventos y se expresa mediante la ecuación 3.16.

$$r_k = \frac{\left[ \frac{1}{n-k} \sum X_i X_{i+1} - \frac{1}{(n-k)^2} \sum X_i (\sum X_{i+k}) \right]}{\sqrt{\frac{1}{n-k} \sum X_i^2 - \frac{1}{(n-k)^2} (\sum X_i)^2} \sqrt{\frac{1}{n-k} \sum X_{i+k}^2 - \frac{1}{(n-k)^2} (\sum X_{i+k})^2}} \quad (3.16)$$

Donde:

$r_k$  = Coeficiente de correlación serial de orden  $k$ .

$k$  = Desfaseamiento o retraso entre eventos, cuyo valor es 1.

$X_i$  = Datos de la serie de tiempo, donde  $i$  es el número de la posición del dato.

Dentro de las pruebas para determinar la persistencia de una serie de tiempo se encuentran las pruebas paramétricas y las no paramétricas. La más recomendada de las primeras es la prueba de R. L. Anderson y de las segundas, se emplea el



criterio del punto de quiebre (Campos, 1984). Enseguida se explica cada una de ellas.

- Prueba paramétrica (Anderson)

Esta prueba se resume de forma gráfica (Figura 3.2) y si el valor obtenido de  $r_k$  de la ecuación 3.16, cae dentro de las zonas delimitadas por las curvas de control, para un nivel de significancia del 5%, entonces no es estadísticamente diferente de cero, es decir, no presenta persistencia.

- Prueba no paramétrica (punto de quiebre)

En una serie de tiempo de precipitación o escurrimiento anuales, la persistencia se manifiesta por un número reducido de puntos de quiebre en comparación al que se tendría si la serie fuera aleatoria.

La prueba estadística se calcula con la ecuación 3.17:

$$u = \frac{m - [2(n-2)/3]}{\sqrt{(16n-29)/90}} \quad (3.17)$$

Donde

$M$  = Número de quiebres (picos altos y bajos).

$n$  = Tamaño de la muestra.

Considerando que 1.96 es la desviación normal estándar para un nivel de significancia del 5%, cuando el valor absoluto de  $u$  es mayor a 1.96 se considera que existe persistencia, de lo contrario, la serie es aleatoria.

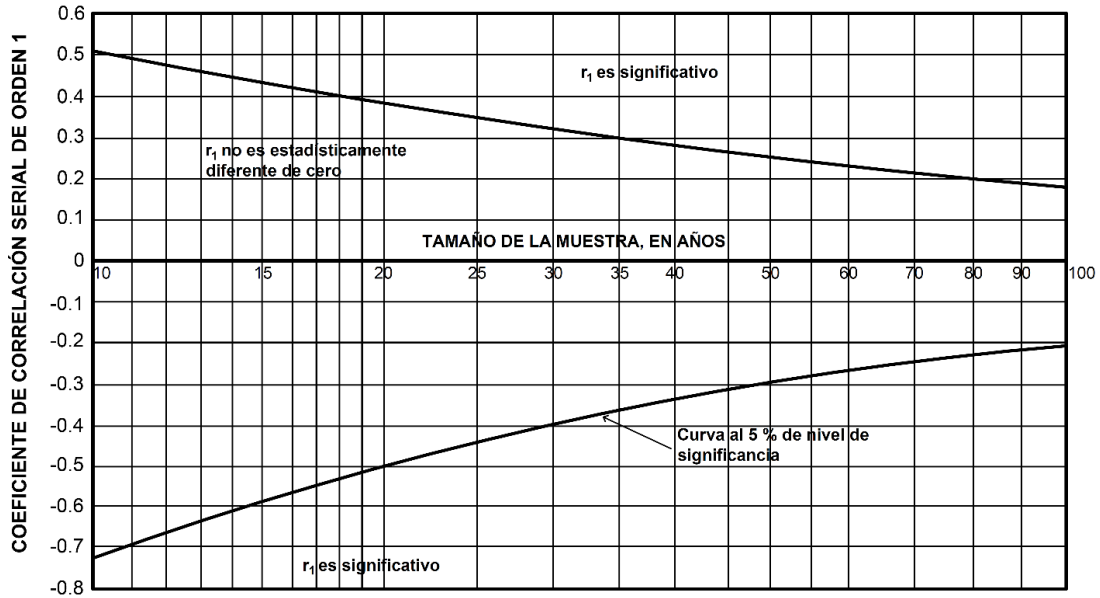


Figura 3.2. Prueba del coeficiente de correlación serial según Anderson para persistencia (Campos, 1984).

### 3.2. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

La lluvia es definida por tres variables: magnitud o lámina, duración y frecuencia. La magnitud de la lluvia es la lámina total ocurrida (en milímetros) en la duración de la tormenta. La frecuencia de la lluvia, es expresada por su periodo de retorno o intervalo de recurrencia, que es el tiempo promedio en años en el cual, el evento puede ser igualado o excedido cuando menos una vez (Goswami, 1973). El análisis de frecuencia relaciona a cada caudal máximo una probabilidad ( $P$ ) en un año cualquiera, siendo entonces, el periodo de retorno ( $Tr$ ) y la probabilidad recíprocos.

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia son una gráfica en la cual se concentran las características de las tormentas de la zona o región, con respecto a sus variables: magnitud, duración y frecuencia (Campos, 1984).

Cuando el ingeniero hidrólogo va a diseñar una obra hidráulica, está considerando un evento que pasará en el futuro, es decir no sabe en qué tiempo de ocurrencia y que magnitud tendrá una avenida máxima, es por eso que tiene que recurrir a



herramientas de probabilidad que le permitan estimar un valor que represente seguridad para la obra de diseño (Linsley, Koher, & Paulus, 1981). Weibull (1939) propone las ecuaciones 3.18 y 3.19, que son las más utilizadas para lo mencionado.

$$P = \frac{m}{n+1} \quad (3.18)$$

$$T_r = \frac{1}{P} = \frac{n+1}{m} \quad (3.19)$$

En donde:

$P$  = Probabilidad de que ocurra un evento.

$m$  = Es el orden de magnitud que tiene el registro; la serie de tiempo de los registros de precipitación va de mayor a menor, por lo que la mayor precipitación tendrá un valor de  $m=1$ .

$n$  = Número total de años de la serie de tiempo.

### **3.2.1. Ajuste a datos de precipitación mediante funciones de distribución de probabilidad**

Los datos de cada estación se deben ajustar a funciones de distribución de probabilidad. Existe software para apoyar estudios para control de avenidas máximas, que cuentan con las funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología. Para dicho ajuste se emplea el software Ax, desarrollado por el Centro Nacional de Desastres Naturales (CENAPRED) para el control de avenidas máximas.

La finalidad del ajuste es encontrar de todas las funciones de distribución de probabilidad la que mejor ajuste tenga (menor error) para cada caso y además calcular las precipitaciones para varios periodos de retorno empleando la función seleccionada.



Las funciones más utilizadas en hidrología son: normal, lognormal, Gumbel, doble Gumbel, exponencial y gamma.

En la Tabla 3.5 se muestran las ecuaciones y parámetros que considera cada una de las funciones de distribución de probabilidad.



Tabla 3.5. Funciones de distribución de probabilidad usadas en hidrología.

Función	Fórmula	Parámetros
Normal	$F(t) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ <p>Donde:</p> $t = \frac{x - \alpha}{\beta}$	$\alpha$ y $\beta$
Lognormal	$F(t) = \int_0^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ <p>Donde:</p> $t = \frac{\ln(x - \delta) - \alpha}{\beta}$	$\alpha, \beta$ y $\delta$
Gumbel	$F(x) = e^{-e^{-t}}$ <p>Donde:</p> $t = \alpha(x - \beta)$	$\alpha =$ <i>Parámetro de forma.</i> $\beta =$ <i>Parámetro de escala.</i>
Exponencial	$F(x) = 1 - e^{-t}$ <p>Donde:</p> $t = \frac{x - \beta}{\alpha}$	$\alpha$ y $\beta$
Gamma	$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma\beta} \int_{\delta}^x t^{\beta-1} e^{-t} dx$ <p>Donde:</p> $t = \frac{x - \beta}{\alpha}$ <p><math>\Gamma(\beta) = 1</math> <i>función matemática gamma 1</i></p>	$\alpha, \beta$ y $\delta$



Doble Gumbel	$F(x) = p \left( e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \right) +$ $(1 - p) \left( e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right)$	$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \text{ y } p$
--------------	--	---

Los métodos para calcular los parámetros de las funciones de probabilidad son: momentos y máxima verosimilitud, algunas de las funciones pueden calcularse por dos o tres parámetros, además de aplicar las pruebas de bondad para determinar el error estándar en cada una de las funciones.

### 3.2.2. Fórmulas de Cheng Lung Chen y F.C. Bell

Las fórmulas de Cheng Lung Chen y F.C. Bell son fórmulas empíricas mayormente utilizadas para solventar la escasez de información pluviográfica (Ramírez, 2007).

La fórmula de Chen relaciona tres parámetros, intensidad-duración-periodo de retorno, útil para estimaciones dentro del intervalo de 5 minutos a 24 horas, en periodos de retorno mayores a 1 año, considerando el clima de la zona a estudiar tal como se mencionó en el apartado 3.1. La fórmula de Chen se presenta en la ecuación 3.20.

$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})t}{60(t+b)^c} \quad (3.20)$$

Donde:

$P_t^{Tr}$  o  $R_t^{Tr}$  = Intensidad de lluvia en mm/hr para un periodo de retorno de  $Tr$  años y una lluvia de  $t$  minutos de duración.

$P_1^{10}$  = Es la lluvia asociada a 10 años de periodo de retorno y una duración de una hora, en mm.



$F = \frac{P_t^{100}}{P_t^{10}}$  = Lámina de lluvia-periodo de retorno, en donde  $P_t^{100}$  es la precipitación en el tiempo  $t$  y periodo de retorno de 100 años y  $P_t^{10}$  es la precipitación en el tiempo  $t$  y periodo de retorno de 10 años.

$t$  = Duración de la lluvia, en minutos.

$a, b$  y  $c$  = Parámetros que dependen del clima de la zona a estudiar, están en función de  $R$ ; se pueden determinar por medio de un nomograma propuesto por Chen (Campos Aranda D. F., 1990) o las ecuaciones 3.21, 3.22 y 3.23, propuestas por Domínguez y Franco (2002).

$$a = -2.297536 + 100.0389R - 432.5438R^2 - 1028.902R^4 \quad (3.21)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864R - 341.4349R^2 - 598.7461R^4 \quad (3.22)$$

$$a = -0.06498345 + 5.069294R - 16.08111R^2 - 20.06288R^4 \quad (3.23)$$

El cociente  $R$ , es un valor muy estudiado por varios autores como Goswami (1973), Bell (1969), Reich (1963), Hershifeld (1965), Weiss y Wilson (1958), debido a la escasez de registros históricos de lluvia en una hora, han intentado relacionar el cociente  $R$  encontrado en Estados Unidos de América (EUA) con otros países.

Campos (1990) recomienda para zonas áridas y semiáridas una  $R$  que varía de 0.40 a 0.60 y en zonas húmedas de 0.30 a 0.040. Además de que, a mayor altitud, la  $R$  es de mayor magnitud y a menor altitud, el valor de  $R$  decrece.

Debido a la confiabilidad y estabilidad que se encuentra en la fórmula de F.C. Bell, se puede emplear para obtener las precipitaciones para periodos de retorno cortos (entre 2 y 100 años) (Campos, 1990). La fórmula de F.C. Bell se muestra en la ecuación 3.24.

$$P_{Tr}^t = (0.35 \ln Tr + 0.76)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_2^{60} \quad (3.24)$$



Donde:

$P_{Tr}^t$  = Precipitación en mm para una duración de  $t$  minutos y periodo de retorno de  $Tr$  años.

$P_2^{60}$  = Precipitación en mm para una duración de 60 minutos y periodo de retorno de 2 años.



#### **4. Análisis para identificar evidencias de cambio climático en las estaciones climatológicas**

Para identificar evidencias de cambio climático en estaciones climatológicas es necesario analizar el comportamiento de los parámetros climatológicos y observar si se presenta una variación consistente que pueda dar lugar a una posible evidencia de cambio climático.

Para encontrar probables evidencias de cambio climático es necesario realizar el análisis gráfico explicado en el punto 2.2, el cual consiste en observar el comportamiento de los parámetros, en este caso de la precipitación máxima (anual en 1 y 24 horas). Como se mencionó en el punto 2.2 de esta obra, la gráfica realizada consiste en la precipitación máxima (mm) contra tiempo (año).

Los análisis en las estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua se realizaron para precipitación máxima anual en 1 y 24 horas.

De la sección 2.1, inventario de información, se tomaron las estaciones climatológicas que contaban con mayor número de datos para que el análisis fuera significativo, resultando 35 estaciones con datos de precipitación máxima anual en 24 horas y 3 estaciones con información de precipitación máxima en 1 hora, las cuales se muestran en la Figura 4.1.

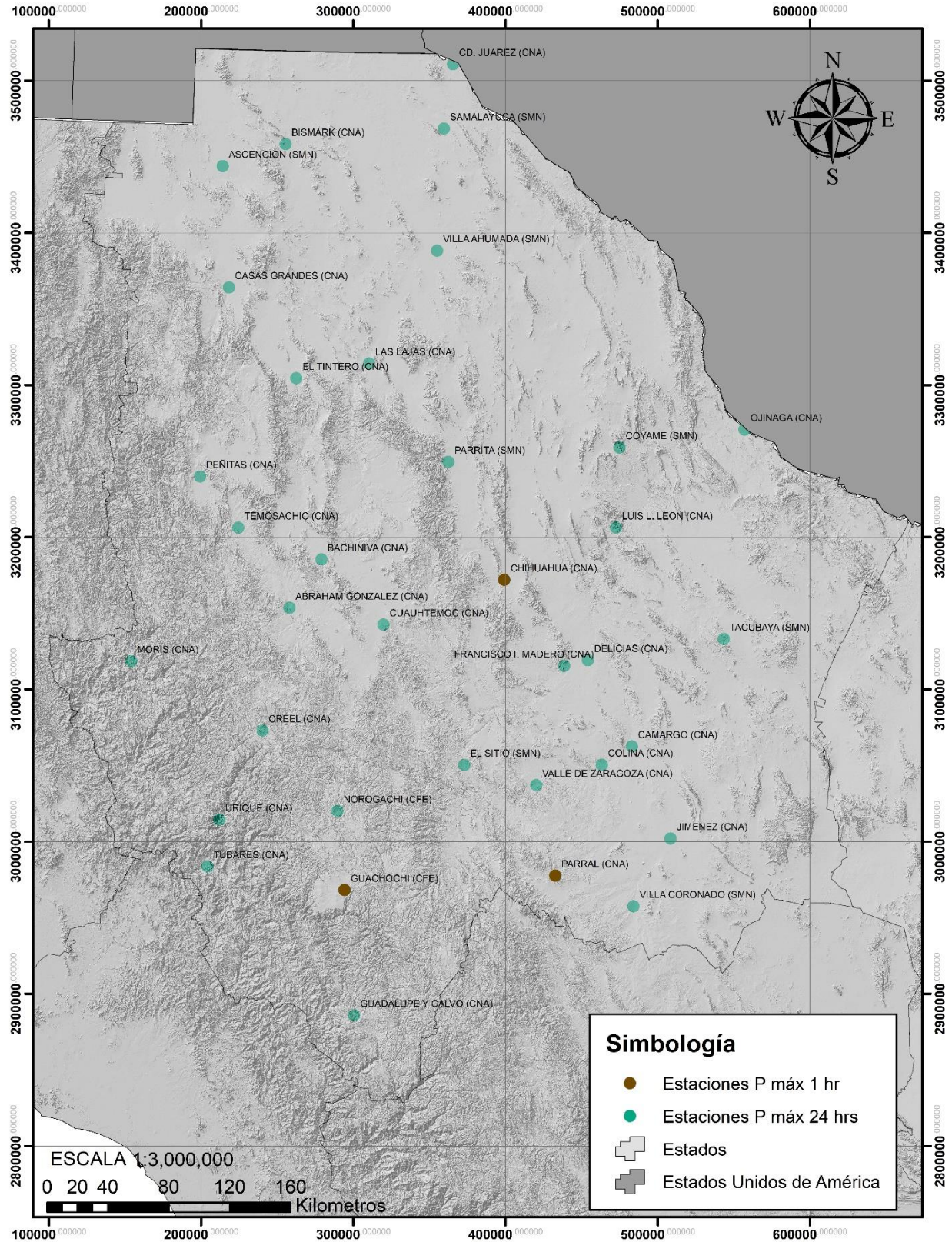


Figura 4.1. Estaciones climatológicas analizadas con precipitación máxima en 1 y 24 horas del Estado de Chihuahua.



#### 4.1. Análisis de normalidad

El análisis de normalidad en las estaciones climatológicas es muy importante, debido a que de acuerdo a los resultados determina que pruebas usar (paramétricas o no paramétricas) para determinar la homogeneidad de las series de tiempo.

El análisis de normalidad aplicado a las estaciones climatológicas es el explicado en el punto 3.1.1 del marco teórico de esta obra. En él se explican las pruebas a aplicar, Kolmogorov-Smirnov, Ryan-Joiner, D' Agostino y coeficiente de correlación de Pearson, para determinar si los datos de precipitación máxima en cada estación presentan o no normalidad, es decir, si se ajustan a una distribución normal.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de aplicar las pruebas de normalidad a la precipitación máxima anual en 24 horas de la estación Abraham González.

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, en la cual si  $D_n > D_{cr}$  se rechaza  $H_0$  (no sigue distribución normal). En este caso se concluyó que la serie de tiempo presenta normalidad debido a que  $D_n$  es menor que  $D_{cr}$ .

Tabla 4.1. Resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov aplicada en la estación Abraham González.

<b>n</b>	59	<b>Dn</b>	0.0727
<b>MEDIA</b>	42.53	<b>Dcr</b>	0.1771
<b>DESVIACIÓN</b>	14.30312	<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>EXISTE NORMALIDAD</b>

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de la prueba de Ryan-Joiner, en la cual si  $R_p > C_v(n)$  no se rechaza  $H_0$  (sigue distribución normal). En este caso se concluyó que la serie de tiempo no presenta normalidad.

Tabla 4.2. Resultados de la prueba de Ryan-Joiner aplicada en la estación Abraham González.

<b>Rp</b>	0.9634
<b><math>\alpha</math></b>	0.05
<b>Cv (n)</b>	0.9796
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>NO EXISTE NORMALIDAD</b>



En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de la prueba de D' Agostino, en la cual si el parámetro de D' Agostino es mayor a 0.05 se presenta normalidad. En este caso se concluyó que la serie de tiempo no presenta normalidad.

*Tabla 4.3. Resultados de la prueba de D' Agostino aplicada en la estación Abraham González.*

<b>COEFICIENTE DE ASIMETRÍA</b>	0.9646
<b>Se ASIMETRÍA</b>	0.3112
<b>COEFICIENTE DE CURTOSIS</b>	0.6976
<b>Se CURTOSIS</b>	0.6133
<b>Za</b>	3.0998
<b>Zc</b>	1.1375
<b>P VALUE ASIMETRÍA</b>	0.0010
<b>P VALUE CURTOSIS</b>	0.1277
<b><math>\alpha</math></b>	0.0500
<b>LÍMITE INFERIOR ASIMETRÍA</b>	0.3547
<b>LÍMITE SUPERIOR ASIMETRÍA</b>	1.5745
<b>LÍMITE INFERIOR CURTOSIS</b>	-0.5044
<b>LÍMITE SUPERIOR CURTOSIS</b>	1.8996
<b>ESTADÍSTICO D'AGOSTINO</b>	10.9029
<b>D' AGOSTINO</b>	0.0043
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>NO EXISTE NORMALIDAD</b>

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados de la prueba del coeficiente de correlación de Pearson, en la cual si  $r > r_c$  no se rechaza  $H_0$  (sigue distribución normal). En esta prueba se elabora una gráfica de precipitación máxima anual en 24 horas contra los cuantiles normales de los valores ajustados a probabilidad normal (distribución normal), que se muestra en la Figura x.

*Tabla 4.4. Resultados de la prueba del coeficiente de correlación de Pearson aplicada en la estación Abraham González.*

<b>N</b>	59.00	<b>MEDIA VAL. AJUST.D.N</b>	42.52763701
<b>MEDIA</b>	42.53	<b>DESVIACION VAL. AJUST. D.N</b>	14.10830542
<b>DESVIACION</b>	14.30312		

<b>R<sup>2</sup></b>	0.9281
<b>r</b>	0.963403775
<b>r<sub>c</sub></b>	0.9796
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>NO EXISTE NORMALIDAD</b>

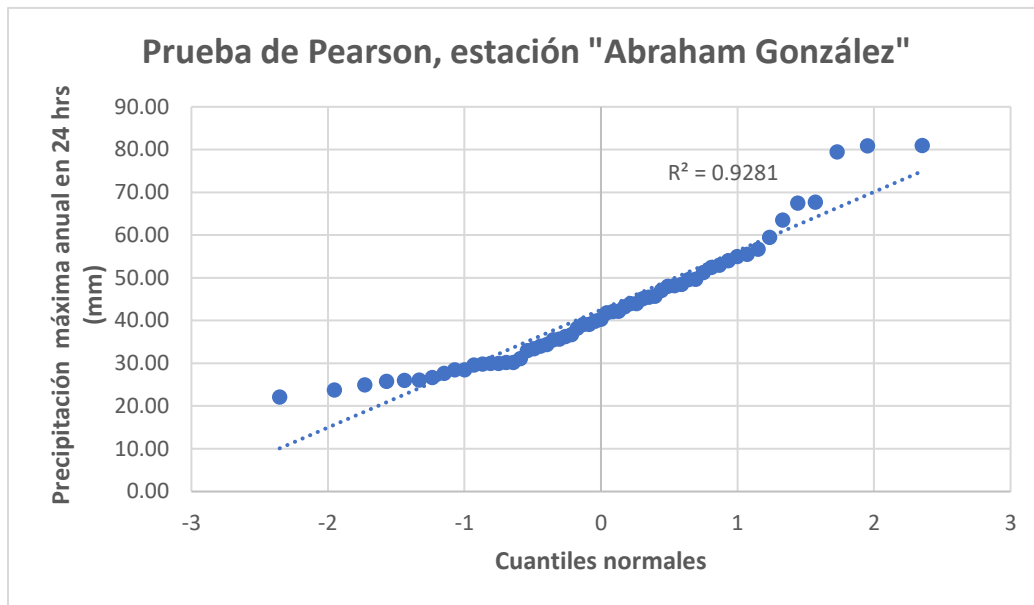


Figura 4.2. Prueba del coeficiente de correlación de Pearson aplicada en la estación Abraham González.

A continuación, se presenta el resumen del resultado de las pruebas de normalidad aplicadas para las estaciones climatológicas para el parámetro de precipitación máxima anual en 1 y 24 horas. Los análisis de normalidad de todas las estaciones se encuentran en el anexo electrónico.

#### Precipitación máxima anual en 24 horas

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 24 horas.

#### Precipitación máxima anual en 1 hora

En la Tabla 4.5 se muestran los resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 1 hora.

Tabla 4.5. Resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 1 hora.

ESTACIONES	PRUEBAS DE NORMALIDAD				EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	DECISIÓN
	KOLMOGOROV	RYAN-JOINER	D'AGOSTINO	PEARSON			
Guachochi	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Parral	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Chihuahua	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	2	2	EXISTE NORMALIDAD



Tabla 4.6. Resultados de las pruebas de normalidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 24 horas.

ESTACIONES	PRUEBAS DE NORMALIDAD				EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	DECISIÓN
	KOLMOGOROV	RYAN-JOINER	D'AGOSTINO	PEARSON			
Abraham González (CNA)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Bachiniva (BACCH)	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Camargo (CCOCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Casas Grandes (CAGCH)	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Cd. Juárez (CJZCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Chihuahua (QJCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Colina (CLNCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Delicias (CDLCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Fco. I Madero (FIMCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Jiménez (JMNCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	0	4	NO EXISTE NORMALIDAD
Las Lajas (LJCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Moris (C08182)	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Ojinaga (OJNCH)	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Parral (PRRCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Peñitas (C08219)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Temosachic (TMCCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Tintero	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Valle De Zaragoza (VZRCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Villa Coronado (VICCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Bizmark (BIZCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	0	4	NO EXISTE NORMALIDAD
Ascensión	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Coyame	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Creel (CRLCH)	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Cuauhtémoc (CUACH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
El Sitio	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Guachochi	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Guadalupe y Calvo (GYCCH)	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Luis L. León (LLNCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	0	4	NO EXISTE NORMALIDAD
Norogachi (NRGCH)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Parrita	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Samalayuca	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Tacubaya	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Tubares (TBRSl)	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD
Urique	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	EXISTE NORMALIDAD	4	0	EXISTE NORMALIDAD
Villa Ahumada	EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	NO EXISTE NORMALIDAD	1	3	NO EXISTE NORMALIDAD



## 4.2. Análisis de homogeneidad

El análisis de homogeneidad de las estaciones climatológicas se emplea para concluir si una estación viene de una misma población o si la homogeneidad se perdió debido a cambios físicos en la estación climatológica o debido a la probable evidencia de cambio climático.

Los resultados del análisis de normalidad explicado en el punto 4.1 anterior se emplean para aplicar las pruebas de homogeneidad correspondientes (paramétricas o no paramétricas). Como se mencionó en el capítulo 3.1.2, si la estación climatológica presenta normalidad, las pruebas que se aplican son las paramétricas, las cuales son la de la t de Student y la de Cramer, en caso contrario, si no presenta normalidad, se aplican las pruebas no paramétricas, que son la de Helmer y la de Secuencias.

En las siguientes tablas se muestran los resultados de aplicar las pruebas de homogeneidad a la precipitación máxima anual en 24 horas de la estación Abraham González. De acuerdo a los resultados de las pruebas de normalidad mostrados en la Tabla 4.6, la estación Abraham González no presenta normalidad, por lo que las pruebas aplicadas fueron las no paramétricas, es decir, Helmer y Secuencias (punto 3.1.2.2.1 y 3.1.2.2.2).

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados de la prueba de Helmer. En este caso se concluyó que la serie de tiempo presenta homogeneidad.

*Tabla 4.7. Resultados de la prueba de homogeneidad de Helmer aplicada en la estación Abraham González.*

<b>MEDIA</b>	42.53
<b>S</b>	28
<b>C</b>	30
$\sqrt{n-1}$	7.6158
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>HOMOGÉNEA</b>



En la Tabla 4.8 se presentan los resultados de las Secuencias. En este caso se concluyó que la serie de tiempo presenta homogeneidad, debido a que el número de rachas o secuencias está comprendido entre el intervalo descrito en la Tabla x del punto 3.1.2.2.1.

*Tabla 4.8. Resultados de la prueba de homogeneidad de las Secuencias aplicada en la estación Abraham González.*

<b>MEDIANA</b>	40.34
<b>n</b>	59
<b>u</b>	35
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>HOMOGÉNEA</b>

De las dos pruebas realizadas se obtuvo el mismo resultado, por lo que se puede concluir que la precipitación máxima anual en la estación Abraham González presenta homogeneidad.

A continuación, se presenta el resumen del resultado de las pruebas de homogeneidad aplicadas para las estaciones climatológicas para el parámetro de precipitación máxima anual en 1 y 24 horas. Los análisis de homogeneidad de todas las estaciones se encuentran en el anexo electrónico.

#### *Precipitación máxima anual en 24 horas*

En la Tabla 4.10 se muestran los resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 24 horas. Es importante dejar en claro, que en algunas estaciones resultó que con una prueba daba homogeneidad y con la otra no homogeneidad, por lo que la decisión se tomó como “resultados distintos”, por lo que en ese caso no hay claridad en la presencia de homogeneidad o no homogeneidad.



## Precipitación máxima anual en 1 hora

En la Tabla 4.9 se muestran los resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 1 hora.

*Tabla 4.9. Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 1 hora.*

ESTACIONES	NORMALIDAD	PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD				HOMOGENEIDAD	NO HOMOGENEIDAD	DECISIÓN	TIPO
		PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS		PRUEBAS PARAMÉTRICAS					
		HELMERT	SECUENCIAS	t DE STUDENT	CRAMER				
Guachochi	EXISTE NORMALIDAD	-	-	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	2	0	HOMOGÉNEA	Homogénea, tendencia con persistencia
Parral	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	-	-	2	0	HOMOGÉNEA	Homogénea, tendencia sin persistencia
Chihuahua	EXISTE NORMALIDAD	-	-	HOMOGÉNEA	HOMOGÉNEA	2	0	HOMOGÉNEA	Homogénea, tendencia sin persistencia



Tabla 4.10. Resultados de las pruebas de homogeneidad aplicadas a las estaciones climatológicas con precipitación máxima anual en 24 horas.

ESTACIONES	NORMALIDAD	PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD				HOMOGENEIDAD	NO HOMOGENEIDAD	DECISIÓN
		PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS		PRUEBAS PARAMÉTRICAS				
		HELMERT	SECUENCIAS	t DE STUDENT	CRAMER			
Abraham González (CNA)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Bachiniva (BACCH)	EXISTE NORMALIDAD	-	-	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	0	2	NO HOMOGENÉA
Camargo (CCOCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA
Casas Grandes (CAGCH)	EXISTE NORMALIDAD	-	-	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	2	0	HOMOGENÉA
Cd. Juárez (CJZCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	1	1	RESULTADOS DISTINTOS
Chihuahua (QJCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	1	1	RESULTADOS DISTINTOS
Colina (CLNCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Delicias (CDLCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	1	1	RESULTADOS DISTINTOS
Fco. I Madero (FIMCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA
Jiménez (JMNCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Las Lajas (LJSCCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	1	1	HOMOGENÉA
Moris (C08182)	EXISTE NORMALIDAD	-	-	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	0	2	NO HOMOGENÉA
Ojinaga (OJNCH)	EXISTE NORMALIDAD	-	-	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	2	0	HOMOGENÉA
Parral (PRRCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA
Peñitas (C08219)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Temosachic (TMCCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Tintero	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Valle De Zaragoza (VZRCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Villa Coronado (VICCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA
Bizmark (BIZCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA
Ascensión	EXISTE NORMALIDAD	-	-	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	2	0	HOMOGENÉA
Coyame	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA
Creel (CRLCH)	EXISTE NORMALIDAD	-	-	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	2	0	HOMOGENÉA
Cuahtémoc (CUACH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	1	1	RESULTADOS DISTINTOS
El Sitio	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA
Guachochi	EXISTE NORMALIDAD	-	-	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	0	2	NO HOMOGENÉA
Guadalupe y Calvo (GYCCH)	EXISTE NORMALIDAD	-	-	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	0	2	NO HOMOGENÉA
Luis L. León (LLNCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	1	1	HOMOGENÉA
Norogachi (NRGCH)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Parrita	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	1	1	NO HOMOGENÉA
Samalayuca	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Tacubaya	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	-	-	2	0	HOMOGENÉA
Tubares (TBRSI)	NO EXISTE NORMALIDAD	HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	1	1	HOMOGENÉA
Urique	EXISTE NORMALIDAD	-	-	HOMOGENÉA	HOMOGENÉA	2	0	HOMOGENÉA
Villa Ahumada	NO EXISTE NORMALIDAD	NO HOMOGENÉA	NO HOMOGENÉA	-	-	0	2	NO HOMOGENÉA



### **4.3. Identificación de punto de inflexión temporal y asociada a posible presencia de cambio climático en las series de tiempo**

Para la identificación de un punto de inflexión temporal que demuestre probable evidencia de cambio climático en las estaciones climatológicas es necesario analizar los resultados de las pruebas de homogeneidad descritas en el punto 4.2.

Cuando en una serie de tiempo se presenta no homogeneidad, es probable que la población se pueda dividir en dos muestras. Esta división puede deberse a un cambio en el comportamiento del parámetro precipitación. Para que se observe probable evidencia de cambio climático debe encontrarse un punto de inflexión temporal en el cual el comportamiento de la precipitación máxima varíe, para lo cual es necesario que la primera muestra de la división presenta homogeneidad, es decir, que explique que el comportamiento en ese periodo de tiempo la precipitación se ha comportado de manera normal, y que la segunda muestra presente anomalías, es decir, no homogeneidad, que representa la variación del parámetro climatológico en el periodo de la muestra. En cada una de las estaciones se verificó si existe tendencia, así como la persistencia de acuerdo a lo explicado en el punto 3.1.3 (prueba paramétrica Anderson o prueba no paramétrica punto de quiebre).

La forma de identificar afectaciones en el diseño de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia debido a probable evidencia de cambio climático radica en encontrar una tendencia a la alta del parámetro de la precipitación que se manifieste en un incremento de la intensidad de las tormentas y con ello un cambio en las curvas IDF que conlleva un cambio en el cálculo de gastos máximos para el diseño de obras hidráulicas.

De acuerdo a los resultados obtenidos para las estaciones con precipitación máxima anual en 1 y 24 horas, se clasificaron las estaciones en 9 tipos, los cuales se describen en la Tabla 4.11.



*Tabla 4.11. Clasificación de estaciones climatológicas de acuerdo a los resultados de las pruebas de homogeneidad.*

TIPO	CARACTERÍSTICAS
I	Homogénea, tendencia con persistencia.
II	Homogénea, tendencia sin persistencia.
III	No homogénea, con evidencia de cambio climático y con persistencia final.
IV	No homogénea, con evidencia de cambio climático y con persistencia inicial.
V	No homogénea, con evidencia de cambio climático y con persistencia total y final.
VI	No homogénea, con evidencia de cambio climático y sin persistencia.
VII	Pruebas de homogeneidad con resultados distintos, sin evidencia de cambio climático.
VIII	No homogénea, sin evidencia de cambio climático y sin persistencia.
IX	No homogénea, sin evidencia de cambio climático y con persistencia final.

De cada uno de los tipos de estaciones se muestra el análisis de una de ellas, así como la lista de estaciones para cada tipo.

*Tipo I (homogénea, tendencia con persistencia)*

En la Tabla 4.12 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo I.

*Tabla 4.12. Estaciones climatológicas del tipo I.*

TIPO	ESTACIÓN
I	Abraham González (CNA)
	Las Lajas (LJCH)
	Tintero
	Ascensión
	Urique
	Guachochi (1 hr)

En la Figura 4.3 se muestra la gráfica de la estación Abraham González como ejemplo del tipo I de las estaciones climatológicas, las cuales presentan homogeneidad en la serie de tiempo y además tienen tendencia con persistencia.

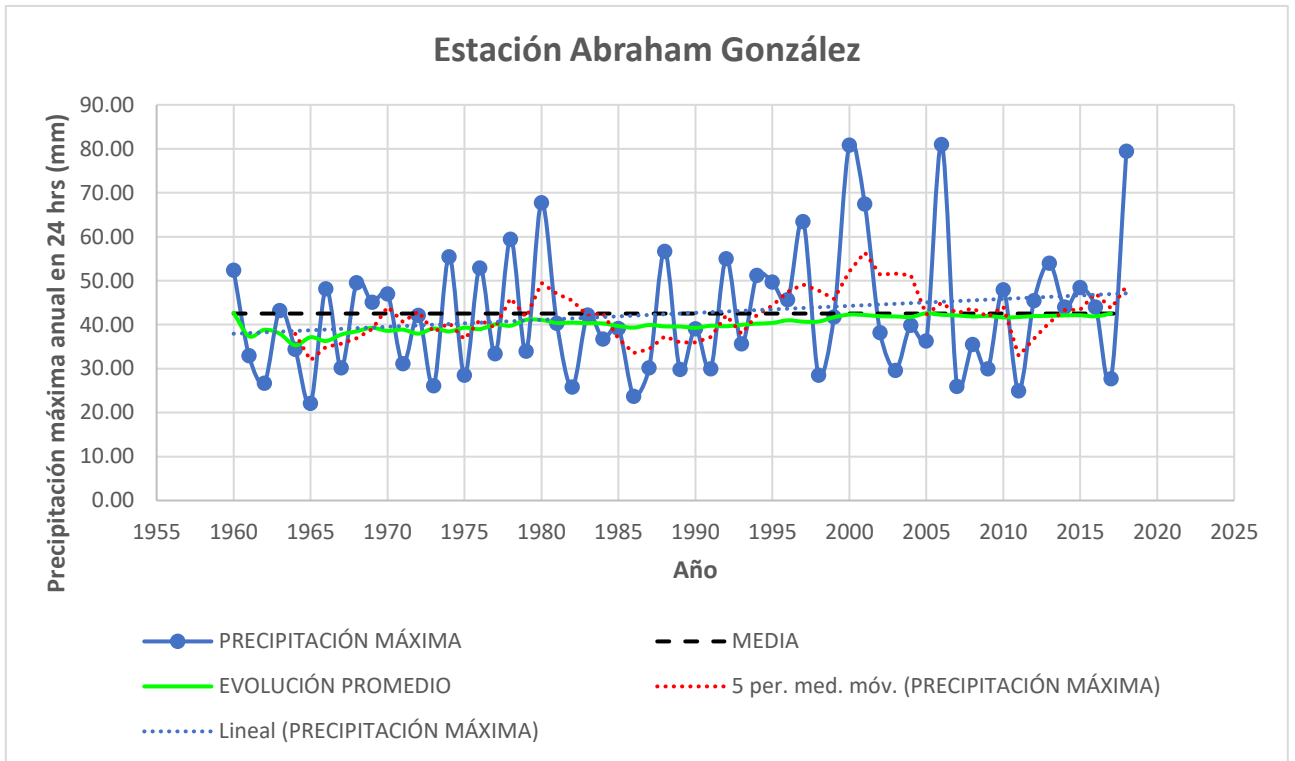


Figura 4.3. Análisis gráfico de la estación Abraham González.

### *Tipo II (homogénea, tendencia sin persistencia)*

En la Tabla 4.13 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo II.

En la Figura 4.4 se muestra la gráfica de la estación Casas Grandes como ejemplo del tipo II de las estaciones climatológicas, las cuales presentan homogeneidad en la serie de tiempo y tienen tendencia sin persistencia.



Tabla 4.13. Estaciones climatológicas del tipo II.

TIPO	ESTACIÓN
II	Casas Grandes (CAGCH)
	Colina (CLNCH)
	Jiménez (JMNCH)
	Ojinaga (OJNCH)
	Peñitas (C08219)
	Temosachic (TMCCH)
	Valle De Zaragoza (VZRCH)
	Creel (CRLCH)
	Luis L. León (LLNCH)
	Norogachi (NRGCH)
	Samalayuca
	Tacubaya
	Tubares (TBRSI)
	Parral (1 hr)
	Chihuahua (1hr)

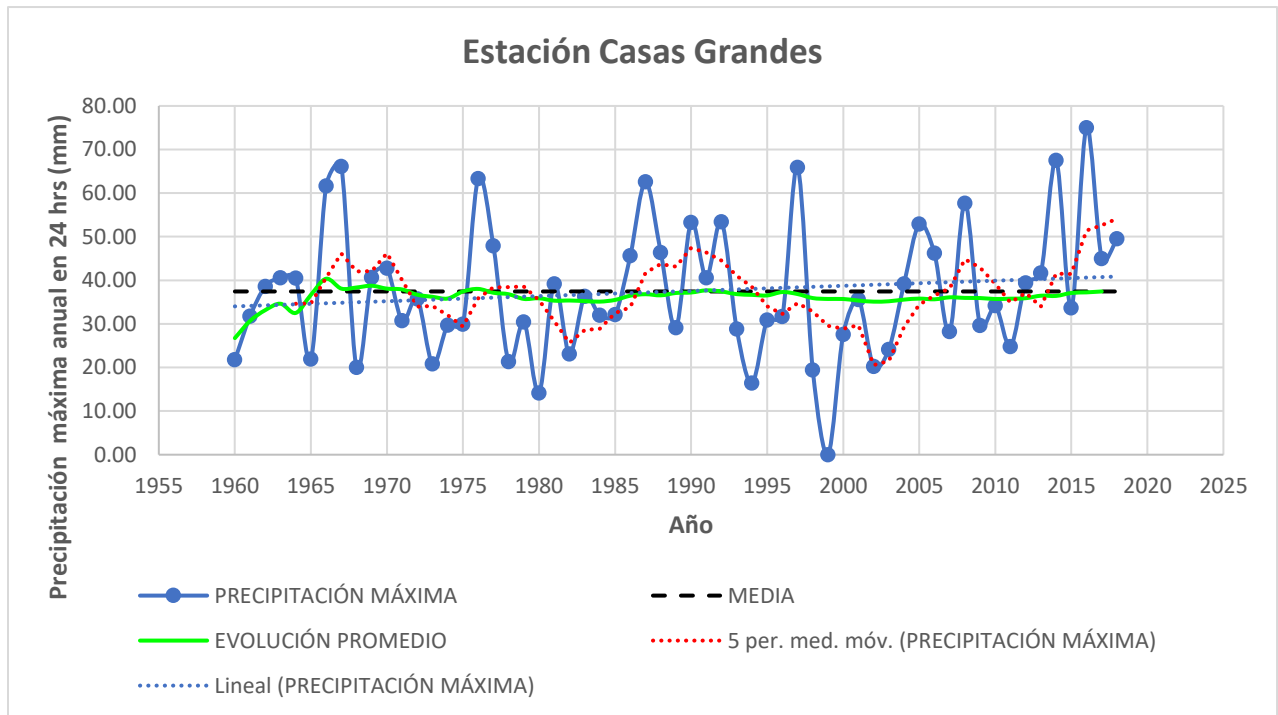


Figura 4.4. Análisis gráfico de la estación Casas Grandes.



*Tipo III (no homogénea, con evidencia de cambio climático y con persistencia final)*

En la Tabla 4.14 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo III.

En la Figura 4.5 se muestra la gráfica de la estación Bachíniva como ejemplo del tipo III de las estaciones climatológicas, las cuales no presentan homogeneidad, pero si evidencia de cambio climático en la serie de tiempo y tienen persistencia final.

Tabla 4.14. Estaciones climatológicas del tipo III.

TIPO	ESTACIÓN
III	Bachiniva (BACCH)
	Guachochi

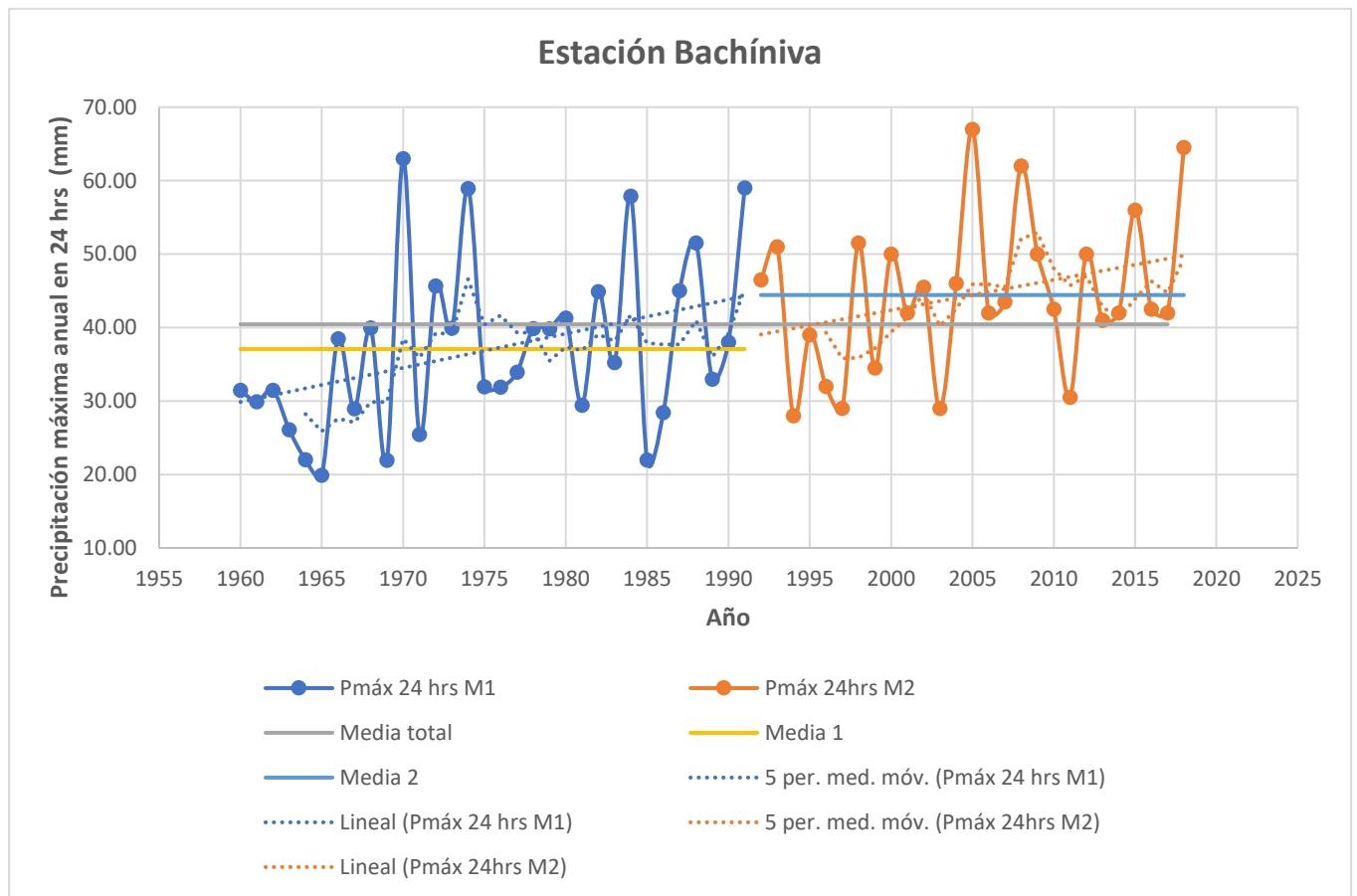


Figura 4.5. Análisis gráfico de la estación Bachíniva.



*Tipo IV (no homogénea, con evidencia de cambio climático y con persistencia inicial)*

En la Tabla 4.15 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo IV.

En la Figura 4.6 se muestra la gráfica de la estación El Sitio como ejemplo del tipo IV de las estaciones climatológicas, las cuales no presentan homogeneidad, pero si evidencia de cambio climático en la serie de tiempo y tienen persistencia inicial.

Tabla 4.15. Estaciones climatológicas del tipo IV.

TIPO	ESTACIÓN
IV	El Sitio
	Guadalupe y Calvo (GYCCH)

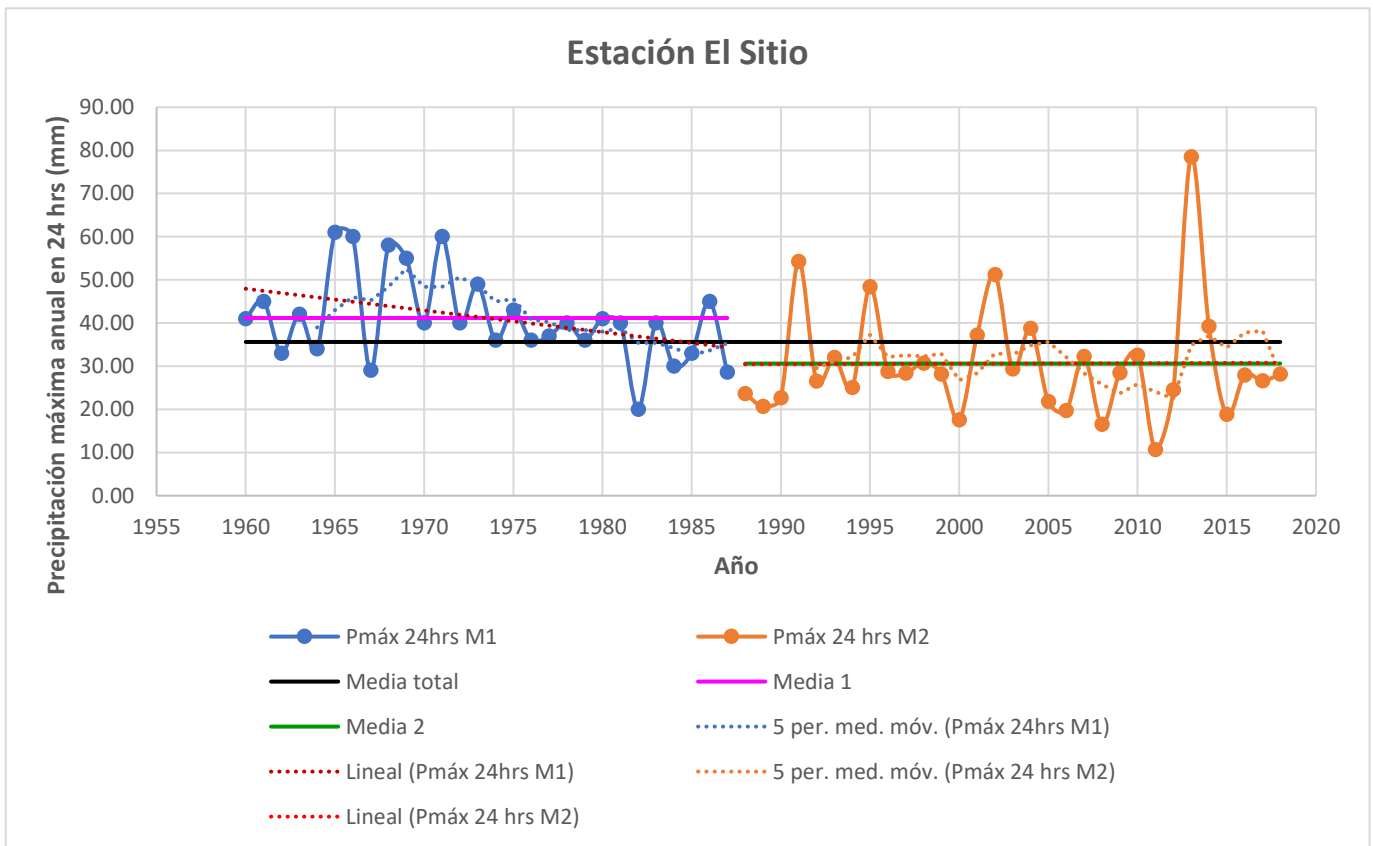


Figura 4.6. Análisis gráfico de la estación El Sitio.



*Tipo V (no homogénea, con evidencia de cambio climático y con persistencia total y final)*

En la Tabla 4.16 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo V.

En la Figura 4.7 se muestra la gráfica de la estación Parrita como ejemplo del tipo V de las estaciones climatológicas, las cuales no presentan homogeneidad, pero si evidencia de cambio climático en la serie de tiempo y tienen persistencia total y final.

Tabla 4.16. Estaciones climatológicas del tipo V.

TIPO	ESTACIÓN
V	Parrita

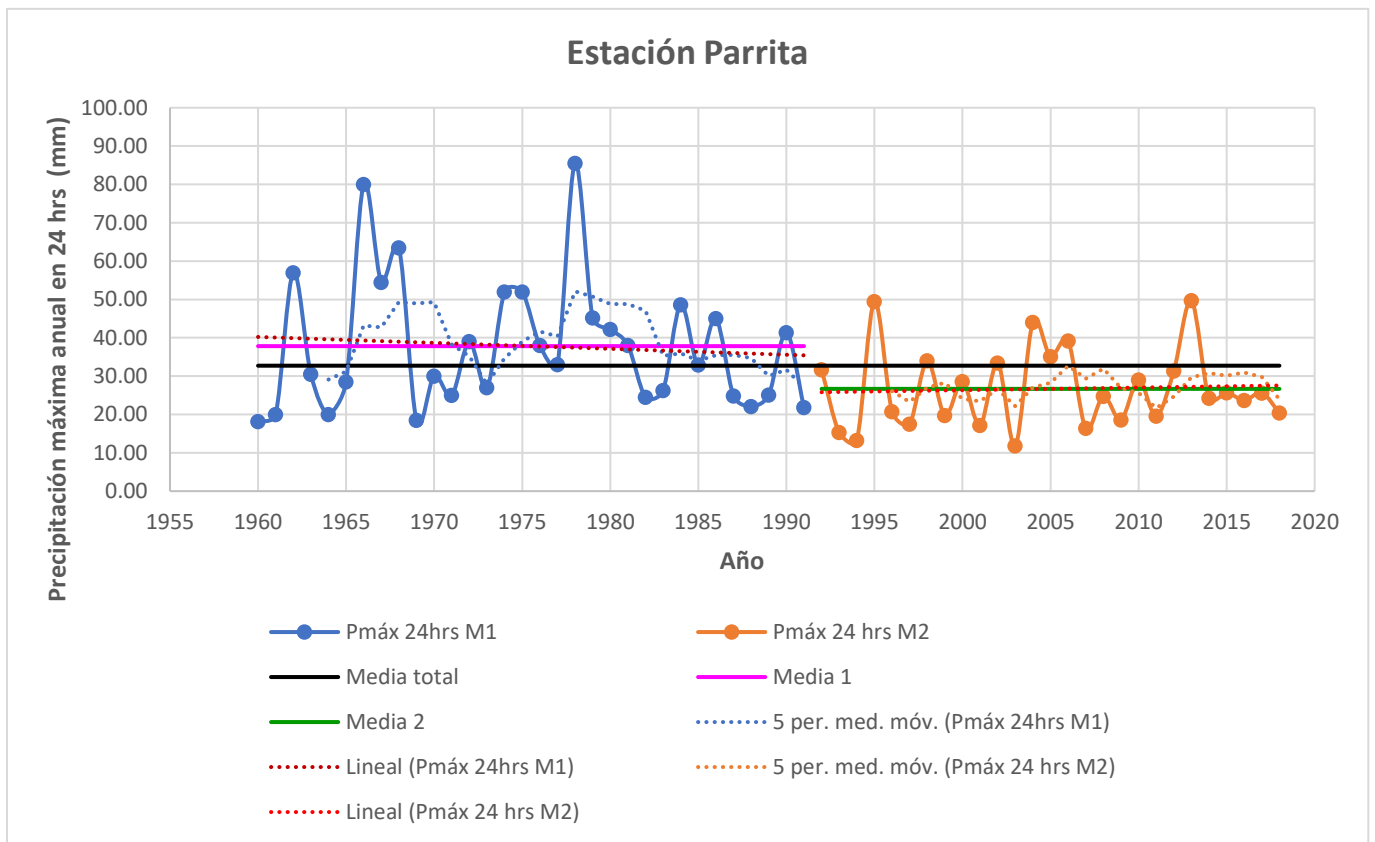


Figura 4.7. Análisis gráfico de la estación Parrita.



*Tipo VI (no homogénea, con evidencia de cambio climático y sin persistencia)*

En la Tabla 4.17 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo VI.

En la Figura 4.8 se muestra la gráfica de la estación Camargo como ejemplo del tipo VI de las estaciones climatológicas, las cuales no presentan homogeneidad, pero si evidencia de cambio climático en la serie de tiempo y no se presenta persistencia.

Tabla 4.17. Estaciones climatológicas del tipo VI.

TIPO	ESTACIÓN
VI	Camargo (CCOCH)
	Villa Coronado (VICCH)
	Bizmark (BIZCH)
	Coyame
	Villa Ahumada

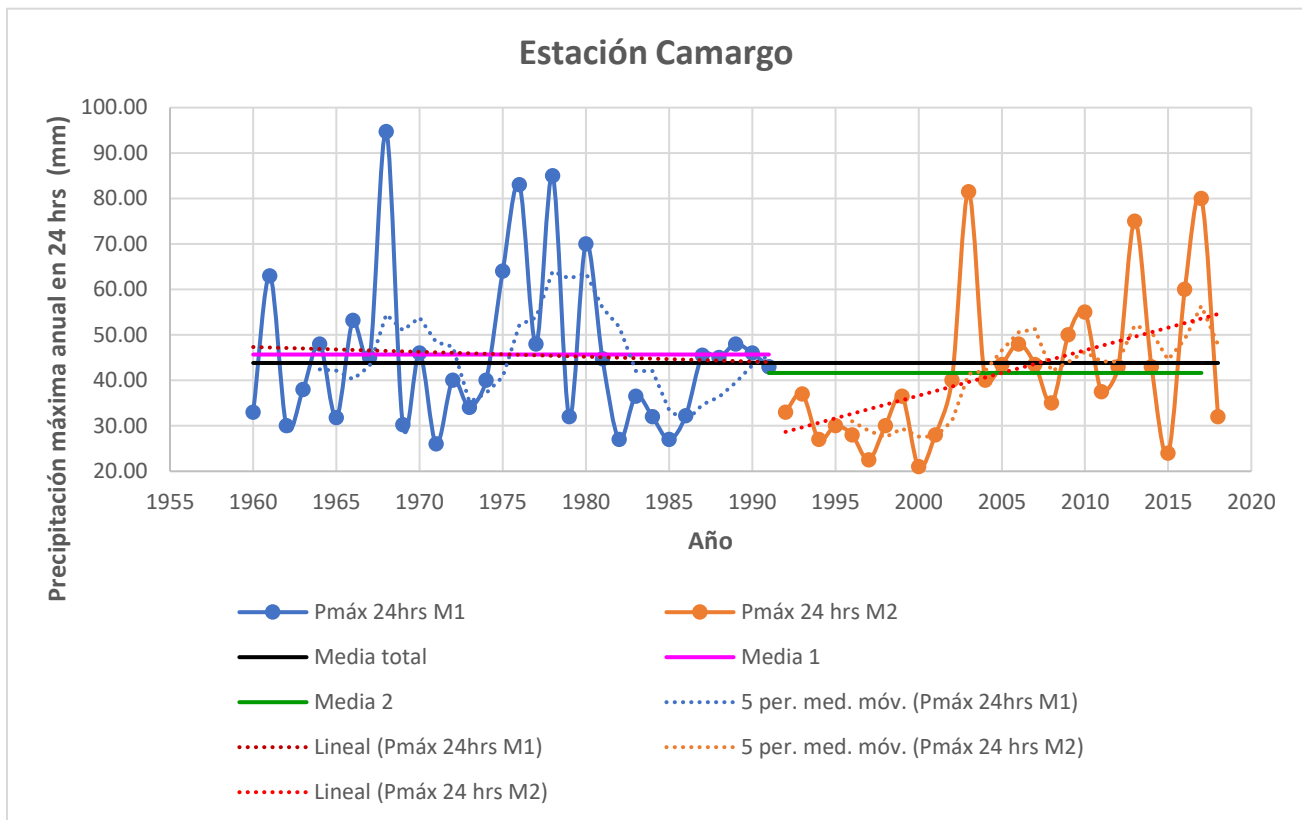


Figura 4.8. Análisis gráfico de la estación Camargo.



Tipo VII (pruebas de homogeneidad con resultados distintos, sin evidencia de cambio climático)

En la Tabla 4.18 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo VII.

En la Figura 4.9 se muestra la gráfica de la estación Juárez como ejemplo del tipo VII de las estaciones climatológicas, las cuales presentan resultados distintos y sin evidencia de cambio climático.

Tabla 4.18. Estaciones climatológicas del tipo VII.

TIPO	ESTACIÓN
VII	Cd. Juárez (CJZCH)
	Chihuahua (QJCH)
	Delicias (CDLCH)
	Cuauhtémoc (CUACH)

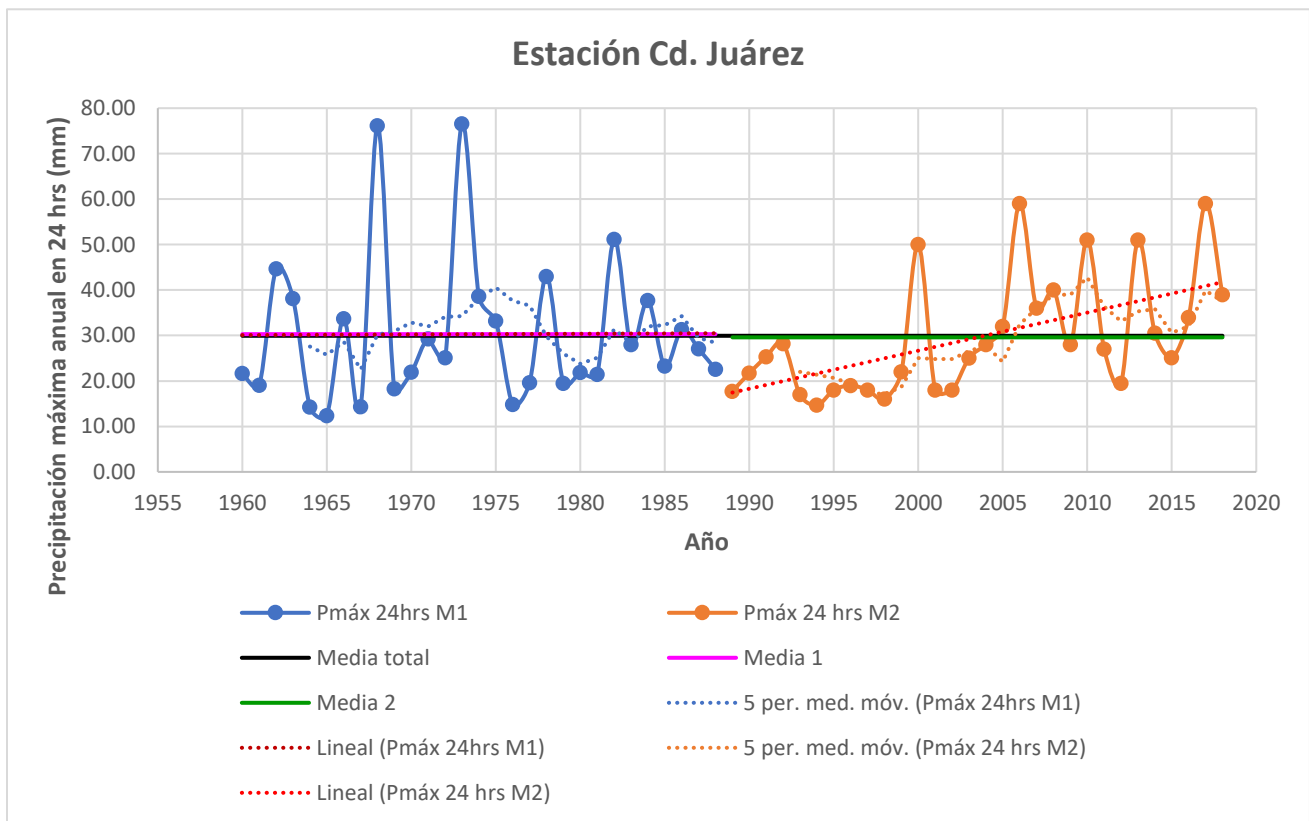


Figura 4.9. Análisis gráfico de la estación Cd. Juárez.



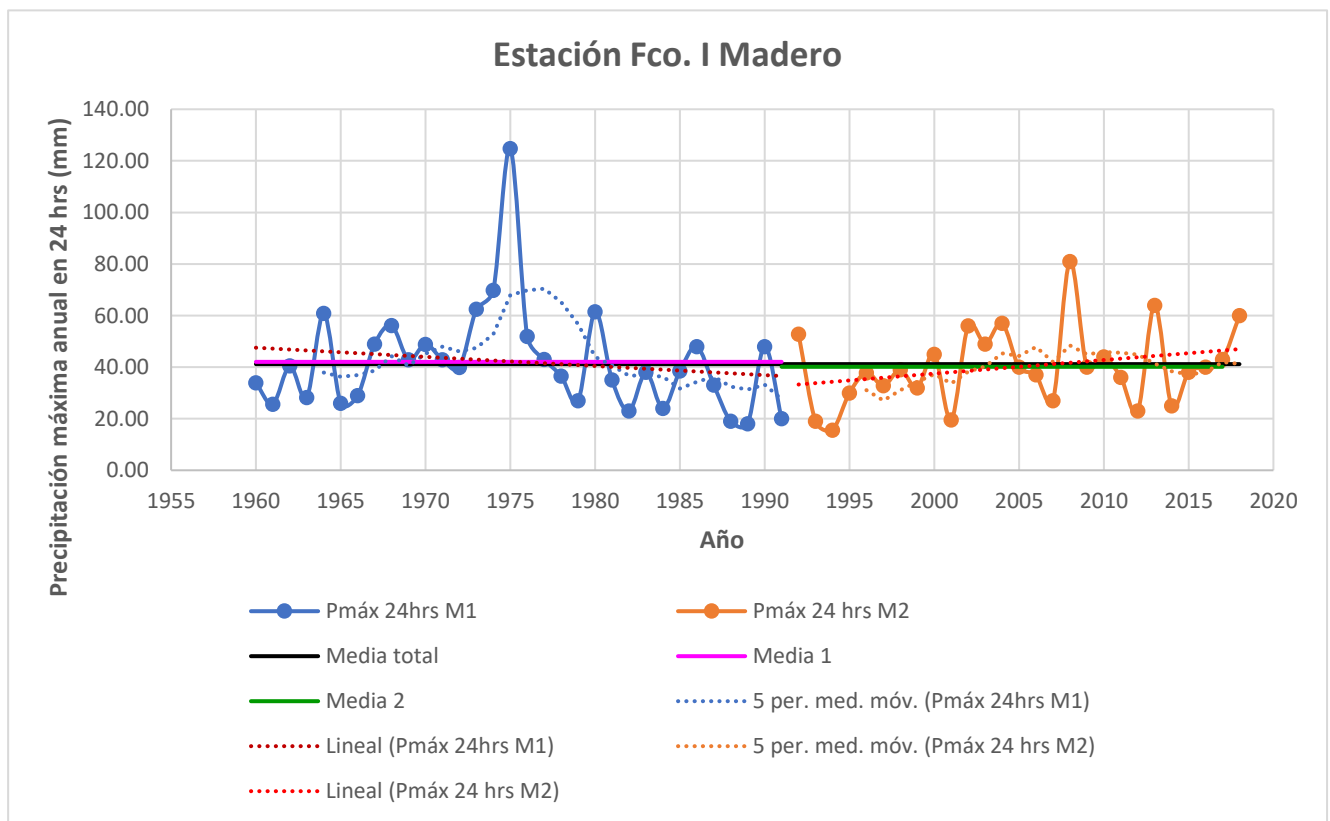
*Tipo VIII (no homogénea, sin evidencia de cambio climático y sin persistencia)*

En la Tabla 4.19 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo VIII.

En la Figura 4.10 se muestra la gráfica de la estación Francisco I. Madero como ejemplo del tipo VIII de las estaciones climatológicas, las cuales no presentan homogeneidad, ni evidencia de cambio climático en la serie de tiempo y no presentan persistencia.

*Tabla 4.19. Estaciones climatológicas del tipo VIII.*

TIPO	ESTACIÓN
VIII	Fco. I Madero (FIMCH)
	Parral (PRRCH)



*Figura 4.10. Análisis gráfico de la estación Fco. I Madero.*



Tipo IX (no homogénea, sin evidencia de cambio climático y con persistencia final)

En la Tabla 4.20 se muestra la lista de estaciones climatológicas correspondientes al tipo IX.

En la Figura 4.11 se muestra la gráfica de la estación Moris como ejemplo del tipo IX de las estaciones climatológicas, las cuales no presentan homogeneidad, ni evidencia de cambio climático en la serie de tiempo y no presentan persistencia.

Tabla 4.20. Estaciones climatológicas del tipo IX.

TIPO	ESTACIÓN
IX	Moris (C08182)

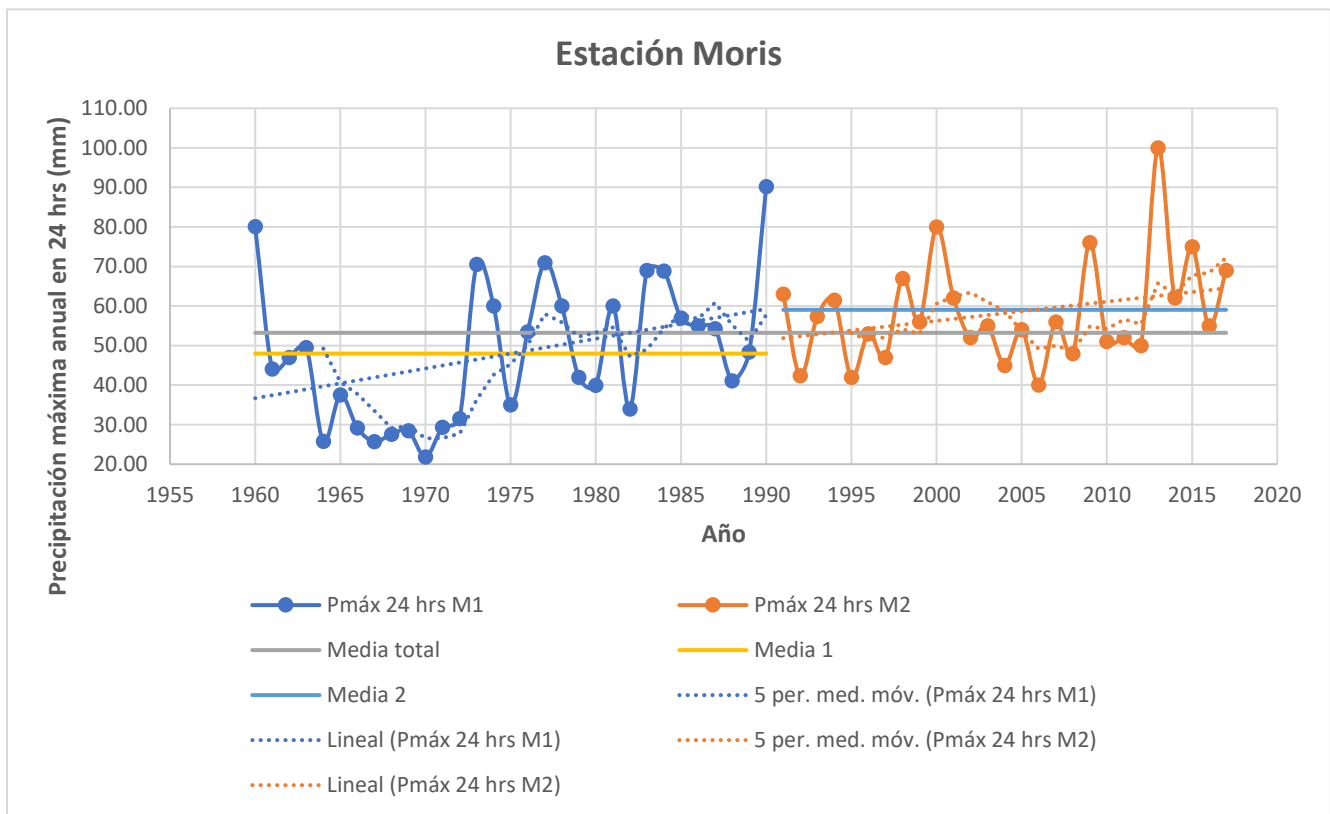


Figura 4.11. Análisis gráfico de la estación Moris.



## **5. Construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua**

La construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia se emplea para conocer las características de las tormentas de una zona o región; ya que a partir de ellas se obtienen los gastos máximos para el diseño de infraestructura hidráulica. Es por ello que es importante conocer el comportamiento de la precipitación máxima a lo largo del tiempo y con ello la probable evidencia de cambio climático presente en las estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua, ya que si hubiera evidencia de cambio climático a la alta, es decir, que se produzca un salto en el comportamiento de la precipitación, tal como se mencionó en la sección 4.3 de esta obra, se produciría un aumento en la intensidad de las tormentas y con ello que los gastos máximos necesarios para el diseño de obras hidráulicas se eleven.

### **5.1. Ajuste de los datos de precipitación máxima a funciones de probabilidad mediante el software Ax**

Se elaboró el ajuste de los datos de precipitación máxima a funciones de probabilidad mediante el software Ax según lo mencionado en la sección 3.2.1 de esta obra, con la finalidad de encontrar el ajuste más adecuado, es decir, con menor error.

En las Figuras 5.1 a x se muestra el ajuste de los datos de precipitación máxima anual en 24 horas, a funciones de probabilidad de la estación Chihuahua. En la Figura 5.1 se observa la captura de los datos de precipitación mediante el software Ax (formato .AJU).

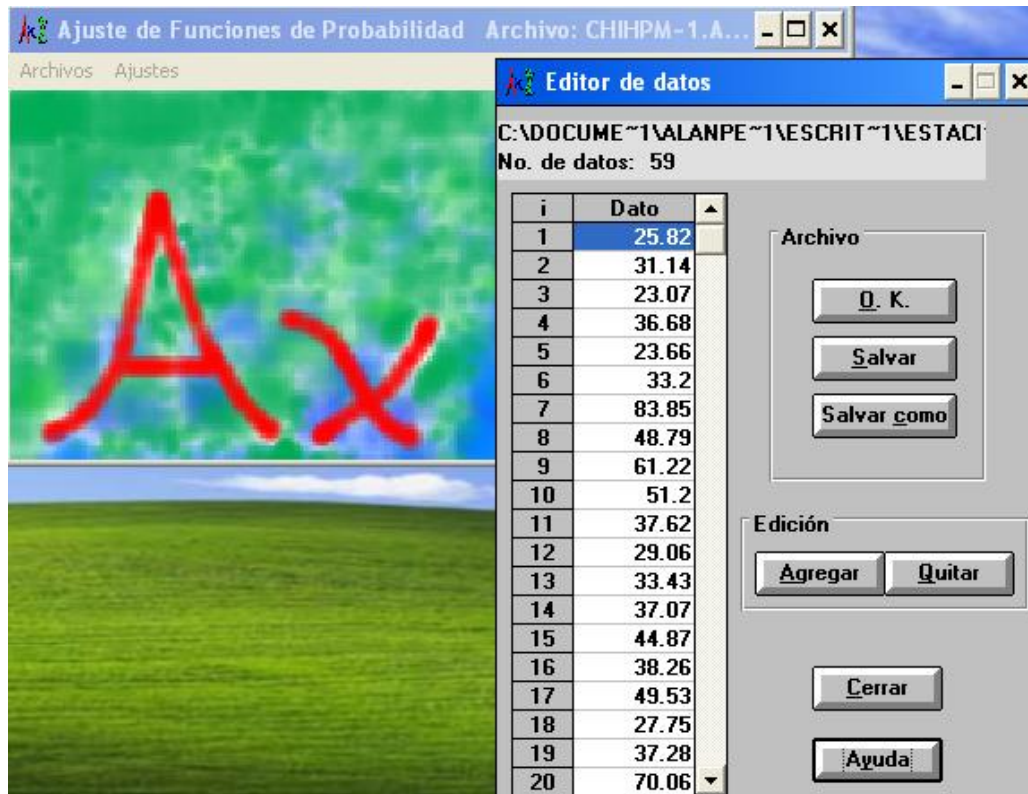


Figura 5.1. Captura de datos de la estación Chihuahua mediante software Ax.

Se analizan las funciones de distribución de probabilidad (normal, Lognormal, Gumbel, doble Gumbel, exponencial y gamma). En la Figura 5.2 se muestra un cuadro resumen del error estándar de cada una de las funciones. El software Ax obtiene el mínimo error estándar que se presenta en los ajustes y con ello se puede seleccionar la distribución con un mejor ajuste.

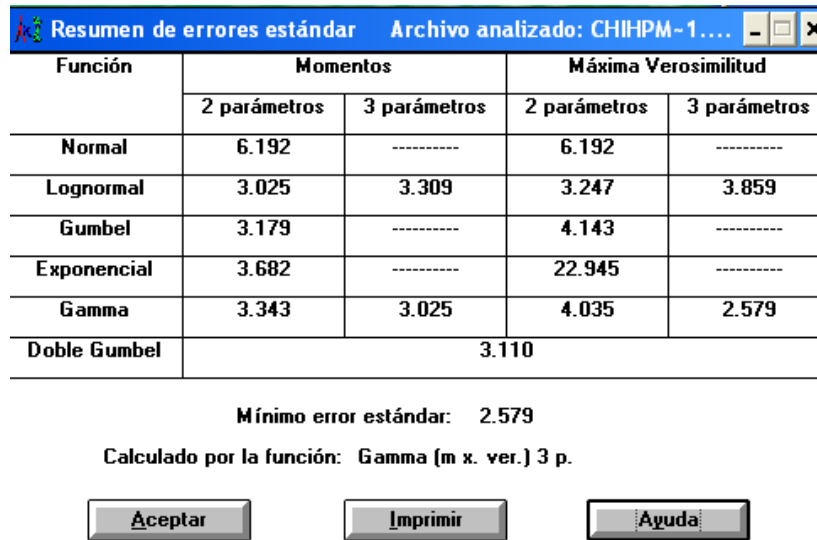


Figura 5.2. Resumen de los errores estándar de las funciones de distribución de probabilidad para la estación Chihuahua.

En este caso se selecciona la función de distribución de probabilidad gamma de tres parámetros del método de máxima verosimilitud y se selecciona ver la información para observar los datos calculados y su error (Figura 5.4).

La función de distribución de probabilidad permite extrapolar información de lluvia a periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 y 10000 años, como se muestra en la Figura 5.3.

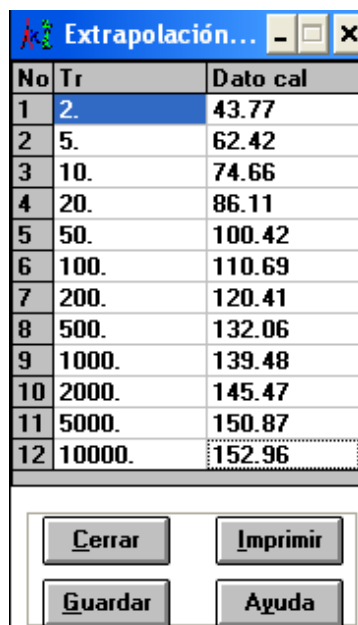


Figura 5.3. Extrapolación de la información de lluvia de la estación Chihuahua para distintos periodos de retorno Tr.

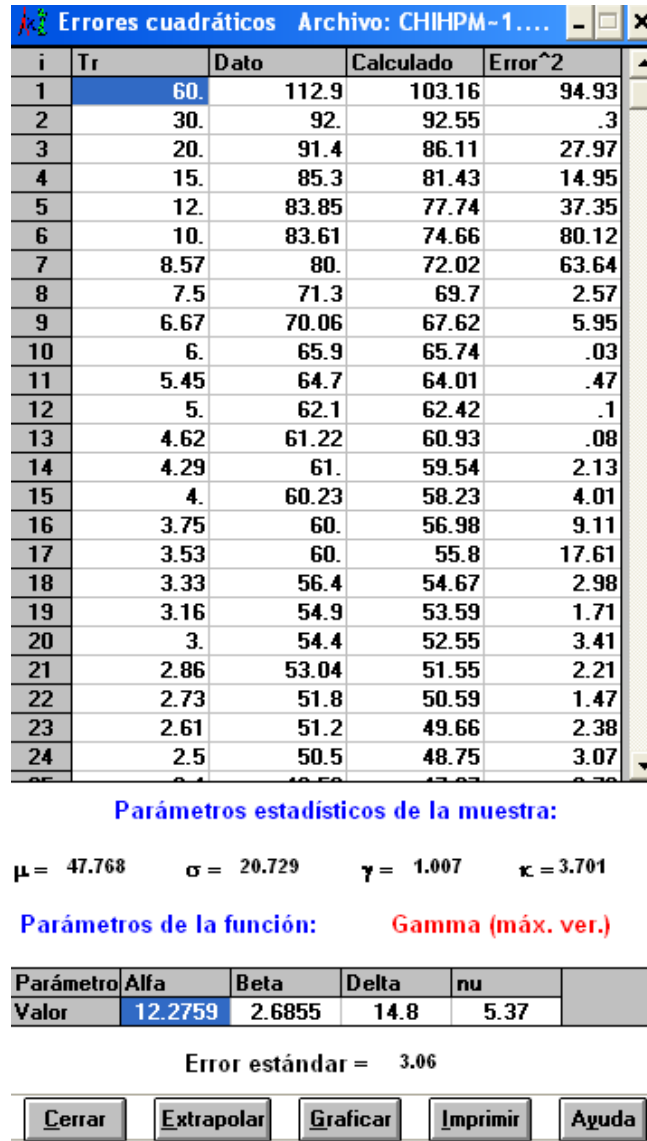


Figura 5.4. Datos calculados mediante la función gamma de tres parámetros del método de máxima verosimilitud para la estación Chihuahua.

A partir del ajuste se elabora una gráfica comparando los datos originales con los datos calculados para conocer el error presente en el ajuste mediante funciones de distribución de probabilidad. En la Figura 5.5 se muestra la gráfica del ajuste realizado para la precipitación máxima anual en 24 horas de la estación Chihuahua.

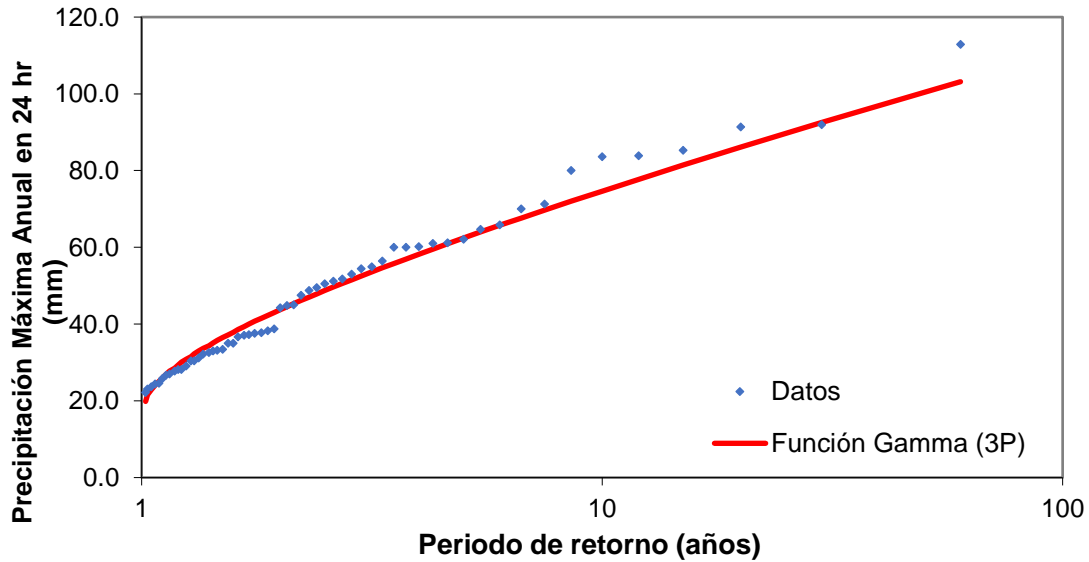


Figura 5.5. Comparación de ajuste realizado y datos originales de la estación Chihuahua.

## 5.2. Construcción de curvas intensidad-duración-frecuencia para precipitaciones máximas mediante las fórmulas de Cheng Lung Chen y F.C. Bell

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia se determinaron mediante el uso de las estaciones con información de precipitación máxima anual en 1 y 24 horas. Después del ajuste realizado se elaboró la extrapolación para diferentes periodos de retorno tal como se menciona en la sección 5.1. La información de precipitación máxima en 24 horas fue corregida por un intervalo fijo de observación que propone L. L. Weiss (1964), cuyo valor es 1.13. Es importante mencionar que este factor solo se emplea para la precipitación en 24 horas.

La construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia se elaboró mediante la metodología propuesta por Campos (1984) que consta de realizar los ajustes para la precipitación máxima en 1 y 24 horas, obtener el parámetro  $r$ ,  $F$  y aplicar las ecuaciones descritas en la sección 3.2.2; dicha metodología se presenta en el anexo electrónico de esta obra. Para ello se programó en una hoja de Excel las fórmulas de Cheng Lung Chen y F. C. Bell descritas en la sección 3.2.2 (ecuación 3.20 y



3.24), así como los parámetros mencionados. Es importante mencionar que se emplean la precipitación en 1 y 24 horas para la construcción de curvas.

En el diseño de las curvas se incluye el parámetro  $r$ , el cual consiste en la relación entre la precipitación en 1 hora en un periodo de retorno de 2 años y la precipitación en 24 horas en un periodo de retorno de 2 años. Dicho cociente nos da información importante sobre el comportamiento de la precipitación en la estación climatológica: según Campos (1984), un cociente menor a 0.40 define una zona donde la incidencia de tormentas convectivas o aguaceros es baja y las grandes lluvias proceden de tormentas no convectivas y donde los procesos orográficos son la causa principal de las fuertes lluvias en invierno, mientras que un valor mayor a 0.40 sin que sobrepase 0.70 define regiones de baja lluvia anual, donde el número de días con lluvia es pequeño, en donde es bastante probable que la lluvia máxima anual en 24 horas provenga de una tormenta convectiva de verano, de duración sustancialmente menor a 24 horas y en regiones de alta incidencia de fuertes aguaceros, donde tanto la lluvia máxima anual en una hora, como la de 24 horas generalmente provienen de la misma tormenta.

Se elaboraron las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua. Las series de tiempo de precipitación máxima en 1 y 24 horas de la estación Chihuahua muestran tendencia total a la alta (ver Figuras 5.6 y 5.7) aunque por el momento sin presentar persistencia, por lo que evaluar el efecto de dicha tendencia a manera de ejemplificación, se considera importante en términos de determinación de avenidas máximas para el diseño de infraestructura hidráulica. El periodo con información de precipitación máxima en 24 horas es de 1960 a 2018 y el de precipitación máxima en 1 hora es de 1983 a 2017. Para el caso de la estación Chihuahua, se construyeron curvas con el periodo completo de la precipitación máxima en 24 horas (1960-2018) y un segundo caso en el que solamente se consideró desde el año con el que se cuenta con información de precipitación máxima en 1 hora, por lo que el primer caso tiene periodos de 1960-2018 para el caso de precipitación en 24 horas y de 1983-2017 para la precipitación en 1 hora y para el segundo caso tiene periodos de 1983-2018 para la precipitación en 24 horas



y de 1983-2017 para la precipitación en 1 hora. Esto se elaboró con la finalidad de observar si existe un incremento en la intensidad de las tormentas en esos periodos, es decir, si en el segundo periodo se está manifestando un incremento en las intensidades y con ello un impacto en las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, tal como se mencionó en la explicación de la sección 4.3 de esta obra.

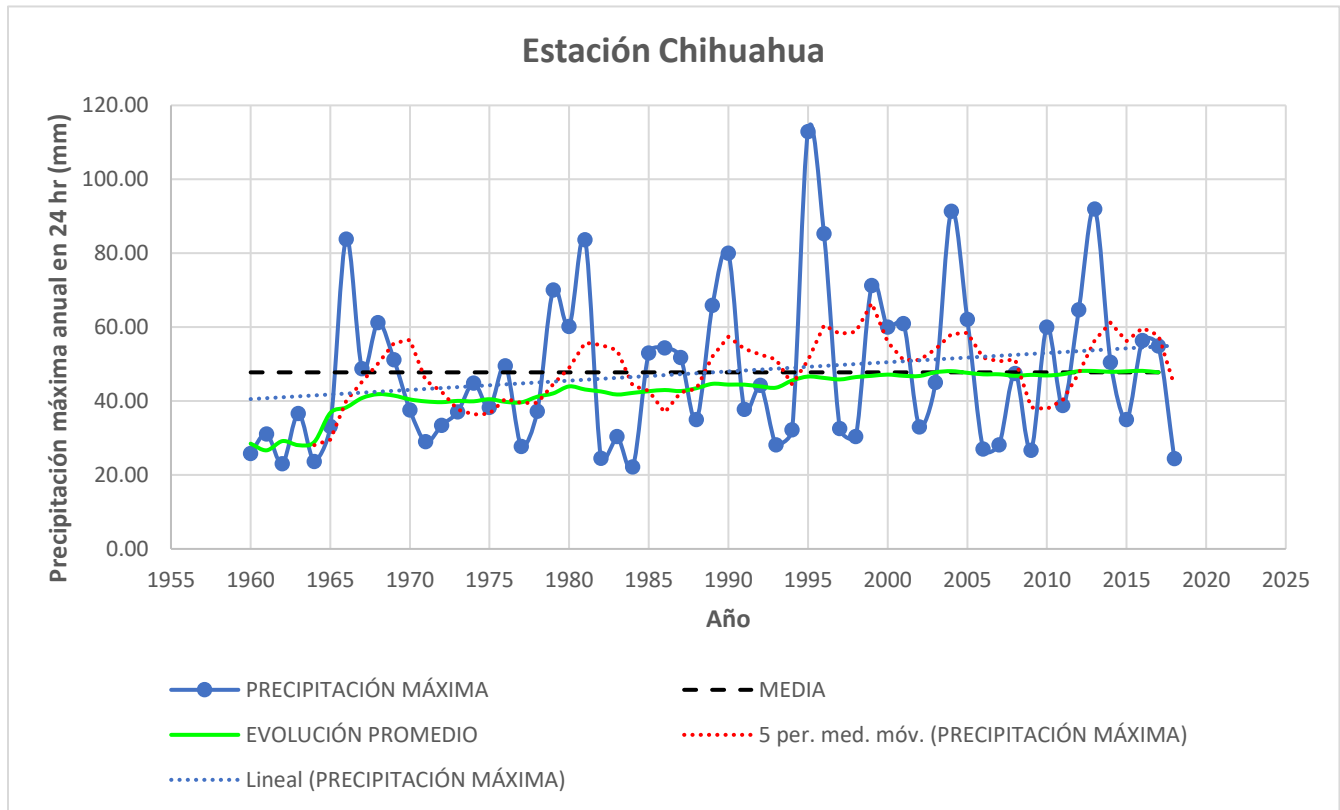


Figura 5.6. Serie de tiempo de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chihuahua.

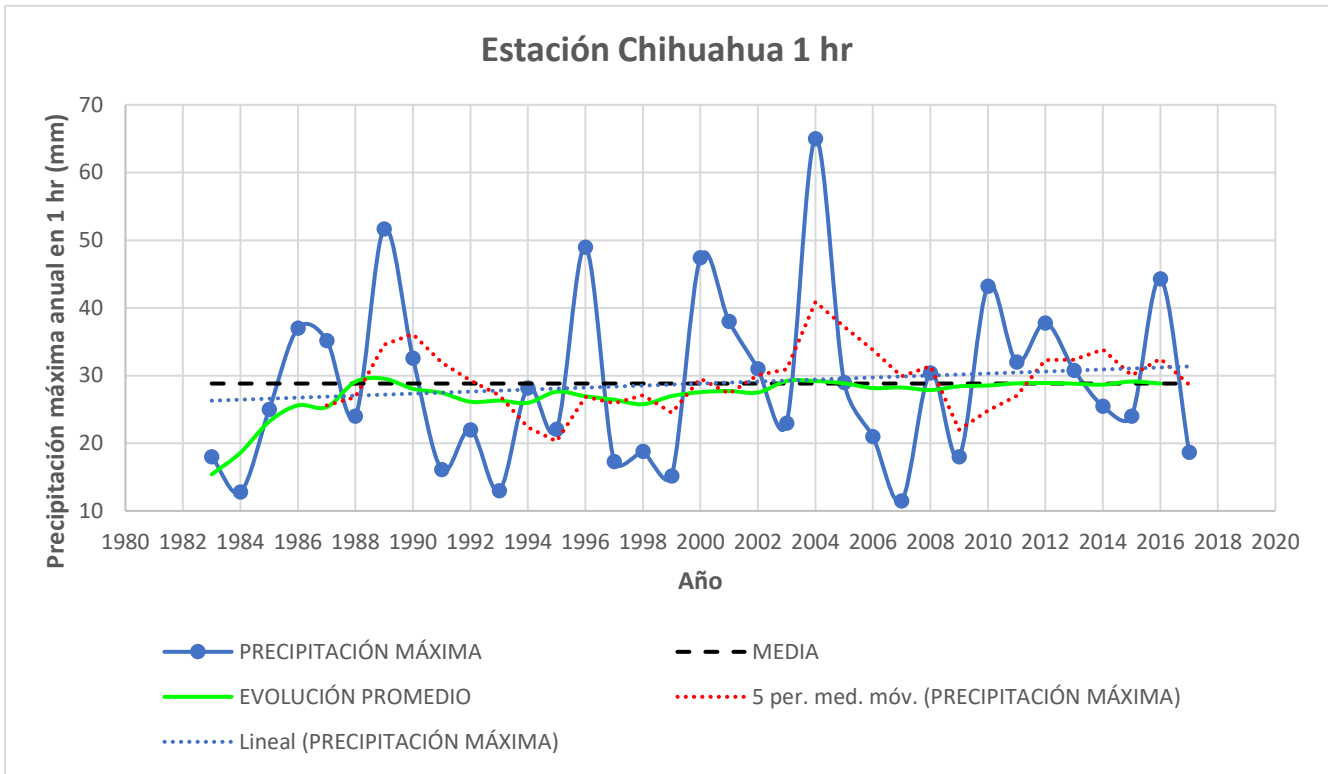


Figura 5.7. Serie de tiempo de precipitación máxima en 1 hora de la estación Chihuahua.

En las Tablas 5.1 y 5.2 se muestran los resultados de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para el primer caso (registro completo) y para el segundo caso (registro incompleto) respectivamente.



*Tabla 5.1. Resultados de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua usando el registro completo.*

t (min)	Periodo de retorno Tr (años)								
	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
1	1.90	2.45	2.86	3.41	3.83	4.24	5.21	5.63	7.01
2	3.55	4.58	5.36	6.38	7.16	7.94	9.75	10.52	13.11
3	5.00	6.45	7.55	9.00	10.10	11.19	13.74	14.84	18.48
4	6.30	8.12	9.50	11.32	12.70	14.08	17.29	18.67	23.25
5	7.45	9.61	11.25	13.41	15.04	16.68	20.47	22.11	27.53
6	8.50	10.96	12.83	15.29	17.15	19.02	23.34	25.21	31.40
15	14.85	19.15	22.41	26.71	29.96	33.22	40.77	44.03	54.84
60	25.29	32.62	38.17	45.50	51.04	56.59	69.46	75.01	93.43
120	30.00	38.69	45.27	53.96	60.54	67.12	82.39	88.97	110.81
180	32.61	42.06	49.21	58.66	65.81	72.96	89.56	96.70	120.45
360	36.98	47.69	55.80	66.52	74.62	82.73	101.55	109.66	136.59
720	41.41	53.41	62.49	74.49	83.56	92.64	113.72	122.80	152.95
1440	46.07	59.42	69.52	82.87	92.97	103.07	126.52	136.62	170.17

*Tabla 5.2. Resultados de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua usando el registro incompleto.*

t (min)	Periodo de retorno Tr (años)								
	2	5	10	25	50	100	500	1000	10000
1	1.91	2.48	2.90	3.46	3.89	4.31	5.29	5.72	7.13
2	3.57	4.62	5.41	6.46	7.25	8.05	9.89	10.68	13.31
3	5.03	6.51	7.62	9.10	10.21	11.33	13.92	15.03	18.74
4	6.33	8.18	9.58	11.44	12.84	14.24	17.50	18.90	23.56
5	7.48	9.68	11.34	13.53	15.19	16.85	20.70	22.36	27.87
6	8.53	11.03	12.92	15.42	17.31	19.20	23.59	25.48	31.76
15	14.87	19.22	22.52	26.88	30.17	33.47	41.12	44.42	55.36
60	25.53	33.01	38.67	46.15	51.81	57.47	70.61	76.27	95.07
120	30.56	39.52	46.29	55.24	62.02	68.79	84.52	91.30	113.80
180	33.44	43.23	50.65	60.44	67.85	75.27	92.48	99.89	124.51
360	38.39	49.63	58.14	69.39	77.90	86.41	106.17	114.67	142.94
720	43.56	56.32	65.98	78.74	88.40	98.06	120.48	130.13	162.21
1440	49.14	63.53	74.43	88.83	99.72	110.61	135.90	146.79	182.97



En la Figura 5.8, 5.9 y 5.10 se muestran de ejemplo las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua con el periodo completo e incompleto de la precipitación máxima en 24 horas para los periodos de retorno de 25, 100 y 500 años, respectivamente.

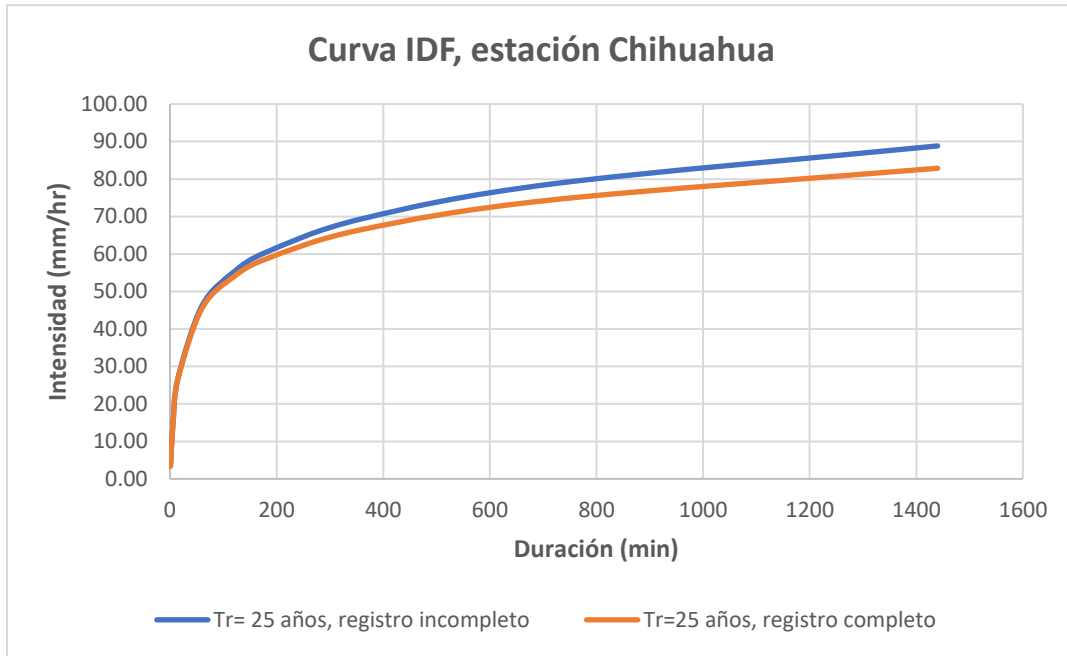


Figura 5.8. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua con el registro completo e incompleto para un periodo de retorno de 25 años.

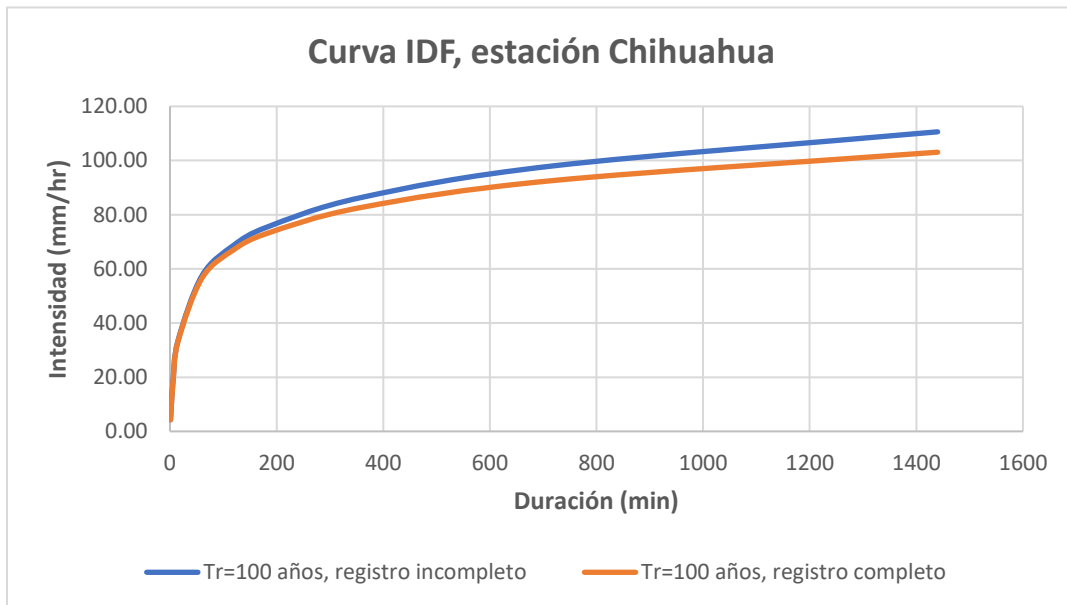


Figura 5.9. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua con el registro completo e incompleto para un periodo de retorno de 100 años.

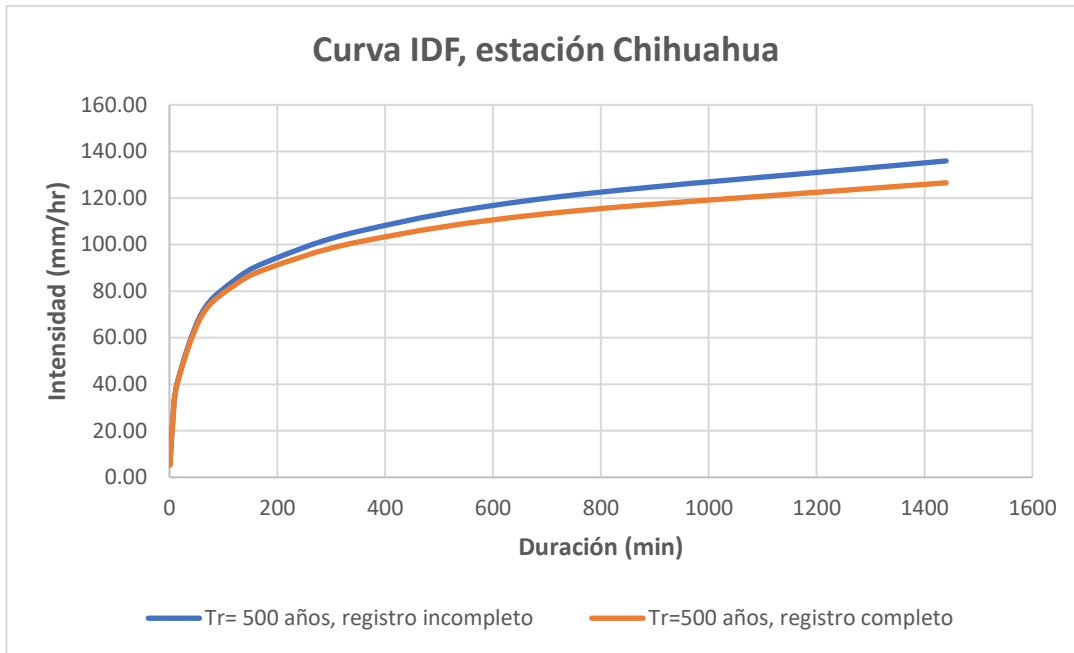


Figura 5.10. Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para la estación Chihuahua con el registro completo e incompleto para un periodo de retorno de 500 años.

En la Figura 5.8, 5.9 y 5.10 se puede observar en la curva Intensidad-Duración-Frecuencia de la estación Chihuahua, que la intensidad de la tormenta del registro incompleto es mayor que la del registro completo, esto indica que en el segundo periodo se está presentando un incremento en la intensidad de la precipitación lo que conlleva una afectación en el diseño de curvas IDF y por lo tanto que al momento de obtener gastos máximos, estos tiendan a ser mayores para el diseño de infraestructura hidráulica. Estas características son el objeto de estudio de esta obra, se buscaron posibles afectaciones en las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia por una tendencia a la alta de la precipitación.

### 5.3. Análisis de existencia de cambio en la intensidad de las tormentas en las series de tiempo

Para conocer la existencia de cambio en la intensidad de las tormentas en las series de tiempo de precipitación máxima en 1 y 24 horas se empleó el análisis descrito en el capítulo 4 de esta obra, usando los resultados de las pruebas de



homogeneidad y del análisis de tendencia, para conocer la posible afectación en el diseño de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia debido al cambio climático.

En la Tabla 5.3 se presenta la evaluación de las estaciones climatológicas en las que se podría tener efecto en las curvas IDF por posible cambio climático. En ella se muestran todas las estaciones en las cuales podría haber afectación y en cuáles no; en las que se presenta, se denota con una marca de verificación mientras que en las que no se presenta afectación se denota con una cruz. Es importante mencionar que las marcas de verificación y las cruces que están en negritas describen estaciones en las que evidentemente se presenta afectación (tendencia a la alta y persistencia) y en las que definitivamente no (tendencia a la baja y persistencia), respectivamente. Las estaciones analizadas con precipitación máxima en una 1 hora se muestran al final de la lista, en las que se hace énfasis en su nombre que son en 1 hora.

Se analizaron 38 estaciones con registros significativos, de las cuales 35 corresponden a estaciones con registros de precipitación máxima en 24 horas y 3 de 1 hora. Respecto al análisis de las estaciones con datos de precipitación máxima en 24 horas, en 15 de las 35 estaciones analizadas se observó que las series de tiempo presentan tendencia a incrementarse, y solo en 4 de ellas se presenta persistencia. La tendencia a incrementarse puede resultar a futuro en un comportamiento que presente no homogeneidad, sin embargo, se aclara no adelantar opiniones sobre ello, por lo que es importante seguir estudiando el comportamiento en dichas estaciones de la variable precipitación.

Respecto a las series de tiempo de precipitación máxima en 1 hora, se analizaron 3 estaciones con registros de un periodo considerable. En todas las estaciones analizadas se encontró homogeneidad, así como que todas presentan tendencia, sin embargo, solo una de ellas presenta tendencia a la alta y las restantes a la baja.

Como se mencionó es importante recalcar que en algunas estaciones no se nota la probable evidencia de cambio climático, sin embargo, existe una tendencia al



incremento en la precipitación máxima en 24 horas a lo largo del tiempo, lo que también conlleva una probable afectación en la construcción de curvas IDF, tal como muestran los resultados de la Tabla 5.3.

*Tabla 5.3. Evaluación de las estaciones que podrían tener efecto en curvas Intensidad-Duración-Frecuencia por posible cambio climático.*

Estación	Evidencia (homogeneidad)		Tendencia		Persistencia total	Posible afectación a curvas IDF
	Si/No	Alta/Baja	Si/No	Alta/Baja	Si/No	
Abraham González (CNA)	No	-	Si	Alta	No	✓
Bachiniva (BACCH)	Si	Alta	Si	Alta	No	✓
Camargo (CCOCH)	Si	Baja	No	-	-	✗
Casas Grandes (CAGCH)	No	-	Si	Alta	No	✓
Cd. Juárez (CJZCH)	No	-	Si	Alta	No	✓
Chihuahua (QIJCH)	No	-	Si	Alta	No	✓
Colina (CLNCH)	No	-	Si	Alta	No	✓
Delicias (CDLCH)	No	-	Si	Alta	Si	✓
Fco. I Madero (FIMCH)	No	-	No	-	-	✗
Jiménez (JMNCH)	No	-	Si	Baja	No	✗
Las Lajas (LJSCCH)	No	-	Si	Alta	Si	✓
Moris (C08182)	Si	Alta	Si	Alta	No	✓
Ojinaga (OJNCH)	No	-	Si	Baja	No	✗
Parral (PRRCH)	No	-	No	-	-	✗
Peñitas (C08219)	No	-	Si	Alta	No	✓
Temosachic (TMCCH)	No	-	Si	Baja	No	✗
Tintero	No	-	Si	Alta	Si	✓
Valle De Zaragoza (VZRCH)	No	-	Si	Alta	No	✓
Villa Coronado (VICCH)	Si	Baja	Si	Baja	No	✗
Bizmark (BIZCH)	Si	Baja	Si	Baja	No	✗
Ascensión	No	-	Si	Baja	Si	✗
Coyame	Si	Baja	Si	Baja	No	✗
Creel (CRLCH)	No	-	Si	Baja	No	✗
Cuauhtémoc (CUACH)	No	-	No	-	-	✗
El Sitio	Si	Baja	Si	Baja	No	✗
Guachochi	Si	Baja	Si	Baja	No	✗
Guadalupe y Calvo (GYCCH)	Si	Baja	Si	Baja	No	✗
Luis L. León (LLNCH)	No	-	Si	Baja	No	✗
Norogachi (NRGCH)	No	-	Si	Baja	No	✗
Parrita	Si	Baja	Si	Baja	Si	✗
Samalayuca	No	-	Si	Baja	No	✗
Tacubaya	No	-	Si	Baja	No	✗
Tubares (TBRSI)	No	-	Si	Alta	No	✓
Urique	No	-	Si	Alta	Si	✓
Villa Ahumada	Si	Baja	Si	Baja	No	✗
Guachochi (1hr)	No	-	Si	Baja	Si	✗
Parral (1 hr)	No	-	Si	Baja	No	✗
Chihuahua (1 hr)	No	-	Si	Alta	No	✓



En la Figura 5.11 se muestra la ubicación de las estaciones en las que es posible la afectación en las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de acuerdo a los resultados de la Tabla 5.3.

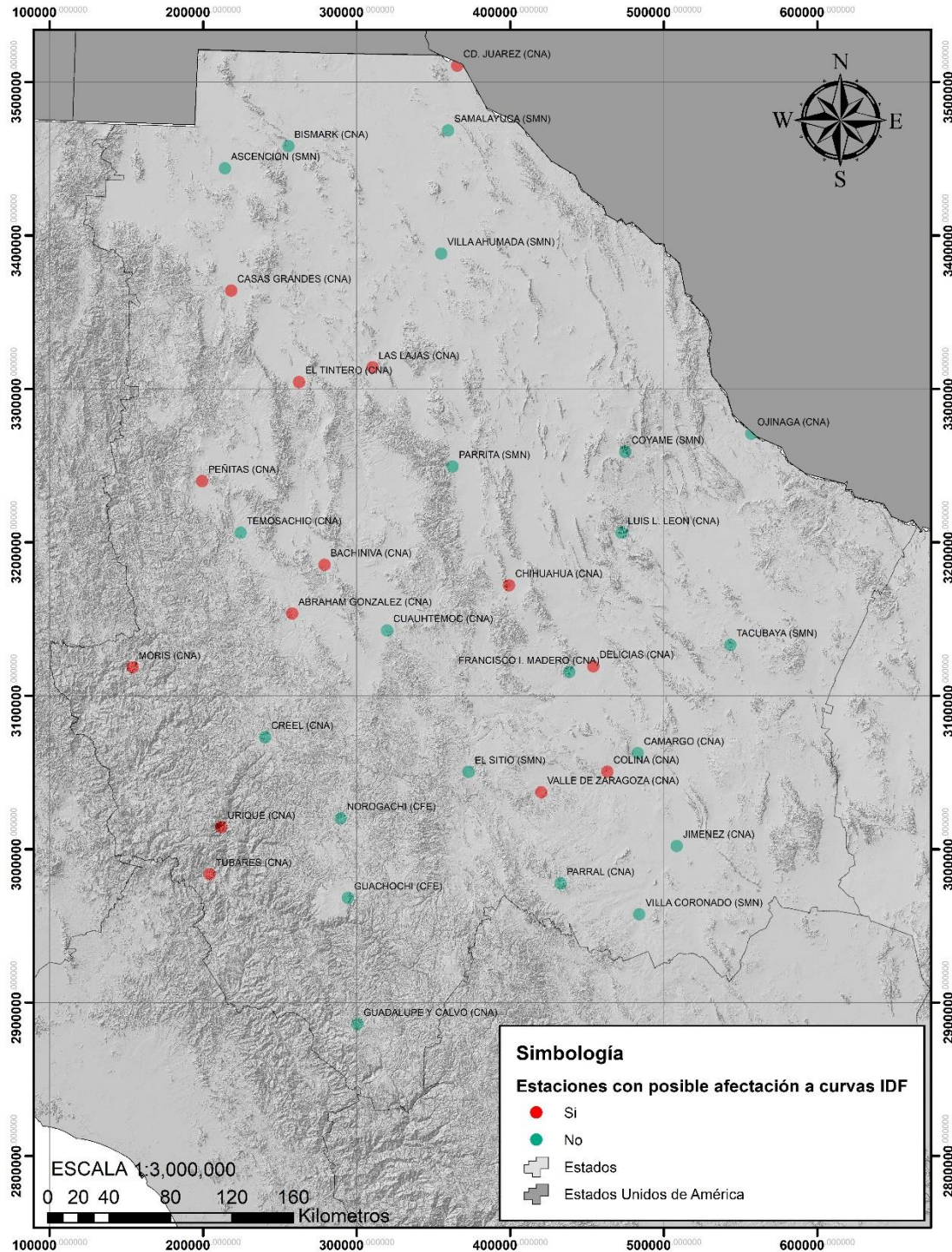


Figura 5.11. Estaciones climatológicas con posible afectación a curvas Intensidad-Duración-Frecuencia del Estado de Chihuahua.



## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1. Conclusiones**

La evaluación desarrollada para observar las posibles implicaciones del cambio climático en la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, es una aportación que conlleva un análisis del comportamiento de la precipitación de las estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua para poder contribuir en la observación de la probable afectación al momento de diseñar obras hidráulicas.

De 35 estaciones que contaron con registros de largo plazo de precipitación máxima en 24 horas, sólo en 11 se identificó no homogeneidad, que se puede asociar a la presencia de dos poblaciones en la serie de tiempo, sin embargo, sólo en 1 de las estaciones se identificó un incremento en la media de precipitación en los registros que se asocian a la población más reciente.

En 15 de las 38 estaciones analizadas con registros de precipitación máxima en 24 horas, se encontró que la serie de tiempo presenta tendencia a incrementarse, aunque sólo en 4 se verificó persistencia. Aunque la tendencia a incrementarse podría resultar en el futuro en un comportamiento no homogéneo en la serie de tiempo, se hace necesario no adelantar conclusiones, sin embargo, es importante continuar con el monitoreo cuidadoso del comportamiento de la variable.

En cuanto a las series de tiempo de precipitación máxima en 1 hora, sólo fue posible encontrar registros de largo plazo en 3 estaciones, en el resto de las estaciones la serie de tiempo es demasiado corta para poder realizar análisis estadísticos representativos. En las 3 series de tiempo revisadas, se encontró homogeneidad en el periodo de tiempo analizado, pero si muestran tendencia, aunque solo una de ellas al incremento y las 2 restantes a disminuir en el tiempo.

Como ejemplo de lo que podría suceder en las estaciones que muestran tendencia a la alta en la precipitación máxima en 24 horas, en la máxima en 1 hora o en ambas, así como las que presentan un comportamiento no homogéneo con un aumento en la precipitación en el periodo más actual, se construyeron las curvas IDF



representativas de la Ciudad de Chihuahua, para la serie de tiempo completa (1960-2018), así como para el periodo de tiempo más reciente (1983-2018), encontrándose un ligero incremento en las precipitaciones máximas.

Respecto al análisis elaborado se puede decir que en general, en las series de tiempo analizadas, no muestran evidencia aparente de cambio climático en la precipitación máxima en 1 y 24 horas de las estaciones climatológicas del Estado de Chihuahua, sin embargo, en algunas estaciones la tendencia del parámetro presenta tendencia a la alta, lo que deriva en un cambio en las curvas IDF que se sugiere debería incorporarse en el diseño hidráulico.

## **6.2. Recomendaciones**

Se recomienda incrementar la red de monitoreo de medición de precipitación máxima en 1 hora, así como verificar los valores máximos observados cada año en esta red y en el monitoreo de la precipitación máxima en 24 horas, ya que son insumos fundamentales para la construcción de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia.

Se recomienda como área de oportunidad para continuar con los trabajos de esta tesis, construir las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para todas las estaciones en las que identificó no homogeneidad con incremento en el promedio de precipitaciones máximas en 24 horas en el periodo más reciente, así como en aquellas en las que se observa tendencia a la alta de la variable, especialmente en aquellas en las que se verifica persistencia.



## Bibliografía

- Acevedo, L., & Poveda, G. (2011). Construcción y análisis de curvas intensidad-frecuencia-duración (idf), bajo escenarios de cambio climático en Colombia. *Revista Colombia Amazónica*, 17(3), 11–30.
- Aparicio, F. (2005). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, D.F.: Limusa.
- Boström, R. & Tomberg, F. (2004). *Testing for Normality and ARCH*. Statistics Sweden. Department for Economic Statistics.
- Campos, D. F. (1984). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos, D. F. (1990). Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 39-52.
- Campos Aranda, D. F. (2015). Aplicación de la distribución de probabilidades no acotada del Sistema Johnson para la estimación de crecientes. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 527-537.
- Campos-Aranda, D. (2015). Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería, Investigación Y Tecnología*, 16(3), 355–368.  
<https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.008>
- Campos Aranda, D. F. (1990). Procedimiento para obtener curvas I-D-Tr a partir de registros pluviométricos. *Ingeniería Hidráulica en México*, 39-52.
- Campos-Aranda DF. (2010). Rainfall Maximum Intensities for Urban Hydrological Design in Mexican Republic. *Ingeniería Investigación Y Tecnología.XI. Núm, 2*, 179–188.
- D'agostino, R. B., Belanger, A., & D'agostino Jr., R. B. (1990). A suggestion for using powerful and informative tests of normality. *The American Statistician*, vol. 44, nro. 4, pp. 316-321.
- Gómez, A. (2012). Determinación de los cambios del patrón de lluvias debido a la presencia de embalses. Estudio del sistema Grijalva. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González, Á. & Mora, D. (2013). Ecuaciones universales ajustadas para el cálculo de lluvias máximas de corta duración. *Geos*, 33(2).



- Groisman P. Ya. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. [Publicación periódica] // *Journal of Climate*, 18. págs. 1326–1350.
- Grum M. (2006). The effect of climate change on urban drainage: an evaluation based on regional climate model simulations. [Publicación periódica] // *Water Science and Technology*, 54. págs. 9-15.
- Helsel, D. R. & Hirsch, R. M. (2002). *Statistical Methods in Water Resources*. U.S. Department of the Interior Gale A. Norton.
- Karl T. R. y Knight R. W. (1998). Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [Publicación periódica] // *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79. págs. 231–241.
- Lobo, L. (2004). *Guía Metodológica para la Delimitación del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas Secas de América Latina y el Caribe*. Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y El Caribe – CAZALAC – UNESCO PHI – Gobierno de Flandes.  
[http://www.cazalac.org/mapa\\_alc\\_guia.php](http://www.cazalac.org/mapa_alc_guia.php).
- Magaña, V., Conde, C., & Garcia, C. G. (2015). *Clima Actual Y De Cambio Climático*, (October).
- Mailhot A. (2007). Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM) [Publicación periódica] // *Journal of Hydrology*, 347. págs. 197-210.
- Martínez-Austria, P., & Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 3(1), 5–20.
- Mesa, O.J. (2006). *¿A dónde va a caer este Globo?* Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Moncho, R., Belda, F., & Caselles, V. (2009). Climatic study of the exponent “n” in IDF curves: application for the Iberian Peninsula. *Journal of Weather & Climate of the Western Mediterranean*, (1), 3–14.  
<https://doi.org/10.3369/tethys.2009.6.01>
- Pereyra-Díaz, D., Ochoa-Martínez, C. A., & Pérez-Sesma, J. A. (2005). Ecuaciones de lluvia intensa generalizada para obtener precipitaciones máximas de corta duración. *Geos*, 25(2), 340–351.



Rodríguez, D. (2017). Análisis geostadístico de las curvas intensidad duración frecuencia para obtención de tormentas de diseño en el Estado de Chihuahua. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.

Semarnat, G. F. de M. (2009). *Cambio Climático. Ciencia, evidencia y acciones. Serie ¿Y el medio ambiente?* Retrieved from [http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/cambio\\_climatico\\_09-web.pdf](http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/cambio_climatico_09-web.pdf)

Thom, H.C.S. (1966). Some Methods of Climatological Analysis. Technical Note No. 81, WMO-No. 199. TP. 103. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.

Thom H.C.S. Some methods of climatological analysis, technical note. Núm. 81, World Meteorological Organization, Genova, Suiza. 1971, 53 p

Thomas, R. & Joiner, B. (1976). Normal Probability Plots and Tests for Normality. Statistics Department. The Pennsylvania State University.

World Meteorological Organization (WMO). Climatic change, anexo III: Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations, pp. 58-71, nota técnica. Núm. 79, WMO-Núm. 195, Secretaría de WMO, Genova, Suiza, 1971, 79 p