



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA**

**ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES REGIONALES PARA EL CÁLCULO DE**  
**TORMENTAS DE DISEÑO EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO.**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**SILVIA GONZÁLEZ ANGÓN**

**TUTORES**  
**DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS**  
**JUÁREZ DR. RAMON DOMÍNGUEZ MORA**

**CD. MX. OCTUBRE 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## Dedicatoria

---

*A mi madre Matilde por su amor, comprensión, paciencia, apoyo incondicional y siempre creer en mí, a mi padre Catarino por su amor por dar siempre más de lo que le era posible.*

*A mi hermanito Leonardo por su amor, por cada uno de los días que he podido compartir con él jugando, aprendiendo, conversando o simplemente pasando el tiempo. Te quiero bebé.*

## **Agradecimientos**

---

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM donde he podido llevar a cabo gran parte de mi formación académica, especialmente al Dr. Ramon y la Dra. Maritza por su guía y apoyo en la elaboración de este trabajo, así como a mi amigo Olaf con quien aprendí mucho y fue una gran guía.

A los amigos Adam, Roberto, Memo, Lalito, Mario, Mau y Paty que conocí en el instituto de los cuales aprendí demasiado, que hicieron cada día más divertido y siempre estuvieron dispuestos ayudarme.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi casa de estudios donde pude realizar la Licenciatura y Maestría. A CONACYT por la beca otorgada para poder concentrarme completamente en mis estudios de Maestría.

## Resumen

---

Uno de los principales problemas de México es la escasez, confiabilidad y accesibilidad de los registros hidrológicos existentes, lo que trae poca confiabilidad al realizar estudios hidrológicos, para solucionar se ha realizado la extrapolación de datos históricos para así caracterizar los fenómenos hidrológicos en la CVM. En este trabajo se realizó la actualización de los factores regionales, factores de reducción por área y factores de convectividad para la Cuenca del Valle de México (CVM).

Para caracterizar las lluvias máximas en la CVM y utilizarlas con fines de diseño se consideran en este trabajo fundamentalmente las lluvias diarias máximas anuales en los distintos puntos dentro del valle y las lluvias máximas anuales asociadas a distintas duraciones.

Se obtuvieron los Factores regionales de la CVM con los cuales será posible obtener las lluvias de diseño en cualquier punto de la cuenca con solo multiplicar el promedio de lluvias máximas anuales por el factor asociado al periodo de retorno deseado.

Para el factor de reducción por área se encontraron dos ecuaciones en función del periodo de retorno y el área a analizar. La primera será útil para áreas menores a  $25 \text{ km}^2$  y cualquier periodo de retorno, la segunda para áreas mayores a  $25 \text{ km}^2$  y periodos de retorno de  $2 \leq Tr \leq 100$  años .

Se encontraron tres factores de convectividad (FC) dentro de la CVM, que relaciona la precipitación máxima de 1 hora con la ocurrida en 24 horas, estos valores fueron corregidos mediante el uso de mediciones tomadas a 1 minuto para sí tener ventanas de una hora que representen la lluvia ocurrida en cualquier hora del día, se encontró que estos factores están asociados a la topografía de la zona.

## Abstract

---

One of the main problems in Mexico is the scarcity, reliability and accessibility of existing hydrological records, which brings little reliability when performing hydrological studies. To solve this problem, the extrapolation of historical data has been carried out to characterize the hydrological phenomena in the The Mexico Valley Basin (MVB). In this work, the regional factors, reduction factors by area and convective factors for the MVB were updated.

In order to characterize the maximum rainfall in the MVB and use it for design purposes, this work considers mainly the annual maximum daily rainfall at different points within the valley and the annual maximum rainfall associated with different durations.

The MVB regional factors were obtained with which it will be possible to obtain the design rainfall at any point in the basin by simply multiplying the average maximum annual rainfall by the factor associated with the desired return period.

For the Area Reduction Factor (ARF), two equations were found depending on the return period and the area to be analyzed. The first will be useful for areas smaller than 25 km<sup>2</sup> and any return period, the second for areas larger than 25 km<sup>2</sup> and return periods of  $2 \leq Tr \leq 100$  years.

Three convective factors (CF) were found within the CVM, which relates the maximum 1-hour rainfall to that occurred in 24 hours, these values were corrected by using measurements taken at 1 minute to yes have one-hour windows that represent the rainfall occurred at any time of the day, it was found that these factors are associated with the topography of the area.

# ÍNDICE

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo general .....	2
1.2.	Objetivos específicos .....	2
2.	Estado del arte .....	3
2.1.	Conceptos básicos .....	3
2.1.1.	Ajustes de distribuciones de probabilidad.....	3
2.1.2.	Periodo de retorno .....	4
2.2.	Regionalización .....	5
2.2.1.	Técnica estaciones año .....	7
2.3.	Concepto del Factor de Reducción por Área (FRA) .....	9
2.4.	Métodos para el cálculo de Factores de convectividad .....	11
3.	Zona de estudio .....	14
3.1.	Cuenca del Valle de México .....	14
3.2.	Datos disponibles .....	16
3.2.1.	Pluviógrafos .....	16
3.2.2.	Pluviómetros .....	19
3.2.3.	Observatorio hidrológico OH.....	24
4.	Metodología .....	27
4.1.	Regionalización de lluvia en la Cuenca del Valle de México asociadas a diferentes periodos de retorno .....	27
4.2.	Factor de reducción por área .....	32
4.3.	Factor de convectividad .....	38
5.	Resultados .....	43
5.1.	Resultados de Regionalización .....	43
5.2.	Factores de reducción por área (FRA) actualizados .....	50
5.2.1.	FRA para áreas mayores a 25 km <sup>2</sup> .....	55
5.3.	Factor de convectividad .....	63
6.	Conclusiones.....	77
7.	Anexos .....	79
8.	Referencias .....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Cuencas vecinas .....	5
Figura 2.2 Envoltentes generales de México (Aparicio,1992). .....	6
Figura 2.3 Aproximaciones numéricas de los parámetros estándar de Chen: a1, b1 y c1 en términos del Factor de Convectividad $R = (P1T/P24T)$ .....	13
Figura 3.1 Cuenca del Valle de México. CONAGUA. Área 9933.2 km <sup>2</sup> .....	14
Figura 3.2 Cuenca del Valle de México. CVM área 6167.4 km <sup>2</sup> .....	15
Figura 3.3 ubicación de los pluviógrafos dentro de la CVM .....	17
Figura 3.4 Ubicación de los pluviómetros dentro de la CVM.....	20
Figura 4.1 Pluviómetros utilizados para el análisis regional de la CVM. Elaboración propia. ....	28
Figura 4.2 Coeficientes de variación de la CVM. Elaboración propia.....	29
Figura 4.3 Máximos anuales por estación de la CVM. Elaboración propia .....	29
Figura 4.4 Relación entre CV y Máximos anuales.....	30
Figura 4.5 Estandarización de registro de la CVM. Imagen izquierda máximos anuales, imagen derecha máximos estandarizados. Elaboración propia .....	31
Figura 4.6 Formato de Información Pluviométrica.....	32
Figura 4.7 software CLICOM. Instituto de ingeniería.....	33
Figura 4.8 Total de estaciones disponibles para los años 1920-2016. Elaboración propia .....	33
Figura 4.9 Ejemplo de áreas de 25 km <sup>2</sup> en la CVM. Elaboración propia .....	34
Figura 4.10 Ejemplo de macros para el análisis de simultaneidad. Elaboración propia .....	35
Figura 4.11 Ejemplo de depuración de datos, área 75 km <sup>2</sup> . Sección izquierda datos completos, sección derecha datos efectivos. Elaboración propia.....	35
Figura 4.12 Obtención de máximos simultáneos promedio por año, área 75 km <sup>2</sup>	36
Figura 4.13 obtención de los periodos de retorno (Tr), la variable Z y el FRA .....	36
Figura 4.14 Relación FR-Tr- área.....	37
Figura 4.15. Valores promedio de los FRA por área .....	37
Figura 4.16 Pluviógrafos (SACMEX) utilizados para la obtención del factor R. Elaboración propia. ....	38
Figura 4.17 Ejemplo del registro diario de pluviógrafos, obtención del factor R. Tormenta 25/05/1988. ....	39

Figura 4.18 Promedio de los factores R por estación y tormenta.....	40
Figura 4.19 Ubicación de estaciones del Observatorio Hidrológico de la UNAM ..	41
Figura 4.20 Hietograma estación Copilco año 2019, identificación de trenes de tormenta. ....	41
Figura 4.21 Ventanas de precipitación. ....	42
Figura 5.1 Isoyetas de la media de las precipitaciones diarias máximas anuales. Elaboración propia .....	46
Figura 5.2 Función Gumbel. Elaboración propia .....	47
Figura 5.3 Función Doble Gumbel. Elaboración propia.....	48
Figura 5.4 Función GVE. Elaboración propia .....	48
Figura 5.5 Ecuación del FRA medido. Elaboración propia. ....	51
Figura 5.6 Ajuste logarítmico FRA. Ecuación FRA calculado. Elaboración propia.	52
Figura 5.7 FRA vs Tr. Áreas menores a 200 km <sup>2</sup> . Elaboración propia .....	53
Figura 5.8 FRA vs Tr. áreas mayores a 500 km <sup>2</sup> . Elaboración propia .....	54
Figura 5.9 Ajuste Gumbel para máximos simultáneos y no simultáneos. Área de 350 km <sup>2</sup> . Elaboración propia.....	55
Figura 5.10 Ajuste Doble Gumbel para máximos simultáneos y no simultáneos. Área de 350 km <sup>2</sup> . Elaboración propia. ....	56
Figura 5.11 Ajuste GVE para máximos simultáneos y no simultáneos. Área de 350 km <sup>2</sup> . Elaboración propia.....	57
Figura 5.12 Periodos de retorno, máximos simultáneos y no simultáneos extrapolados utilizando el ajuste Gumbel. Area 350 m <sup>2</sup> .....	58
Figura 5.13 Grafica FRA-A-Tr. Gumbel. Elaboración propia .....	60
Figura 5.14 Grafica FRA-A-Tr. Doble Gumbel. Elaboración propia.....	60
Figura 5.15 Grafica FRA-A-Tr. GVE. Elaboración propia. ....	61
Figura 5.16 Factores de reducción por área ajustados a la función Gumbel, líneas de tendencia para cada periodo de retorno. Elaboración propia. ....	62
Figura 5.17 ecuación para línea de tendencia de las variables m y b Vs Tr. Elaboración propia .....	63
Figura 5.18 Factores de convectividad promedio interpolada. ....	65
Figura 5.19 Ubicación especial de los factores de corrección para FC.....	68
Figura 5.20 Mapa del factor de convectividad en la Cuenca del Valle de México. 69	
Figura 5.21 Curvas de los Factores de ajuste R (24 hr/1 hr) Tr= 10 años. Tomado de Franco 1998 .....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Factores regionales para la CDMX y EDO. MEX. (Domínguez et al., 2017) .....	7
Tabla 3.1 Estaciones pluviógrafos dentro de la CVM.....	17
Tabla 3.2 Nombre y clave de las estaciones pluviométricas dentro de la CVM. ...	20
Tabla 3.3 Estaciones hidrométricas del OH-UNAM dentro de la Cuenca del valle de México.....	25
Tabla 4.1 estaciones del OH utilizadas para la corrección del factor R.....	40
Tabla 5.1 Valores estadísticos de la CVM.....	43
Tabla 5.2 Factores Regionales.....	49
Tabla 5.3 Valores medidos de FRA promedios .....	50
Tabla 5.4 FRA calculados. ....	51
Tabla 5.5 Ajuste Gumbel. FRA para diferentes periodos de retorno .....	58
Tabla 5.6 Ajuste Doble Gumbel. FRA para diferentes periodos de retorno.....	59
Tabla 5.7 Ajuste GVE. FRA para diferentes periodos de retorno .....	59
Tabla 5.8 Ecuaciones logarítmicas para el FRA en diferentes periodos de retorno (Tr). ....	62
Tabla 5.9 Variables m y b de las ecuaciones obtenidas para la función Gumbel..	62
Tabla 5.10 Promedios del factor de convectividad obtenida dentro de la CVM.....	64
Tabla 5.11 Máximos fijos 1 hora. OH-UNAM.....	66
Tabla 5.12 Máximos móviles 1 hora. OH-UNAM.....	66
Tabla 5.13 Factor de corrección entre valores fijos y valores móviles. ....	67
Tabla 5.14 Coeficientes a, b y c para R= 0.5, 0.55 y 0.6.....	70
Tabla 5.15 Valores k en función del factor de convectividad R y la duración d, respecto a 1 hora. ....	70
Tabla 5.16 Comparación de Factores K para diferentes duraciones en minutos. .	76
Tabla 5.17 comparación para diferentes factores K según un periodo de retorno	76
Anexo 1. Fechas de tormentas registradas en Pluviógrafos de SACMEX .....	79



## Capítulo 1. Introducción

---

Debido al crecimiento descontrolado de la mancha urbana dentro de la cuenca del Valle de México, surge la necesidad de diseñar nueva infraestructura capaz atender las problemáticas hidrológicas que puedan presentarse.

Uno de los principales problemas de México es la escasez, confiabilidad y accesibilidad de los registros climatológicos existentes, lo que trae cierta incertidumbre al realizar estudios hidrológicos, para solucionar la escasez de registros se ha realizado un análisis regional de datos históricos para así caracterizar el comportamiento de la lluvia en la Cuenca del Valle de México (CVM).

En 2017 el Instituto de Ingeniería UNAM realizó un estudio para el Centro Nacional de Prevención Desastres (CENAPRED) utilizando los datos disponibles hasta esa fecha con los pluviómetros presentes en la Ciudad de México (CDMX) y el Estado de México (EDO.MEX) con un total de 34 y 113 pluviómetros, respectivamente. Para este trabajo se depuraron y actualizaron las estaciones ya consideradas en el estudio de 2017, se le agregaron las estaciones que ya cumplen con más de 20 años de registro para el año 2022 (datos de 2017). Además, se incluyeron algunas estaciones de Hidalgo, para conformar la CVM. Para caracterizar las lluvias máximas en la CVM y utilizarlas con fines de diseño se consideran en este trabajo fundamentalmente las lluvias diarias máximas anuales en los distintos puntos dentro del valle, las lluvias máximas anuales asociadas a distintas duraciones y las lluvias máximas anuales asociadas a distintas zonas dentro del valle. En general, dado que se utilizarán para diseño, la caracterización consiste en estimar las funciones de distribución de probabilidades correspondientes a cada caso.

Si bien el análisis regional de lluvias arroja resultados más robustos y confiables al extrapolar una tormenta de diseño a un periodo de retorno alto, se podría caer en el error de un sobredimensionamiento al no tomar en cuenta la simultaneidad espacial de eventos conforme crece el área y al querer asociar el evento de diseño a un periodo de retorno. Es por esto que se buscó encontrar la relación entre el Factor de Reducción por Área (FRA), el periodo de retorno y el área de estudio.

En tanto al Factor de convectividad ya se cuenta con estudios que proponen un factor para la zona en cuestión, en 1998 Franco C. realizó un estudio para el valle de México, Baeza en 2007 realizó otro para la República Mexicana. En este trabajo se utilizará información actualizada, así como estaciones del Observatorio hidrológico de la UNAM (OH-UNAM) que logran dar como resultado factores con mayor exactitud.



## 1.1. Objetivo general

Regionalización actualizada de las cuencas que conforman al Valle de México, que comprenden estaciones climatológicas de la Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo.

## 1.2. Objetivos específicos

- a. Actualizar los mapas de isolíneas correspondientes a la media de las precipitaciones diarias máximas anuales, así como a los factores para asociarlas a distintos periodos de retorno.
- b. Obtener curvas FRA-A-TR que relacionen el factor de reducción por área en función del área para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años dentro de la Cuenca del Valle de México.
- c. Definir una ecuación general que describa el comportamiento del factor de reducción por área para cualquier periodo de retorno deseado en la Cuenca del Valle de México.
- d. Actualizar los factores de convectividad para la Cuenca del Valle de México y compararlos con los obtenidos anteriormente para todo el país.



## Capítulo 2. Estado del arte

---

Así como en otras partes del mundo, México cuenta con datos hidrométricos escasos, debido a esto es que se han realizado diversos métodos y estudios capaces de caracterizar el comportamiento de la lluvia. En este capítulo se discutirán trabajos previos donde se abordan estudios realizados en México, en especial los realizados para la Ciudad de México y su zona Metropolitana, se recabaron los resultados obtenidos en estos para su posterior comparación o actualización con los obtenidos para la cuenca del Valle de México, además se presentarán las ecuaciones básicas para cada metodología.

### 2.1. Conceptos básicos

#### 2.1.1. Ajustes de distribuciones de probabilidad

##### 2.1.1.1. Función Gumbel

La función Gumbel de una variable aleatoria tiene la forma de las Ec. 2.1 y Ec. 2.2:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

$$f(x) = \alpha e^{[-e^{-y}-y]} \quad \text{Ec. 2.2}$$

$y$ : variable reducida obtenida como  $y = \alpha(x - \beta)$

$\alpha$ : parámetro de forma

muestras grandes

$$\alpha = \frac{1.2825}{s}$$

muestras pequeñas

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{s}$$

$\beta$ : parámetro de escala

muestras grandes

$$\beta = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha}$$

muestras pequeñas

$$\beta = \bar{x} - 0.45s$$



### 2.1.1.2. Función doble Gumbel

También conocida como Gumbel Mixta o Bi Gumbel, se encuentra definida por la Ec. 2.3

$$F(x) = p \left[ e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \right] + \left[ (1-p)e^{-e^{-\alpha_2(x-\beta_2)}} \right] \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

$\alpha_1$ : parámetro de forma de la primera población

$\beta_1$ : parámetro de escala de la primera población

$\alpha_2$ : parámetro de forma de la segunda población

$\beta_2$ : parámetro de escala de la segunda población

$p$ : es el parámetro de asociación (probabilidad de que existan eventos no ciclónicos)

$$p = \frac{\text{número de gastos no ciclónicos}}{\text{número total de datos}} = \frac{N_n}{N_t} \quad \text{Ec. 2.4}$$

### 2.1.1.3. Función general de valores extremos

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-v}{\alpha}\right)^\beta\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

$v$ : parámetro de ubicación

$\alpha$ : parámetro de escala,  $\alpha > 0$

$\beta$ : parámetro de forma

## 2.1.2. Periodo de retorno

El periodo de retorno ( $Tr$ ) de un evento es el valor de un intervalo de ocurrencias promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada.

$$Tr = \frac{n_T + 1}{m_s} \quad \text{Ec. 2.6}$$

$$P(X \leq x) = P = 1 - \frac{1}{Tr} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

$n_T$ : longitud del registro

$m_s$ : número de orden del registro

$Tr$ : periodo de retorno

$P$ : probabilidad de no excedencia

## 2.2. Regionalización

Se concibe la regionalización como un medio que permite mejorar las estimaciones y realizar predicciones de lluvias y escurrimientos para ciertos periodos de retorno en sitios con nula o escasa información a través del empleo de las características fisiográficas y climatológicas de las cuencas del sitio de estudio y/o de sus cuencas vecinas, la mayoría de las técnicas regionales se basan en series de máximos anuales (Escalante y Reyes, 2008).

La bondad de este procedimiento depende de algunos factores:

- Qué tan abundante y precisa es la información que se pretende transferir del sitio en que es abundante
- Qué tan escasa es dicha información en donde es escaza
- Que tan similares son los sitios con información escaza a los sitios con información abundante, **respecto a la información que se pretende transferir.**

En el aspecto c) se subraya que debe tenerse muy en cuenta qué información se quiere transferir; así, para 2 sitios cercanos, la precipitación puede comportarse de forma muy similar, pero el escurrimiento ser muy diferente (Figura 2.1)

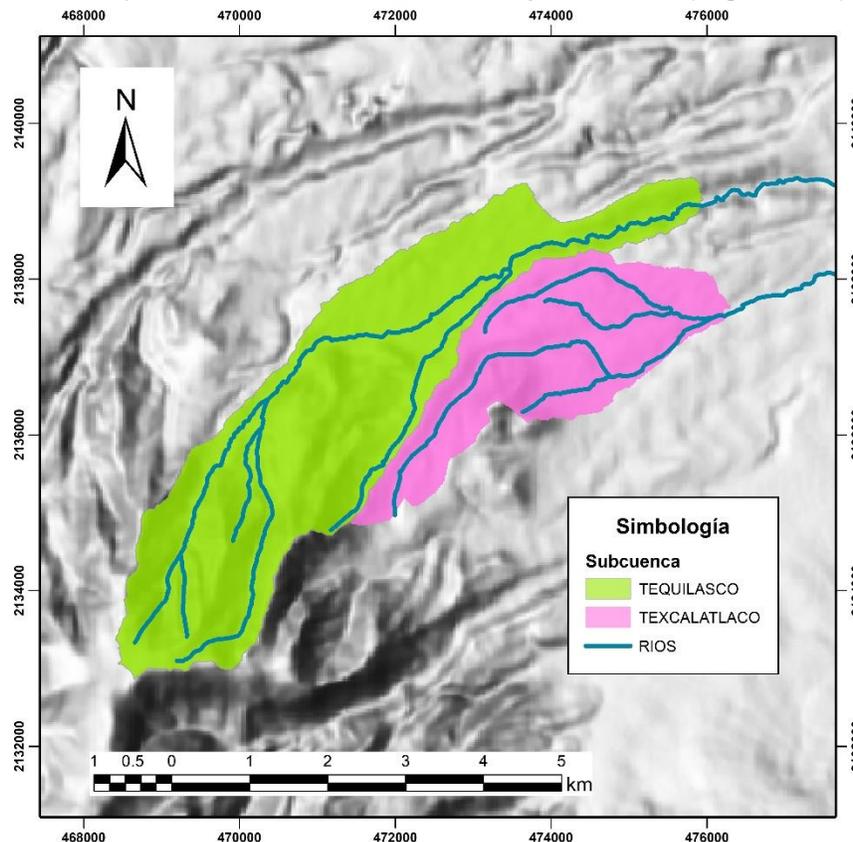


Figura 2.1 Cuencas vecinas

En relación con los aspectos a) y b), conforme se cuenta con mayor información histórica registrada, los estudios de regionalización de lluvias máximas han evolucionado con el tiempo, desde el uso de envolventes mundiales (Figura 2.2), hacia el uso cada vez más frecuente de la información local.

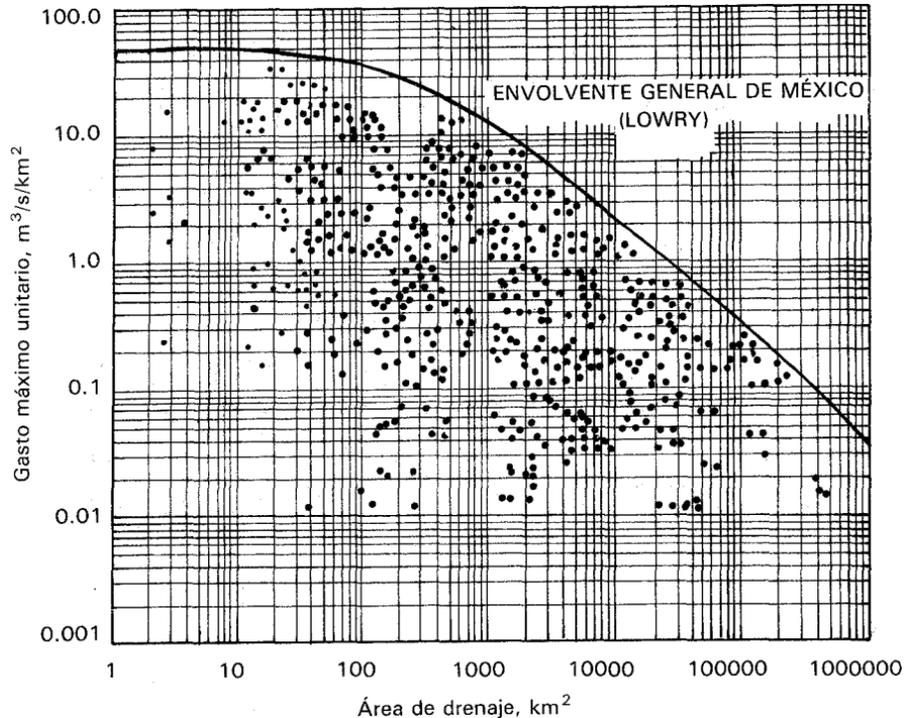


Figura 2.2 Envolventes generales de México (Aparicio, 1992).

A nivel mundial se han realizado diversos estudios que no suelen describir las condiciones en México como es el caso del autor Koutsoyiannis D. (2004a y b) en sus trabajos sobre la estimación de extremos máximos, menciona que una función de Valores Extremos tipo II se ajusta mejor que la función tipo Gumbel a registros de precipitación aun cuando se cuente con pocos datos, evitando así la sobreestimación de eventos máximos. Sin embargo, debido a que estos trabajos utilizan información recabada en E.U y Europa (Reino Unido, Francia, Italia y Grecia) estos no consideran la influencia que tienen los ciclones como los que suceden en casi todas las costas de México.

Por su parte en México se han realizado diversos estudios de Regionalización de tormentas Cortes (2003) en la cuenca del valle de México, Guichard y Domínguez (1998) en su estudio de regionalización de cuencas del Alto Grijalva; Campos-Aranda (2008) con estudios de regionalización de precipitaciones usando la distribución general de valores extremos realizados en San Luis Potosí; Domínguez *et al.* (2012) con mapas de precipitaciones para distintos periodos de retorno y duraciones; Escalante-Sandoval y Domínguez (2001) Regionalización de precipitaciones con funciones bivariadas y máxima entropía; Escalante-Sandoval y Amores-Rovelo (2014) la influencia de la regionalización en la estimación de precipitaciones máximas diarias. Por mencionar algunos.



Considerando los últimos estudios regionales de tormentas, en el año 2010 el Instituto de Ingeniería de la UNAM llevo a cabo un primer estudio de regionalización de lluvias en el país, dicho estudio se actualizó en el año 2017 con la información disponible (actualizada hasta el año 2014) en la base de datos de registros pluviométricos de CLICOM manejado por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). En Tabla 2.1 se muestran los datos obtenidos en dicho estudio para la Ciudad de México (CDMX) y el Estado de México (EDO. MEX).

Tabla 2.1 Factores regionales para la CDMX y EDO. MEX. (Domínguez et al., 2017)

Tr	CDMX	EDO. MEX
	GUMBEL 2017	
2	0.950	0.950
5	1.220	1.220
10	1.400	1.400
20	1.570	1.570
50	1.790	1.790
100	1.950	1.950
200	2.120	2.120
500	2.340	2.330
1000	2.500	2.500
2000	2.660	2.660
5000	2.880	2.880
10000	3.050	3.040

Para caracterizar las lluvias en la Cuenca del Valle de México y utilizarlas con fines de diseño se consideran las lluvias diarias máximas anuales medidas en los distintos puntos dentro del valle a las cuales se les ajustara una función de distribución de probabilidad que describa su comportamiento regional asociándolo a un periodo de retorno.

### 2.2.1. Técnica estaciones año

Con este método se busca el tratamiento de una sola muestra de datos formada por un registro estandarizado de eventos a la cual se le puede ajustar cualquier función de probabilidad. A diferencia de otras técnicas regionales esta no requiere de una longitud de registros en común de las estaciones a utilizar, Escalante y Reyes (2008) recomiendan un mínimo de 10 años de registro sin embargo esta recomendación está sujeta a la calidad de los datos en la zona de estudio.

En Escalante y Reyes (2008) se describe la metodología a seguir:



1. Comprobar que los datos de la región analizada sean homogéneos.
2. Obtener los estadísticos muestrales de las series  $Q_i^j$  (media, varianza, coeficiente de asimetría, curtosis, desviación estándar y coeficiente de variación) para  $J=1, \dots, ms$
3. Para cada serie  $j$  verificar independencia de eventos.
4. Para cada serie  $j$  se generan una muestra modulada (estandarizada) de forma:

$$q_i^j = \frac{Q_j^i}{\bar{x}_j} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

- $q_i^j$ : Evento modulado
- $Q_j^i$ : serie de eventos
- $\bar{x}_j$ : Media

5. Con los eventos  $q_i^j$  se forma el registro estaciones-año de tamaño

$$n_T = \sum_{j=1}^{ms} n_j \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

- $n_T$ : longitud del registro estaciones año
- $ms$ : número de orden del registro
- $j$ : estación
- $n_j$ : tamaño de muestra

6. El registro es ordenado de mayor menor y se asigna un periodo de retorno y una probabilidad de no excedencia.
7. Al registro formado en el paso 5 se le ajustan distintas funciones de probabilidad y se selecciona la que mejor se ajuste a los datos medidos.
8. Una vez obtenida la distribución de mejor ajuste, es posible estimar los eventos regionales para diferentes periodos de retorno, los cuales serán válidos para cualquier punto dentro de la zona analizada.

$$q_{Tr}^R = \left( \frac{Q}{\bar{X}} \right)_{Tr}^R \quad \text{Ec. 2.10}$$

$Tr = 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 5000, 1000$  años

Donde:

- $q_i^j$ : estimador regional
- $Q_j^i$ : serie de eventos
- $\bar{x}_j$ : media

9. Si se quiere obtener un evento  $Q_{Tr}^j$  en un sitio  $j$  que tiene escasa información, bastara con multiplicar la relación regional obtenida en el paso anterior por el correspondiente valor  $\bar{x}_j$ .



### 2.3. Concepto del Factor de Reducción por Área (FRA)

Al realizar un análisis de precipitación para tormentas de diseño para una cuenca se debe considerar la distribución temporal, probabilística ( $Tr$ ) y espacial de una lluvia. No suele suceder que se presenten eventos hidrometeorológicos simultáneos en cuencas muy grandes y que estos correspondan a periodos de retorno similares en cualquier punto de la cuenca, es por esto que, al realizar un promedio de las precipitaciones en determinada área para un periodo de retorno, por ejemplo,  $Tr=50$  años este valor suele sobreestimar la precipitación de diseño. Para evitar que esto suceda se recurre a aplicar un Factor de Reducción por Área (FRA) al promedio de precipitaciones (CENAPRED, 2017). El factor de reducción por área (FRA) es el coeficiente que puede ser aplicado a una lluvia puntual con una duración y periodo de retorno determinado, para obtener la lluvia espacial sobre un área para la misma duración y periodo de retorno (Estévez et al., 2010).

Haciendo uso del FRA se considera la no simultaneidad de las lluvias máximas en las estaciones que se encuentran dentro del área, de forma que la precipitación areal se obtiene con la Ec. 2.11:

$$P_a = P_p * FRA \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

$P_a$ : precipitación areal para la duración y área de interés

$P_p$ : media de los valores puntuales para la misma área y duración.

FRA: factor de reducción areal, que depende de la duración, del área y, según estudios recientes, del período de retorno

El concepto surgió desde la década de los 60 el cual se ha utilizado con fines prácticos, Hershfield en 1962 identificó dos tipos de factores de reducción por área:

- Centros de tormenta. Se asocian al cálculo de la altura de precipitación efectiva para tormentas específicas, obteniendo únicamente perfiles de tormentas individuales, puesto que el área de influencia de la tormenta no se encuentra predeterminada, sino que varía con el tiempo. Originalmente fueron concebidos para su utilización en el método de la Precipitación Máxima Probable. Con este factor no es posible hacer análisis de frecuencias, se calcula según la relación de la Ec. 2.12:

$$FRA = \frac{P'_a}{P'_p} \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

$P'_a$ : precipitación máxima media areal en la zona de la tormenta, para la duración y área de interés

$P'_p$ : precipitación máxima puntual en la zona de la tormenta, para la misma duración



- De área geográfica. Se calculan utilizando los registros de precipitaciones máximas de diferentes eventos, relacionan la altura de precipitación de un punto de la cuenca con la precipitación promedio del área total de la cuenca, la relación se presenta en la Ec. 2.13.

$$FRA = \frac{P_a}{P_p} \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

$P_a$ : precipitación máxima areal puntual, para la duración y área de interés.

$P_p$ : precipitación media areal de los valores máximos puntuales, para la duración y área de interés.

Este factor permite hacer análisis de frecuencia para estimar las tormentas de diseño y se pueden relacionar con el periodo de retorno.

Delva-Guicharr et al. (2006) realizó la revisión histórica de los métodos propuestos para la obtención de FRA, entre los cuales menciona:

- Métodos empíricos. Relacionan la precipitación areal máxima con la máxima puntual, suele ser utilizado con el método de polígonos de Thiessen para asignar el área correspondiente de cada estación, donde se destacan: U. S. Weather Bureau (1957), Bell (1976), Desbordes, Raous, & Trévisiol (1984)
- Métodos Teóricos. En él se ajustan los eventos empleados que han sucedido antes, con las mismas condiciones. En este grupo destacan: Roche, 1963; Rodríguez Iturbe & Mejía, 1974; Nguyen, Rousselle, & McPhearson, 1980; Bacchi & Ranzi, 1995; Sivapalan & Blóshl, 1998; y De Michelle, Kottegoda & Rosso, 2001
- Métodos teóricos-empíricos. Myers Y Zehr (1980) se obtienen los estadísticos de cada estación por separado, de pares de estaciones y de grupo de 5 estaciones, la combinación de dichos factores se obtienen el FRA. Se trabaja con áreas circulares

En el mismo trabajo Guicharr (2006) destaca los siguientes trabajos por su aplicación: África (Roche, 1963; Rodríguez Iturbe y Mejía, 1974), Australia (Omolayo, 1993), Austria (Sivapalan y Blóschl, 1998), Canadá (Nguyen et al., 1981), España (Lorente y Redaño, 1990), Estados Unidos de América (Hershfield, 1962; Viessman, 1989), Francia (Desbordes et al., 1984; Neppel et al., 2003), Italia (Bacchi y Ranzi, 1995; De Michelle et al., 2001), México (DGCOH, 1982; Tipacamú y Domínguez, 1992; Franco y Domínguez, 1998; Guichard y Domínguez, 1998), Reino Unido (NERC, 1975; Bell, 1976), Suecia (Niemczynowicz, 1984). Además, concluyó que a diferencia de lo que se pensaba, al aumentar el periodo de retorno el FRA disminuye.



## 2.4. Métodos para el cálculo de Factores de convectividad

Se han presentado diversas metodologías para estimar el factor de convectividad entre ellos se encuentran Bell (1989) quien a partir de datos de corta duración en 157 estación a lo largo de 40 años de registro propuso una ecuación empírica independiente del periodo de retorno para la generalización de lluvia de 24 horas y 1 hora (Labrada, 2019), por su parte Cheng (1983) obtuvo una formula generalizada como la de Bell que requiere la precipitación de 1 hora y diez años de periodo de retorno además de las lluvias a 24 horas y 10 años de periodo de retorno y 1 hora y 100 años de periodo de retorno.

- **BELL (1969)**

Se han realizado múltiples estudios para relacionar la lluvia y su duración con el fin de obtener la probabilidad de que se presenten precipitaciones de corta duración, el US Weather Bureau (USWB) utilizando los datos de corta duración de 157 estaciones con registros de más de 40 años propuso una relación empírica donde obtuvo los coeficientes de 0.29, 0.45, 0.57, y 0.79 para duraciones de 5,10,15,30 minutos respecto a una hora. Utilizando estos datos Bell (1969) propuso una fórmula para determinar las curvas intensidad -duración- periodo de retorno para lluvias con duraciones de hasta 120 minutos (Labrada, 2019). Utilizado las extrapolaciones realizadas por el USWB para los periodos de retorno de 50 y 100 años se llegó a la Ec. 2.14 .

$$\frac{P_T^t}{P_{10}^t} = 0.21 \ln T + 0.52 \quad \text{Ec. 2.14}$$

*para*  $2 \leq T \leq 100$

Donde:

T: Periodo de retorno, en años.

t: Duración, en minutos.

$P_T^t$ : Altura de lluvia para una duración t y un periodo de retorno T, en mm.

$P_{10}^t$ : Altura de lluvia para la duración t y un Tr de 10 años, en mm.

Para representar la relación matemática lluvia-duración, Bell encontró la siguiente ecuación:

$$\frac{P_T^t}{P_{60}^t} = 0.54t^{0.25} - 0.5 \quad \text{Ec. 2.15}$$

*para*  $5 \leq t \leq 120$

Donde:

$P_{60}^t$ : Altura de lluvia para 60 minutos y un periodo de retorno T.



Al realizar la combinación de la Ec. 2.14 y Ec. 2.15 se obtiene una fórmula que permite estimar la altura de lluvias para cierta duración entre 5 a 120 minutos y periodos de retorno de 2 y 100 años, si se conoce la altura de la lluvia con duración de 1 hora .

$$P_T^t = (0.21 \ln T + 0.52)(0.54t^{0.25} - 0.5)P_{60}^t \quad \text{Ec. 2.16}$$

para  $2 \leq T \leq 120$  en años y  $5 \leq t \leq 120$  minutos

- **CHEN (1983)**

Para 1983 Chen apoyado en los estudios de USBW propuso una formula general para representar la relación Intensidad-duración-periodo de retorno.

$$P_t^T = \frac{aP_1^{10} \log(10(2^{-x})T^{(x-1)})}{(t+b)^c} \left(\frac{t}{60}\right) \quad \text{Ec. 2.17}$$

para  $T \geq 1$  años y  $5 \text{ min} \leq t \leq 24 \text{ h}$

Donde:

$P_t^T$ : es la altura de precipitación en mm para una duración t en minutos y un periodo de retorno T en años.

t: es la duración en minutos.

$x = \left(\frac{P_1^{100}}{P_1^{10}}\right)$  es la relación de lluvias  $P_1^{100}$  y  $P_1^{10}$  correspondientes a una duración de 1 hora y periodos de retorno de 100 y 10 años respectivamente.

$a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$  son parámetros de la tormenta que dependen del lugar y se determinan según el factor  $R = (P_1^T / P_{24}^T)$ . Por medio del nomograma propuesto por Chen (Figura 2.3) o las siguientes ecuaciones:

$$a_1 = -87.9266 R^3 + 155.9848 R^2 - 0.751 R + 3.321 \quad \text{Ec. 2.18}$$

$$b_1 = -1.6718 R^3 - 21.2623 R^2 + 44.6238 R - 7.0648 \quad \text{Ec. 2.19}$$

$$c_1 = 2.5348 R^3 - 4.2581 R^2 + 3.0053 R + 0.05221 \quad \text{Ec. 2.20}$$

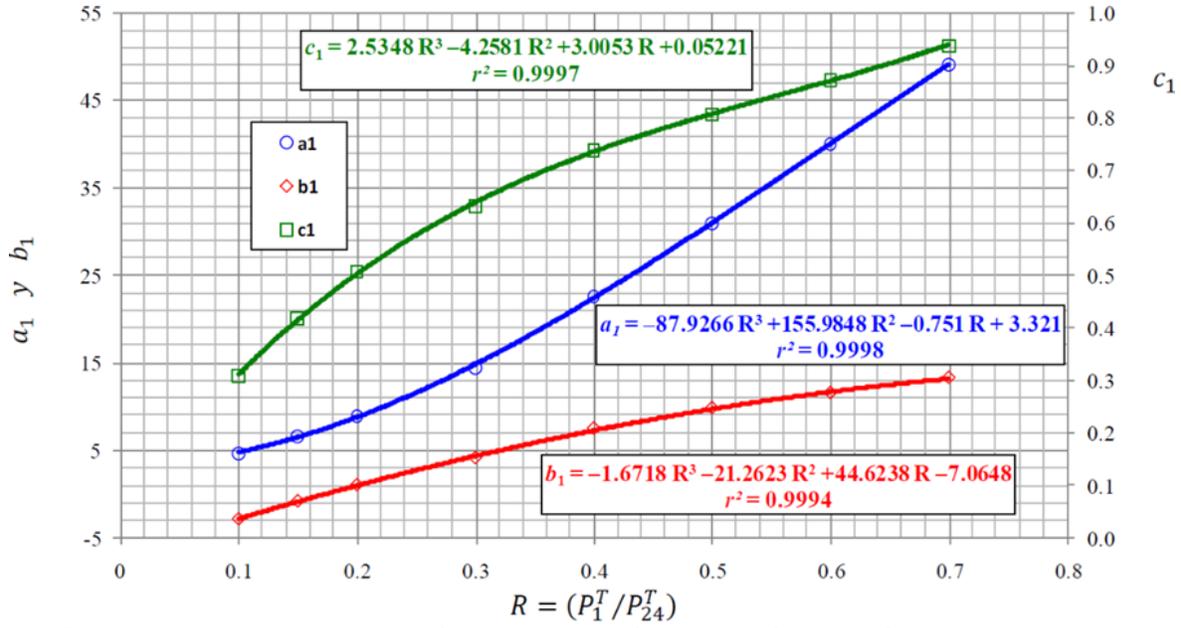


Figura 2.3 Aproximaciones numéricas de los parámetros estándar de Chen:  $a_1$ ,  $b_1$  y  $c_1$  en términos del Factor de Convectividad  $R = (P_1^T / P_{24}^T)$

## Capítulo 3. Zona de estudio

### 3.1. Cuenca del Valle de México

México se encuentra cerca del Ecuador entre los océanos Atlántico y Pacífico, por lo que frecuentemente se ve afectado por diferentes eventos meteorológicos como son los ciclones o tormentas tropicales, que a veces llegan a tener influencia en las precipitaciones que ocurren en el centro del país.

La Cuenca del Valle de México es una cuenca endorreica formada a partir de procesos vulcano-tectónicos que dieron como resultado una extensa altiplanicie lacustre limitada por cuatro sierras volcánicas: Sierra Nevada al este, Sierra Chichinautzin al sur, Sierra de las Cruces al oeste y Sierra de Pachuca y Campo volcánico Apan-Tezontepec al norte (Arce et al, 2015), tiene una extensión aproximada de 9 540 km<sup>2</sup>, dentro de la cual se encuentran la Ciudad de México en su totalidad, así como parcialmente los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla (Figura 3.1).

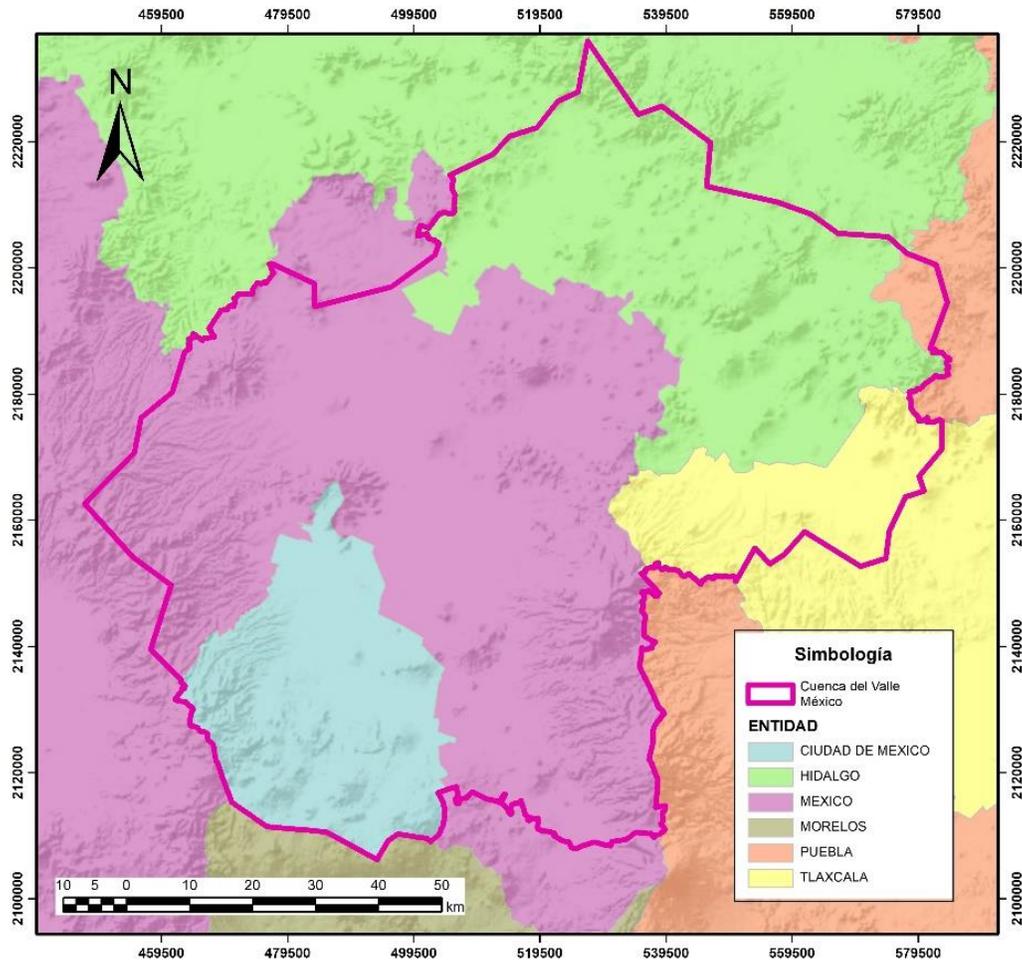


Figura 3.1 Cuenca del Valle de México. CONAGUA. Área 9933.2 km<sup>2</sup>

Debido a su ubicación geográfica y a la cantidad de recursos naturales la Cuenca del Valle de México se convirtió en un lugar de gran interés para asentamientos humanos y para que lograran prosperar, la cuenca ha sufrido múltiples intervenciones estructurales evitando así afectaciones a la creciente población. Durante el siglo XVII se realizó el Túnel de Nochistongo, en 1900 se construyó el Gran Canal de Desagüe que da salida a la cuenca a través del túnel de Tequixquiac, para 1967 se inició la construcción del drenaje profundo el cual continuó extendiéndose con el Túnel Emisor Oriente (Peña-Díaz, 2019). Debido a estos cambios, actualmente el escurrimiento superficial ya no ocurre totalmente como indicaría la topografía es por esto que para este trabajo se considera una cuenca con un área menor (6 200 km<sup>2</sup> aprox.) en la cual el escurrimiento ocurre hacia el centro de la cuenca, esta cubre casi en su totalidad a la Ciudad de México, 54 municipios del Estado de México y 4 municipios de Hidalgo (Figura 3.2).

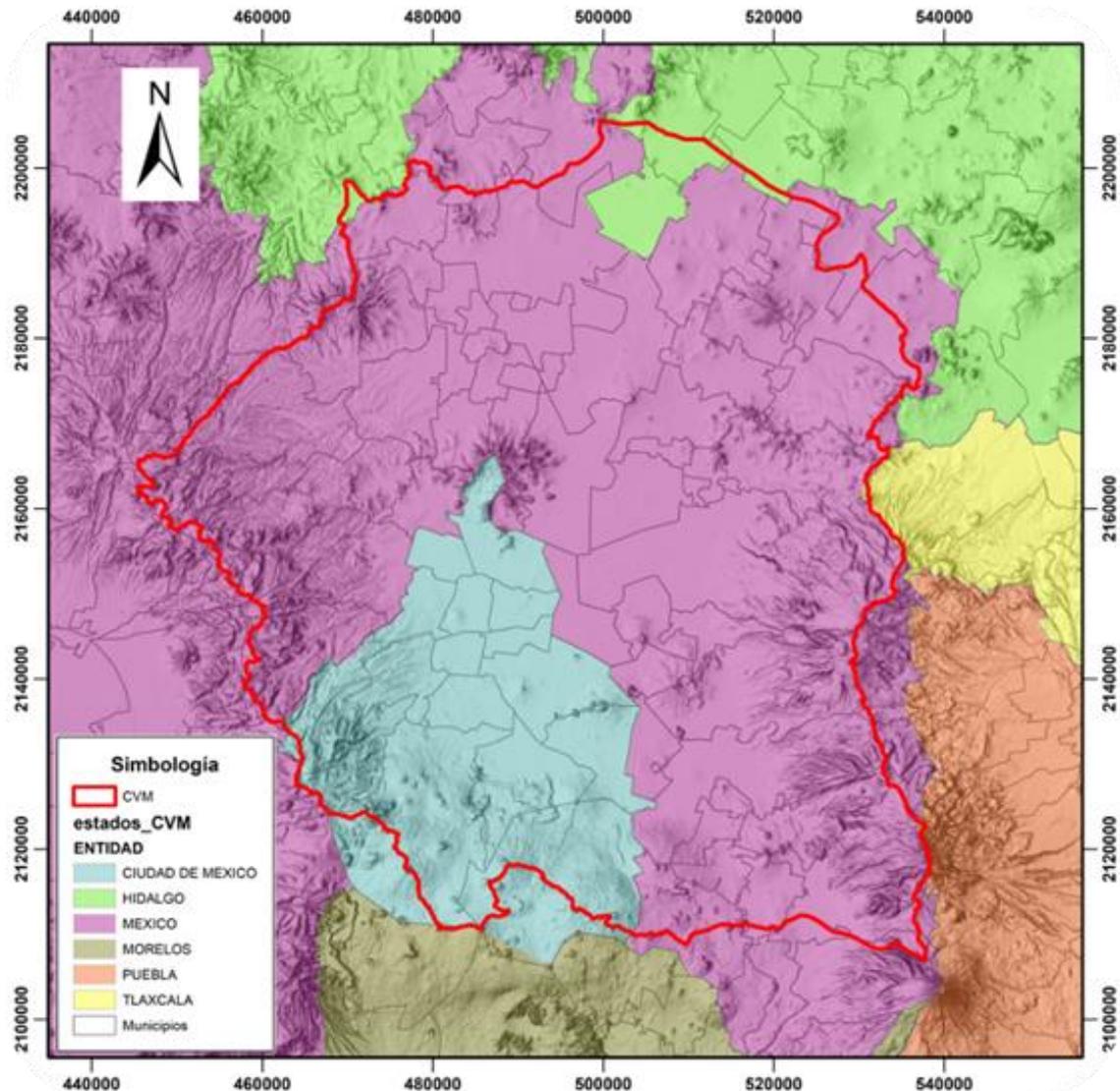


Figura 3.2 Cuenca del Valle de México. CVM área 6167.4 km<sup>2</sup>



### **3.2. Datos disponibles**

Con el fin de entender el sistema hidrológico y gestionar los recursos hídricos de una región es importante contar con bases de datos que permitan el acceso a diversas mediciones tales como la temperatura, la lluvia, la evaporación del agua, así como la velocidad y dirección del viento (CONAGUA, 2016). Para esto se cuenta con diversas plataformas de las cuales se puede extraer esta información; sin embargo, la información suele ser escasa o de acceso limitado. Para considerar los aspectos a), b) y c) descritos en el capítulo anterior 3.1 se presenta la información disponible dentro de la cuenca del valle de México: información de lluvia diaria (pluviómetros) e información prácticamente continua (pluviógrafos).

#### **3.2.1. Pluviógrafos**

Instrumento que mide la cantidad de agua precipitada en determinado lugar, recoge el agua atmosférica en sus diversos estados, el total se denomina precipitación. Se encuentra medida en mm.

Las estaciones de SACMEX utilizan Pluviógrafos de balancín (PB), modelo TB3, con un nivel de precisión de  $\pm 2\%$  de 0 a 250 mm/h y resolución de 0.01 pulgadas e intervalos de medición de 0 a 700 mm/h. Funciona llevando el agua de lluvia al compartimiento superior mediante un embudo, una vez que se han recolectado 0.254 mm la cubeta pierde estabilidad y se balancea hacia la otra posición de reposo, este movimiento acciona un circuito eléctrico que produce un registro (pulso) con trazos discontinuos (Amaro-Loza et al, 2022). En la Cuenca del Valle de México cuenta con un total de 78 pluviógrafos activos, que se encuentran concentrados en la CDMX, mismos que se presentan en la Tabla 3.1 y Figura 3.3.

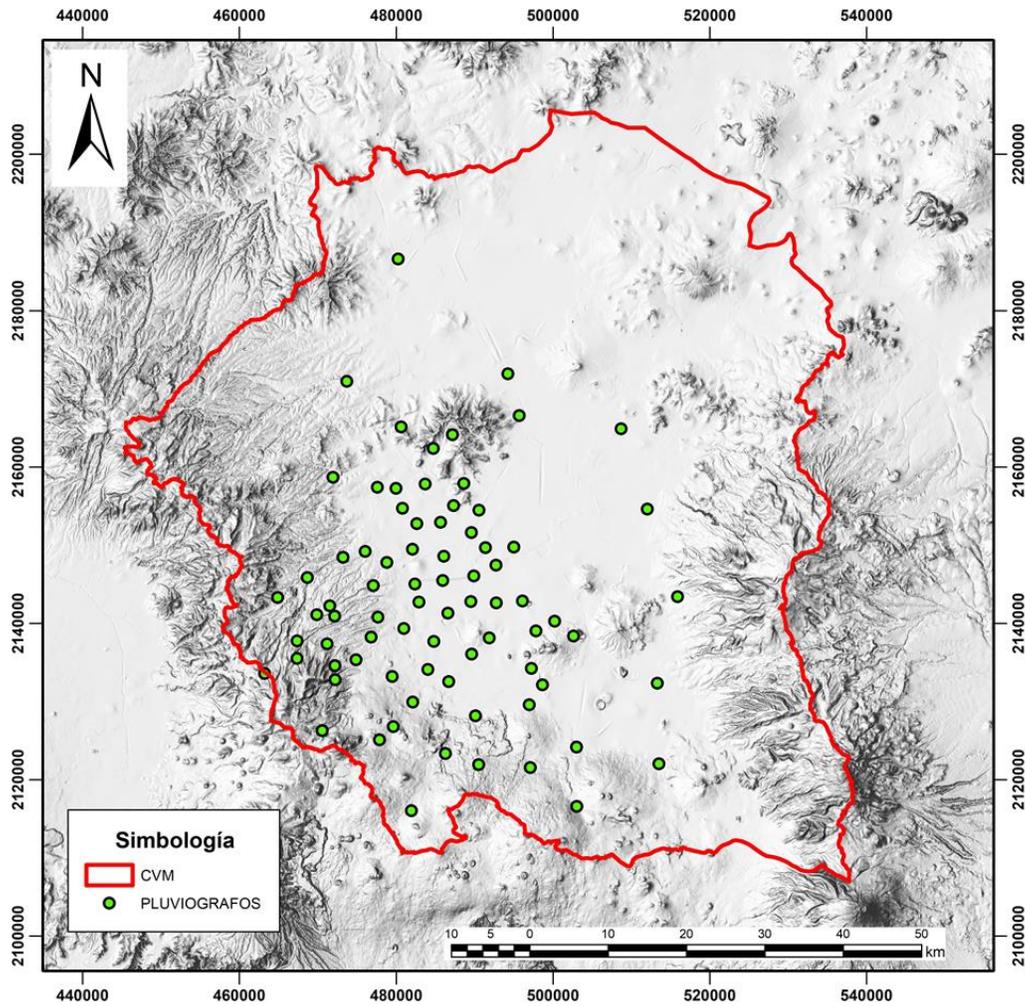


Figura 3.3 ubicación de los pluviógrafos dentro de la CVM

Tabla 3.1 Estaciones pluviógrafos dentro de la CVM.

ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z14_N	Y_UTM_Z14_N
1	REMEDIOS	484737.7	2162356
2	LINDAVISTA	483695.1	2157820
3	COYOL	487313	2155050.8
4	GENERADORA 101	490544.8	2154462.3
5	ROSARIO	489598.7	2151596.9
6	CAMPAMENTO MECOAYA	479969.8	2157270.5
7	NUEVA STA. MARIA	480806.5	2154713.5
8	SAN JOAQUIN	482630.5	2152764.1
9	TIZOC	476034.8	2149186.5
10	G.D.F	482081.5	2149478.3
11	MARCOS CARRILLO	486069.7	2148578.5
12	LOPEZ MATEOS	485930.8	2145469.2
13	CHURUBUSCO LAGO	492735.2	2147423.8



ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z14_N	Y_UTM_Z14_N
14	TRIANGULO	495014	2149757.8
15	STA. LUCIA	477079	2144803.3
16	TANQUE LIENZO	472138.1	2140937.3
17	UNIVERSIDAD	476797.6	2138219.8
18	RADIO COMUNICACIÓN	480968.7	2139321.5
19	MUNICIPIO LIBRE	482381.6	2145029.7
20	EL CARTERO	486589.2	2141297.1
21	LA VENTA	471520.5	2142221.9
22	EL ZARCO	467343.4	2137758.5
23	SAN FRANCISCO	463217.4	2133583.7
24	RIO MAGDALENA	474871.4	2135345.4
25	MONTE ALEGRE	472199.2	2132804.2
26	XOTEPINGO	470549.6	2126289.4
27	ACULCO	484811.4	2137669.1
28	EJERCITO DE ORIENTE	489520.1	2142789
29	PLANTA CERRO DE LA ESTRELLA	496093.7	2142841.7
30	LA CALDERA	491880.7	2138140.4
31	SUB. SANTA CATARINA	502615.4	2138382.2
32	TLAHUAC	497226.5	2134221.7
33	BOSQUE DE TLALPAN	498644.6	2132130.2
34	VILLA COAPA	479491.4	2133204
35	SAN PEDRO MARTIR	486698.3	2132555.5
36	AJUSCO	482125.3	2129937
37	TOPILEJO	477853	2125095.1
38	CASETA FORESTAL (PARREZ)	486281.7	2123338.6
39	GAVM SUR	481954	2116028.4
40	NATIVITAS	489631.7	2136061.3
41	SAN LUIS TLAXIALTEMALCO	490121.2	2128171.6
42	MILPA ALTA	496952.5	2129585.5
43	BARRIENTOS	497119.4	2121541.2
44	VASO DE CRISTO	480618.3	2165126.3
45	CHICONAUTLA I	477577.6	2157384
46	CHICONAUTLA II	495679.3	2166566
47	PALMAS	488626.5	2157893.7
48	EL VENADO	473230.9	2148426.9
49	100 METROS	464875.2	2143317.9
50	PEÑON	485653.3	2152927.5
51	DEPORTIVA	491371.5	2149670.6
52	LA QUEBRADORA	489899.9	2146053
53	CAIDA DEL BORRACHO	497825.9	2139012.9



ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z14_N	Y_UTM_Z14_N
54	YAQUI	468649.4	2145856
55	DESIERTO DE LOS LEONES	469880.4	2141095.8
56	SAN BARTOLO AMEYALCO	467360.4	2135512.2
57	CARCEL DE MUJERES	471197.8	2137386.8
58	TETELCO	500199.5	2140252
59	HUAYATLA	503006.3	2124185.7
60	SAN SALVADOR CUAUTENCO	472180.9	2134596.8
61	SIERRA DE GUADALUPE	490506.8	2121919.6
62	SANTA ANA TLACOTENCO	487183	2164135.6
63	CHAPINGO	503039.1	2116573
64	PRESA MADIN	512036.7	2154596.7
65	LAGO DE GUADALUPE	471945.1	2158664.4
66	SAN LUIS CHALCO	473683.8	2170933.6
67	LA GRANDE	513301.8	2132345.3
68	SAN LUIS AMECA II	508673.6	2164885.6
69	COATEPEC	513498.6	2122032.8
70	KM. 27 + 250	515897.9	2143401.5
71	PUENTE COLGANTE	494233.8	2171911
72	PLANTA CHAPULTEPEC	480233.1	2186594.1
73	DEL VALLE	478783.4	2147777.8
74	ESTADIO AZTECA	482893.9	2142727.6
75	EL MORAL	484030.9	2134084.7
76	TARANGO	492754.3	2142610.4
77	PLANTA ABASOLO	477662	2140774.8
78		479641.8	2126786

### 3.2.2. Pluviómetros

Instrumento que mide la cantidad de agua precipitada en determinado lugar, recogiendo la precipitación en sus diferentes estados. La medición se realiza en mm, la información se obtiene de forma acumulada cada 24 horas.

Es un recipiente metálico de forma cilíndrica, que en su parte superior tiene una boca circular que recibe el agua de lluvia por medio de un embudo, a un colector que almacena el agua para su posterior medición. La información en México es administrada por el sistema meteorológico nacional (SMN) de la CONAGUA, y se descargan por estación en la plataforma de CLICOM.

Dentro de la Cuenca del Valle de México se encuentran 151 pluviómetros mismos que se presentan en la Figura 3.4 y en la tabla Tabla 3.2.

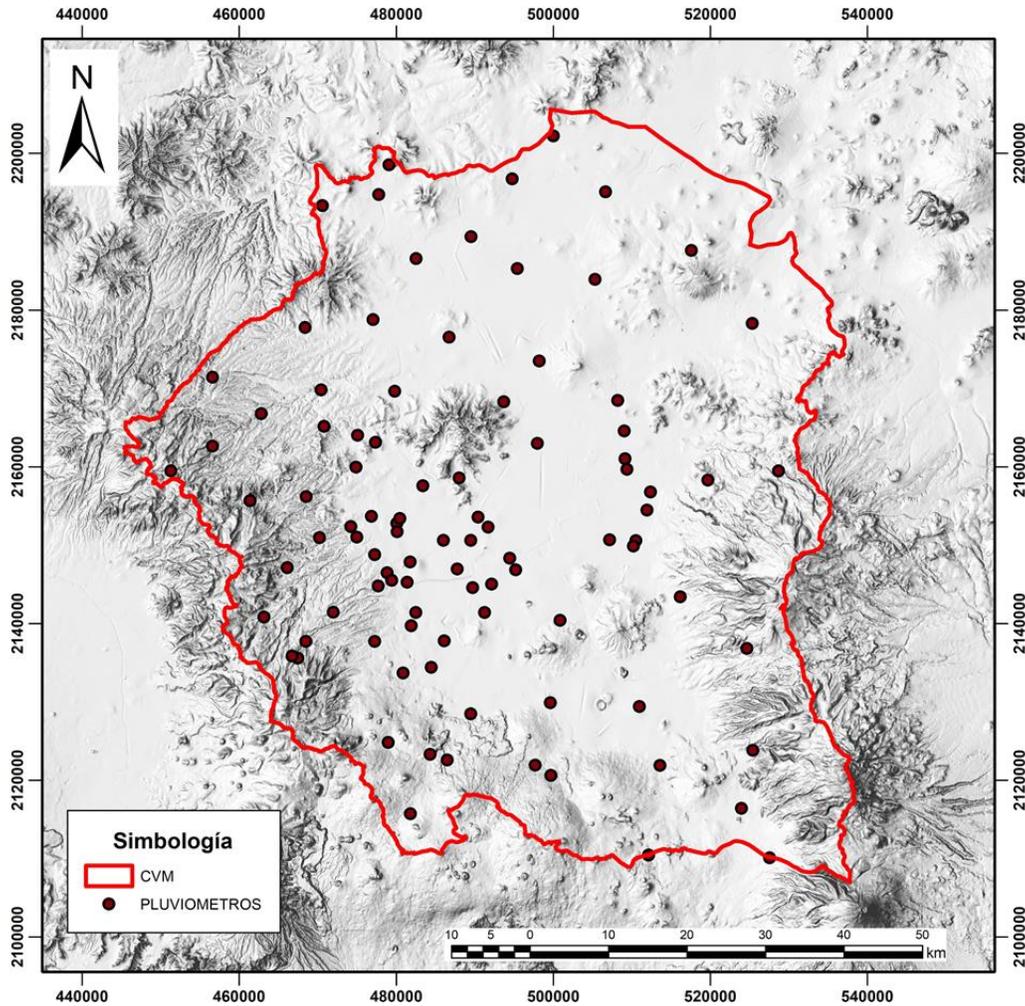


Figura 3.4 Ubicación de los pluviómetros dentro de la CVM.

Tabla 3.2 Nombre y clave de las estaciones pluviométricas dentro de la CVM.

ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z 14N	Y_UTM_Z 14N
9002	AJUSCO, TLALPAN	2793639.806	805042.6208
9003	AQUILES SERDAN 46 (AZCA)	2794881.649	830827.4058
9004	CALVARIO 61 (TLALPAN)	2796989.685	812469.2661
9005	CALLE SALTO 13 (MIXCOAC)	2796517.276	836378.8558
9006	TACUBA 7 (CENTRO)	2800152.308	829092.0353
9007	CINCEL 42 (COL. SEVILLA)	2801934.123	827287.9015
9009	COL. AGRICOLA ORIENTAL	2805461.62	825519.3396
9010	COL. AMERICA, COL. AMERICA	2793244.74	825275.8264
9011	COL. DEL VALLE (SMN)	2796771.636	823505.189
9012	COL. ESCANDON	2800005.254	836448.1773
9013	COL. MOCTEZUMA (SMN)	2803641.978	829162.2017
9014	COL. SANTA URSULA COAPA	2802192.995	814413.1147
9015	EDIFICIO C.F.E. RODANO 14	2796662.621	829022.6798



ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z 14N	Y_UTM_Z 14N
9016	CUAJIMALPA, CUAJIMALPA	2782876.864	819557.2131
9017	CUAUTEPEC BARRIO BAJO	2799931.731	840126.0453
9019	DESIERTO DE LOS LEONES	2782980.759	814039.1004
9020	DESV. ALTA AL PEDREGAL	2788255.782	812299.2388
9021	EGIPTO 7 (AZCAPOTZALCO)	2794845.526	832666.4711
9022	KM.39.5 A CUERNAVACA	2795568.111	795878.5167
9023	GPE. INN, ALVARO OBREGON	2795062.272	821631.5666
9024	HDA.PE% <sub>3</sub> A POBRE (TLALPAN)	2795206.784	814274.2679
9025	HDA.LA PATERA G.A.MADERO	2798297.816	834574.426
9026	MORELOS 77 (IXTAPALAPA)	2805536.437	821840.9519
9027	JARDIN BOTANICO,CHAPULT.	2794953.896	827149.1737
9028	KM. 3+000 GRAN CANAL	2803604.786	831001.2799
9029	KM. 6+250 GRAN CANAL	2805274.592	834714.7074
9030	LA VENTA CUAJIMALPA(SMN)	2782911.495	817717.8771
9031	COL.ROMA, COL.ROMA (SMN)	2796698.958	827183.5514
9032	MILPA ALTA, MILPA ALTA	2812940.076	801751.132
9033	MOSQUETA 52 (COL. GRO.)	2800115.543	830931.122
9034	MOYOGUARDA (XOCHIMILCO)	2803976.737	812608.9418
9035	COL.SAN JOSE INSURGENTES	2795062.272	821631.5666
9036	COL. MARTE, COL. MARTE	2800262.606	823574.57
9037	PRESA ANSALDO, CONTRERAS	2791677.951	816045.4485
9038	PRESA MIXCOAC, MIXCOAC	2786333.692	821462.6576
9039	PRESA TACUBAYA, TACUBAYA	2791535.153	823402.639
9040	SAN BORJA 726, COL.VALLE	2796771.636	823505.189
9041	SAN FCO. TLALNE.(XOCHI)	2802414.913	803376.2017
9042	SAN GREGORIO ATLAP. XOCH	2809292.664	809036.9663
9043	COL. SAN JUAN DE ARAGON	2807056.393	832911.2841
9044	SAN LORENZO (MILPA ALTA)	2811192.058	801714.8671
9045	SANTA ANA (MILPA ALTA)	2814726.577	799947.983
9046	COL.SANTA FE,STA.FE(SMN)	2789789.651	823368.8614
9047	COL. TACUBA, TACUBA	2794881.649	830827.4058
9048	CENTRAL TACUBAYA	2793244.74	825275.8264
9049	TARANGO (VILLA OBREGON)	2784587.965	821429.4845
9050	LOMAS DE CHAPULTEPEC	2791428.061	828920.1675
9052	UNIDAD MODELO IXTAPALAPA	2802045.064	821770.3453
9054	SAN FELIPE 169 G. ANAYA	2796807.976	821665.957
9055	PEDRO ARVIZU 36	2800115.543	830931.122
9056	IXTACALCO, IXTACALCO	2802008.083	823609.5646



ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z 14N	Y_UTM_Z 14N
9058	VERTEDOR MILPA ALTA	2812940.076	801751.132
9059	CASTAÑEDA, (MIXCOAC)	2793316.564	821597.3791
9062	VENCEDORA 44,COL.INDUST.	2800042.016	834609.1923
9064	CHAPULTEPEC, MIGUEL HGO.	2793244.74	825275.8264
9065	COL. PROVIDENCIA	2794809.404	834505.5015
9066	CONAFRUT, PALO ALTO	2782911.495	817717.8771
9067	MONTE ALEGRE, CONTRERAS	2784901.588	804874.5412
9068	PUENTE LA LLAVE	2798370.915	830896.3472
9069	VERSALLES 19 COL. JUAREZ	2798407.466	829057.2562
9070	COYOACAN I.N.I.F.,COYOC.	2796771.636	823505.189
9071	COL. EDUCACION COYOACAN	2796771.636	823505.189
13008	EL MANANTIAL, TIZAYUCA	2818367.613	875454.0611
13014	LLANO CHICO, EMILIANO Z.	2850149.444	855931.1132
13035	TEZONTEPEC, TEZONTEPEC	2833344.318	827952.3287
13036	TIZAYUCA, TIZAYUCA (SMN)	2814927.373	873542.1994
13047	TEZONTEPEC, TEZONTEPEC	2830462.48	879394.3623
13091	TIZAYUCA, TIZAYUCA (DGE)	2816667.044	873578.8979
13119	MAZATEPEC, CUAUTEPEC	2850149.444	855931.1132
15007	AMECAMECA DE JUAREZ,	2839284.273	796800.7137
15008	ATENCO, TEXCOCO (DGE)	2822558.08	842435.106
15013	CALACOAYA, TLALNEPANTLA	2789789.651	823368.8614
15015	AMECAMECA DE JUAREZ(SMN)	2839325.755	794961.051
15017	COATEPEC DE LOS OLIVOS,	2829935.166	824197.0659
15018	COL. AVILA CAMACHO,	2838828.031	817034.6026
15019	COL. VICENTE GUERRERO,	2778871.982	847077.9122
15020	CHALCO, CHALCO	2824977.254	811208.0829
15022	CHICONAUTLA, ECATEPEC	2813610.778	853282.621
15023	CHIMALHUACAN,	2821129.409	827686.1331
15024	PRESA DANXHO, JILOTEPEC	2792203.583	878598.4068
15027	EL SALITRE (SAN BARTOLO)	2782565.212	836109.6769
15029	EL TEJOCOTE(ATLACOMULCO)	2824539.891	831439.2572
15032	HUEHUETOCA, HUEHUETOCA	2792275.37	874921.8433
15033	HUIXQUILUCAN,	2777605.016	821298.8204
15039	JUCHITEPEC, JUCHITEPEC	2828873.04	792888.383
15040	KM. 2+120 (BOMBAS),	2812060.016	844052.668
15041	KM. 27+250 GRAN CANAL,	2806605.022	854977.1009
15042	KM. 46+930 GRAN CANAL,	2802823.909	869614.2747
15044	LA GRANDE (TEXCOCO),	2826044.649	842510.4796



ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z 14N	Y_UTM_Z 14N
15045	LA MARQUESA, LERMA	2781199.75	815845.7274
15047	LAS ARBOLEDAS (R.TUIPAN)	2791142.512	843632.0817
15050	LOS REYES, LA PAZ	2816010.452	822057.6404
15053	MAGDALENA CHICHICASPA,	2781337.429	808487.8728
15055	MAQUIXCO, TEMASCALAPA	2830706.047	868364.8912
15058	MOLINITO (SAN BARTOLO),	2787903.067	830691.9558
15059	MOLINO BLANCO, NAUCALPAN	2791320.975	834437.3877
15061	NETZAHUALCOYOTL (P.MPAL)	2813726.178	847766.5663
15065	OTUMBA, OTUMBA	2839615.7	859367.6171
15073	PSA. GUADALUPE, TULTITLAN	2787515.156	850920.0116
15074	PRESA LA CONCEPCION,	2783891.213	858208.2996
15075	PSA. LAS RUINAS, ATIZAPAN	2784135.048	845337.2232
15077	PRESA TOTOLICA, NAUCALPAN	2784413.753	830625.4473
15081	REPRESA ALEMÁN A. TEPOTZO	2789080.091	860146.7675
15083	SAN ANDRÉS, TEXCOCO	2826124.582	838832.8121
15090	SN. JERÓNIMO XONACAHUACÁN	2818602.216	864424.0271
15092	SAN JUAN IXHUATEPEC,	2799968.492	838287.1286
15094	SAN LUIS AMECA,	2818184.106	801861.1457
15095	SAN LUIS AYUCÁN,	2777299.14	837851.0836
15096	SAN MARCOS JILOTZINGO,	2807893.011	877073.975
15097	SAN M. DE LAS PIRÁMIDES,	2832650.38	859211.37
15098	SAN MARTÍN OBISPO,	2794520.451	849216.5473
15099	SAN MATEO ACUITLAPILCO,	2810050.639	856887.3626
15100	SAN MATEO TECOLOAPAN,	2792849.756	845504.8506
15101	S. M. TLAIXPAN, TEXCOCO	2833099.374	838986.0279
15106	SAN RAFAEL, TLALMANALCO	2840866.09	804198.5093
15109	STA.M.MAGDALENA CAHUACÁN	2770091.94	850596.0161
15114	SANTIAGO TLAZALA,	2768448.333	845048.2544
15123	TEPETLAXTOC,	2832936.094	846341.1551
15124	TEPEXPAN, TEPEXPAN	2822399.934	849790.0822
15125	TEXCOCO, TEXCOCO (DGE)	2826124.582	838832.8121
15127	TOTOLICA (S. BARTOLO), N.	2787867.799	832531.0378
15129	TULTEPEC, TULTEPEC	2803084.169	856744.8588
15138	ATENCO, TEXCOCO (CFE)	2822558.08	842435.106
15141	T.AGROP.32 TLALPITZAHUC,	2825017.019	809368.6732
15144	LAS AMÉRICAS, NAUCALPAN	2787903.067	830691.9558
15145	CAMTO. PLAN LAGO DE TEX.	2814072.415	831216.6193
15147	SAN BARTOLITO,	2781027.666	825042.2512



ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z 14N	Y_UTM_Z 14N
15149	SAN LORENZO HUITZIZILAPA	2775825.494	823105.9426
15156	SAN MIGUEL JAGUEYES,	2785352.325	872949.2558
15157	SAN MIGUEL TLILAN,	2780614.729	847110.421
15163	TEXCOCO, TEXCOCO (SMN)	2826124.582	838832.8121
15167	EL TEJOCOTE (TEXCOCO),	2824539.891	831439.2572
15170	CHAPINGO, TEXCOCO	2826164.549	836993.9277
15182	LA MARQUESA, HUIXQUILUCAN	2779384.962	819491.8731
15188	LA MORA, APAXCO	2795718.067	876828.4668
15204	CURVA DEL PATITO,	2810621.269	829304.9678
15209	PRESA SAN JOAQUIN,	2791428.061	828920.1675
15213	C.NAL.SANIDAD ANIMAL SAG	2779487.575	813973.7364
15220	KM. 47+560 ZUMPANGO,	2802823.909	869614.2747
15221	TAJO DE TEQUIXQUIAC,	2775757.946	826784.4027
15226	C.N.S.A. STA.ANA,TECAMAC	2781096.497	821363.7467
15246	JILOTZINGO, JILOTZINGO	2773777.935	839626.0175
15257	CICITEC, MILPA ALTA	2821798.132	796416.5943
15263	ACOLMAN, ACOLMAN	2824102.617	851666.3061
15265	CAMP. BERROS, SAN JOSE	2783084.661	808520.6683
15268	IXTAPALUCA, IXTAPALUCA	2828350.508	816802.0057
15274	NOPALA, NEUYPOXTLA	2812995.413	882696.7794
15280	TLALMANANCO, TLALMANANCO	2835622.873	804080.5879
15342	SN. BAROLO, HUIXQUILUCAN	2791428.061	828920.1675
15358	LAS PALOMAS, TLAZALA	2763283.906	841277.7403
21217	TEUTLA, JOLALPAN	2818915.058	849715.5555

### 3.2.3. Observatorio hidrológico OH

El OH-UNAM se conforma de 55 estaciones que funcionan de manera autónoma, compuesta por 39 disdrómetros óptico laser (miden el tamaño de gota) y 16 pluviómetros de pesaje (Figura 3.5).

El disdrómetros laser mide la sombra que generan las partículas precipitadas cuando pasan por el haz láser, las partículas son divididas en 32 clases de diámetros y 32 velocidades (1024 clases en total), a partir de estas se estima la cantidad de precipitación, intensidad, condiciones de visibilidad, energía cinética y reflectividad. La superficie de medición de la banda laser es de 54 cm<sup>2</sup>, es capaz de identificar los tipos de precipitación, para partículas de precipitación líquida cuenta con un rango de 0.2 a 5 mm y en partícula sólida 0.2 a 0.25 mm, la velocidad de partícula de 0.2 a 20 m/s, la intensidad de lluvia de 0.001 a 1200 mm/h con un nivel de precipitación de ±5% (precipitación líquida) y 20% (sólida).

Puesto que los principios de funcionamiento del disdrómetros laser y el pluviómetro de pesaje son diferentes para utilizar las mediciones de ambos sensores se utilizan las estimaciones derivadas del disdrómetro evaluadas en términos de acumulación anual y de la acumulación de precipitación de los eventos (Amaro-Loza et al, 2022).

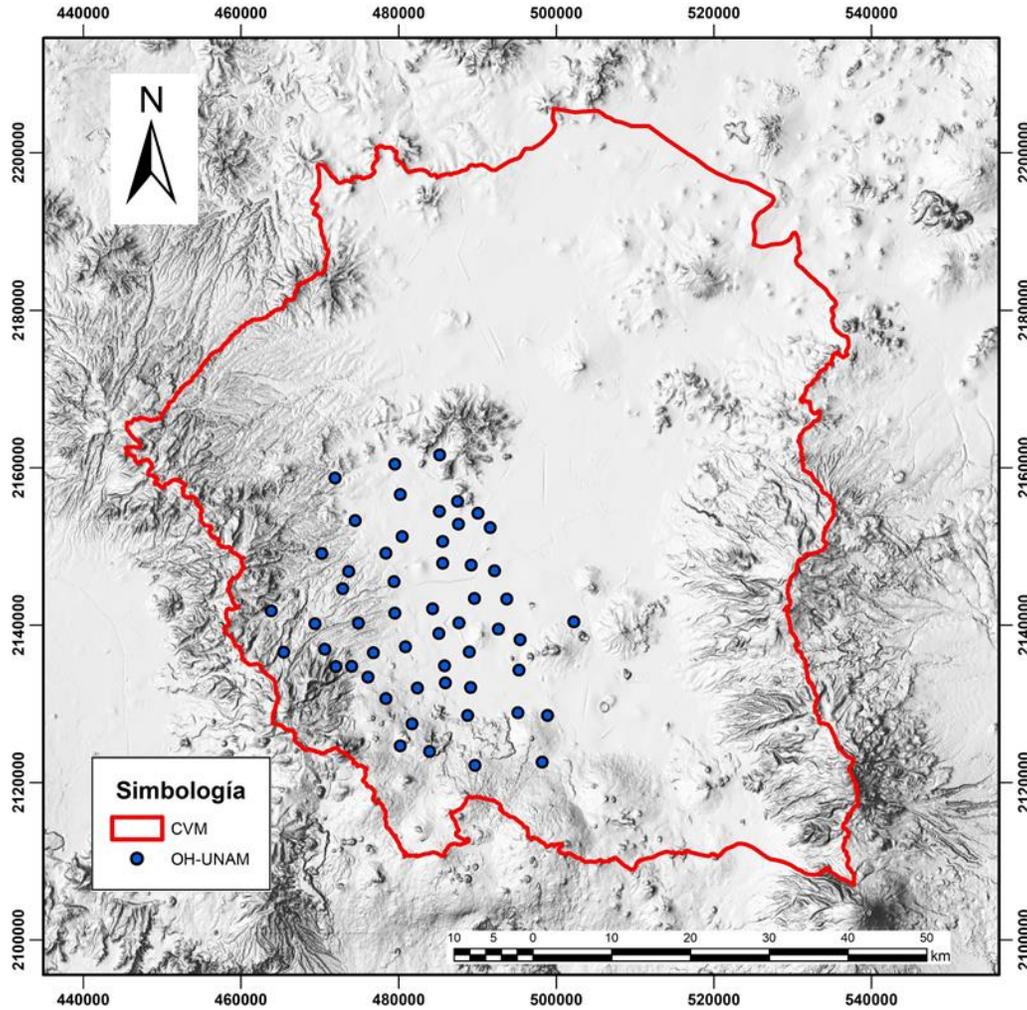


Figura 3.5 Ubicación de las estaciones del OH-UNAM Dentro de la CVM.

Tabla 3.3 Estaciones hidrométricas del OH-UNAM dentro de la Cuenca del valle de México.

ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z14_N	Y_UTM_Z14_N
0	BALBUENA	489221	2147612
1	PREPA 2	489630.4384	2143361.046
2	ZAPATA	484328.3318	2142072.296
3	MEXICALTZINGO	487642.5103	2140255.563
4	IZTAPALAPA	492641.0837	2139463.752
5	D HUMANOS	476788.7085	2136463.769
6	LA JOYA	482371.2883	2132002.283
7	CUEMANCO	489157.195	2132057.101
8	S GREGORIO	495148.2812	2128852.693
9	TACUBA	480444.0444	2151233.332



ESTACIÓN	NOMBRE	X_UTM_Z14_N	Y_UTM_Z14_N
10	TLATELOLCO	485608.3546	2150607
11	POLANCO	478377.9928	2149114.445
12	CULHUACAN	488963.1424	2136583.031
13	BONDOJITO	487598.7317	2152810.781
14	TAXQUEÑA	485098.5552	2138927.848
15	MADIN	471943.6809	2158682.71
16	BOSQUE REAL	470255.0195	2149105.27
17	V HERMOSA	472908.157	2144613.474
18	ARAGÓN	491612.464	2152382.436
19	CCH OTE	493739.8342	2143286.667
20	TLALNE	479507.9555	2160448.225
21	PREPA 4	479407.7051	2145496.398
22	PREPA 5	485840.0071	2134831.716
23	PREPA 8	479534.7994	2141495.127
24	UAMAZC	480207.8246	2156556.599
25	CCH VALLEJO	485171.4919	2154427.276
26	DOS RIOS	463843.8931	2141802.146
27	COAPA	485934.3463	2132647.048
28	CUAJIMALPA	469376.6037	2140171.871
29	TULYEHUALC	498912.7182	2128505.65
30	CUAUHTENCO	489692.9472	2122171.054
31	MILPA ALTA	498200.4743	2122585.323
32	SACMEX	485607.638	2147868.285
33	XOCHIMILCO	488762.2483	2128513.366
34	ACOPILCO	465419.2502	2136544.046
35	SAN BARTOLO	470614.5812	2136933.71
36	SAN BERNABE	472034.0275	2134734.237
37	CENTENARIO	474915.0267	2140246.21
38	II UNAM	480860.8811	2137237.277
39	NOPALERA	495293.2223	2134254.328
40	AJUSCO	480198.0022	2124669.948
41	PICACHO	478372.2096	2130656.544
42	PANTITLAN	492161.0297	2146880.296
43	TOPILEJO	483947.3614	2123929.537
44	CUAUTEPEC	485222.7733	2161604.525
45	LOS REYES	502246.5467	2140393.159
46	HERRADURA	473669.9752	2146833.771
47	AMC	481688.4293	2127461.977
48	MEYEHUALCO	495414.3542	2138137.477
49	PADIERNA	476115.5549	2133389.198
50	CONTRERAS	474034.4889	2134751.11
51	INDIOS VERDES	487474.7292	2155710.457
52	PREPA 3	490076.2918	2154188.876
53	NAUCALPAN	474476.3705	2153263.556



## Capítulo 4. Metodología

---

### 4.1. Regionalización de lluvia en la Cuenca del Valle de México asociadas a diferentes periodos de retorno.

En el año 2010 el Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó el primer estudio de regionalización de lluvias en el país, este estudio fue actualizado en 2017 con nueva información disponible (con datos hasta 2014) en la base de datos de CLICOM, con esta información se realizaron estudios individuales para la Ciudad de México y el Estado de México, para los cuales se utilizaron 34 y 113 estaciones pluviométricas respectivamente (Domínguez, 2017).

Para este trabajo se buscó realizar el análisis para la Cuenca del Valle de México, el cual abarca parte de la Ciudad de México, 54 municipios del Estado de México, así como cuatro municipios (parcialmente) del estado de Hidalgo, se analizaron 151 pluviómetros que se encontraran dentro de la zona (Figura 3.4), los registros de lluvia diaria fueron descargados de la plataforma CLICOM del Sistema Meteorológico Nacional de CONAGUA, para cada estación se verifico que los registros cumplieran con los siguientes requisitos:

1. Estaciones que contaran con registros de al menos 20 años.
2. Estaciones con años completos especialmente en época de lluvias (mayo a octubre).

Para considerar un año como “completo” fue necesario que el registro anual contara con la mayoría de los meses dentro del periodo de lluvia, el cual va de mayo a octubre, considerando como indispensables los meses de junio- septiembre. Una vez realizada esta depuración se obtuvieron 95 estaciones pluviométricas (Figura 4.1) con registros de 1920 a 2017. Para cada una de las estaciones seleccionada se obtuvieron las precipitaciones diarias máximas anuales y se calcularon sus parámetros estadísticos: media, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos.

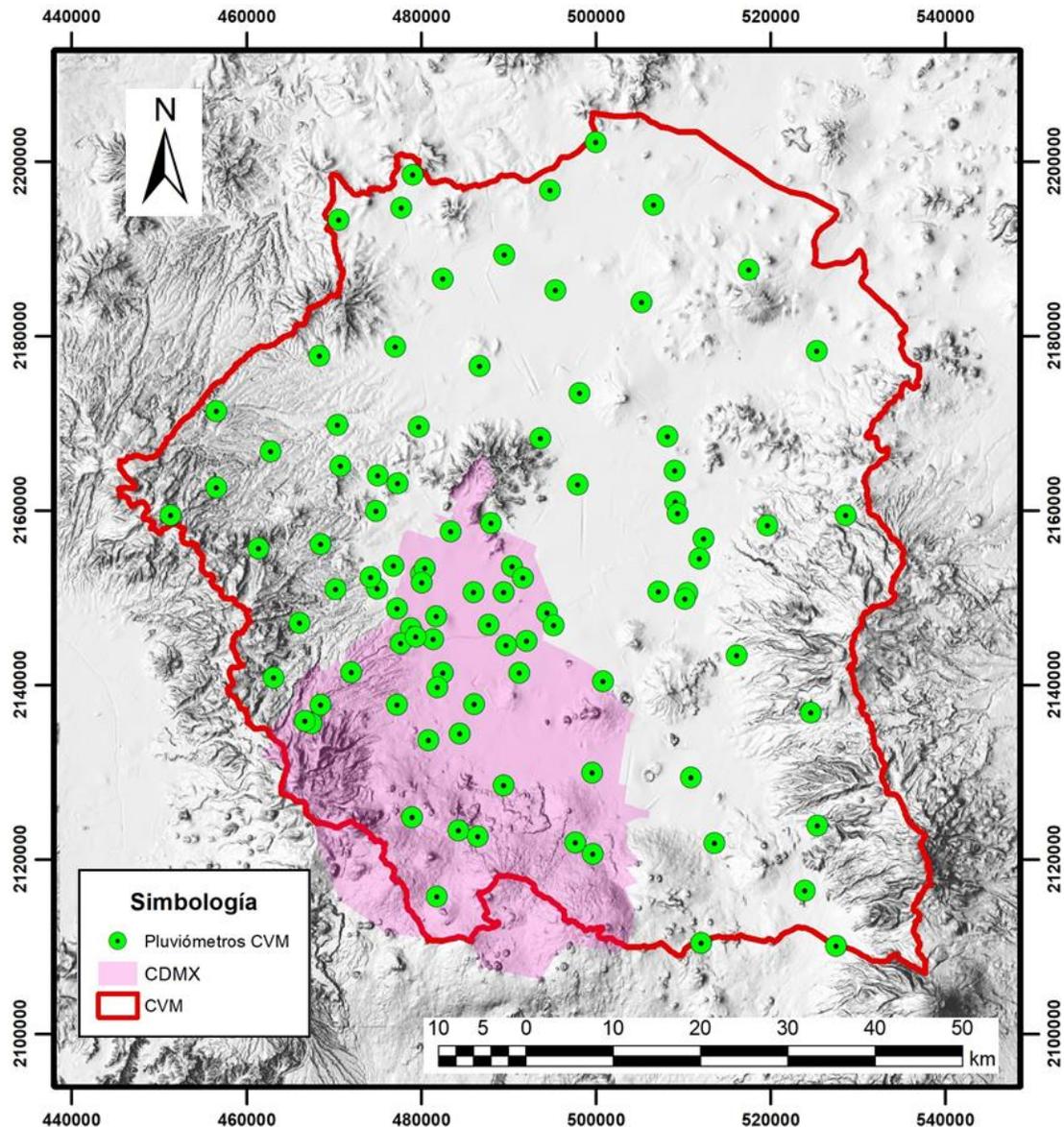


Figura 4.1 Pluviómetros utilizados para el análisis regional de la CVM. Elaboración propia.

Al analizar los valores estadísticos fue posible realizar la depuración de los datos, eliminando valores demasiado altos, que no estén asociados a ningún evento extremo y valores demasiados bajos que pudieran afectar el cálculo de la precipitación media y el coeficiente de variación. Con las medias de las precipitaciones diarias máximas anuales se construyó un mapa de Isoyetas.

Para identificar si la CVM es una región homogénea se optó por analizar el coeficiente de variación (CV) (Figura 4.2) y los máximos de los máximos anuales de cada una de las estaciones climatológicas (Figura 4.3) Para esto los valores obtenidos fueron ordenándolos de mayor a menor.

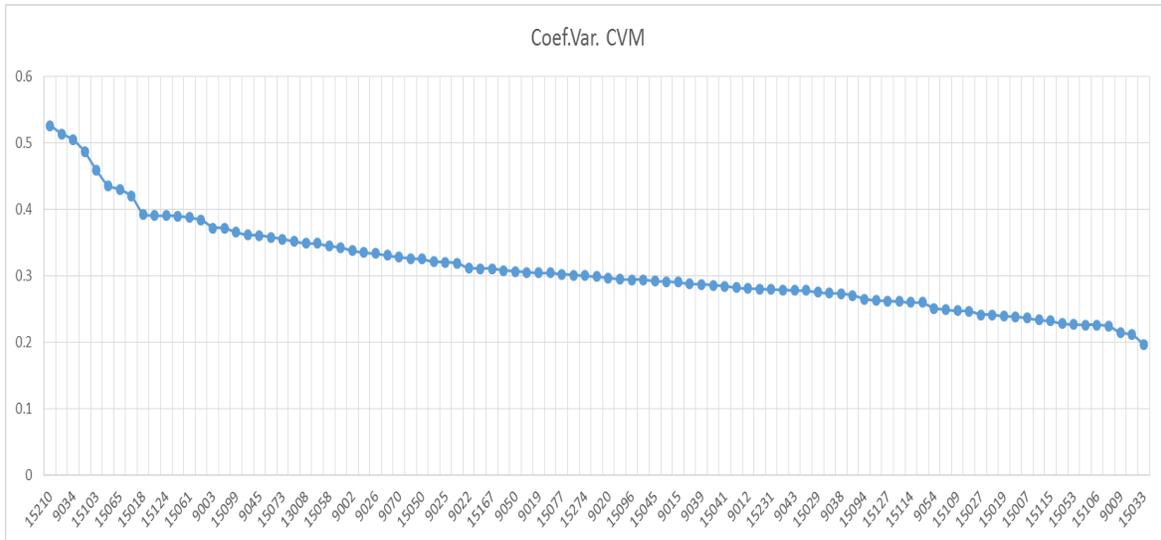


Figura 4.2 Coeficientes de variación de la CVM. Elaboración propia

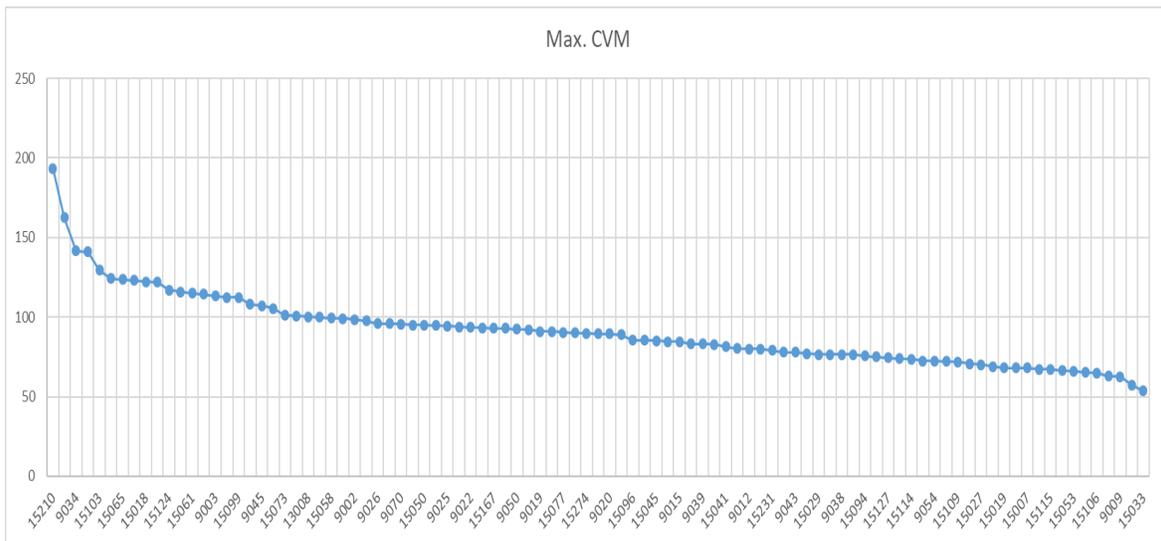


Figura 4.3 Máximos anuales por estación de la CVM. Elaboración propia.

Se observó que los coeficientes de variación se encuentran en un rango de 0.5-0.2 teniendo la mayor pendiente al inicio de la recta, misma que ocurre con máximos, sin embargo, estas variaciones todavía se encuentran dentro del rango establecido, los valores que salían de la tendencia fueron revisados y analizados. Posteriormente se verificó la distribución espacial entre los coeficientes de variación y los 4 más grandes de los máximos anuales, tomando en cuenta la topografía de la cuenca, para ver si no hay alguna tendencia entre estas características (Figura 4.4).

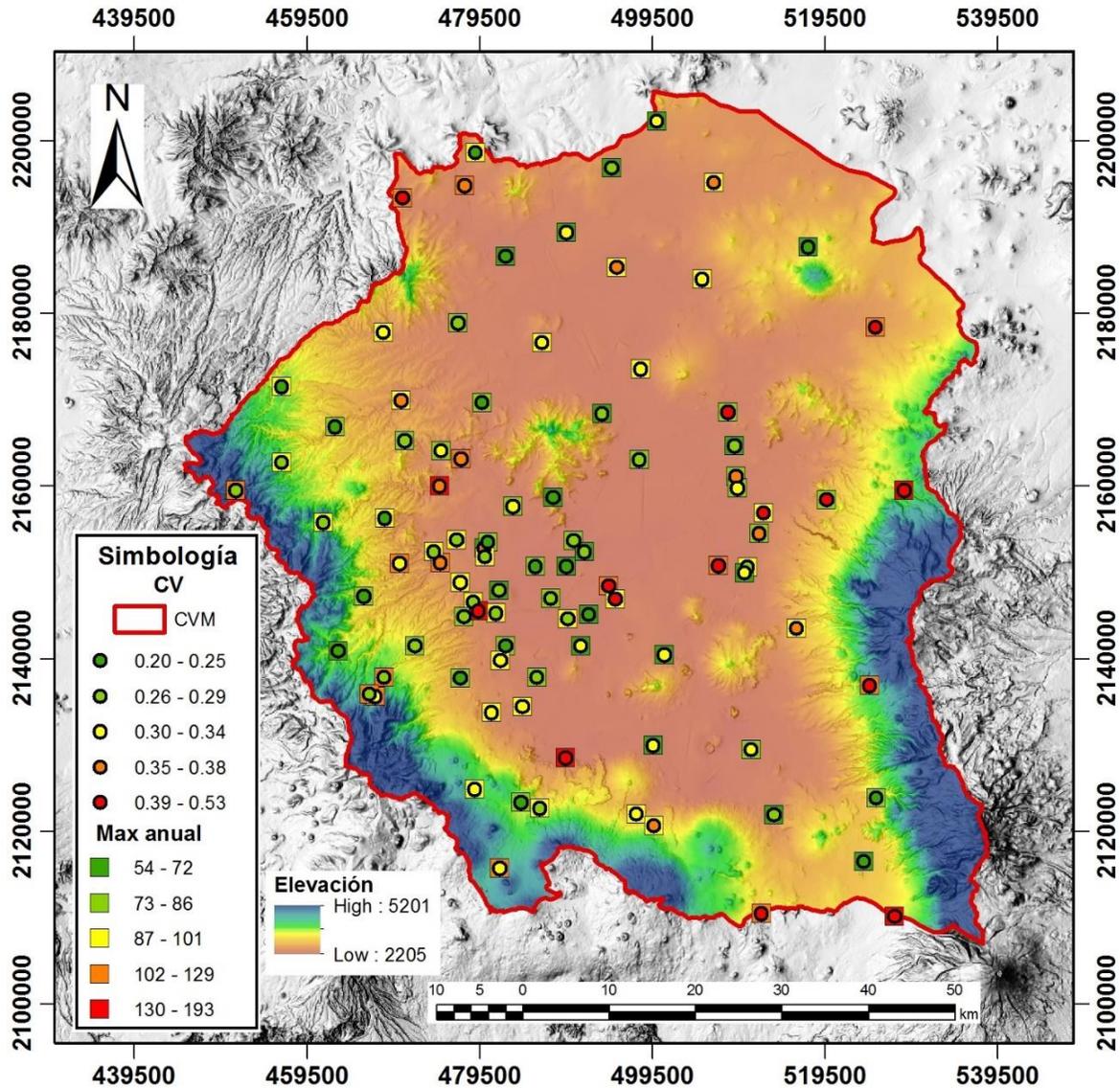


Figura 4.4 Relación entre CV y Máximos anuales.

En la figura anterior se observa que en 4 estaciones los coeficientes de variación más altos ( $> 0.4$ ) y los máximos anuales más altos ( $> 129$  mm) guardan relación entre sí y que estos puntos no parecen seguir un patrón relacionado a la topografía. Además, se observa que la zona sur oeste, donde se encuentran concentrados la mayoría de los pluviómetros, es donde los CV y los máximos anuales guardan mayor relación

Para estandarizar estadísticamente los valores máximos anuales de la región formada se aplicó la técnica de estaciones-año, la cual consiste en normalizar los máximos anuales de cada estación, dividiendo estos entre su media, de tal manera que todas las medias del nuevo registro sean iguales a 1. En la Figura 4.5 se muestra el procedimiento utilizado para realizar la estandarización de los datos.



Estacion	9002	9003	9004	9007	9009
Nombre/año	AJUSCO	AQUILES SERDAN 46	CALVARIO 61	CINCEL 42	COLONIA AGRICOLA ORIENTAL
1971	45.5	41.2	56	29.5	40.7
1972	96	40.8	43.2	40.3	42.4
1973	81	67.4	42	48.7	26
1974	54	38.8	42	36.7	33.2
1975	41.5	42.4	43.7	36.5	53.5
1976	75	44.2	45.5	33.1	29
1977	56.5	48.2	47	55.9	31.3
1978	65	51.8	53.3		38.7
1979	64.5	61.2	38.7	38	25
1980	96	61.8	36.4	40	36.7
1981	70	51.2	40	67.6	35.4
1982	49	48.4	36.2	46.9	
1983	46	27.8	39	36.6	27.8
1984	52	46.4	40.9	49.3	45.3
1985	52	41.3	54.7	39.7	28.6
1986	61		61	37.1	52.3
1987	49	60.5	52	49.8	32.3
1988		36.8			
Media	55.27	40.03	49.28	41.25	36.19
Desv.Est	18.65	14.88	11.49	10.76	7.73
Coef.Var.	0.34	0.37	0.23	0.26	0.21
Máx	96.00	70.60	73.90	76.40	53.50
Mín	25.00	16.50	27.50	22.00	25.00
Máx/media	1.74	1.76	1.50	1.85	1.48
de Hershfiel	2.18	2.05	2.14	3.27	2.24
No años	26.00	46.00	36.00	33.00	26.00

Estacion	9002	9003	9004	9007	9009
Nombre/año	AJUSCO	AQUILES SERDAN 46	CALVARIO 61	CINCEL 42	COLONIA AGRICOLA ORIENTAL
1971	0.82324287	1.0292728	1.13647894	0.71517778	1.12466787
1972	1.73695198	1.01927986	0.87671233	0.97700558	1.17164417
1973	1.46555324	1.68381035	0.85235921	1.18064943	0.71846105
1974	0.97703549	0.96931516	0.85235921	0.88972965	0.91741949
1975	0.75086987	1.05925162	0.88685946	0.88488099	1.47837177
1976	1.35699374	1.10421984	0.92338914	0.80245372	0.8013604
1977	1.02226862	1.20414924	0.95383054	1.35520129	0.86491657
1978	1.17606124	1.2940857	1.08168442		1.06940164
1979	1.16701461	1.52891978	0.78538813	0.92124596	0.69082793
1980	1.73695198	1.54390919	0.73871131	0.96973259	1.0141354
1981	1.26652749	1.27909629	0.81177067	1.63884808	0.97821235
1982	0.88656924	1.20914571	0.73465246	1.13701146	
1983	0.83228949	0.69450931	0.79147641	0.88730532	0.76820066
1984	0.94084899	1.15918101	0.83003551	1.19519542	1.25178021
1985	0.94084899	1.03177103	1.1100964	0.96245959	0.79030715
1986	1.10368824		1.23795028	0.89942698	1.44521203
1987	0.88656924	1.51143214	1.05530188	1.20731707	0.89254969
1988		0.91935046			
Media	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Desv.Est	0.34	0.37	0.23	0.26	0.21
Coef.Var.	0.34	0.37	0.23	0.26	0.21
Máx	1.74	1.76	1.50	1.85	1.48
Mín	0.45	0.41	0.56	0.53	0.69
Máx/media	1.74	1.76	1.50	1.85	1.48
de Hershfiel	2.18	2.05	2.14	3.27	2.24
No años	26.00	46.00	36.00	33.00	26.00

Figura 4.5 Estandarización de registro de la CVM. Imagen izquierda máximos anuales, imagen derecha máximos estandarizados. Elaboración propia

De esta forma se creó un único registro estaciones año que abarca todos los eventos dentro de la cuenca, con un total de 3379 datos. Estos nuevos valores fueron ordenados de mayor a menor y se le ajustaron tres diferentes funciones de distribución de probabilidad:

1. Gumbel
2. Doble Gumbel
3. General de Valores Extremos (GVE).

Para ajustar las diferentes funciones de distribución de probabilidad se implementaron diferentes herramientas, los ajustes Gumbel y doble Gumbel se realizaron utilizando el programa AX desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) del cual se obtienen directamente los factores regionales y periodos de retorno asociados, para esto los valores estandarizados fueron ordenados de mayor a menor y guardados en un archivo tipo “.AJU” los cuales se introducen directamente al programa AX. Mientras que la función GVE se ajustó utilizando una hoja de cálculo y aplicando el método de momentos. Se realizó el cálculo del periodo de retorno y la variable Z, para el periodo de retorno (Tr) se utilizó la Ec. 2.6 y el cálculo de la variable Z se realizó mediante la Ec. 4.1



$$Z = - \ln \left[ \ln \left( \frac{Tr}{Tr - 1} \right) \right] \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde:

Tr: periodo de retorno

Los ajustes de las diferentes funciones de distribución de probabilidad dan como resultado factores regionales asociados a diferentes periodos de retorno.

### 4.2. Factor de reducción por área

Para realizar la actualización de los factores de reducción por área en la Cuenca del Valle de México se revisó la información obtenida en la base de datos CLICOM, a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el cual contiene los registros diarios de pluviómetros que recopilan la información de las últimas 24 horas, además se contó con los datos de las tormentas más importantes registradas en los pluviógrafos de SACMEX.

Se analizaron 135 estaciones pluviométricas con registros diarios de 1920 a 2016, en este caso no se consideró un mínimo de años registrados en la estación para ser tomada como válida, sin embargo, estos si debían contener el registro completo de los meses de lluvia (mayo-octubre) de lo contrario los datos de ese año se descartaron. A estos registros se le agregó la información de 150 tormentas registradas por 45 pluviógrafos de SACMEX entre 1988-1998. La información pluviométrica fue guardada en formato.DLY y se encontraba ordenada como se muestra en la Figura 4.6.

**Acumulado diario**

B	C	D	E	G	I	K	M	O	Q	S
Station-ID	ELEMENT-CC	YEAR-MONT	VALUE-1	VALUE-2	VALUE-3	VALUE-4	VALUE-5	VALUE-6	VALUE-7	VALUE-8
9002	5	1961-01	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1961-02	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1961-03	4.5	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1961-04	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1961-05	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1961-06	0	0	0	0	8.5	0	0	0
9002	5	1961-07	5	6	10.5	0	8.5	0	16	14.5
9002	5	1961-08	0	0	0	10	20	0	0	0
9002	5	1961-09	0	0	10	0	0	0	6.5	0
9002	5	1961-10	0	0	0	0	7.5	4.3	0	0
9002	5	1961-11	0	0	0	0	5	0	0	0
9002	5	1961-12	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1962-01	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1962-02	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1962-03	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1962-04	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1962-05	0	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1962-06	8.5	0	0	0	0	0	0	0
9002	5	1962-07	5	4	0	0	3	0	2.5	0

Figura 4.6 Formato de Información Pluviométrica.

Para realizar la depuración de estos datos, se utilizó el software CLICOM, creado por el Instituto de Ingeniería (diferente a la base de datos CLICOM manejado por el Servicio Meteorológico Nacional y el CICESE), en el cual se introdujeron los datos obtenidos para eliminar los registros de años incompletos (Figura 4.7).



Figura 4.7 software CLICOM. Instituto de ingeniería

Una vez eliminados los datos de años incompletos, se analizó la información restante para realizar el estudio, en la Figura 4.8 se presenta el número de estaciones con registro para cada año del periodo de análisis. Relación estaciones con registro por año

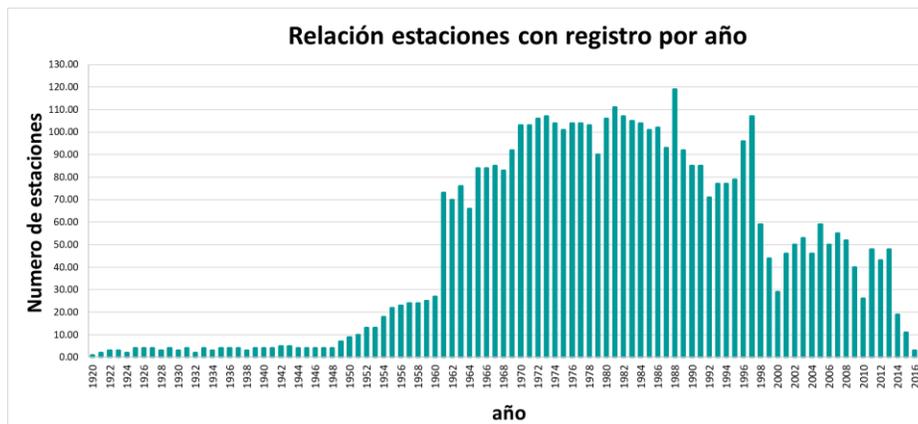


Figura 4.8 Total de estaciones disponibles para los años 1920-2016. Elaboración propia.

En la Figura 4.8 se puede observar que los años que cuentan con un menor número de registros va de 1920 a 1960, por lo que se optó por descartar esta información, así como el periodo de 2013-2016, por lo que el periodo efectivo será de 1961 a 2013. Considerando este periodo quedaron un total de 176 estaciones que se extienden por toda la cuenca, en mayor número localizados en la zona centro de la ciudad de México. Estas estaciones fueron agrupadas en áreas circulares de distintos tamaños: 25 km<sup>2</sup>, 50 km<sup>2</sup>, 75 km<sup>2</sup>, 100 km<sup>2</sup>, 150 km<sup>2</sup>, 200 km<sup>2</sup>, 350 km<sup>2</sup>,

500 km<sup>2</sup>, 700 km<sup>2</sup>, 1000 km<sup>2</sup>, 1500 km<sup>2</sup>, 2000 km<sup>2</sup>, 3000 km<sup>2</sup>, 4000 km<sup>2</sup>, 4500 km<sup>2</sup>, 5000 km<sup>2</sup>, 5500 km<sup>2</sup> y 6200 km<sup>2</sup>, con el objetivo de buscar el mayor número de combinaciones posibles con estaciones dentro de cada área. Como se muestra en la Figura 4.9 se buscó que cada círculo cubriera el mayor número de estaciones posibles, verificando que se encontraran al menos 2 estaciones dentro de cada área, realizando así el mayor número de combinaciones; conforme el área aumentaba el número de estaciones dentro de cada círculo aumentó y las combinaciones disminuyeron, en total para las 21 áreas se obtuvieron 663 círculos.

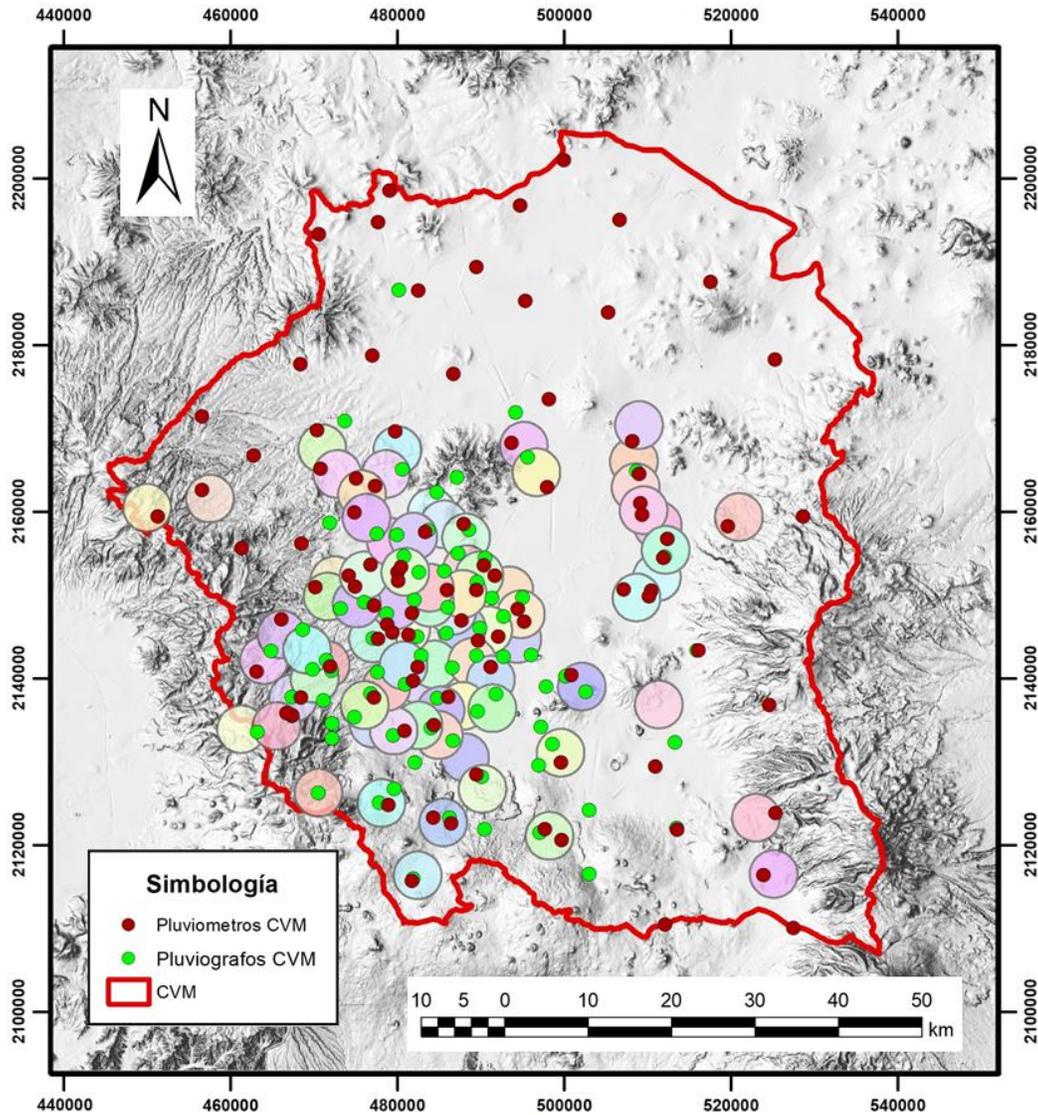


Figura 4.9 Ejemplo de áreas de 25 km<sup>2</sup> en la CVM. Elaboración propia

Se identificaron las estaciones que se encuentran dentro de cada una de las 663 áreas y se procedió a obtener el valor máximo, el promedio y el factor de reducción por área (FRA) por año. Para esto se realizó un análisis de simultaneidad utilizando un Macros de Excel (Figura 4.10) creado en el Instituto de Ingeniería.



ANIO	ESTACION	NO. ESTACIONES	MÁX. ANUAL	PROMEDIO	FACTOR RED. ÁREA	MAY_18	JUN_23	JUL_4	SEP_10	SEP_19
2007	9004		56.7			8.5	56.7	0	52.4	46.7
2007	9014		48			48	4	23	37	28
2007	9032		52.4	Prom. de máximos anuales		7.1	0	5	52.4	25.5
2007	9041		69.5			23	1	3	69.5	4
2007	9051		63.5			10	0	63.5	29	22
2007	9071		41.6	Max. no simultáneo		8.1	0	8.9	25.9	41.6
2007	PROMEDIO	6	44.3667	55.283333	0.80253241	17.45	10.2833333	17.2333333	44.3666667	27.9666667

Valor Max. de los promedios diarios  
**Max. anual simultáneo**

Figura 4.10 Ejemplo de macros para el análisis de simultaneidad. Elaboración propia

El máximo anual simultáneo (recuadro naranja) se obtuvo como el valor máximo de los 365 promedios diarios de todas las estaciones (morado). El valor promedio máximo no simultáneo (recuadro azul) es el promedio de los máximos anuales por estación (verde), los cuales no necesariamente se presentaron el mismo día, como se muestra en la tabla. Finalmente, el FRA se obtiene de la Ec. 4.2. Este proceso se realizó en cada una de las 663 áreas.

$$FRA = \frac{Max_s}{Max_{ns}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

Max<sub>s</sub>: Máximo simultaneo

Max<sub>ns</sub>: Máximo no simultaneo

FRA: factor de reducción por área

Los datos obtenidos anteriormente fueron depurados por área, donde cada año debía tener al menos el número de estaciones que se estableció con un *criterio* (Figura 4.11) de no ser así ese año sería descartado.

Media	2	Criterio	1.9
Desv Est	0.77184498		
Media-desv	1.22815502		
	2.00	34.04	42.08
			0.81

AÑO	Promedio	# ESTACIONES	MAX SIM	MAX NO SIM	FRA
1961	PROMEDIO	1	52.0	52.0	1.0
1962	PROMEDIO	1	45.0	45.0	1.0
1963	PROMEDIO	1	29.0	29.0	1.0
1964	PROMEDIO	1	29.8	29.8	1.0
1965	PROMEDIO	2	59.0	89.3	0.7
1966	PROMEDIO	2	42.0	49.2	0.9
1967	PROMEDIO	2	47.0	53.0	0.9
1968	PROMEDIO	1	45.3	45.3	1.0
1969	PROMEDIO	2	42.3	49.5	0.9
1970	PROMEDIO	2	25.5	32.4	0.8
1971	PROMEDIO	3	28.0	35.5	0.8
1972	PROMEDIO	3	38.6	41.8	0.9
1973	PROMEDIO	3	28.8	39.2	0.7
1974	PROMEDIO	3	25.4	38.1	0.7

AÑO	# ESTACIONES	MAX SIM	MAX NO SIM	FRA
1961				
1962				
1963				
1964				
1965	2	59.0	89.3	0.66
1966	2	42.0	49.2	0.85
1967	2	47.0	53.0	0.89
1968				
1969	2	42.3	49.5	0.85
1970	2	25.5	32.4	0.79
1971	3	28.0	35.5	0.79
1972	3	38.6	41.8	0.92
1973	3	28.8	39.2	0.73
1974	3	25.4	38.1	0.67

Figura 4.11 Ejemplo de depuración de datos, área 75 km<sup>2</sup>. Sección izquierda datos completos, sección derecha datos efectivos. Elaboración propia.



Se tomó como *criterio* la media del total de estaciones por año, sin embargo, como se observa en la Figura 4.11, la media de estaciones con registro para un año fue de 2 por lo que el *criterio* para el número mínimo de estaciones por año debería ser igual a 2, en casos como este el *criterio* fue bajado ligeramente para considerar más estaciones moviendo p ej. de una media = 2 a media = 1.9 para considerar los años con 2 estaciones. Cabe recalcar que para los años 1962, 1967, 1988 y 2011 estas restricciones no se consideraron puesto que en estos años ocurrieron tormentas importantes en la CVM sin embargo si debían contar con el registro de al menos 2 estaciones por año.

Posteriormente los valores obtenidos de máx. simultáneos y Max. no simultáneos para cada círculo (C0, C1, C2, ..., Cn) fueron promediados por año, como se puede ejemplificar en la Figura 4.12 donde el promedio para los máx. simultáneos del año 1969 de 64 áreas (círculos) de 75 km<sup>2</sup> fue de 37.0 mm.

	B	C	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
3	Max Sim														
4	AÑO	PROMEDIO	AÑO	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	
5	1961	32.38	1961	34.50				24.75	37.50	26.50		27.90			
6	1962	41.55	1962		46.75			40.25	40.00	57.60		41.35			
7	1963	33.74	1963					30.75	35.35	44.10		37.95			
8	1964	31.15	1964					25.50	27.00	22.60					
9	1965	37.75	1965					46.00	35.15	28.40		88.50			
10	1966	38.96	1966	44.25				32.50	34.25	71.90		97.45	41.25	42.25	
11	1967	47.59	1967		56.43			45.00	40.30			45.75	51.00	41.50	
12	1968	39.28	1968		42.40							24.40	36.25	43.00	
13	1969	37.00	1969	28.30	53.95			23.50	35.50	30.00		34.25	27.75	20.55	
14	1970	33.95	1970	44.45	34.36			32.00	32.35	35.40		33.35	25.50	25.05	
15	1971	34.29	1971	24.60	38.68		25.25	26.50	32.85	34.55		24.75	33.35	26.70	

Figura 4.12 Obtención de máximos simultáneos promedio por año, área 75 km<sup>2</sup>

Una vez calculados los valores promedio de los máx. simultáneos y no simultáneos para cada año se obtuvieron los periodos de retorno (Tr) con la Ec. 2.6 y la variable Z con la ecuación Ec. 4.1. Para ello se ordenaron los valores de máximos simultáneos y no simultáneos, como se muestra en la Figura 4.13 los valores de las celdas C y D se ordenaron de mayor a menor en las celdas I y J y se utilizó la Ec. 4.2 para obtener el FRA (celda k).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
	Numero de datos= 53										
	AÑO	Max Sim	Max No Sim	m	Tr	Z=Ln(Ln(Tr/(Tr-1)))	Max. Sim	Max. No Sim	FRA		
	1961	33.95	38.67	1	54.00	3.980	52.64	62.98	0.8358		
	1962	40.45	44.52	2	27.00	3.277	50.78	59.27	0.8567		
	1963	36.80	49.17	3	18.00	2.862	47.61	58.05	0.8201		
	1964	41.22	45.49	4	13.50	2.564	47.02	56.25	0.8360		
	1965	35.65	42.11	5	10.80	2.331	45.96	55.25	0.8318		
	1966	33.82	40.14	6	9.00	2.139	45.75	53.83	0.8498		
	1967	47.02	50.18	7	7.71	1.974	43.40	50.93	0.8522		
	1968	45.96	56.25	8	6.75	1.830	43.15	50.18	0.8598		
	1969	39.48	45.71	9	6.00	1.702	42.72	49.17	0.8687		
	1970	36.89	43.12	10	5.40	1.586	41.37	49.07	0.8431		
	1971	38.10	46.32	11	4.91	1.479	41.30	49.03	0.8423		
	1972	37.21	44.74	12	4.50	1.381	41.22	48.95	0.8421		
	1973	38.20	45.24	13	4.15	1.289	40.45	48.82	0.8286		

Figura 4.13 obtención de los periodos de retorno (Tr), la variable Z y el FRA



Este proceso se realizó para las 21 áreas (25 km<sup>2</sup>, 50 km<sup>2</sup>, 75 km<sup>2</sup>, 100 km<sup>2</sup>, 150 km<sup>2</sup>, 200 km<sup>2</sup>, 350 km<sup>2</sup>, 500 km<sup>2</sup>, 700 km<sup>2</sup>, 1000 km<sup>2</sup>, 1500 km<sup>2</sup>, 2000 km<sup>2</sup>, 3000 km<sup>2</sup>, 4000 km<sup>2</sup>, 4500 km<sup>2</sup>, 5000 km<sup>2</sup>, 5500 km<sup>2</sup> y 6200 km<sup>2</sup>). Posteriormente se realizaron graficas FRA-Tr para cada área para así observar la relación entre el FRA y el Tr (Figura 4.14).

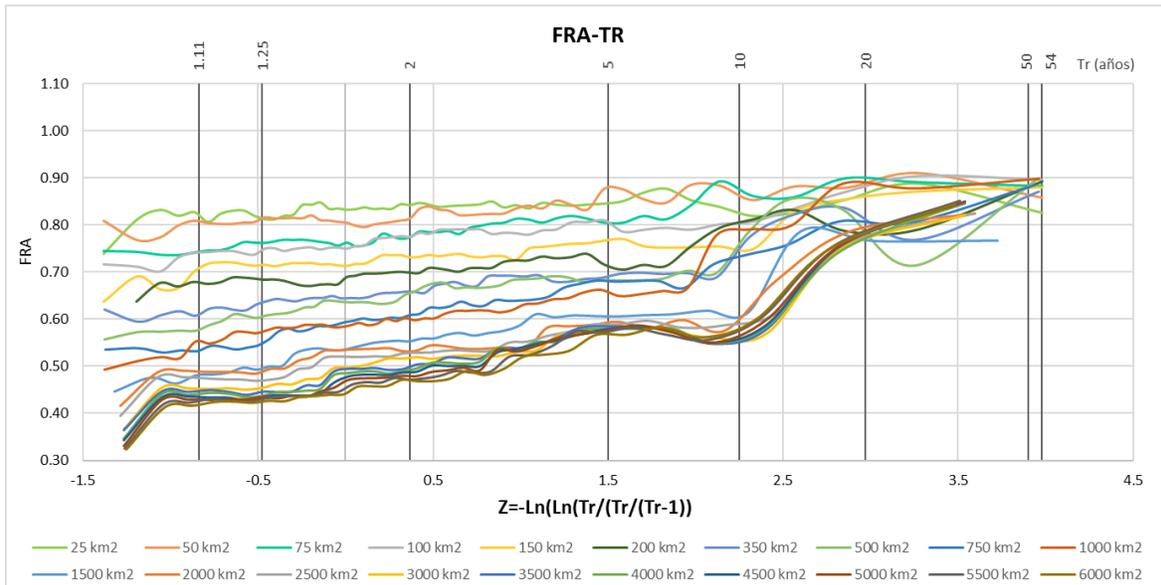


Figura 4.14 Relación FR-Tr- área.

Para cada año, de 1961 a 2013 se obtuvieron los valores promedio del factor de reducción por área, de los máximos simultáneos y de los máximos no simultáneos. Los valores anuales de los FRA asociados a cada área se promediaron (Figura 4.15) y se elaboró una gráfica “área vs FRA” en la que se ajustó una ecuación con la que se busca definir el FRA para cualquier área, periodo de retorno y ubicación de la cuenca del valle de México.

PROMEDIO	0.84	0.81	0.79	0.77	0.74	0.71	0.68	0.66	0.63	0.62	0.56	0.55	0.53	0.53	0.52	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50
Área (km <sup>2</sup> )	25	50	75	100	150	200	350	500	750	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
C0	0.91	0.78	0.79	0.81	0.69	0.66	0.61	0.70	0.62	0.63	0.57	0.56	0.53	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.51	0.50
C1	0.82	0.73	0.85	0.82	0.69	0.68	0.72	0.62	0.65	0.77	0.58	0.54	0.52	0.52	0.52	0.52	0.50	0.51	0.50	0.50
C2	0.83	0.72	0.76	0.84	0.83	0.72	0.77	0.66	0.77	0.60	0.58	0.60	0.54	0.54	0.51	0.51	0.51	0.50	0.50	0.49
C3	0.82	0.79	0.84	0.74	0.70	0.71	0.73	0.59	0.60	0.62	0.55	0.56	0.53	0.53	0.52	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50
C4	0.86	0.87	0.88	0.71	0.71	0.70	0.69	0.61	0.67	0.61	0.60	0.56	0.53	0.53	0.52	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50
C5	0.84	0.74	0.83	0.76	0.71	0.67	0.70	0.65	0.68	0.62	0.55	0.58	0.53	0.52	0.51	0.51	0.51	0.51	0.50	0.50
C6	0.91	0.76	0.79	0.70	0.66	0.77	0.77	0.64	0.73	0.64	0.60	0.54	0.53	0.53	0.52	0.50	0.52	0.50	0.50	0.50
C7	0.89	0.83	0.74	0.64	0.74	0.68	0.69	0.58	0.68	0.58	0.55	0.53	0.53	0.53	0.51	0.52	0.51	0.50	0.50	0.50
C8	0.77	0.81	0.85	0.70	0.66	0.70	0.64	0.62	0.61	0.74	0.58	0.56	0.55	0.53	0.51	0.51	0.50	0.50	0.50	0.50
C9	0.79	0.85	0.81	0.72	0.82	0.71	0.68	0.63	0.64	0.58	0.55	0.55	0.55	0.53	0.52	0.51				
C10	0.78	0.74	0.80	0.73	0.75	0.74	0.67	0.64	0.65	0.62	0.56	0.56	0.55	0.52	0.52	0.51				
C11	0.78	0.88	0.78	0.78	0.69	0.68	0.66	0.70	0.62	0.66	0.56	0.55	0.55	0.52	0.52	0.51				
C12	1.00	0.86	0.72	0.77	0.81	0.76	0.64	0.63	0.60	0.59	0.55	0.54	0.54	0.54	0.52					
C13	0.88	0.80	0.84	0.72	0.78	0.71	0.66	0.77	0.64	0.64	0.56	0.54	0.53	0.53	0.52					
C14	0.88	0.83	0.76	0.75	0.83	0.76	0.69	0.72	0.61	0.58	0.56	0.53	0.53							
C15	0.86	0.90	0.76	0.85	0.78	0.67	0.74	0.66	0.61	0.63	0.56	0.54	0.54							
C16	1.00	0.75	0.77	0.87	0.79	0.74	0.88	0.68	0.64	0.58	0.55	0.54	0.54							
C17	0.82	0.73	0.86	0.69	0.76	0.66	0.70	0.66	0.66	0.64	0.56	0.56	0.54							
C18	0.83	1.00	0.78	0.75	0.74	0.73	0.68	0.63	0.61	0.63	0.58	0.54	0.54							
C19	0.83	0.81	0.74	0.75	0.71	0.69	0.65	0.65	0.61	0.59	0.54	0.54	0.53							
C20	0.87	0.82	0.82	0.81	0.73	0.69	0.73	0.63	0.60	0.61	0.54	0.54	0.55							
C21	0.84	0.81	0.75	0.83	0.72	0.74	0.70	0.61	0.62	0.63	0.54	0.54	0.53							
C22	0.87	0.84	0.85	0.83	0.70	0.75	0.77	0.67	0.57	0.61	0.55	0.53								
C23	0.79	0.79	0.86	0.83	0.69	0.69	0.74	0.68	0.58	0.59	0.54	0.53								
C24	0.84	0.83	0.84	0.74	0.75	0.77	0.64	0.59	0.61	0.60	0.55	0.54								
C25	0.75	0.73	0.86	0.73	0.74	0.72	0.61	0.62	0.61	0.58	0.55	0.54								
C26	0.83	0.78	0.88	0.77	0.75	0.69	0.63	0.63	0.58	0.58										
C27	0.81	0.79	0.69	0.81	0.68	0.74	0.67	0.68	0.61	0.59										
C28	0.88	0.75	0.75	0.72	0.86	0.71	0.65	0.65	0.61	0.59										
C29	0.85	0.75	0.87	0.75	0.84	0.73	0.67	0.64	0.63											
C30	0.83	0.81	0.83	0.84	0.72	0.78	0.64	0.71	0.66											

Figura 4.15. Valores promedio de los FRA por área

### 4.3. Factor de convectividad

Uno de los problemas principales en México es la escasez de información pluviográfica, por lo que para obtener la relación entre las lluvias diarias máximas anuales y su evolución durante el día es necesario recurrir a métodos que describan el comportamiento de la lluvia en la CVM, para esto se recurrió a la obtención del factor de convectividad también conocido como Factor **R**, el cual determina la relación de las precipitaciones acumuladas de un día con las de una hora.

Para obtener el Factor R se utilizó la información recabada por los primeros 49 pluviógrafos que instaló SACMEX (Figura 4.16) de los cuales se obtuvieron 143 de las tormentas más importantes ocurridas en la CVM entre 1988 y 2008 (Anexo 1). La información analizada contiene el registro por día desde las 7 am hasta las 6 am del día siguiente, con un  $\Delta t = 1$  hora.

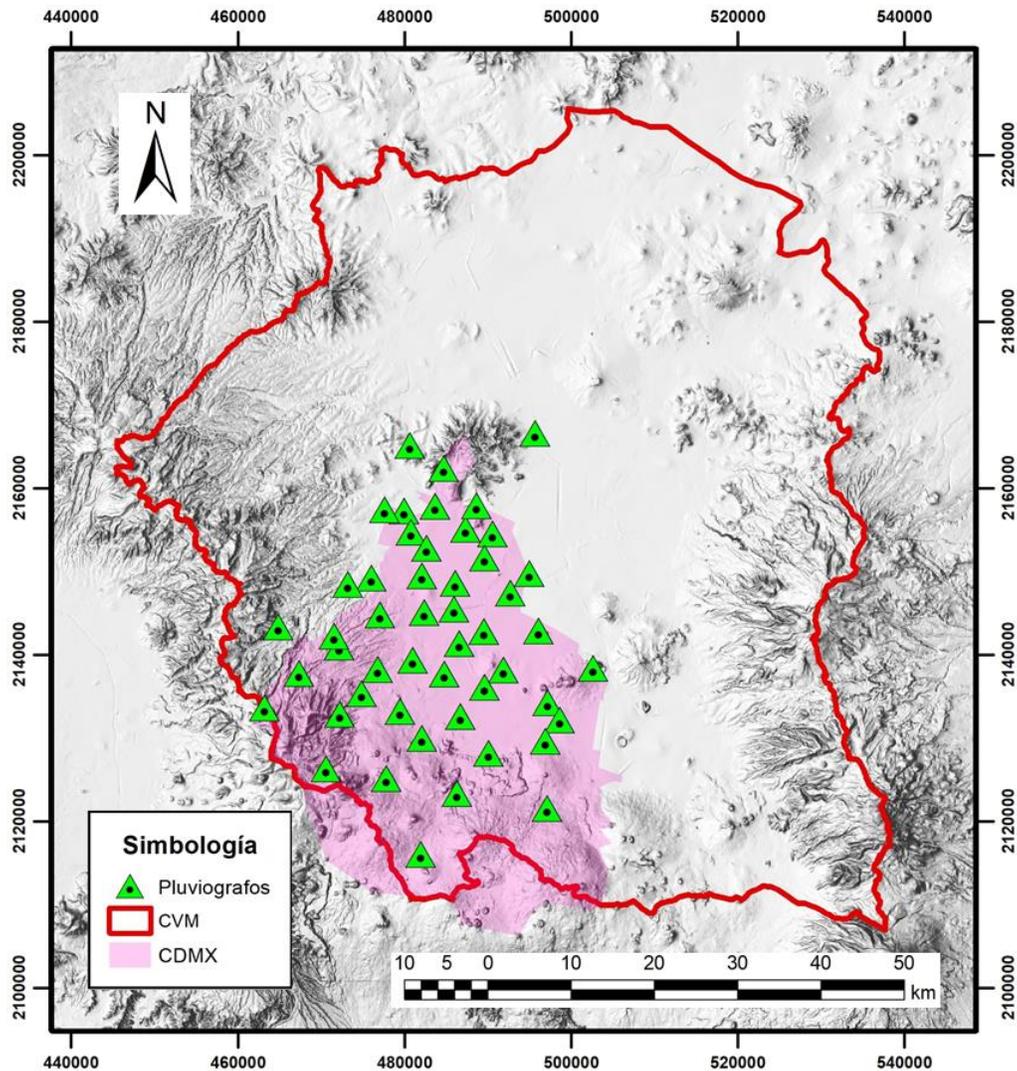


Figura 4.16 Pluviógrafos (SACMEX) utilizados para la obtención del factor R. Elaboración propia.



El archivo contiene el registro de la precipitación horaria del día en el que ocurrió la tormenta para las 49 estaciones (Figura 4.17) cabe recalcar que no todas las estaciones cuentan con el registro de la misma tormenta. Para obtener el coeficiente R se obtuvo el acumulado de 24 horas (recuadro rosa) y el máximo de los valores horarios; posteriormente se obtuvo el factor R como el cociente de lluvia máxima acumulada en una hora entre el acumulado de un día (Ec. 4.3).

FechaEstacion	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
25/06/1988 07:00	1.14	1.38	3.81	2.03	2.87	0.82	3.3	1.02	0	1.78	0	0
25/06/1988 08:00	1.06	0.27	0	0	0.12	0.26	0	0.82	2.23	0.51	0	1.92
25/06/1988 09:00	0.24	0.13	0.03	1.55	0.09	0.19	3.3	0.19	0.56	0.76	0	0.87
25/06/1988 10:00	0	0	0.07	0.04	0.05	0	0	0	0	0	0	0
25/06/1988 11:00	0	0	0.07	0.04	0.05	0	0	0	0	0	0	0
25/06/1988 12:00	0	0	0.07	0.04	0.05	0	0	0	0	0	0	0
25/06/1988 13:00	0	0	0.07	0.04	0.05	0	0	0	0	0	0	0
25/06/1988 14:00	0	0	0.07	0.04	0	0	0	0	0	0	0.25	0
25/06/1988 15:00	0	0	0.07	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
25/06/1988 16:00	0.24	0.64	0.07	0.55	0.51	0	0	0	0	2.79	0	2.54
25/06/1988 17:00	6.43	2.16	0.25	0.92	0	4.06	1.02	0	0	0	1.27	0
25/06/1988 18:00	4.79	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	2.8	0
25/06/1988 19:00	0.05	0	0	0	0	0	0	0	1.02	0	0	0
25/06/1988 20:00	0.39	0.29	0.63	1.82	3.15	0	0	0.89	10.45	1.97	0	1.94
25/06/1988 21:00	0.57	0.47	1.4	0.47	0.91	1.78	2.6	1.65	1.84	1.33	0	1.11
25/06/1988 22:00	0	0	0	0	0	0	0.19	0	0.16	0	0	0
25/06/1988 23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0
26/06/1988 00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/06/1988 01:00	0	0	0	0	0.26	0	0	0	0	0	0	0
26/06/1988 02:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/06/1988 03:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/06/1988 04:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/06/1988 05:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/06/1988 06:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
hp_24h	14.91	5.34	6.61	7.64	8.11	7.11	10.41	4.57	16.26	9.14	4.57	8.38
Max_1h	6.43	2.16	3.81	2.03	3.15	4.06	3.3	1.65	10.45	2.79	2.8	2.54
R	0.43	0.40	0.58	0.27	0.39	0.57	0.32	0.36	0.64	0.31	0.61	0.30

Figura 4.17 Ejemplo del registro diario de pluviógrafos, obtención del factor R. Tormenta 25/05/1988.

$$R = \frac{Max_{1h}}{hp_{24h}} \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

Max<sub>1h</sub>: precipitación máxima acumulada en 1 hora

hp<sub>24h</sub>: precipitación aculada de 24 horas

Se obtuvo un valor de R para cada tormenta, del cual para cada estación se le calculo el valor medio, la desviación estándar y el número de tormentas registradas (Figura 4.18).



Fecha\Estación	1	2	3	4	5	6	7	8
19/07/2004 07:00	0.51	0.52			0.90	0.64	0.50	0.62
18/08/2004 07:00	0.51	0.81	0.47	0.33	0.60	0.30	0.30	0.37
20/08/2004 07:00	0.58	0.49	0.75	0.88	0.75	0.59	0.65	0.67
29/08/2004 07:00	0.22	0.37		0.45	0.57	0.37	0.40	0.43
30/08/2004 07:00	0.42	0.37	0.59	0.62	0.74	0.47	0.43	0.46
24/09/2004 07:00	0.74	0.54		0.49	0.47	0.85	0.52	0.48
29/09/2004 07:00	0.31	0.35		0.21	0.54	0.40	0.45	0.30
23/06/2005 07:00	0.32	0.46	0.74	0.65	0.39	0.89	0.71	0.51
25/06/2005 07:00	0.30	0.19	0.97	0.95	0.86	0.43	0.74	0.83
18/07/2005 07:00	0.16	0.15	0.32	0.24	0.32	0.24	0.21	0.28
05/08/2005 07:00	0.32	0.31	0.40	0.32	0.48	0.50	0.47	0.61
30/08/2005 07:00	0.28	0.37	0.39	0.35	0.57	0.40	0.49	0.92
31/08/2005 07:00	0.38	0.43	0.29	0.32	0.28	0.26	0.29	0.25
09/09/2005 07:00	0.29	0.29	0.54	0.52	0.43	0.39	0.36	0.36
11/06/2008 07:00	0.53	0.54	0.24	0.26	0.22	0.36	0.56	0.42
07/07/2008 07:00	0.36	0.45	0.26	0.38	0.41	0.30	0.38	0.18
media	0.48	0.52	0.51	0.53	0.52	0.52	0.48	0.50
Desv.Est	0.18	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.21	0.20
No. de tormentas	137.00	131.00	128.00	128.00	130.00	130.00	131.00	132.00

Figura 4.18 Promedio de los factores R por estación y tormenta.

Los valores promedio de las estaciones fueron ubicados geográficamente y se realizó una interpolación espacial utilizando el método IDW para así observar su variabilidad espacial, así como alguna relación de estos con las características de la CVM. Debido a que la información utilizada se encuentra medida a cada hora, estos valores no son realmente representativos a la lluvia que podría ocurrir durante una hora consecutiva sin importar el momento del día. Por lo que para corregir estos resultados se propuso utilizar la información disponible del Observatorio Hidrológico de la UNAM (OH-UNAM), estas estaciones cuentan con información medida a un  $\Delta t=1$  minuto. Para esto se utilizaron 10 de las 49 estaciones de OH-UNAM (Tabla 4.1) que cuentan con el registro completo de la información diaria de los años 2019, 2020 y 2021 y se encuentran ubicadas en la Figura 4.19

Tabla 4.1 estaciones del OH utilizadas para la corrección del factor R

No.	Estación
1	Ajusco
2	Copilco
3	Cuemanco
4	La Joya
5	Milpa Alta
6	Naucalpan
7	Nopalera
8	Prepa 4
9	San Bernabe
10	Zapata

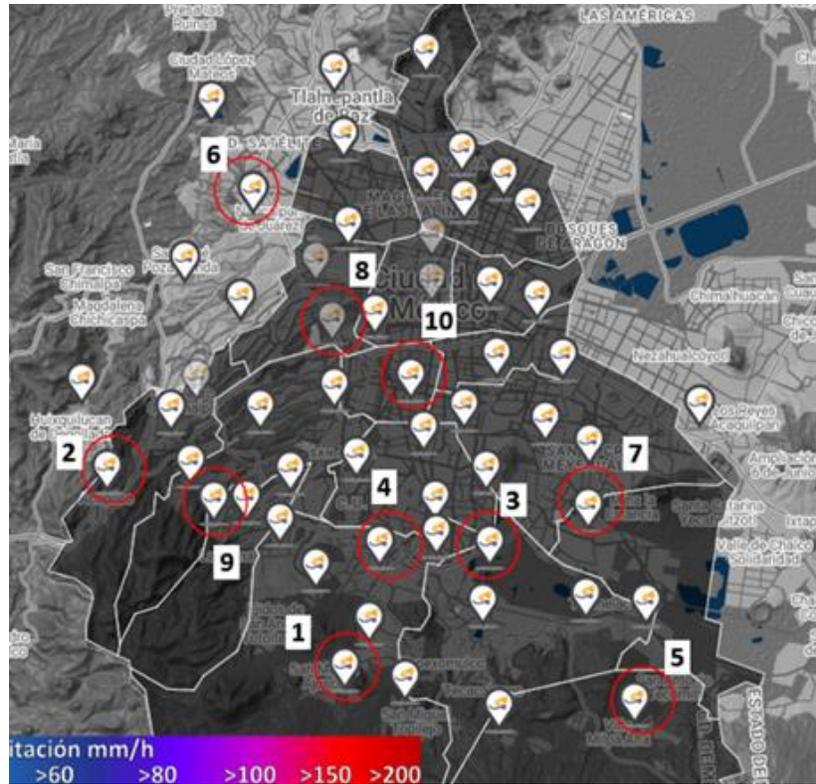


Figura 4.19 Ubicación de estaciones del Observatorio Hidrológico de la UNAM

Con la información del OH-UNAM se obtuvo un hietograma anual por estación para identificar las tres tormentas de mayor duración, en total se obtuvieron 9 hietogramas, para cada uno se identificaron tres tormentas con mayor precipitación en un día los cuales debían ser parte de trenes de tormentas que cuenten con al menos una duración de tres días (Figura 4.20), cabe mencionar que las tormentas con mayor precipitación no siempre cumplían con ser parte de un tren de tormentas por lo que de no ser así se optó por seleccionar a la siguiente tormenta con mayor precipitación.

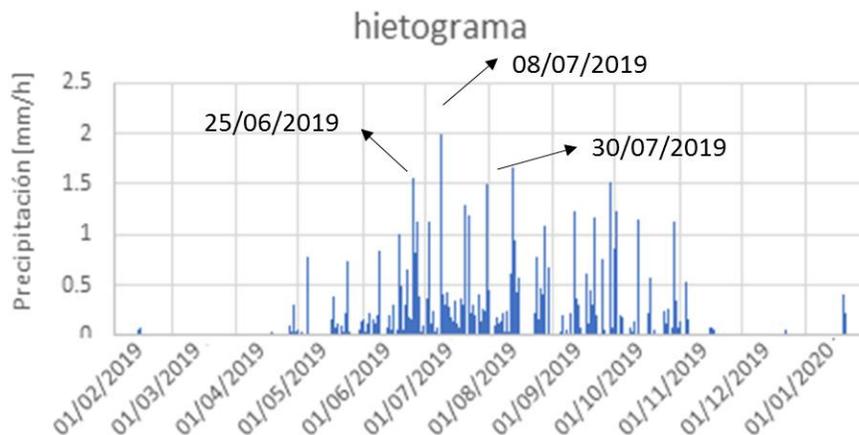


Figura 4.20 Hietograma estación Copilco año 2019, identificación de trenes de tormenta.



Para cada tormenta se obtuvieron los máximos de altura de precipitación acumulado calculados para una ventana temporal fija y otra móvil correspondientes a 1 hora y 24 horas, entendiéndose como hora fija a los 60 minutos que inician en el minuto 0 y como hora móvil a los 60 minutos corridos que inician a partir del minuto 01 hasta el minuto 59. Como se puede ver en la Figura 4.21 en la columna C se tiene los datos como lo arroja el OH-UNAM (mm) en la columna D estos valores fueron multiplicador por 1/60 para pasarlos a mm/hora para así agruparlos en ventanas de una hora y 24 horas según sea el caso, ventana móvil (columnas F y G) o ventana fija (columnas J y K).

Estación	Fecha/hora	Intensidad de Precipitación [mm]	hietograma Ip*(1/60)	Movil		Fijo			L	M	N	O		
				acu_1hr	acu_24hr	Hora	Acum hora	Acum dia						
ACOPILCO	24/06/2019 00:00	0.362	0.00603333	0.31955	2.83541667	24/06/2019 00:00	0.31955	2.83541667						
ACOPILCO	24/06/2019 00:01	0.648	0.0108	0.31351667	2.82938333	24/06/2019 01:00	0	22.7684	Max_1 hora movil	21.37235				
ACOPILCO	24/06/2019 00:02	1.085	0.01808333	0.30271667	2.81858333	24/06/2019 02:00	0.04056667	6.85185	Max_24 hrs movil	29.1382833				
ACOPILCO	24/06/2019 00:03	0.812	0.01353333	0.28463333	2.8005	24/06/2019 03:00	0		FC	0.73348007				
ACOPILCO	24/06/2019 00:04	0.978	0.0163	0.2711	2.78696667	24/06/2019 04:00	0							
ACOPILCO	24/06/2019 00:05	0.949	0.01581667	0.2548	2.77066667	24/06/2019 05:00	0		Max_1hr fija	1.4275	Max día	2.83541667	FC	0.50345334
ACOPILCO	24/06/2019 00:06	0.905	0.01508333	0.23898333	2.75485	24/06/2019 06:00	0		24/06/2019	20.0632	22.7684	0.88118621		
ACOPILCO	24/06/2019 00:07	0.693	0.01155	0.2239	2.73976667	24/06/2019 07:00	0		25/06/2019	5.680933333	6.85185	0.82910941		
ACOPILCO	24/06/2019 00:08	0.778	0.01296667	0.21235	2.72821667	24/06/2019 08:00	0							
ACOPILCO	24/06/2019 00:09	0.704	0.01173333	0.19938333	2.71525	24/06/2019 09:00	0							
ACOPILCO	24/06/2019 00:10	0.706	0.01176667	0.18765	2.70351667	24/06/2019 10:00	0							
ACOPILCO	24/06/2019 00:11	0.672	0.0112	0.17588333	2.69175	24/06/2019 11:00	0							
ACOPILCO	24/06/2019 00:12	0.591	0.00985	0.16468333	2.68055	24/06/2019 12:00	0.12705							
ACOPILCO	24/06/2019 00:13	0.501	0.00835	0.15483333	2.6707	24/06/2019 13:00	0.28283333							
ACOPILCO	24/06/2019 00:14	0.425	0.00708333	0.14648333	2.66235	24/06/2019 14:00	1.4275							
ACOPILCO	24/06/2019 00:15	0.438	0.0073	0.1394	2.65526667	24/06/2019 15:00	0.10528333							
ACOPILCO	24/06/2019 00:16	0.513	0.00855	0.1321	2.64796667	24/06/2019 16:00	0.53263333							

Figura 4.21 Ventanas de precipitación.

Con los acumulados para cada ventana se obtuvieron los máximos móviles y fijos y se obtuvo un factor R con la Ec. 4.3 para cada caso. Puesto que el factor R ya fue calculado, lo que se busca utilizando esta información es un factor de corrección relacionado con una ventana de 1 minuto, mismo que se obtuvo con la relación existente entre una hora móvil y una hora fija (Ec. 4.4).

$$\text{Factor de correccion} = \frac{1h_m}{1h_f} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

- h<sub>m</sub>: 1 hora móvil
- h<sub>f</sub>: 1 hora fija

Finalmente, el factor de corrección encontrado fue multiplicado por los factores R obtenidos anteriormente y se obtuvo un mapa con las zonas correspondientes a diferentes factores R.



## Capítulo 5. Resultados

### 5.1. Resultados de Regionalización

#### a.1 Obtención de mapas de isolíneas correspondientes a la media de las precipitaciones diarias máximas anuales

Con los valores estadísticos descritos en la sección 4.1 Regionalización de la CVM mismos que se presentan en la Tabla 5.1., utilizando las medias de las lluvias diarias máximas anuales fue posible construir un mapa de Isoyetas, a partir de las cuales se puede calcular la precipitación de diseño asociada a diferentes periodos de retorno en cualquier subcuenca dentro de la CVM (Figura 5.1).

Tabla 5.1 Valores estadísticos de la CVM

No.	Clave	Nombre	X_UTM	Y_UTM	Media	Desv. Est	Coef. Var.	Máx	Mín	No. años
1	9002	Ajusco	478977.39	2124817.19	55.27	18.65	0.34	96	25	26
2	9003	Aquiles Serdan 46	480059.23	2152777.87	40.03	14.88	0.37	70.6	16.5	46
3	9004	Calvario 61	484315.85	2123306.98	49.28	11.49	0.23	73.9	27.5	36
4	9007	Cinzel 42	487748.23	2146939.58	41.25	10.76	0.26	76.4	22	33
5	9009	Colonia Agricola Oriental	492125.28	2145022.85	36.19	7.74	0.21	53.5	25	26
6	9010	Colonia America	478823.92	2146483.08	56.05	16.13	0.29	94.6	28.1	34
7	9012	Colonia Escandon	481394.87	2145252	46.29	12.99	0.28	90.5	30.2	34
8	9014	Colonia Santa Ursula Coapa	484440.94	2134394.13	50.54	15.08	0.30	93	28.5	40
9	9015	Rodano 14 (Cfe)	481775.49	2147863.03	42.29	12.28	0.29	72.5	22.5	27
10	9019	Desierto De Los Leones	467465.59	2135589.47	58.37	17.75	0.30	122	38.7	23
11	9020	Desviacion Alta Al Pedregal	480857.71	2133689.37	50.66	15.03	0.30	94.5	27	57
12	9021	Egipto 7	480469.22	2153397.09	48.66	11.07	0.23	85.5	32.8	28
13	9022	El Guarda	481795.90	2115707.64	57.17	17.77	0.31	115	26.5	42
14	9025	Hacienda La Patera	483390.63	2157576.89	41.69	13.36	0.32	83.3	24	28
15	9026	Morelos 77	491252.07	2141404.91	40.91	13.63	0.33	72.3	16.2	36
16	9028	Gran Canal Km. 3+000	489503.62	2150623.23	43.39	10.46	0.24	67.3	28	25
17	9029	Gran Canal Km. 06+250	490407.88	2153577.17	43.72	12.13	0.28	83.2	24.5	59
18	9030	La Venta Cuajimalpa	468488.32	2137734.34	59.77	17.07	0.29	123	32.5	34
19	9032	Milpa Alta	497697.66	2121917.28	43.38	14.35	0.33	93	26	52
20	9033	Colonia Guerrero	486008.32	2150625.6	48.74	11.62	0.24	75.5	24	27
21	9034	Moyoguarda	489490.83	2128492.8	47.62	24.03	0.51	162.5	24.4	39
22	9036	Playa Caleta 454 Colonia Marte	489731.11	2144570.37	46.83	13.21	0.28	95	26	40
23	9037	Presa Ansaldo	477238.10	2137721.28	48.40	11.94	0.25	77.2	30.5	33



No.	Clave	Nombre	X_UTM	Y_UTM	Media	Desv. Est	Coef. Var.	Máx	Mín	No. años
24	9038	Presa Mixcoac	471991.84	2141424.42	47.84	13.05	0.27	81.5	22	33
25	9039	Presa Tacubaya	477687.96	2144791.45	44.70	12.82	0.29	79.2	27.2	34
26	9041	San Francisco Tlalnepantla	486480.84	2122597.09	55.97	16.50	0.30	95	30	37
27	9043	San Juan De Aragon	491687.65	2152315.09	42.16	11.70	0.28	72	21.4	56
28	9045	Santa Ana Tlacotenco	499705.62	2120622.54	42.08	15.16	0.36	90	21	35
29	9047	Colonia Tacuba	480121.02	2151704.46	48.32	13.07	0.27	89.5	29.5	25
30	9048	Central Tacubaya	479410.74	2145497.59	51.09	21.45	0.42	193.3	26.7	80
31	9050	Lomas De Chapultepec	477251.99	2148786.58	50.59	15.49	0.31	93.5	25.7	20
32	9051	Tlahuac	499621.70	2129906.11	38.77	11.79	0.30	66	20	43
33	9054	General Anaya	482493.62	2141411.25	46.59	11.67	0.25	78	31	33
34	9068	Puente La Llave	494457.21	2148319.44	41.55	21.32	0.51	117	18.8	23
35	9070	Coyoacan I.N.I.F., Coyoc.	481914.33	2139718.83	54.07	17.72	0.33	90.9	29.6	23
36	9071	Colonia Educacion	486113.94	2137778.72	44.73	13.02	0.29	78	27.8	24
37	13008	El Manantial	506659.10	2195071.82	42.38	14.76	0.35	89.9	21.8	40
38	15007	Amecameca De Juarez (DGE)	523955.77	2116400.27	44.11	10.41	0.24	66.5	27.7	27
39	15008	Atenco	509147.56	2161012.9	39.33	14.07	0.36	85.5	22.5	39
40	15013	Calacoaya	474884.62	2159954.77	53.39	18.29	0.34	141.1	30.3	44
41	15017	Coatepec De Los Olivos	516160.39	2143401.75	42.85	15.92	0.37	100.2	24.8	38
42	15018	Colonia Manuel A Camacho	524653.85	2136805.33	48.59	19.04	0.39	107.1	28.2	31
43	15019	Colonia Vicente Guerrero	462802.51	2166770.03	52.25	12.48	0.24	74.6	29.3	32
44	15020	Chalco -San Luca S-	510950.01	2129411.46	39.41	12.56	0.32	80.2	20	44
45	15022	Chiconautla	498196.92	2173492.55	44.99	14.65	0.33	92	26.7	37
46	15024	Presa Danxho, Jilotepec	479067.05	2198534.59	53.20	13.22	0.25	97.5	29.5	66
47	15027	El Salitre	468520.43	2156180.36	47.76	11.52	0.24	91	35	23
48	15029	El Tejocote (Atlacomulco)	510500.35	2150576.8	49.32	13.57	0.28	99	25	48
49	15032	Huehuetoca	477750.18	2194741.54	46.67	16.40	0.35	112.4	25	35
50	15033	Huixquilucan	463158.53	2140820.54	48.96	9.62	0.20	68	32.5	27
51	15039	Juchitepec	512129.01	2110446.78	45.55	22.19	0.49	122.1	24.5	29
52	15040	Km. 2+120 (Bombas),	493708.36	2168292.76	39.00	10.85	0.28	63	24.5	22
53	15041	Gran Canal Km 27+250	497965.10	2162980.33	43.96	12.48	0.28	76.5	23.6	43
54	15042	Gran Canal Km 46+930	489526.33	2189352.65	43.47	13.08	0.30	68	22.5	25
55	15044	La Grande	509030.38	2164575.92	40.64	11.38	0.28	68	20.4	37
56	15045	La Marquesa, Lerma	466737.62	2135851.27	59.65	17.41	0.29	105.5	30	45
57	15047	Las Arboledas	477364.48	2163116.21	57.60	20.81	0.36	113.3	29	29
58	15050	Los Reyes	500871.69	2140418.02	33.96	11.05	0.33	57.4	16	34
59	15053	Magdalena Chichicaspa	466110.95	2147122.08	53.12	12.01	0.23	85.3	33	24



## Capitulo 5. Resultados

No.	Clave	Nombre	X_UTM	Y_UTM	Media	Desv. Est	Coef. Var.	Máx	Mín	No. años
60	15055	Maquixco	517576.57	2187609.88	43.81	9.29	0.21	62.5	25	43
61	15058	Molinito	474987.64	2151035.85	57.98	19.96	0.34	124.3	29	35
62	15059	Molino Blanco	476827.87	2153678.03	54.94	14.41	0.26	89.5	27.5	45
63	15061	Nezahualcoyotl	495212.65	2146836.48	50.43	19.55	0.39	93.3	17.6	33
64	15065	Otumba	525330.69	2178301.88	40.13	17.24	0.43	116	21	34
65	15073	Presa Guadalupe	470410.73	2169821.04	47.80	16.95	0.36	101	24.2	41
66	15074	Presa La Concepción	468380.15	2177758.64	53.39	16.44	0.31	100.7	28	38
67	15075	Presa Las Ruinas	470812.04	2165150.68	49.80	13.63	0.27	76.5	26	33
68	15077	Presa Totolica	470232.70	2150954.54	54.82	16.55	0.30	114.5	36.5	37
69	15081	Represa El Aleman	477027.99	2178785.57	43.69	11.34	0.26	76.5	18.3	36
70	15083	San Andres	509379.04	2159685.16	38.96	11.87	0.31	75	22.5	37
71	15090	San Jeronimo Xonocahuacan	505301.31	2183906.01	47.34	15.84	0.34	95.5	23.7	40
72	15092	San Juan Ixhuatepec	487997.43	2158558.05	40.87	9.16	0.22	69	23.8	27
73	15094	San Luis Ameca	513582.76	2121888.98	42.76	11.33	0.27	72.5	27.8	35
74	15095	San Luis Ayucan	461404.86	2155674.12	58.91	17.29	0.29	99.5	30.9	36
75	15096	San Marcos Jilotzingo	494765.35	2196731.22	45.52	13.39	0.29	70	27.9	25
76	15098	San Martin Obispo	479784.34	2169630.94	45.34	10.24	0.23	73.7	26.4	32
77	15099	San Mateo Acuitlapilco	495401.01	2185289.03	49.52	18.08	0.37	94	30	35
78	15100	San Mateo Tecoloapan	475089.56	2164004.47	46.38	14.89	0.32	80	20	34
79	15101	San Miguel Tlaixpan	519672.35	2158310.3	39.66	15.46	0.39	80	20	38
80	15103	San Pedro Nexapa	527530.19	2110098.21	50.31	23.07	0.46	141.5	25.5	35
81	15106	San Rafael	525407.21	2123837.95	55.57	12.53	0.23	84.5	34.5	33
82	15109	Santa Maria Magdalena Cahuacan	456605.36	2171420.55	55.51	13.73	0.25	96	40.5	22
83	15114	Santiago Tlazala	456584.07	2162634.36	61.53	15.98	0.26	98.5	40	36
84	15115	Santo Tomas Puente Colgante	482516.66	2186558.54	39.92	9.27	0.23	65.1	23.3	46
85	15124	Tepexpan	508210.50	2168481.65	39.97	15.59	0.39	82.8	14.8	33
86	15125	Texcoco (DGE)	512392.00	2156776.78	38.80	15.14	0.39	88.9	16.9	40
87	15127	Totolica San Bartolo	474223.31	2152364.78	51.23	13.41	0.26	100	34.2	39
88	15129	Tultepec	486720.28	2176540.44	46.03	14.28	0.31	92.4	22.3	48
89	15145	Plan Lago De Texcoco	507169.00	2150687.99	42.72	18.57	0.44	123.6	23	28
90	15156	San Miguel Jagñeyes	470596.42	2193335.55	45.73	17.55	0.38	112.5	29	25
91	15167	El Tejocote	510202.90	2149881.68	37.34	11.58	0.31	67.3	20	36
92	15170	Chapingo (DGE)	511921.35	2154463.79	39.56	13.78	0.35	84.5	18.2	55
93	15210	San Juan Totolapan,	528672.64	2159462.14	45.41	23.89	0.53	129.5	19.5	30
94	15231	Presa Iturbide	451299.17	2159472.03	58.71	16.40	0.28	108	30.5	29
95	15274	Nopala, Neuypoxtla	500003.82	2202210.6	40.61	12.17	0.30	65	21.4	20

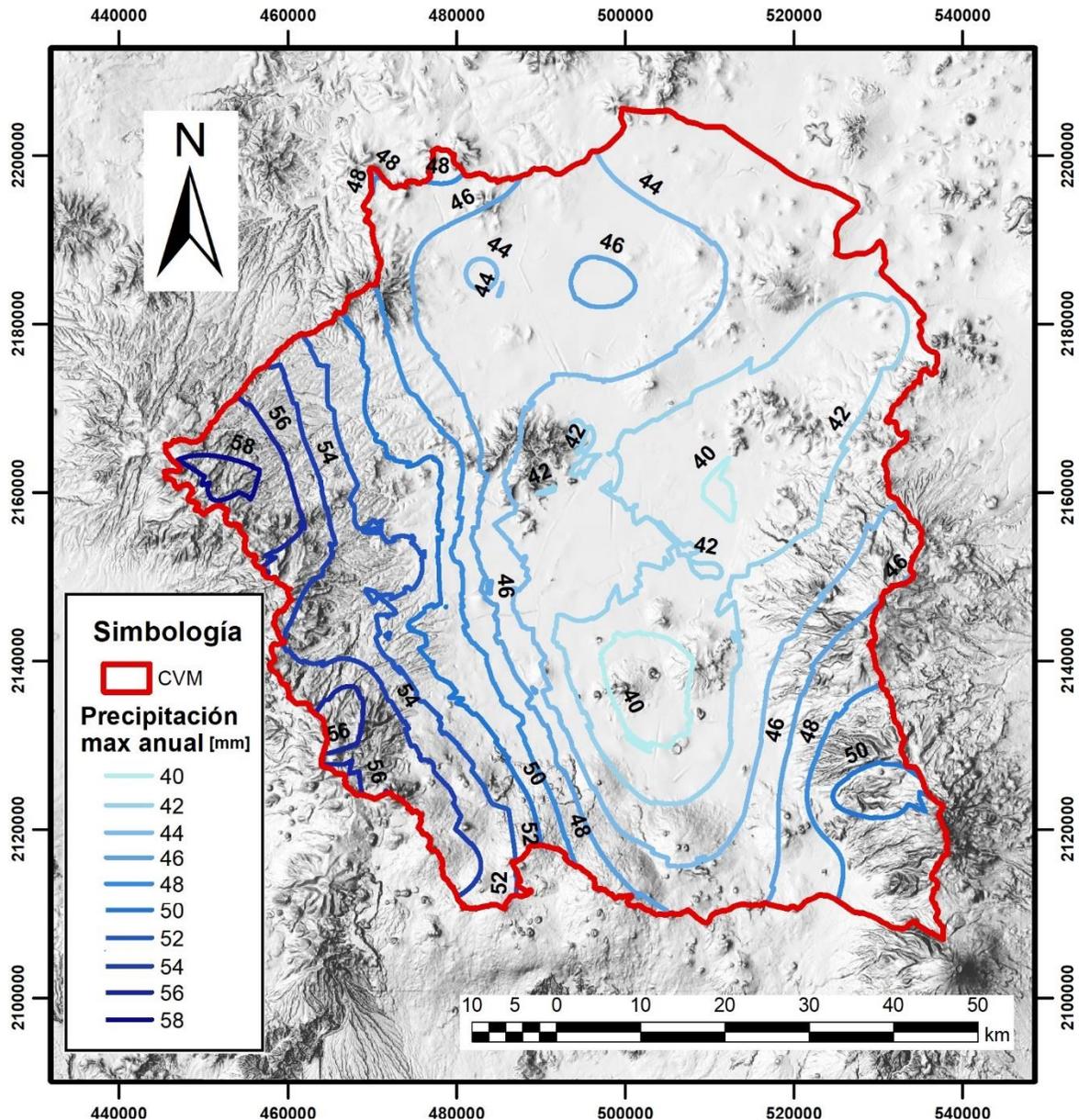


Figura 5.1 Isoyetas de la media de las precipitaciones diarias máximas anuales. Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 5.1 la precipitación media más alta ocurre en las zonas altas de la cuenca mientras que las zonas bajas cuentan con la precipitación media menor; como se esperaba la zona que se encuentra mejor definida es la sur oeste que es donde se cuenta con un mayor número de estaciones pluviométricas.

## a.2 Obtención de factores regionales asociados a distintos periodos de retorno.

Al registro estaciones año obtenido en la sección 4.1 y con el procedimiento mencionado se ajustaron las diferentes funciones de distribución de probabilidad, implementando los ajustes Gumbel, doble Gumbel y la función GVE. Los periodos de retorno ( $Tr$ ) se estimaron con la Ec. 2.6 y la variable  $Z$  con la Ec. 4.1.

Una vez realizados los ajustes de probabilidad, los valores obtenidos para diferentes periodos de retorno fueron representados gráficamente como se muestra en las Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4.

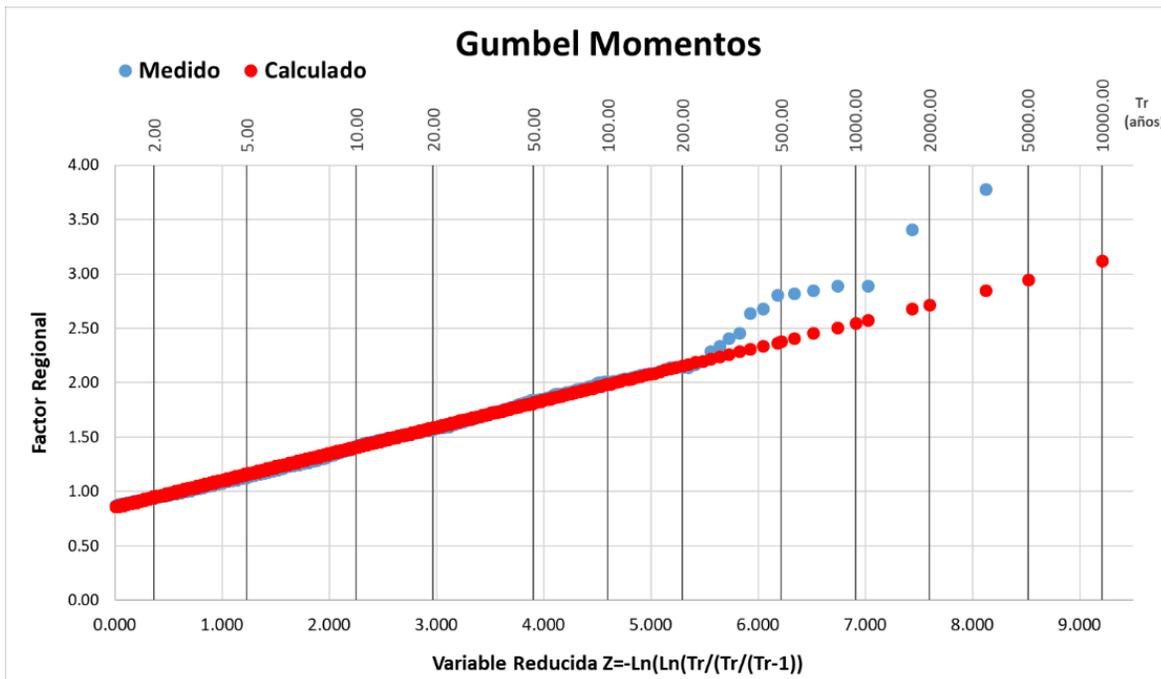


Figura 5.2 Función Gumbel. Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 5.2 la función Gumbel (puntos rojos) se adapta a los datos medidos de buena manera hasta un  $Tr$  de 200 años, posteriormente estos se separan en lo que se comporta como una segunda población saliendo por completo de la función, especialmente en el punto cercano a  $Tr$  2000.

En el caso de la función Doble Gumbel (Figura 5.3) los datos calculados se ajustan bien hasta el  $Tr$  de 50 años diferenciándose ligeramente hasta un  $Tr$  de 400 años, sin embargo, los valores asociados a  $Tr$  superiores de 400 años se ajustan de mejor manera que la función Gumbel. El punto cercano a  $Tr$  2000 continúa saliendo de los valores calculados.

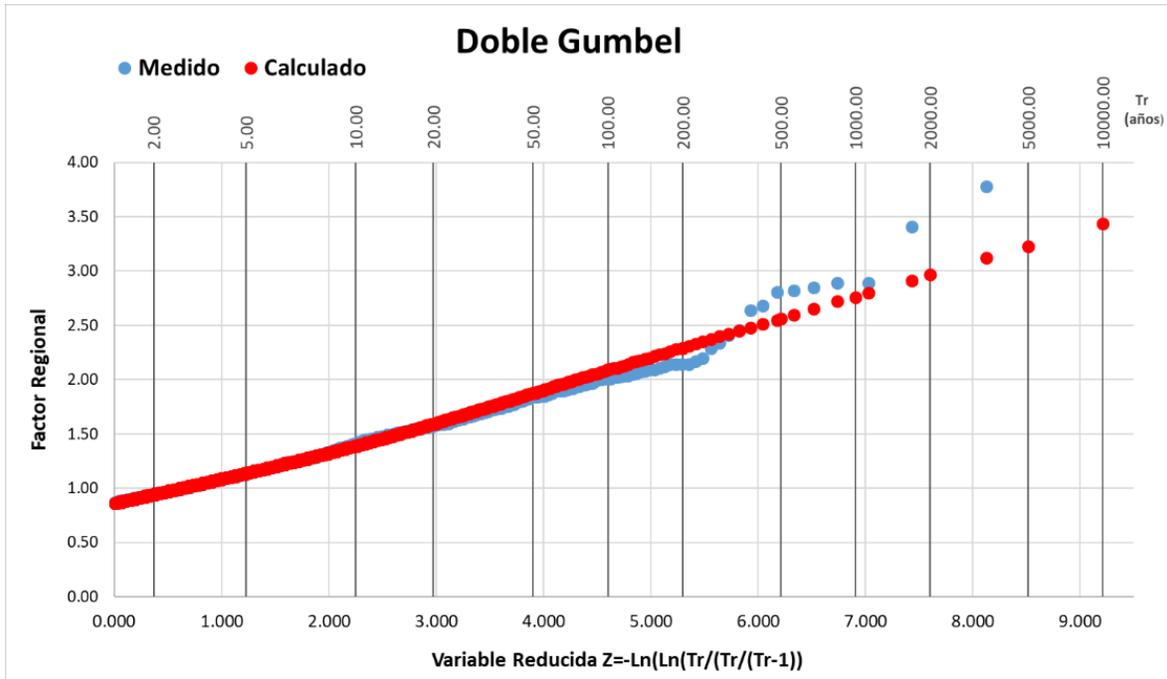


Figura 5.3 Función Doble Gumbel. Elaboración propia.

Para la función GVE (Figura 5.4) los valores calculados comienzan a diferenciarse de los medidos a partir de Tr 50 años, a diferencia de la función doble Gumbel esta función no logra ajustarse a los valores medidos en Tr mayores a 50 años y, sobre todo para Tr mayor que 200 años.

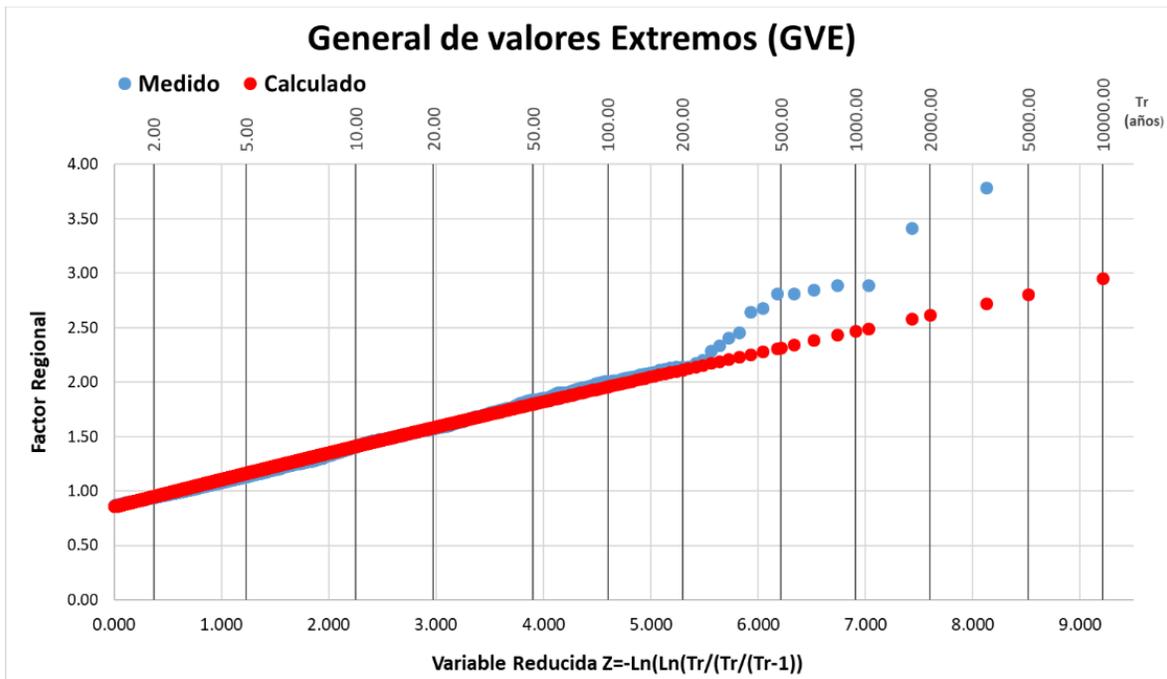


Figura 5.4 Función GVE. Elaboración propia



Se puede observar que en las figuras correspondientes a los ajustes Gumbel y GVE los valores calculados quedan por debajo de los registros medidos en periodos de retorno superiores a los 200 años, mientras que el ajuste Doble Gumbel mantiene una mejor relación entre los valores medidos y calculados hasta un periodo de retorno de hasta 1000 años

Estos valores fueron comparados con los obtenidos anteriormente en el estudio del CENAPRED realizado en 2017 para la CDMX y el Edo. Mex. Mismos que se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Factores Regionales

Tr	CDMX	EDO. MEX	CVM		
	GUMBEL 2017		GVE	GUMBEL	DOBLE CUMBEL
2	0.950	0.950	0.952	0.950	0.940
5	1.220	1.220	1.233	1.230	1.200
10	1.400	1.400	1.414	1.410	1.390
20	1.570	1.570	1.585	1.590	1.590
50	1.790	1.790	1.800	1.820	1.880
100	1.950	1.950	1.961	1.990	2.090
200	2.120	2.120	2.117	2.160	2.290
500	2.340	2.330	2.319	2.380	2.560
1000	2.500	2.500	2.468	2.550	2.760
2000	2.660	2.660	2.615	2.720	2.970
5000	2.880	2.880	2.809	2.950	3.230
10000	3.050	3.040	2.955	3.120	3.440

Si bien los valores obtenidos, son similares a los obtenidos por el estudio de 2017 en el cual la función que mejor se ajustó fue la Gumbel tanto para la CDMX como para el EDO.MEX, en el caso de la CVM la función que mejor se ajusta a los datos medidos es la Doble Gumbel, la cual es capaz de ajustarse de mejor manera a la segunda población de datos, puesto que la función doble Gumbel se encuentra asociada a zonas afectadas por eventos extremos que suelen comportarse como lo encontrado en la CVM. Aun cuando la CVM no suele ser afectada en gran medida por los efectos de tormentas tropicales o huracanes debido a su ubicación, dentro de la cuenca llegan a ocurrir eventos que dan lugar a mediciones como las obtenidas (2009 y 2011) para Tr superiores a los 200 años.

Utilizando los factores regionales obtenidos en la última columna (doble GUMBEL) de la Tabla 5.2 se puede obtener la precipitación diaria de diseño en cualquier punto de la cuenca del valle de México, únicamente multiplicando el promedio de precipitaciones máximas anuales del lugar en cuestión (Figura 5.1) por dichos factores.



### 5.2. Factores de reducción por área (FRA) actualizados.

A continuación, se presentan los valores promedio de FRA (Tabla 5.3) obtenidos según el procedimiento descrito en el capítulo 4.2, los cuales fueron representado gráficamente como FRA Vs área (Figura 5.5) y se obtuvo la ecuación de la función que las relaciona (Ec. 5.1).

Tabla 5.3 Valores medidos de FRA promedios

Área	FRA (MEDIDO)
25	0.84
50	0.82
75	0.79
100	0.78
150	0.75
200	0.73
350	0.69
500	0.67
750	0.64
1000	0.64
1500	0.56
2000	0.55
2500	0.53
3000	0.53
3500	0.52
4000	0.51
4500	0.52
5000	0.51
5500	0.51
6000	0.51
6200	0.49

### FRA PARA LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

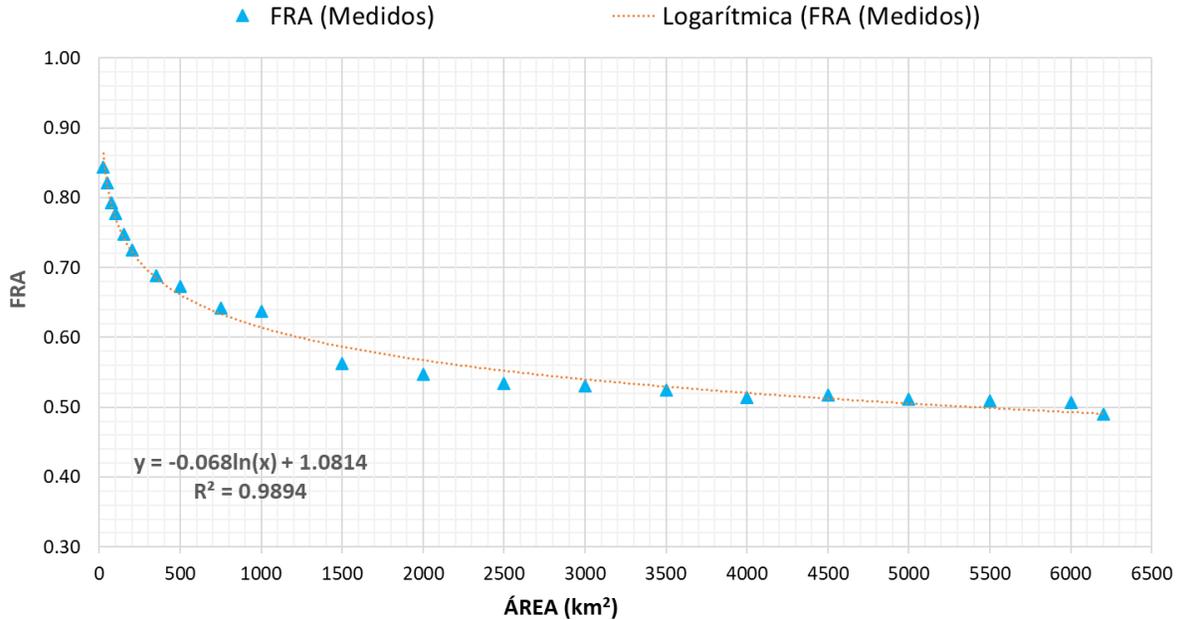


Figura 5.5 Ecuación del FRA medido. Elaboración propia.

$$FRA_{med} = -0.068\ln(A) + 1.0814 \qquad \text{Ec. 5.1}$$

Donde

$FRA_{med}$ : Factor de reducción por área estimado. ecuación resultante de ajuste a los FRA medidos

A: área

A estos valores se les aplicó un ajuste logarítmico para obtener la línea de tendencia y así obtener una ecuación capaz de definir el FRA en cualquier parte de la cuenca. Con la Ec. 5.1 se calculó el FRA para áreas menores a 25 km<sup>2</sup> los cuales fueron agregados a los medios (Tabla 5.4); puesto que no es posible considerar un área de 0 km<sup>2</sup> se propuso un área de manera arbitraria que fuera la más cercana a 0.0 (A=0.01), con un valor de FRA cercano a 1 (0.99), los cuales fueron graficados y ajustados (Figura 5.6y Ec. 5.2).

Tabla 5.4 FRA calculados.

Área	FRA (Calculados)
0.01	0.99
5	0.97*
10	0.92*
15	0.90*
20	0.88*
25	0.84
50	0.82
75	0.79



Área	FRA (Calculados)
100	0.78
150	0.75
200	0.73
350	0.69
500	0.67
750	0.64
1000	0.64
1500	0.56
2000	0.55
2500	0.53
3000	0.53
3500	0.52
4000	0.51
4500	0.52
5000	0.51
5500	0.51
6000	0.51
6200	0.49

\* Valores calculados con la Ec. 5.2.1

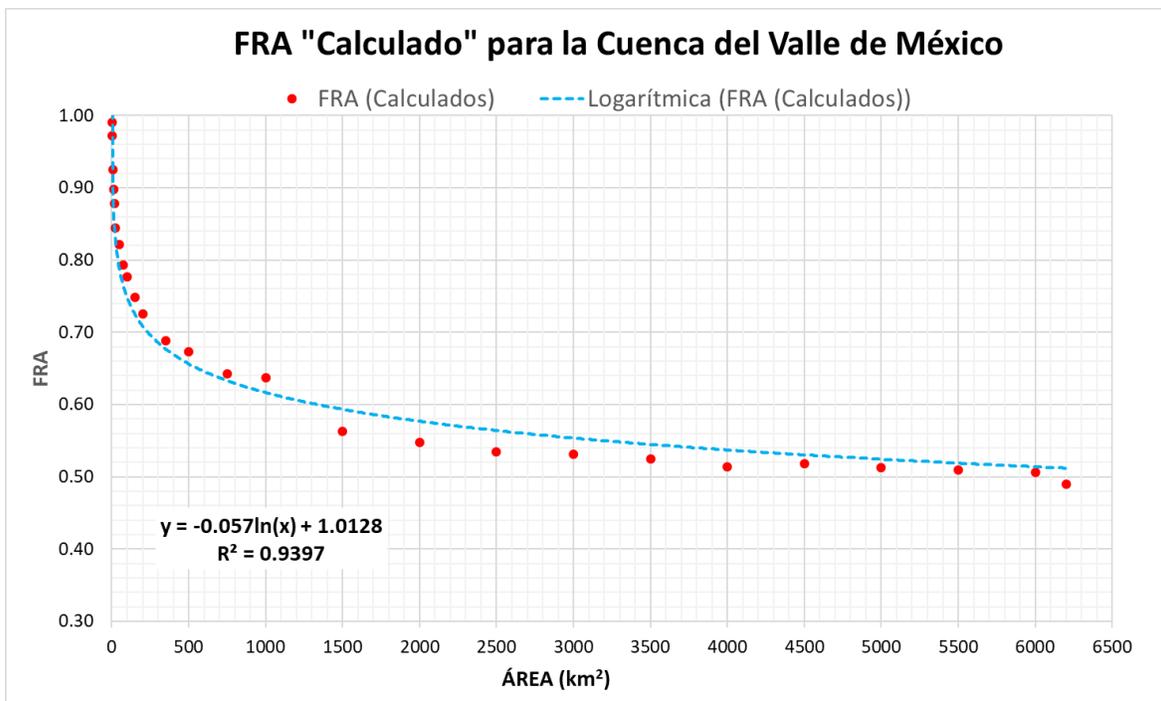


Figura 5.6 Ajuste logarítmico FRA. Ecuación FRA calculado. Elaboración propia.

$$FRA_{cat} = -0.057\ln(A) + 1.0128 \quad \text{Ec. 5.2}$$

Donde:

FRA<sub>cal</sub>: ecuación resultada de ajuste a los FRA calculados y medidos

A: área



Como se puede observar en la Figura 5.6, al considerar áreas más pequeñas (Tabla 5.4) la curva de ajuste y la ecuación de la recta cambia ligeramente, esto debido a que además de agregar nuevos valores calculados, el ajuste fue forzado a graficar con un área de 0.01 km<sup>2</sup> y un FRA de 0.99 al considerar que no es posible iniciar con un área = 0. Se decidió utilizar este último ajuste y la Ec. 5.2 para la obtención del FRA debido a que este es resultado de utilizar áreas más pequeñas.

Por otro lado, para encontrar la relación entre el FRA con el Tr se utilizaron los máximos anuales, mismos que fueron ordenados de mayor a menor y se les asignó un periodo de retorno con la Ec. 2.6, con el periodo de retorno se calculó la variable Z (Ec. 4.1). Al graficar el FRA vs la variable Z se pudo observar que el factor de reducción por área se ajusta mejor a áreas pequeñas sin importar el periodo de retorno y varía en áreas muy grandes (Figura 5.7 y Figura 5.8)

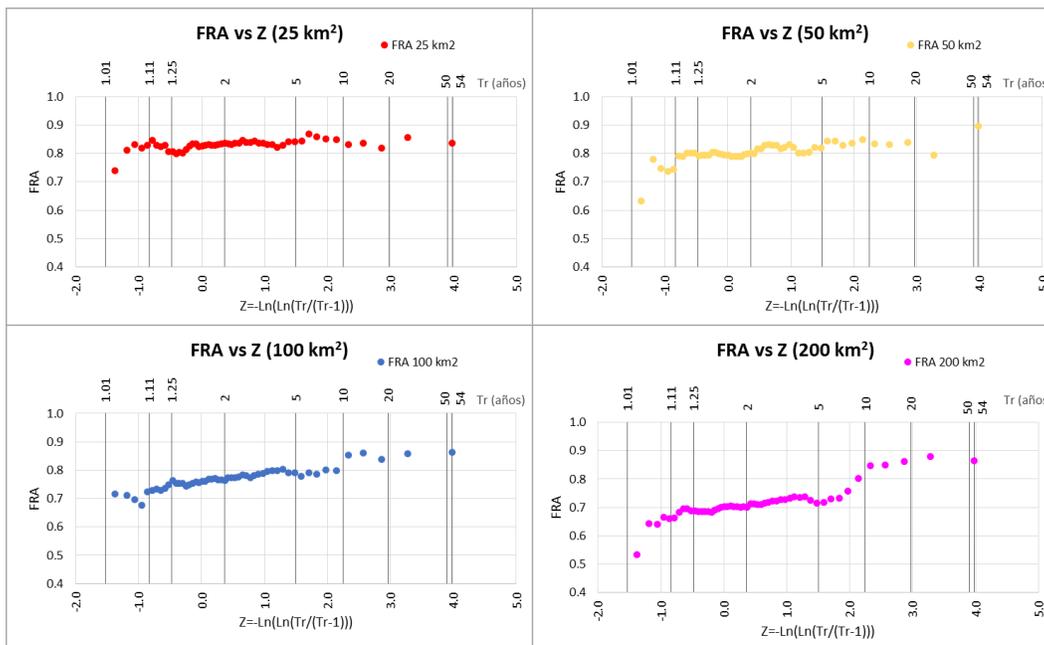


Figura 5.7 FRA vs Tr. Áreas menores a 200 km<sup>2</sup>. Elaboración propia

En la Figura 5.7 se observa que para el área de 25 km<sup>2</sup> el FRA se mantiene estable entre 0.8 y 0.9 sin importar el periodo de retorno, para 50 km<sup>2</sup> el FRA comienza a presentar pequeñas variaciones en periodos de retorno menores a 1.1 años y mayores a 5 años, es a partir de 100 km<sup>2</sup> que el FRA tiene cambios muy abruptos en Tr mayores a 2 años.

Como se puede observar en la Figura 5.8 para áreas mayores a 100 km<sup>2</sup> el FRA comienza a variar mucho por lo que puede decir que el FRA no se mantiene constante cuando el área de estudio crece.

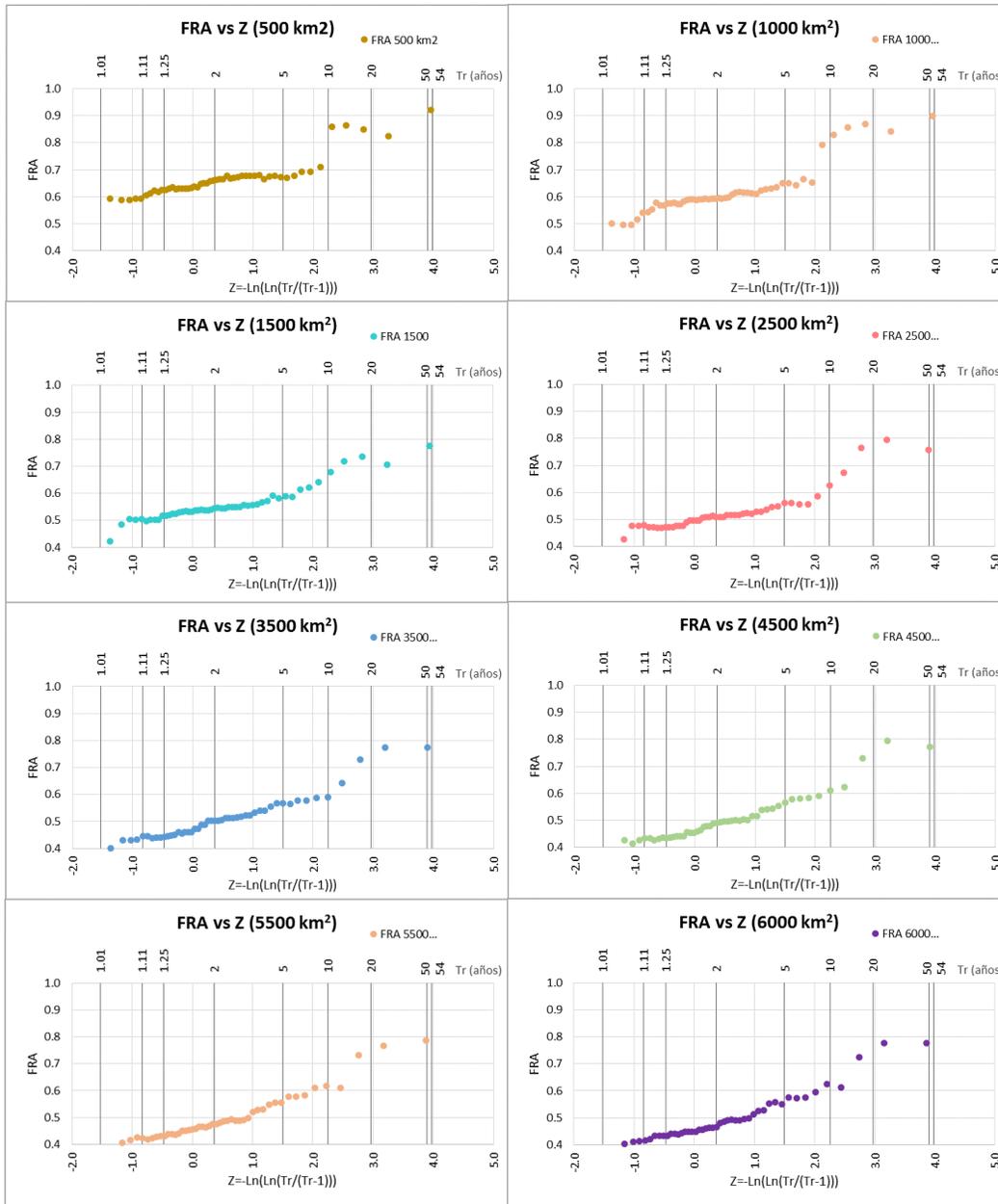


Figura 5.8 FRA vs Tr. áreas mayores a 500 km2. Elaboración propia

Por lo antes mencionado se considera que la Ec. 5.2 para la obtención de FRA es válida únicamente en áreas menores a 25 km<sup>2</sup> y periodos de retorno menores a 100 años. Para áreas mayores se realizó otro procedimiento el cual se describe a continuación.

$$FRA_{cal} = -0.057Ln(A) + 1.0128 \tag{Ec. 5.3}$$

Donde:

FRAcal: ecuación resultada de ajuste a los FRA calculados y medidos

A: área

Para áreas < 25 km<sup>2</sup> y cualquier periodo de retorno



### 5.2.1. FRA para áreas mayores a 25 km<sup>2</sup>

Para encontrar una ecuación que se ajuste a áreas mayores se hizo el siguiente procedimiento: a cada serie por área de máximos anuales simultáneos y no simultáneos se les ajustó tres diferentes funciones de distribución de probabilidad: Gumbel ( Figura 5.9), doble Gumbel (Figura 5.10) y GVE (Figura 5.11).

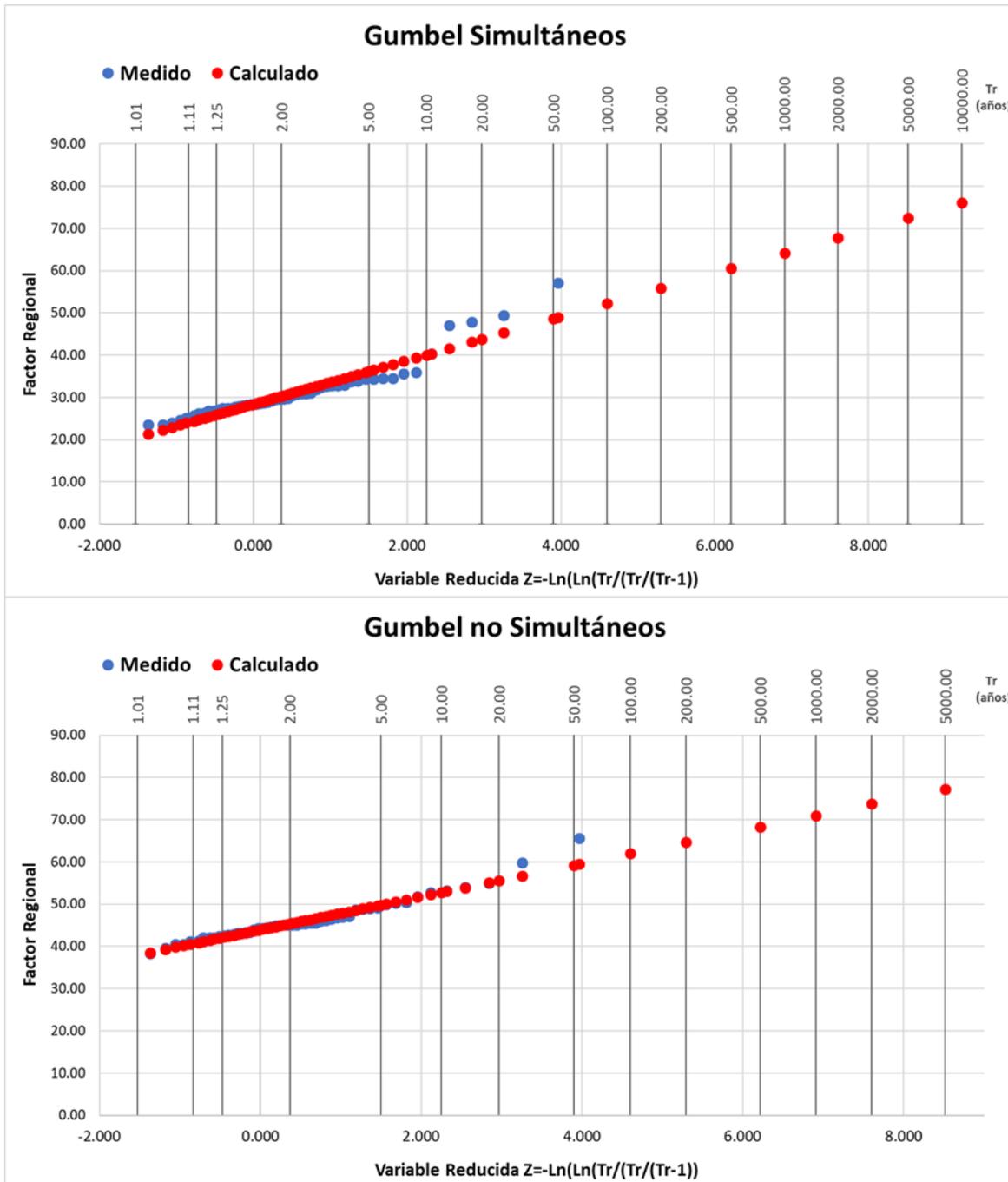


Figura 5.9 Ajuste Gumbel para máximos simultáneos y no simultáneos. Área de 350 km<sup>2</sup>.  
Elaboración propia.

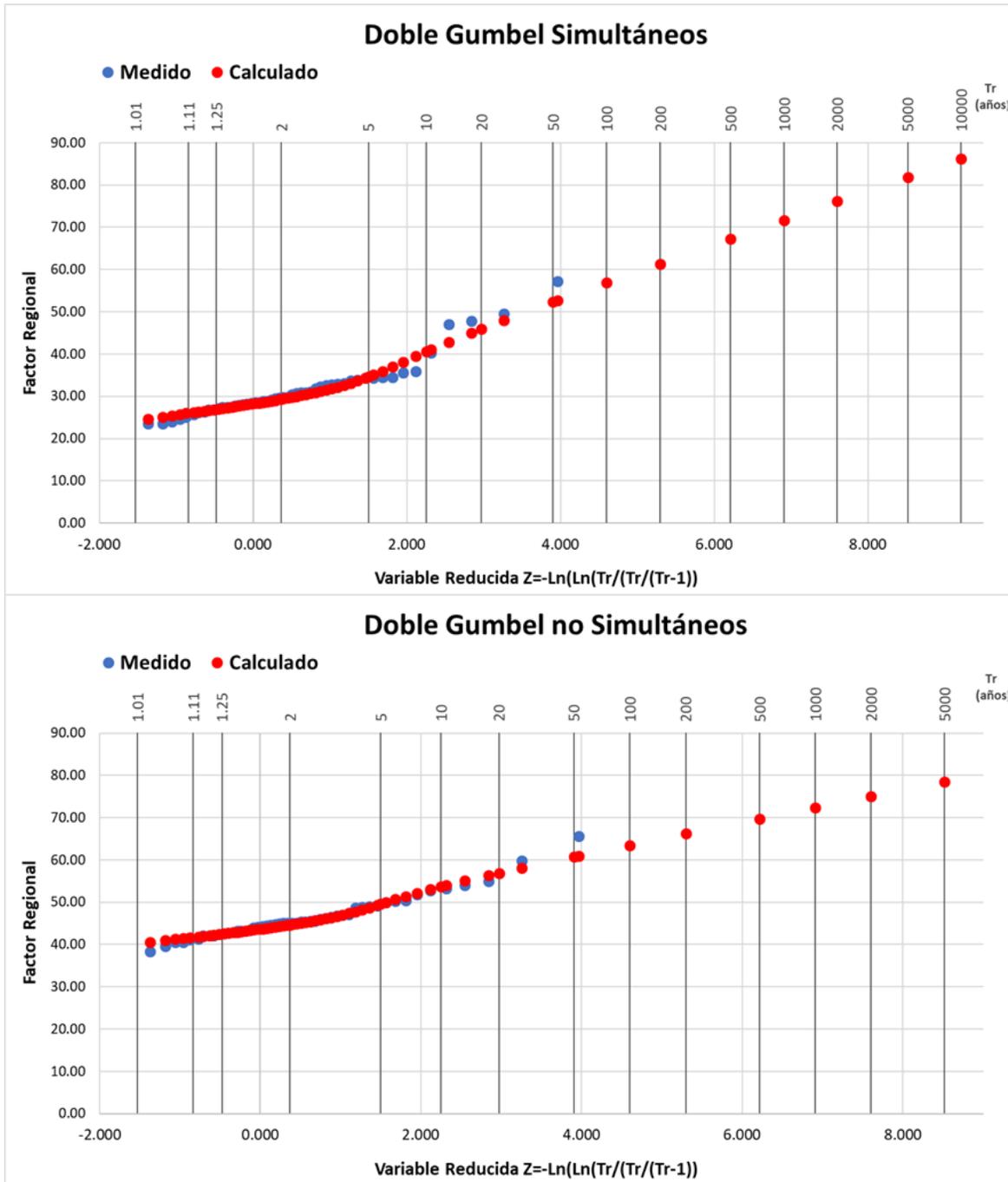


Figura 5.10 Ajuste Doble Gumbel para máximos simultáneos y no simultáneos. Área de 350 km<sup>2</sup>.  
Elaboración propia.

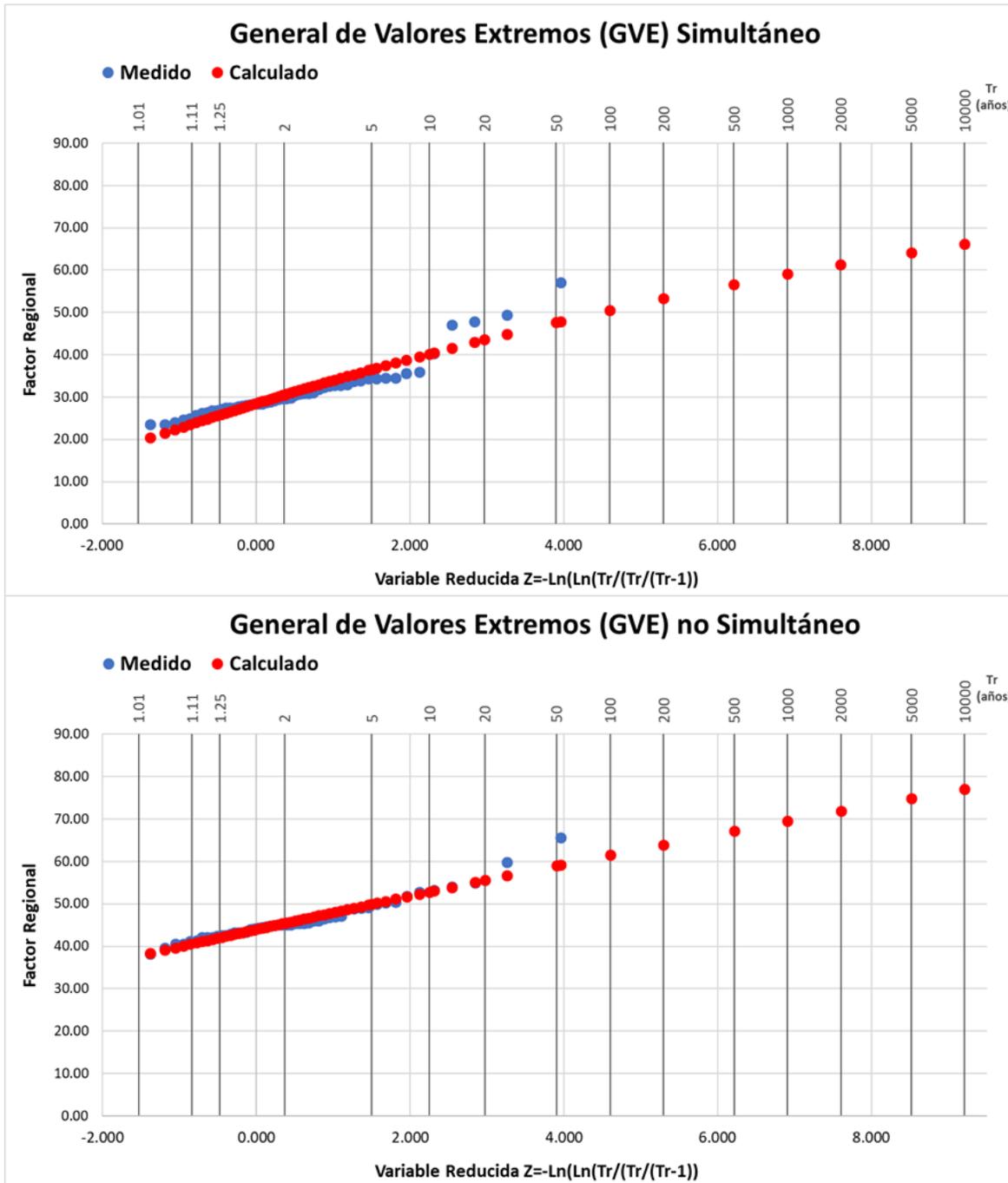


Figura 5.11 Ajuste GVE para máximos simultáneos y no simultáneos. Área de 350 km<sup>2</sup>.  
Elaboración propia

Como resultado de aplicar las diferentes funciones de distribución de probabilidad se obtuvieron máximos simultáneos y no simultáneos extrapolados asociados a diferentes periodos de retorno, con dichos máximos se calculó el FRA con la Ec. 4.2



(Figura 5.12) esto se realizó para cada área con cada una de las funciones de distribución.

Extrapolados		Extrapolados		FRA
Gumbel		Gumbel		
Tr (años)	SIMULTANEOS	Tr (años)	NO SIMULTANEOS	
2	30.33	2	45.400	0.668
5	36.19	5	49.840	0.726
10	40.07	10	52.770	0.759
20	43.78	20	55.590	0.788
50	48.6	50	59.230	0.821
100	52.21	100	61.97	0.843
200	55.8	200	64.69	0.863
500	60.54	500	68.28	0.887
1000	64.13	1000	70.99	0.903
2000	67.71	2000	73.710	0.919
5000	72.45	5000	77.29	0.937
10000	76.03	10000	80	0.950

Figura 5.12 Periodos de retorno, máximos simultáneos y no simultáneos extrapolados utilizando el ajuste Gumbel. Area 350 m<sup>2</sup>

**b. Obtención de curvas FRA-A-TR que relacionen el factor de reducción por área en función del área para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años dentro de la Cueca del Valle de México.**

En las Tabla 5.5, Tabla 5.6 y Tabla 5.7 se presentan los FRA obtenidos para diferentes periodos de retorno y áreas mayores a 25 km<sup>2</sup>, cabe recordar que los FRA de la columna “medidos” son los valores obtenidos en la Tabla 5.3.

Tabla 5.5 Ajuste Gumbel. FRA para diferentes periodos de retorno

Área	Medido	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500	Tr 1000
25	0.844	0.829	0.838	0.842	0.846	0.851	0.853	0.856	0.859	0.862
50	0.821	0.803	0.826	0.838	0.848	0.860	0.867	0.874	0.882	0.888
75	0.793	0.780	0.815	0.835	0.852	0.873	0.887	0.899	0.915	0.925
100	0.777	0.769	0.801	0.820	0.836	0.855	0.868	0.880	0.895	0.905
150	0.748	0.734	0.772	0.795	0.814	0.837	0.852	0.866	0.884	0.896
200	0.725	0.713	0.763	0.793	0.818	0.847	0.867	0.885	0.907	0.923
350	0.688	0.668	0.726	0.759	0.788	0.821	0.843	0.863	0.887	0.903
500	0.673	0.662	0.730	0.769	0.802	0.841	0.868	0.892	0.920	0.941
750	0.642	0.623	0.701	0.745	0.784	0.829	0.859	0.887	0.921	0.944
1000	0.637	0.614	0.702	0.750	0.791	0.836	0.866	0.893	0.924	0.945
1500	0.562	0.553	0.614	0.650	0.681	0.717	0.741	0.763	0.791	0.809
2000	0.547	0.535	0.609	0.652	0.689	0.732	0.762	0.788	0.820	0.842
2500	0.534	0.518	0.590	0.632	0.669	0.712	0.742	0.769	0.803	0.826
3000	0.531	0.513	0.584	0.625	0.662	0.704	0.732	0.759	0.791	0.813
3500	0.525	0.505	0.581	0.625	0.664	0.710	0.741	0.770	0.804	0.829
4000	0.514	0.496	0.576	0.623	0.664	0.712	0.746	0.776	0.814	0.840
4500	0.518	0.496	0.578	0.626	0.668	0.717	0.751	0.783	0.821	0.847
5000	0.512	0.492	0.575	0.625	0.668	0.719	0.754	0.786	0.825	0.853



Área	Medido	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500	Tr 1000
5500	0.509	0.490	0.575	0.624	0.668	0.720	0.755	0.788	0.828	0.856
6000	0.506	0.489	0.574	0.624	0.668	0.720	0.756	0.789	0.829	0.857

Tabla 5.6 Ajuste Doble Gumbel. FRA para diferentes periodos de retorno.

Área	FRA (Medido)	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500	Tr 1000
25	0.84	0.829	0.848	0.846	0.842	0.838	0.836	0.833	0.830	0.828
50	0.82	0.801	0.833	0.841	0.847	0.854	0.858	0.862	0.867	0.870
75	0.79	0.774	0.811	0.839	0.861	0.885	0.901	0.916	0.935	0.948
100	0.78	0.765	0.798	0.823	0.842	0.864	0.879	0.894	0.911	0.924
150	0.75	0.727	0.765	0.800	0.827	0.858	0.879	0.898	0.922	0.939
200	0.73	0.703	0.748	0.799	0.838	0.882	0.911	0.939	0.973	0.997
350	0.69	0.657	0.697	0.756	0.807	0.861	0.896	0.927	0.964	0.990
500	0.67	0.648	0.692	0.767	0.829	0.893	0.934	0.971	1.015	1.045
750	0.64	0.607	0.679	0.753	0.808	0.867	0.905	0.941	0.984	1.015
1000	0.64	0.592	0.659	0.760	0.824	0.884	0.920	0.952	0.989	1.014
1500	0.56	0.537	0.594	0.660	0.702	0.747	0.776	0.803	0.836	0.859
2000	0.55	0.516	0.573	0.663	0.723	0.784	0.824	0.861	0.906	0.938
2500	0.53	0.503	0.558	0.641	0.703	0.769	0.814	0.855	0.905	0.941
3000	0.53	0.500	0.566	0.637	0.690	0.747	0.785	0.820	0.863	0.893
3500	0.52	0.491	0.562	0.637	0.694	0.756	0.797	0.835	0.882	0.916
4000	0.51	0.480	0.551	0.635	0.696	0.763	0.808	0.850	0.902	0.938
4500	0.52	0.480	0.562	0.642	0.699	0.760	0.800	0.837	0.883	0.915
5000	0.51	0.475	0.560	0.641	0.697	0.757	0.797	0.833	0.879	0.911
5500	0.51	0.473	0.560	0.642	0.698	0.758	0.797	0.834	0.878	0.909
6000	0.51	0.471	0.558	0.639	0.696	0.756	0.797	0.834	0.879	0.912

Tabla 5.7 Ajuste GVE. FRA para diferentes periodos de retorno

Área	FRA (Medido)	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500	Tr 1000
25	0.844	0.833	0.841	0.843	0.843	0.841	0.839	0.836	0.831	0.827
50	0.821	0.807	0.830	0.839	0.846	0.851	0.854	0.855	0.855	0.855
75	0.793	0.778	0.814	0.835	0.853	0.875	0.890	0.904	0.922	0.934
100	0.777	0.770	0.802	0.820	0.836	0.854	0.866	0.877	0.890	0.899
150	0.748	0.731	0.770	0.795	0.818	0.847	0.868	0.889	0.915	0.934
200	0.725	0.711	0.762	0.792	0.820	0.854	0.879	0.902	0.932	0.954
350	0.688	0.671	0.732	0.762	0.785	0.808	0.822	0.832	0.843	0.849
500	0.673	0.666	0.737	0.772	0.799	0.826	0.842	0.855	0.867	0.874
750	0.642	0.620	0.701	0.745	0.784	0.829	0.859	0.887	0.921	0.945
1000	0.637	0.621	0.712	0.753	0.784	0.815	0.832	0.846	0.860	0.868
1500	0.562	0.551	0.616	0.651	0.680	0.713	0.734	0.753	0.776	0.791
2000	0.547	0.538	0.614	0.654	0.687	0.723	0.745	0.764	0.785	0.798
2500	0.534	0.513	0.594	0.634	0.667	0.703	0.727	0.748	0.771	0.787
3000	0.531	0.509	0.587	0.627	0.661	0.699	0.723	0.746	0.772	0.789
3500	0.525	0.498	0.583	0.626	0.664	0.707	0.736	0.763	0.796	0.818
4000	0.514	0.487	0.579	0.624	0.663	0.708	0.737	0.764	0.796	0.818
4500	0.518	0.489	0.581	0.627	0.667	0.712	0.742	0.769	0.801	0.823
5000	0.512	0.482	0.578	0.626	0.667	0.714	0.745	0.774	0.808	0.831



Área	FRA (Medido)	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 20	Tr 50	Tr 100	Tr 200	Tr 500	Tr 1000
5500	0.509	0.480	0.577	0.626	0.667	0.715	0.746	0.775	0.809	0.832
6000	0.506	0.476	0.577	0.625	0.667	0.715	0.748	0.777	0.812	0.836

Con los valores prestados en las tablas anteriores se elaboraron curvas FRA-A-TR (Figura 5.13, Figura 5.14 y Figura 5.15) observando que el factor de reducción por área disminuye al aumentar el área, pero crece en función del periodo de retorno para una misma área de estudio.

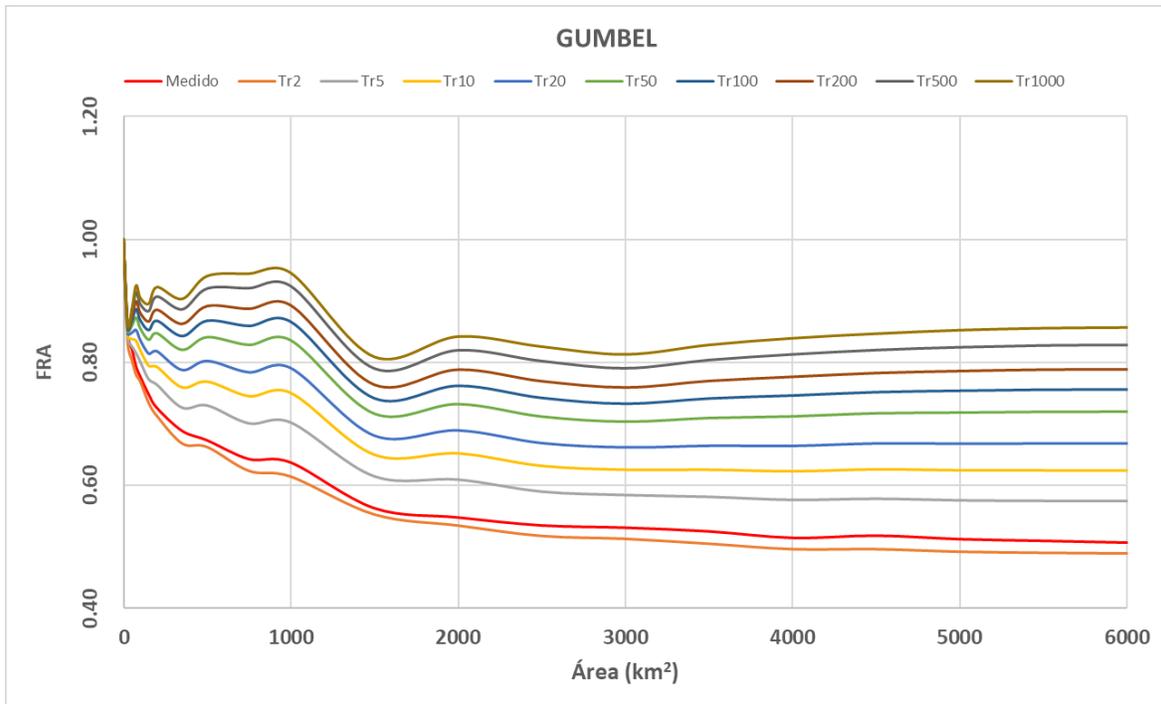


Figura 5.13 Grafica FRA-A-Tr. Gumbel. Elaboración propia

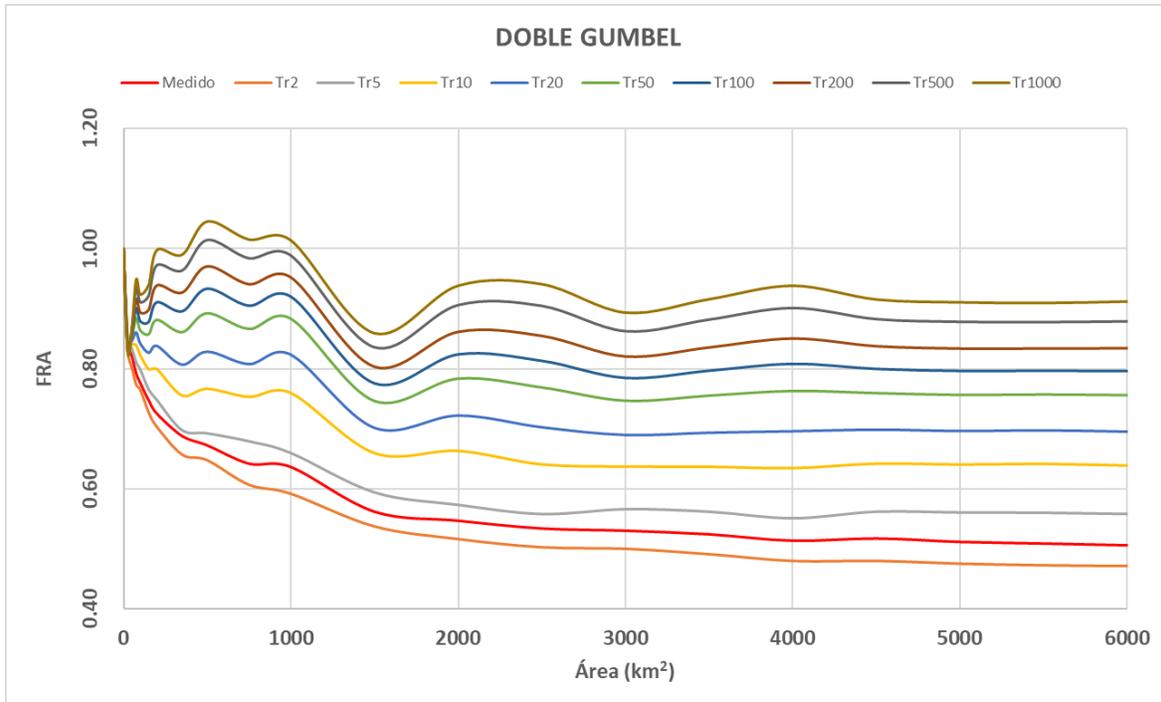


Figura 5.14 Grafica FRA-A-Tr. Doble Gumbel. Elaboración propia.

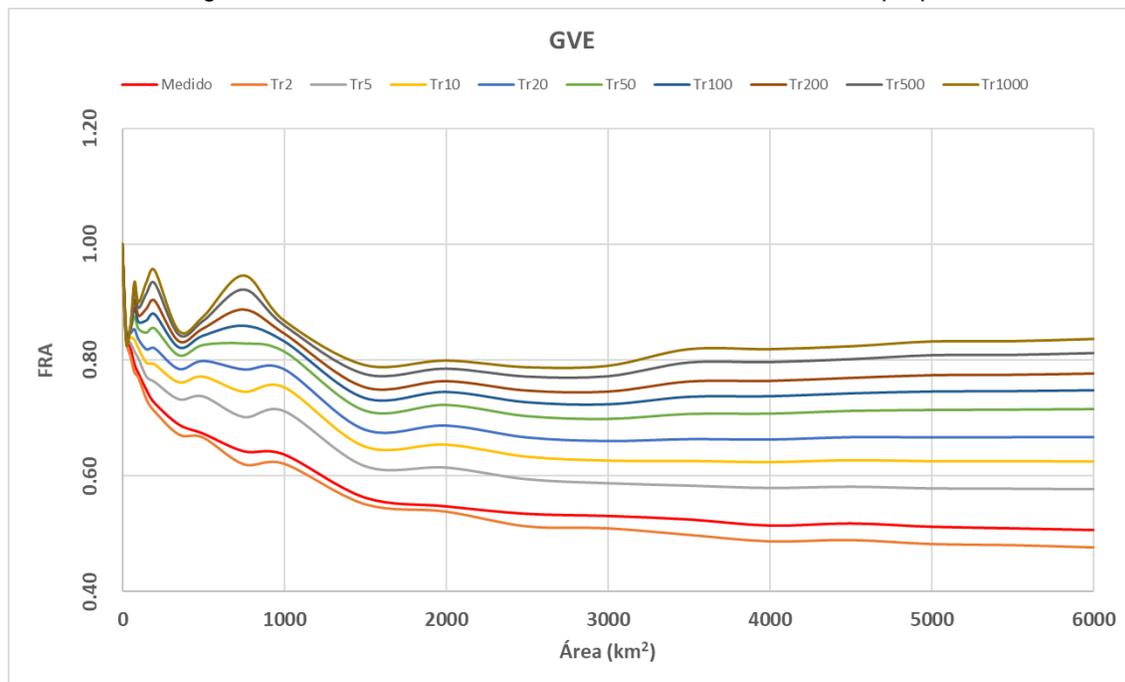


Figura 5.15 Grafica FRA-A-Tr. GVE. Elaboración propia.

Cabe destacar que tanto en el ajuste Gumbel (Figura 5.13) como en el GVE (Figura 5.15) el FRA se mantiene por debajo de 1 mientras que el para la doble Gumbel (Figura 5.14) el FRA es mayor a 1 en periodos de retorno mayores a 500 años y áreas menores a 1000 km<sup>2</sup>. En los tres ajustes el factor de reducción por áreas es muy variable para áreas menores a 1000 km<sup>2</sup> y se estabiliza al sobrepasar áreas de 2000



km<sup>2</sup>. Por el comportamiento de las curvas se optó por tomar el ajuste Gumbel puesto que mantiene un comportamiento más parecido a los datos medidos.

**c. Ecuación general que describe el comportamiento del factor de reducción por área para cualquier periodo de retorno deseado en la Cuenca del Valle de México**

Para encontrar una adecuación que diera como resultado un FRA para cualquier área se optó por encontrar líneas de tendencia para cada periodo de retorno (Figura 5.16) obteniendo así para cada línea una ecuación (Tabla 5.8)

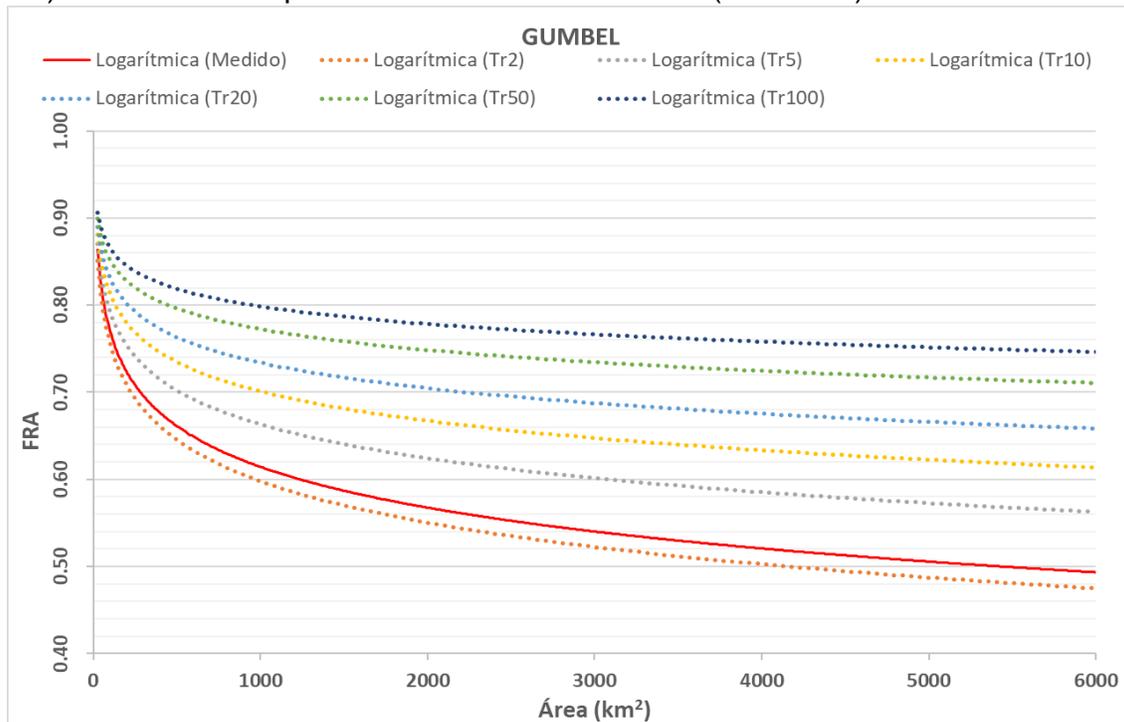


Figura 5.16 Factores de reducción por área ajustados a la función Gumbel, líneas de tendencia para cada periodo de retorno. Elaboración propia.

Tabla 5.8 Ecuaciones logarítmicas para el FRA en diferentes periodos de retorno (Tr).

Tr (años)	Ecuación	R <sup>2</sup>
100	$y = -0.029 \ln(x) + 0.9996$	0.7256
50	$y = -0.034 \ln(x) + 1.0105$	0.8135
20	$y = -0.042 \ln(x) + 1.0255$	0.8958
10	$y = -0.049 \ln(x) + 1.0378$	0.9383
5	$y = -0.056 \ln(x) + 1.0511$	0.9677
Medido	$y = -0.068 \ln(x) + 1.0812$	0.9887
2	$y = -0.069 \ln(x) + 1.0719$	0.9905

Como se puede ver en la Tabla 5.8 la ecuación que mejor se ajusta a la línea de tendencia de los datos medidos es la perteneciente a un Tr de 2 años y conforme el

periodo de retorno crece la relación disminuye. La información de las ecuaciones obtenidas se ordenó en la Tabla 5.9, las variables m y b fueron graficadas versus el periodo de retorno de 2 a 100 años como se observa en la Figura 5.17

Tabla 5.9 Variables m y b de las ecuaciones obtenidas para la función Gumbel

Tr (años)	m	b	R <sup>2</sup>
100	-0.029	0.9996	0.7256
50	-0.034	1.0105	0.8135
20	-0.042	1.0255	0.8958
10	-0.049	1.0378	0.9383
5	-0.056	1.0511	0.9677
2	-0.069	1.0719	0.9905

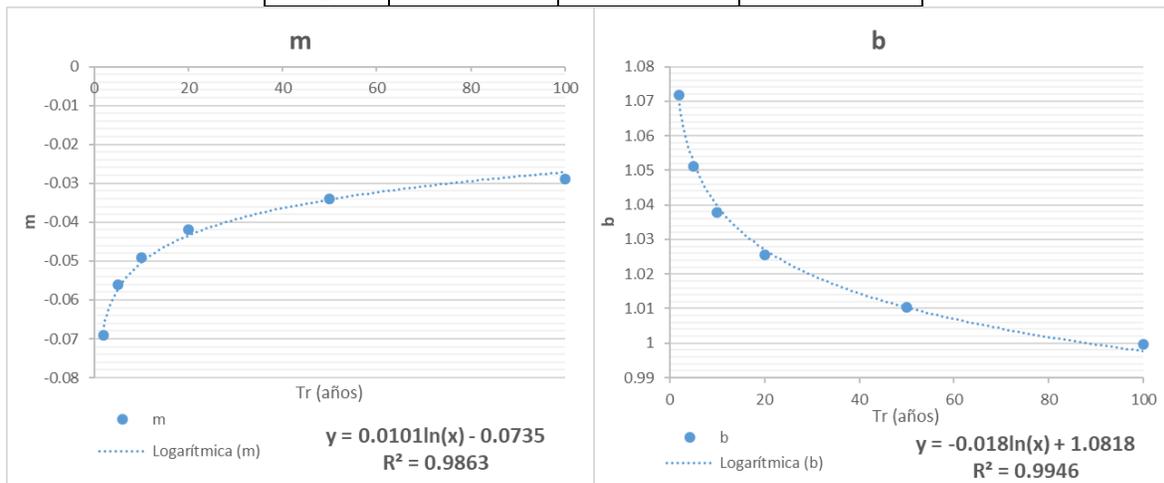


Figura 5.17 ecuación para línea de tendencia de las variables m y b Vs Tr. Elaboración propia.

Con la serie de datos m graficados con su respectivo periodo de retorno se obtuvo una línea de tendencia y la correspondiente ecuación que la describe, lo mismo sucedió con la variable b, para la integración de ambos datos se utilizó la forma de las curvas mostradas en la Tabla 5.8 a partir de la cual se pueden calcular los FRA para cualquier área mayor a 25 km<sup>2</sup> y para cualquier periodo de retorno, dejando como límite el FRA para un periodo de retorno de 100 años. Mismo que se describe como Ec. 5.4 con sus parámetros Ec. 5.5 y Ec. 5.6. que dependen del periodo de retorno a partir de la cual se pueden calcular los FRA.

$$FRA_{E_{Tr=i}}^{a=n} = -m * Ln(A) + b \quad \text{Ec. 5.4}$$



Donde

$$m = 1.0101Ln(Tr) - 0.0735 \quad \text{Ec. 5.5}$$

$$b = -0.018(Tr) + 1.0818 \quad \text{Ec. 5.6}$$

A: área

FRA<sub>E</sub>: Ecuación general del factor de reducción por área

### 5.3. Factor de convectividad

Con el procedimiento del capítulo 4.3 se obtuvo el promedio del “factor de convectividad” (FC) R para cada estación, la desviación estándar y el número de tormentas registradas, mismos que se presentan en la Tabla 5.10, se encontró que el promedio va de 0.40 a 0.55 y una desviación estándar de 0.2 en promedio, con al menos 112 tormentas registradas por estación.

Tabla 5.10 Promedios del factor de convectividad obtenida dentro de la CVM.

Estación	Promedio R	Desv. Est	No. de tormentas
1	0.478	0.179	137
2	0.522	0.205	131
3	0.514	0.211	128
4	0.525	0.203	128
5	0.521	0.203	130
6	0.516	0.198	130
7	0.484	0.210	131
8	0.496	0.201	132
9	0.484	0.185	131
10	0.511	0.183	133
11	0.541	0.199	135
12	0.517	0.196	134
13	0.543	0.211	135
14	0.553	0.211	137
15	0.459	0.194	138
16	0.447	0.181	128
17	0.508	0.204	136
18	0.499	0.177	139
19	0.507	0.195	140
20	0.502	0.192	136
21	0.462	0.183	140
22	0.458	0.182	140
23	0.437	0.190	135
24	0.504	0.190	139
25	0.485	0.184	137
26	0.423	0.185	137
27	0.545	0.200	133



Estación	Promedio R	Desv. Est	No. de tormentas
28	0.492	0.199	133
29	0.535	0.211	134
30	0.539	0.203	135
31	0.480	0.207	126
32	0.526	0.217	123
33	0.562	0.207	130
34	0.501	0.202	138
35	0.489	0.183	133
36	0.478	0.182	141
37	0.480	0.191	140
38	0.512	0.190	131
39	0.401	0.188	136
40	0.533	0.192	128
41	0.503	0.183	137
42	0.510	0.199	126
43	0.521	0.197	128
44	0.497	0.223	125
45	0.526	0.201	125
46	0.509	0.211	112
47	0.526	0.195	133
48	0.495	0.202	132
49	0.433	0.185	134

Los valores promedio de las estaciones fueron ubicados geográficamente y se realizó una interpolación espacial utilizando el método IDW para así observar su variabilidad espacial, así como alguna relación de estos con las características de la CVM (Figura 5.18).

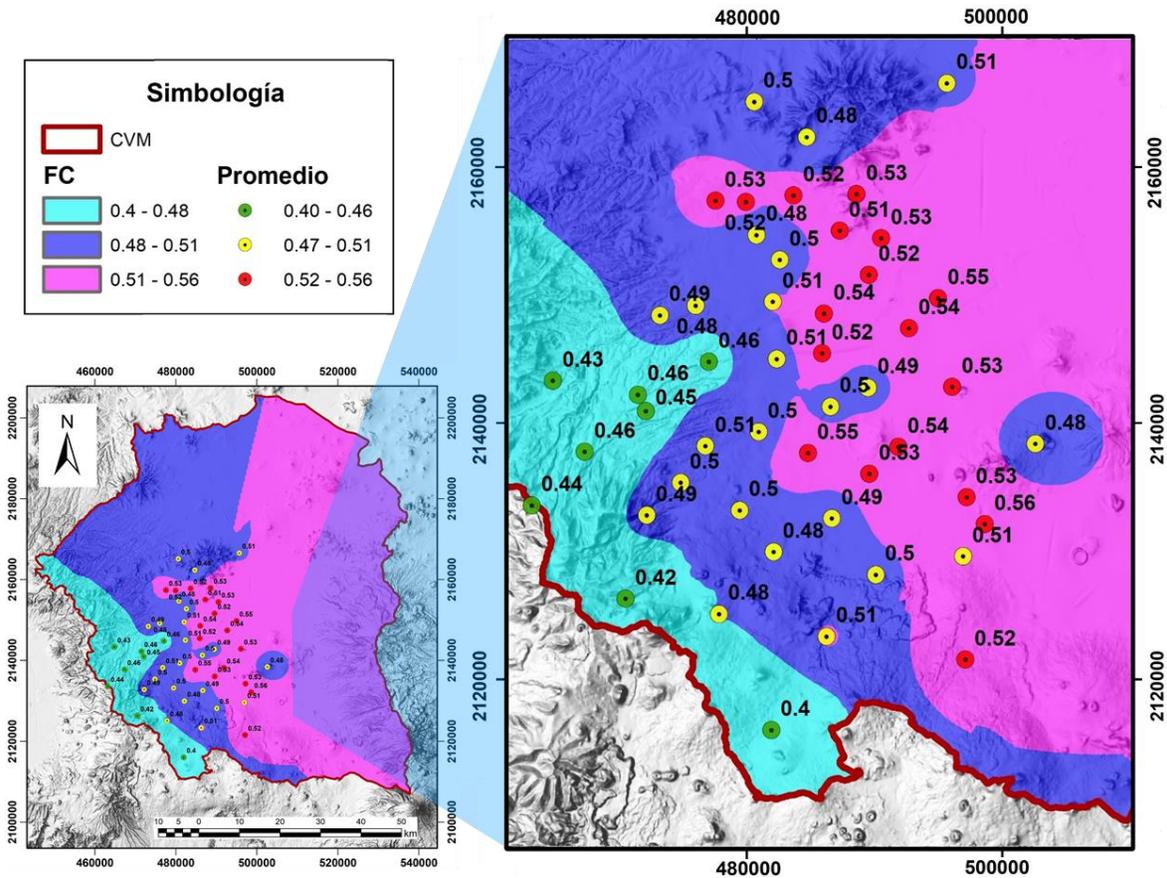


Figura 5.18 Factores de convectividad promedio interpolada.

Se puede observar que las zonas con mayor definición son la centro y sur-oeste que es donde se encuentran concentradas el mayor número de estaciones, en estas zonas se puede apreciar que existe cierta relación entre los valores del FC y la topografía donde el rango más bajo (0.40-0.48) se ubica en la parte montañosa, los valores intermedios (0.48-0.51) en la zona de transición entre la parte plana y montañosa, finalmente el rango más alto (0.51-0.56) se ubica en la parte plana. Se tomó un valor promedio para cada una de las zonas encontradas, siendo 0.45 para para la zona montañosa, 0.50 para la zona de transición y 0.55 para la zona plana.

Como se había mencionado en el capítulo 4.3 la información utilizada se encuentra medida a cada hora, estos valores no son realmente representativos a la lluvia que podría ocurrir durante una hora consecutiva sin importar el momento, por lo que se utilizó la información del OH-UNAM para afinar el factor R. En la Tabla 5.11 y Tabla 5.12 se presentan los máximos de una hora fijos y móviles obtenidos para cada tren de tormenta.

Tabla 5.11 Máximos fijos 1 hora. OH-UNAM.



Ventana fija			AJUSCO	CUEMANCO	MILPA ALTA	NAUCALPAN	PREPA 4	COPIILCO	LA JOYA	NOPALERA	SAN BERNABE	ZAPATA
2019	T1	Máx. 1 h	14.4	21.39	13.77	14.36	8.01	20.06	27.89	15.29	20.88	19.1
	T2	Máx. 1 h	20.22	7.43	8.78	9.02	19.34	16.45	11.62	20.51	13.54	13.23
	T3	Máx. 1 h	22.79	18.47	13.64	22.89	7.69	9.95	7.52	12.15	3.13	5.2
2020	T1	Máx. 1 h	25.3	24. A32	12.29	9.04	12.74	11.54	45.33	5.32	7.77	51.8
	T2	Máx. 1 h	14.05	24.49	11.93	5.28	12.22	17.94	39.41	19.38	5.28	28.86
	T3	Máx. 1 h	14.81	28.05	8.61	22.48	14.41	10.33	19.03	14.05	10.5	51.26
2021	T1	Máx. 1 h	31	11.55	15.46	14.13	11.76	11.42	22.27	6.83	18.49	12.39
	T2	Máx. 1 h	18.49	12.88	17.53	23.17	9.15	21.01	13.3	6.02	26.82	22.59
	T3	Máx. 1 h	29.6	18.99	8.41	10.68	14.08	20.9	13.3	9.34	21.04	21.43

Tabla 5.12 Máximos móviles 1 hora. OH-UNAM.

Ventana móvil			AJUSCO	CUEMANCO	MILPA ALTA	NAUCALPAN	PREPA 4	COPIILCO	LA JOYA	NOPALERA	SAN BERNABE	ZAPATA
2019	T1	Máx. 1 h	15.34	29.69	13.81	14.63	8.08	21.37	29.54	15.28	20.9	19.1
	T2	Máx. 1 h	20.49	7.43	8.81	11.07	20.05	20.61	11.62	20.87	13.54	15.6
	T3	Máx. 1 h	23.02	20.35	13.67	22.87	11.83	9.96	7.52	14.37	3.29	5.3
2020	T1	Máx. 1 h	33.18	24.32	13.74	11.34	12.84	12.45	47.2	5.32	7.84	57.56
	T2	Máx. 1 h	22.12	24.49	12.3	5.28	12.22	28.14	41.25	19.68	5.3	28.86
	T3	Máx. 1 h	14.81	33.59	8.61	22.97	14.73	10.37	21.24	22.21	10.51	59.02
2021	T1	Máx. 1 h	31	14.12	15.48	14.13	11.9	12.47	22.65	6.99	32.3	12.39
	T2	Máx. 1 h	20.17	12.88	21.75	40.78	9.16	21.78	13.3	8.56	26.83	22.96
	T3	Máx. 1 h	29.98	24.12	9.45	14.61	15.45	23.29	18.64	9.51	21.22	30.33

Como se esperaba, los máximos acumulados para las ventanas móvil son mayores a los calculados para a las ventanas fijas. Es importante recordar que puesto que las estaciones del OH-UNAM no cuentan con la misma información de precipitación registrada por los pluviógrafos de SACMEX y que el factor R ya fue calculado en los pasos anteriores, lo que se busca utilizando esta información es un factor de corrección relacionado con una ventana de 1 minuto, mismo que se obtuvo con la relación existente entre una hora móvil y una hora fija, la relación obtenida se presenta en la Tabla 5.13



Tabla 5.13 Factor de corrección entre valores fijos y valores móviles.

Año	Tormenta	AJUSCO	CUEMANCO	MILPA ALTA	NAUCALPAN	PREPA 4	COPILOCO	LA JOYA	NOPALERA	SAN BERNABE	ZAPATA
2019	T1	1.07	1.39	1.00	1.02	1.01	1.07	1.06	1.00	1.00	1.00
	T2	1.01	1.00	1.00	1.23	1.04	1.25	1.00	1.02	1.00	1.18
	T3	1.01	1.10	1.00	1.00	1.54	1.00	1.00	1.18	1.05	1.02
2020	T1	1.31	1.00	1.12	1.25	1.01	1.08	1.04	1.00	1.01	1.11
	T2	1.57	1.00	1.03	1.00	1.00	1.57	1.05	1.02	1.00	1.00
	T3	1.00	1.20	1.00	1.02	1.02	1.00	1.12	1.58	1.00	1.15
2021	T1	1.00	1.22	1.00	1.00	1.01	1.09	1.02	1.02	1.75	1.00
	T2	1.09	1.00	1.24	1.76	1.00	1.04	1.00	1.42	1.00	1.02
	T3	1.01	1.27	1.12	1.37	1.10	1.11	1.40	1.02	1.01	1.42
Promedio		1.12	1.13	1.06	1.18	1.08	1.13	1.08	1.14	1.09	1.10
		1.11									

En la Tabla 5.13 se puede apreciar que se calculó el promedio por estación obteniendo así 10 factores de ajustes que varían entre 1.06 - 1.18, estos valores fueron georreferenciados e interpolados mediante la herramienta IDW para identificar si siguen algún patrón relacionado con las características de la cuenca (Figura 5.19).

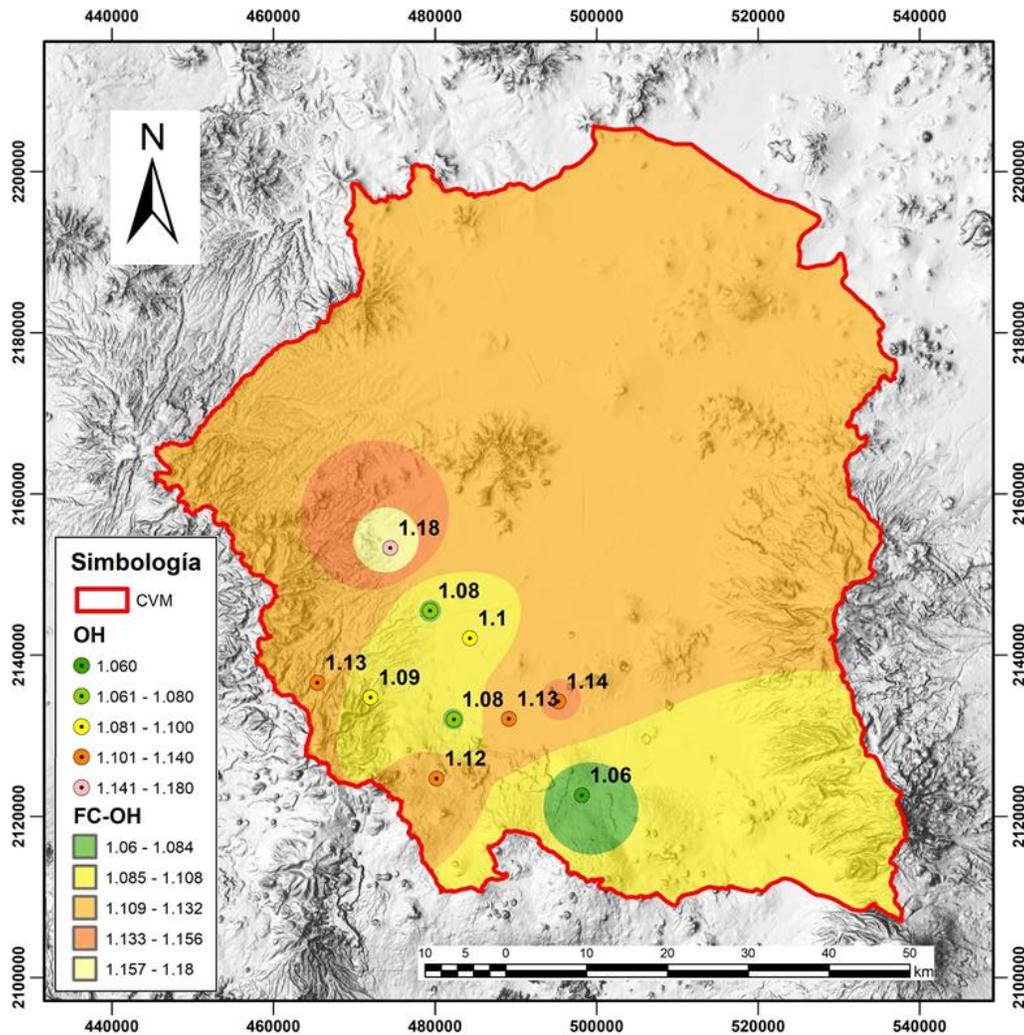


Figura 5.19 Ubicación especial de los factores de corrección para FC.

Se encontró que estos valores no guardan relación con la característica topográfica de la cuenca por lo que se utilizó el valor promedio de estos el cual es 1.11. El valor obtenido fue multiplicado por los factores anteriormente encontrados de forma que:

$$0.45 \times 1.1 \rightarrow 0.50$$

$$0.50 \times 1.1 \rightarrow 0.55$$

$$0.55 \times 1.1 \rightarrow 0.61$$

#### d. Actualización y comparación de los factores de conectividad para la Cuenca del Valle de México

Con los factores obtenidos se construyó el mapa de la Figura 5.20 en cual ya se encuentran corregidos los factores R, mismos que se ajustaron las zonas en función de la topografía de la Cuenca del Valle de México ubicando finalmente tres zonas del factor de conectividad, con valores de 0.5, 0.55 y 0.6.

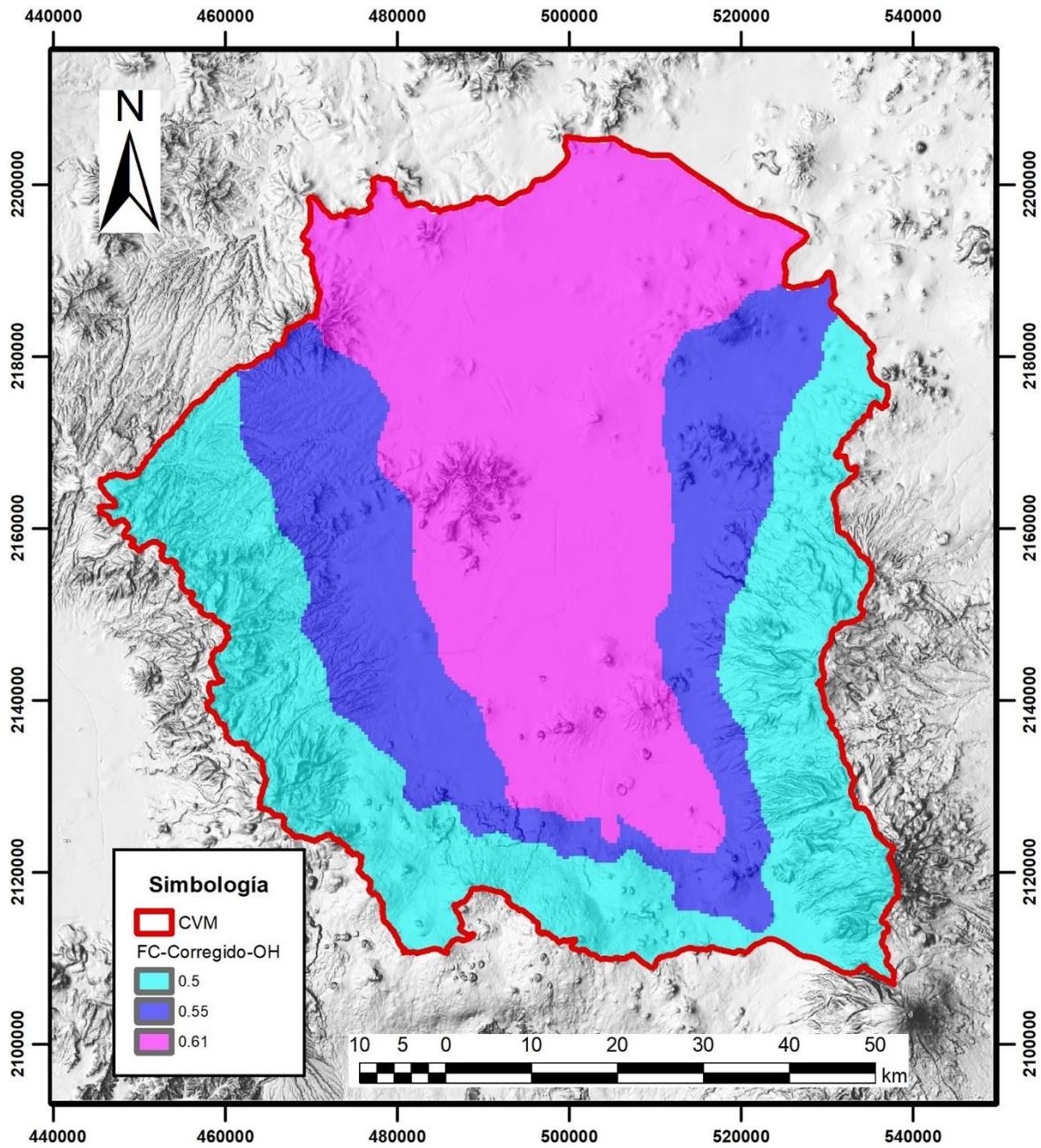


Figura 5.20 Mapa del factor de convectividad en la Cuenca del Valle de México.

Con los tres valores del factor R se aplicó el método de Chen mencionado en la sección 2.4 para la obtención de una lámina de lluvia  $P_t^T$ . La obtención de las variables a, b y c se obtuvo mediante las Ec. 2.18, Ec. 2.19 Ec. 2.20 y se presentan en la Tabla 5.14:



Tabla 5.14 Coeficientes a, b y c para R= 0.5, 0.55 y 0.6

F.C.	0.50	0.55	0.60
a1	30.95	35.46	40.03
b1	9.72	10.77	11.69
c1	0.81	0.84	0.87

Los factores k que relacionan la precipitación asociada a distintas duraciones con la de 1 hora, para los 3 factores de convectividad R mostrados en la Tabla 5.14 se muestran en la Tabla 5.15

Tabla 5.15 Valores k en función del factor de convectividad R y la duración d, respecto a 1 hora.

Duración (Minutos)	Factor de convectividad R		
	0.5	0.55	0.6
	Valores de K		
10	0.484	0.489	0.493
20	0.673	0.684	0.694
30	0.786	0.796	0.806
40	0.868	0.876	0.883
50	0.933	0.937	0.941
60	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>
70	1.031	1.028	1.026
80	1.071	1.065	1.059
90	1.106	1.097	1.087
100	1.137	1.125	1.113
110	1.166	1.151	1.136
120	1.192	1.174	1.156
130	1.217	1.196	1.175
140	1.239	1.216	1.192
150	1.260	1.234	1.208
160	1.280	1.251	1.222
170	1.299	1.268	1.236
180	1.317	1.283	1.249
190	1.333	1.297	1.261
200	1.349	1.311	1.272
210	1.364	1.324	1.283
220	1.379	1.336	1.293
230	1.393	1.348	1.303
240	1.406	1.359	1.312
250	1.419	1.370	1.321
260	1.431	1.380	1.330
270	1.443	1.390	1.338
280	1.455	1.400	1.346
290	1.466	1.409	1.353



Duración (Minutos)	Factor de convectividad R		
	0.5	0.55	0.6
	Valores de K		
300	1.476	1.418	1.360
310	1.487	1.427	1.367
320	1.497	1.435	1.374
330	1.507	1.443	1.380
340	1.516	1.451	1.386
350	1.525	1.459	1.392
360	1.534	1.466	1.398
370	1.543	1.473	1.404
380	1.552	1.480	1.409
390	1.560	1.487	1.415
400	1.568	1.494	1.420
410	1.576	1.500	1.425
420	1.584	1.507	1.430
430	1.591	1.513	1.434
440	1.599	1.519	1.439
450	1.606	1.525	1.444
460	1.613	1.530	1.448
470	1.620	1.536	1.452
480	1.627	1.542	1.456
490	1.633	1.547	1.461
500	1.640	1.552	1.465
510	1.646	1.557	1.468
520	1.653	1.562	1.472
530	1.659	1.567	1.476
540	1.665	1.572	1.480
550	1.671	1.577	1.483
560	1.677	1.582	1.487
570	1.682	1.586	1.490
580	1.688	1.591	1.494
590	1.694	1.595	1.497
600	1.699	1.600	1.500
610	1.705	1.604	1.503
620	1.710	1.608	1.506
630	1.715	1.612	1.510
640	1.720	1.616	1.513
650	1.725	1.620	1.516
660	1.730	1.624	1.518
670	1.735	1.628	1.521
680	1.740	1.632	1.524
690	1.745	1.636	1.527
700	1.750	1.640	1.530



Duración (Minutos)	Factor de convectividad R		
	0.5	0.55	0.6
	Valores de K		
710	1.754	1.643	1.532
720	1.759	1.647	1.535
730	1.764	1.651	1.538
740	1.768	1.654	1.540
750	1.772	1.658	1.543
760	1.777	1.661	1.545
770	1.781	1.664	1.548
780	1.785	1.668	1.550
790	1.790	1.671	1.552
800	1.794	1.674	1.555
810	1.798	1.677	1.557
820	1.802	1.680	1.559
830	1.806	1.684	1.561
840	1.810	1.687	1.564
850	1.814	1.690	1.566
860	1.818	1.693	1.568
870	1.822	1.696	1.570
880	1.825	1.699	1.572
890	1.829	1.702	1.574
900	1.833	1.705	1.576
910	1.836	1.707	1.578
920	1.840	1.710	1.580
930	1.844	1.713	1.582
940	1.847	1.716	1.584
950	1.851	1.719	1.586
960	1.854	1.721	1.588
970	1.858	1.724	1.590
980	1.861	1.727	1.592
990	1.865	1.729	1.594
1000	1.868	1.732	1.595
1010	1.871	1.734	1.597
1020	1.875	1.737	1.599
1030	1.878	1.739	1.601
1040	1.881	1.742	1.602
1050	1.884	1.744	1.604
1060	1.887	1.747	1.606
1070	1.891	1.749	1.608
1080	1.894	1.751	1.609
1090	1.897	1.754	1.611
1100	1.900	1.756	1.612
1110	1.903	1.758	1.614



Duración (Minutos)	Factor de convectividad R		
	0.5	0.55	0.6
1120	1.906	1.761	1.616
1130	1.909	1.763	1.617
1140	1.912	1.765	1.619
1150	1.915	1.768	1.620
1160	1.918	1.770	1.622
1170	1.921	1.772	1.623
1180	1.923	1.774	1.625
1190	1.926	1.776	1.626
1200	1.929	1.778	1.628
1210	1.932	1.781	1.629
1220	1.935	1.783	1.631
1230	1.937	1.785	1.632
1240	1.940	1.787	1.634
1250	1.943	1.789	1.635
1260	1.946	1.791	1.636
1270	1.948	1.793	1.638
1280	1.951	1.795	1.639
1290	1.953	1.797	1.640
1300	1.956	1.799	1.642
1310	1.959	1.801	1.643
1320	1.961	1.803	1.644
1330	1.964	1.805	1.646
1340	1.966	1.807	1.647
1350	1.969	1.809	1.648
1360	1.971	1.810	1.650
1370	1.974	1.812	1.651
1380	1.976	1.814	1.652
1390	1.979	1.816	1.653
1400	1.981	1.818	1.654
1410	1.984	1.820	1.656
1420	1.986	1.821	1.657
1430	1.988	1.823	1.658
1440	1.991	1.825	1.659

Estos valores fueron **comparados con los obtenidos por Franco C. (1998)** para el valle de México, en su trabajo Franco utilizo el inverso del propuesto en este trabajo (24 h / 1 h) para la obtención del factor R, utilizando 49 estaciones pluviográfica dentro del entonces D.F (actualmente CDMX) con 14 años de registro (1982-1995), en la Figura 5.21 se presentan las curvas generadas a partir de los factores de ajuste obtenidos.

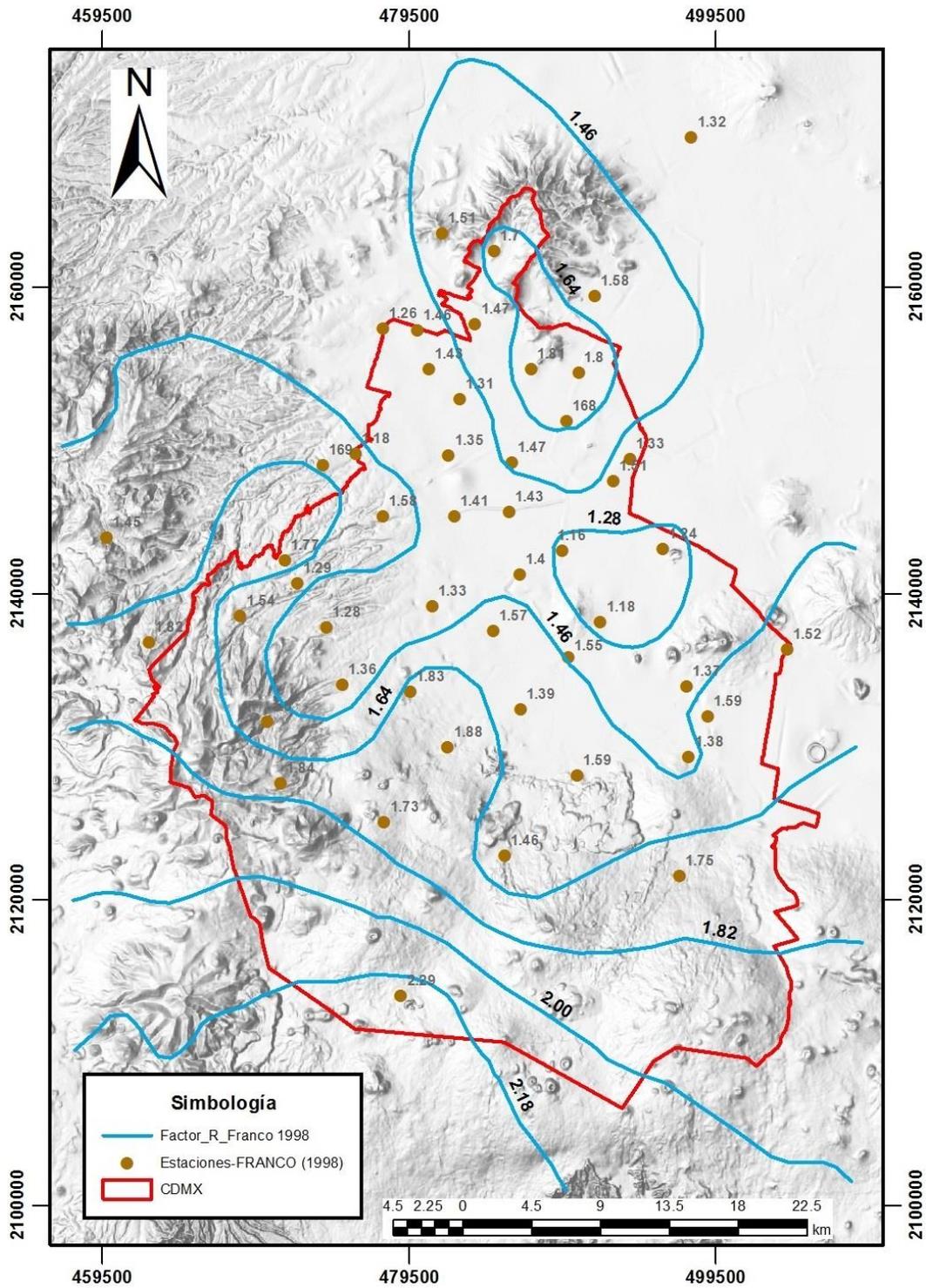


Figura 5.21 Curvas de los Factores de ajuste R (24 hr/1 hr)  $T_r = 10$  años. Tomado de Franco 1998

En la Figura 5.22 se presentan las curvas generadas a partir del factor R de la Tabla 5.10 multiplicados por el valor de corrección 1.1 obtenido en la Tabla 5.13

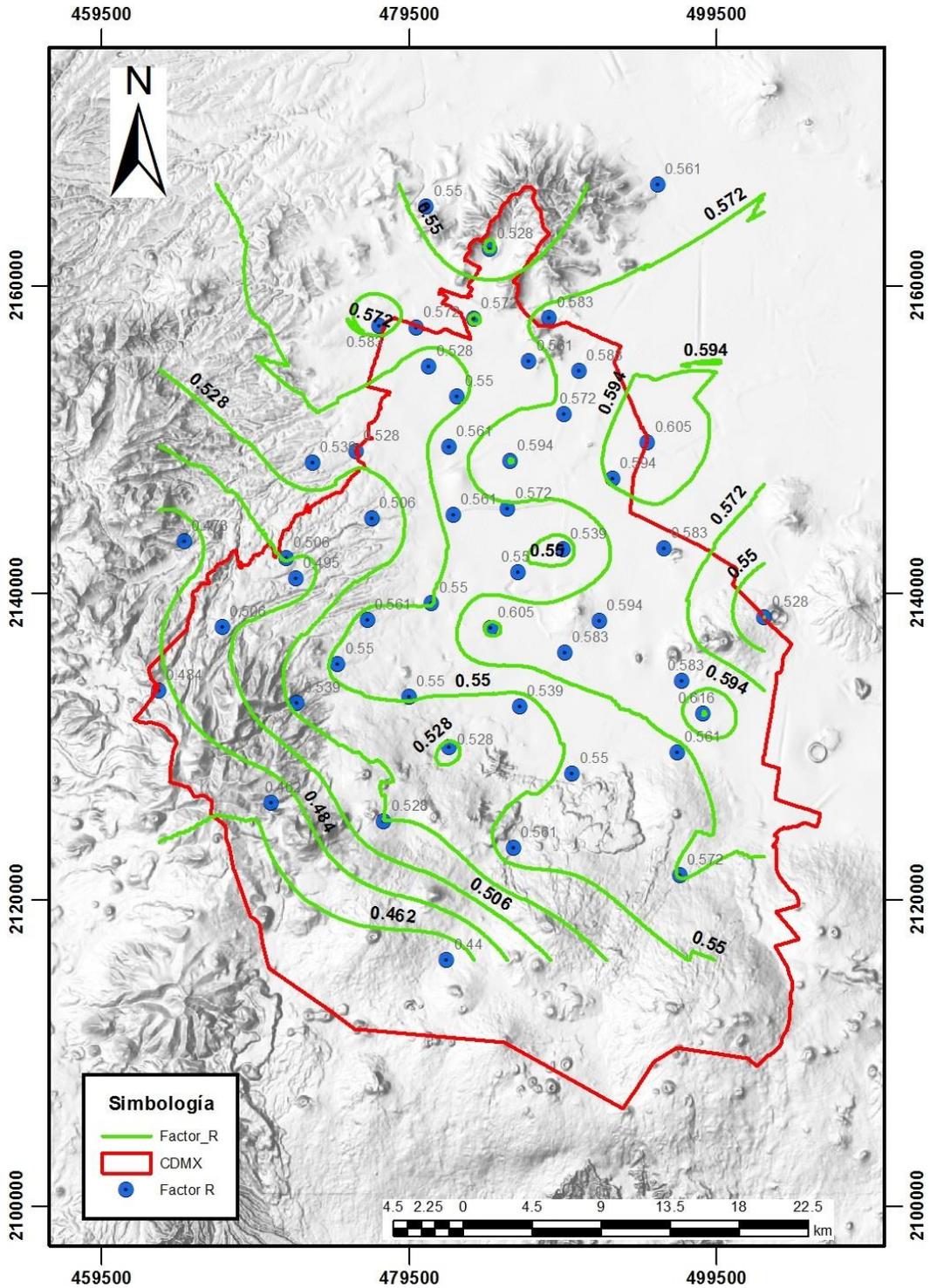


Figura 5.22 Curvas del factor de ajuste R. Elaboración propia (2023).

Como se puede observar en la Figura 5.21 y la Figura 5.22 el factor de ajuste guarda la misma relación respecto a la topografía, siendo en el caso de Franco los valores más altos en las zonas con mayor altura, mientras que para este trabajo los valores



R más bajos se encuentran en las zonas altas, cabe recordar que el obtenido por Franco es el inverso al de este trabajo.

Por otro lado, en la Tabla 5.16 se compararon los valores de K obtenidos con los valores de K presentados por Franco.

Tabla 5.16 Comparación de Factores K para diferentes duraciones en minutos.

Duración (minutos)	FACTOR K			
	Franco C. - 1998	R= 0.5	R=0.55	R=0.6
30	0.78	0.786	0.796	0.806
60	1	1	1	1
120	1.17	1.192	1.174	1.156
1440	1.52	1.991	1.825	1.659

Se puede observar que los valores k en función del factor de convectividad R y la duración d, respecto a 1 hora obtenidos por Franco son parecidos a los obtenidos en este trabajo, siendo que para 30 minutos los resultados de Franco se acercan más al K resultante de un R=0.5, para 120 minutos sería R=0.55 y para 1440 minutos sería R =0.6

De igual forma se obtuvieron los factores K según el periodo de retorno, para esto se multiplicaron los factores regionales obtenidos en la sección 5.1 - Tabla 5.2 con los factores R (Tabla 5.17)

Tabla 5.17 comparación para diferentes factores K según un periodo de retorno

Tr (años)	FACTOR K			
	Franco C. - 1998	R= 0.5	R=0.55	R=0.6
2	0.67	0.47	0.55	0.56
5	0.88	0.6	0.66	0.72
10	1	0.7	0.76	0.83
25	1.14			
50	1.24	0.94	1.03	1.13
100	1.34	1.05	1.15	1.25
200		1.145	1.2595	1.374
500	1.55	1.28	1.41	1.54
1000		1.38	1.518	1.656
2000		1.485	1.6335	1.782
5000		1.615	1.7765	1.938
10000		1.72	1.892	2.064

Según la anterior los valores del factor K que más se parecen a los obtenidos por Franco C. son los pertenecientes a R=0.6 que se obtuvieron en la zona plana de la CVM.



## Capítulo 6. Conclusiones

---

Para la regionalización de la Cuenca del Valle de México se optó por utilizar un área que abarca a la Ciudad de México (CDMX), 54 municipios del Estado de México y 4 municipios de Hidalgo (Figura 3.2) la cual fue nombrada como (CVM). Es por esto que al comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos en el estudio de 2017 para cada estado, los factores regionales a pesar de ser similares se ajustaron mejor a la función Gumbel tanto para la CDMX como para el EDO.MEX, mientras que para este trabajo la función que mejor se ajusta a los datos medidos es la Doble Gumbel, la cual representa de mejor manera a la segunda población de datos, puesto que la función doble Gumbel se encuentra asociada a zonas afectadas por eventos extremos que suelen comportarse como lo encontrado en la CVM.

Con el procedimiento utilizado para el Factor de reducción por área fue posible obtener dos ecuaciones generales capaces de describir el comportamiento del factor de reducción por área para cualquier periodo de retorno deseado dentro de la cuenca. Utilizando la ecuación 1 será posible obtener el factor de reducción por área para cualquier cuenca dentro de la CVM siempre que esta tenga un área menor a 25 km<sup>2</sup>, sin importar el periodo de retorno. Con la ecuación 2 se pueden calcular los FRA para cualquier área mayor a 25 km<sup>2</sup> y para cualquier periodo de retorno entre 2 y 100 años utilizando únicamente dos términos que dependen del área y el Periodo de retorno.

Se observó que los FRA medidos son menores a los de los periodos de retorno de 20 años o más y el factor de reducción por área disminuye al aumentar el área, pero crece en función del periodo de retorno para una misma área de estudio (Figura 5.16).

Para la obtención del factor de convectividad de la CVM se usó la información Pluviográfica de SACMEX sin embargo, debido a que esta información se encuentra medida a cada hora, estos valores no son realmente representativos de la lluvia que podría ocurrir durante una hora consecutiva sin importar el momento del día, por lo que al utilizar la información del OH-UNAM, la cual se encuentra medida a cada minuto, se logró afinar el factor R, dando así finalmente tres factores R los cuales se identificó que tienen relación con la topografía de la cuenca, siendo estos con valores de 0.5 para la zona alta, 0.55 para la zona de transición y 0.6 la para la planicie de la cuenca (la zona más baja). Cabe recalcar que esta división se dio a partir de la información que se encuentra concentrada en la Ciudad de México por lo que para mayor exactitud sería necesario mayor disponibilidad de estaciones con registros abundantes. Al comparar los resultados obtenidos en este trabajo y los obtenidos por Franco (1998) se observó que guardan mayor relación en la zona plana con un R=0.6 puesto que es la zona con mayor información.



Finalmente se considera que los resultados obtenidos en este trabajo para los tres factores (regionales, FRA y de convectividad) aun cuando difieren ligeramente con los obtenidos anteriormente deben ser empleados para futuros estudios, puesto que para su elaboración se contó con un mayor registro de años además de datos de mayor resolución, con los cuales se podrán obtener tormentas de diseño con menor incertidumbre.



## Capítulo 7. Anexo

Anexo 1. Fechas de tormentas registradas en Pluviógrafos de SACMEX

Fecha de tormenta	Número de estaciones registradas	Fecha de tormenta	Número de estaciones registradas	Fecha de tormenta	Número de estaciones registradas	Fecha de tormenta	Número de estaciones registradas
25/06/1988	49	16/08/1994	48	28/07/1998	49	09/07/2002	47
05/07/1988	49	27/08/1994	42	04/08/1998	47	10/09/2002	45
08/07/1988	49	07/09/1994	44	06/08/1998	47	11/09/2002	44
20/07/1988	49	08/09/1994	48	28/08/1998	47	20/09/2002	31
03/08/1988	49	12/09/1994	48	29/08/1998	49	03/06/2003	42
07/08/1988	49	24/09/1994	27	31/08/1998	48	21/06/2003	47
15/08/1988	49	09/10/1994	37	06/09/1998	39	30/06/2003	46
22/08/1988	49	21/05/1995	34	10/09/1998	49	05/07/2003	42
31/08/1988	49	25/05/1995	47	16/09/1998	49	15/07/2003	48
03/09/1988	49	27/06/1995	35	26/09/1998	49	19/07/2003	48
04/09/1988	49	29/06/1995	49	27/09/1998	47	26/07/2003	49
20/06/1993	48	30/06/1995	49	08/06/1999	15	27/07/2003	46
21/06/1993	47	11/07/1995	49	24/06/1999	48	31/07/2003	48
22/06/1993	49	05/08/1995	49	18/07/1999	48	10/08/2003	49
23/06/1993	48	06/08/1995	49	19/07/1999	47	19/08/2003	44
02/07/1993	48	16/08/1995	49	23/07/1999	46	03/09/2003	45
09/07/1993	48	22/08/1995	49	17/08/1999	48	04/09/2003	42
31/07/1993	48	02/09/1995	49	04/09/1999	49	16/09/2003	48
14/08/1993	49	23/09/1995	40	06/09/1999	49	25/09/2003	29
06/09/1993	43	25/09/1995	42	09/09/1999	45	19/07/2004	31
10/09/1993	47	03/11/1995	47	19/10/1999	39	18/08/2004	45
21/09/1993	48	07/07/1996	49	13/05/2000	42	20/08/2004	49
24/09/1993	49	15/08/1996	49	11/06/2000	48	29/08/2004	47
04/06/1994	43	04/09/1996	49	11/07/2000	49	30/08/2004	45
10/06/1994	48	07/09/1996	49	03/08/2000	48	24/09/2004	40
11/06/1994	48	12/09/1996	30	20/08/2000	48	29/09/2004	46
24/06/1994	47	03/10/1996	48	21/08/2000	47	23/06/2005	42
27/06/1994	49	03/05/1997	47	24/08/2000	36	25/06/2005	43
04/07/1994	49	23/06/1997	49	13/09/2000	47	18/07/2005	46
10/07/1994	48	15/07/1997	48	01/10/2000	26	05/08/2005	48
12/07/1994	43	17/07/1997	47	14/10/2000	47	30/08/2005	44
21/07/1994	49	26/07/1997	49	10/08/2001	39	31/08/2005	46
22/07/1994	49	18/08/1997	48	16/08/2001	42	09/09/2005	46
31/07/1994	48	29/08/1997	49	24/08/2001	46	11/06/2008	44
06/08/1994	49	05/09/1997	47	24/09/2001	39	07/07/2008	46
13/08/1994	39	13/10/1997	49	07/06/2002	46		



## Capítulo 8. Referencias

- Amaro-Loza, A, Pedrozo-Acuña, A., Sánchez-Huerta, A., Sánchez-Vargas, C. y Vergara-Alcaraz, E.A. (2022). *Evaluación de las mediciones de lluvia en la Ciudad de México utilizando la red de disdrómetros y su comparación con respecto a la red de pluviómetros de balancín*. Ingeniería del agua, 26(2), 91-105. <https://doi.org/10.4995/la.2022.17217>
- Baeza, R.C. (2007). Estimación regional de factores de convectividad para el cálculo de las relaciones intensidad-duración-frecuencia. Tesis Maestría, IIUNAM.
- CENAPRED (2017). Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana. Tomo II. Extraído de <https://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/20a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/III.%20Estudio%20para%20regionalizar%20los%20gastos/Actividad%202/Informe%20CENAPRED%20Tomo%20II,%20regionalizaci%C3%B3n%20lluvias11%20de%20sept%202017.docx>
- CONAGUA (2016). Estaciones para medir el clima. Extraído de <https://www.gob.mx/conagua/articulos/estaciones-para-medir-el-clima>.
- Guichard-Romero D., Domínguez-Mora R. & García-Bertual R. (2006). Revisión histórica de los factores de reducción por área. Aplicación en la zona mediterráneo de España. Quehacer científico en Chiapas. I, 32-40.
- Domínguez (2017). “Estudio para regionalizar los gastos generados por avenidas máximas, como base para la elaboración de mapas de peligro por inundaciones fluviales en todas las cuencas de la república mexicana”. CENAPRED
- Domínguez-Mora R., Carrizosa e., Fuentes G., Arganis M., Osnaya J. y Galvan-Torres A. (2018). Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la república mexicana. Tecnología y ciencias del agua. DOI: 10.24850/j-tyca-2018-01-01
- Estevez, J., Garcia, A., Ayoso, J. L. Estimation of areal reduction factors in the province of Córdoba (Southern Spain). Memorias del XIV International Congress on Project Engineering. Madrid, España, 2010
- Franco-Domínguez. C. (1998) “Análisis regional de lluvias convectivas aplicación al valle de México”. Tesis de Maestría, IIUNAM.
- Labrada M. P. (2018). “Análisis Regional para lluvias de diseño con duraciones menores a un día.” Tesis de Maestría, IIUNAM.
- Koutsoyiannis D. (2004a) Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation / Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: I. Recherche théorique, Hydrological Sciences Journal, 49:4, -590, DOI:10.1623/hysj.49.4.575.54430



- Koutsoyiannis D. (2004b) Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II. Empirical investigation of long rainfall records / Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: II. Recherche empirique sur de longues séries de précipitations, Hydrological Sciences Journal, 49:4, -610, DOI: 10.1623/hysj.49.4.591.54424