



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA

**LA NATURALEZA INTERMITENTE DE LA
PRECIPITACIÓN EN CIUDAD DE MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

FIS. GUSTAVO JAVIER GONZÁLEZ MORAGA

COMITÉ TUTOR

Dr. Carlos Abraham Ochoa Moya (Tutor)(Centro de Ciencias de la atmósfera, UNAM)

Dr. Ignacio Arturo Quintanar Isaías (Centro de Ciencias de la atmósfera, UNAM)

Dr. David K. Adams (Centro de Ciencias de la atmósfera, UNAM)

JURADO EXAMINADOR

Dr. Carlos Abraham Ochoa Moya (Centro de Ciencias de la atmósfera, UNAM)

Dr. Ignacio Arturo Quintanar Isaías (Centro de Ciencias de la atmósfera, UNAM)

Dr. Carlos Lizárraga Celaya (Dpto. de Física, UNISON)

Dr. Enrique R. Vivoni (School of Earth and Space Exploration & School of Sustainable
Engineering and the Built Environment, ASU, USA)

Dr. Harry Alvarez Ospina (Facultad de Ciencias, UNAM)

Ciudad Universitaria, CD. MX. **Octubre** 2020



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.

*“Cuando llegue el momento
y pelees con alguien que se quede frente a ti,
un peleador que no huya, que no dé pasos atrás,
que también te golpee y que te cueste respirar.
Cuando vivas esa situación, será grandiosa.
Por que será tu bautizo de fuego.
Cuando salgas de eso
tendrás la clase de respeto que importa en este maldito mundo,
el autorrespeto.”*

Rocky VI

Agradecimientos

Le agradezco a CONACyT por la beca de manutención, a los proyectos PAPIIT IA102916 y PAPIIT IN110718, a las becas de Apoyo para Titulación y Obtención de Grado mediante un Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios del Centro de Ciencias de la Atmósfera.

Les agradezco a CONACyT por otorgarme la beca de manutención, al posgrado en ciencias de la tierra y al centro de ciencias de la atmósfera por aceptarme en la maestría. A mi tutor Carlos Ochoa por todo su apoyo y paciencia, que en todo momento me estuvo alentando y animándome a dar lo mejor de mi, sus palabras fueron de gran aliento y su conocimiento fue de gran apoyo para hacer bien mi tesis. Al comité jurado: Arturo, Lizarraga, Vivoni y Harry; que sus revisiones mejoraron mi tesis. A Araceli Chaman que siempre me ayudo en el proceso de maestría muy amablemente.

A mi familia, mis padres y mis hermanas, que siempre se comunicaban conmigo y me alentaban seguir mis sueños, porque ellos son la motivación de mi vida. A mis amigos que siempre estaban ahí para apoyarme, para distraernos en los momentos más tensos. A los que siempre estuvieron ahí que sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas: Sharlee, Lynes, Nicole, Noé, Emiliano, Victoria. Y en especial a Rocío, que la ayuda que me brindo fue sumamente importante y por su apoyo en toda la maestría con sus palabras de animo y su amistad inquebrantable.

A mi arrendador Gustavo por ofrecerme un buen lugar donde vivir. A las chicas de las tortas de San Fernando que de vez en cuando me alimentaban con unas tortas muy ricas. A todas las personas que durante el curso de mi maestría me enseñaron cosas de la vida y me hicieron más fuerte.

Gracias a Renée que me ayudó a enfrentar el paso final de mi maestría, siempre fue muy motivadora y esperanzadora en todo momento con su forma tan singular de hacerme ver lo bueno de cada cosa y dedicándome momentos tan especiales.

Resumen

En este trabajo se caracteriza el comportamiento del patrón de precipitación para la Ciudad de México (CdMx, por sus siglas). El cual, está rodeado al sur, este y oeste por grandes relieves. El forzamiento orográfico que generan estos relieves sobre el valle hace que la precipitación en la zona tenga un patrón determinado, donde la mayor precipitación se registra al oeste de la Ciudad. Primero, se describe el comportamiento del patrón de precipitación extrema horaria para la CdMx. Se caracterizó con métodos de potencias: espectral, análisis de escala de invarianza y exponente de intermitencia. Para obtener los regímenes de escala que corresponden a CdMx, así como los patrones espaciales de la precipitación con dichos métodos.

Para realizar la caracterización de la precipitación, se usaron los datos crudos provenientes de estaciones pluviométricas de radioenlace del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), del periodo de 1993 – 2017. Se procesaron para obtener datos horarios y cada 10 *min* en dos diferentes series de tiempo, serie completa y serie binaria.

Conforme a los resultados se observa que los eventos de precipitación extrema han aumentado progresivamente en altitudes más bajas (zona norte de CdMx). Sin embargo, no se presentan cambios significativos en la zona oeste. Se observa que existen tres regímenes de escala. El régimen de tormenta, sistemas frontales y de transición, en intervalos de 10 *min* a 80 *min*, 80 *min* a 21.3 *h* y mayor a 21.3 *h*, respectivamente. Se observa que el régimen que mejor describe la climatología de la CdMx es la métrica espectral.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	v
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	x
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	3
2. Métodos	5
2.1. Datos	5
2.2. Procedimiento	7
2.2.1. Extremos	8
2.2.2. Método espectral	9
2.2.3. Método de análisis de invarianza de escala o multifractal	10
2.2.4. Método de intermitencia	11
3. Análisis y Resultados	13
3.1. Precipitación en Ciudad de México	13
3.2. Análisis de precipitación extrema	16
3.3. Métricas y regímenes	25
4. Conclusiones	38
A. Estaciones SACMX	40

Índice de figuras

1.1. Mapa de orografía y ubicación de las estaciones de SACMEX.	4
2.1. División cardinal de la Ciudad de México. Los puntos indican la localización de las estaciones de radioenlace.	7
3.1. Precipitación media mensual de 1993 – 2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.	15
3.2. Precipitación acumulada mensual promedio para las 61 estaciones.	16
3.3. Serie temporal de la precipitación acumulada de la estación 15, con una regresión lineal.	17
3.4. Ciclo diurno del número de eventos extremos de precipitación, para la suma de todas las estaciones. Debajo, diagrama de caja del número de eventos extremos de precipitación.	17
3.5. Climatología de precipitación de 1993 – 2017, con los datos de SACM. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.	20
3.6. Acumulado anual de precipitación para los años de 1993–2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.	21
3.7. Acumulado medio de precipitación cada 5 años. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.	22
3.8. Anomalías de precipitación media cada 5 años. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas en anomalías de precipitación.	23
3.9. Acumulado medio de precipitación extrema horaria de 1993-2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.	24

3.10. Número medio de eventos extremos horarios de 1993-2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isolíneas de número de eventos.	24
3.11. Regímenes de escala espectral promediado de todas las estaciones. Los círculos rojos representa la serie completa, FS, las cruces azules representa la serie binaria, BS, las líneas discontinuas son los puntos de ruptura, rojo para FS y azul para BS.	28
3.12. Regímenes de escala de intermitencia promediado de todas las estaciones. Los círculos rojos representa la serie completa, FS, las cruces azules representa la serie binaria, BS, las líneas discontinuas son los puntos de ruptura, rojo para FS y azul para BS.	28
3.13. Regímenes de escala multifractal promediado de todas las estaciones.	29
3.14. Mapas de contorno para la métrica espectral, promediando los regímenes de tormenta y frontal. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isolíneas de α	32
3.15. Mapas de contorno para la métrica de intermitencia, promediando los regímenes de tormenta y frontal. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isolíneas de μ	33
3.16. Mapas de contorno para la métrica multifractal, promediando los regímenes de tormenta y frontal. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isolíneas de $K(3)$	34
3.17. Tendencias de la métrica espectral contra la altitud.	35
3.18. Tendencias de la métrica de intermitencia contra la altitud.	36
3.19. Tendencias de la métrica multifractal contra la altitud.	37

Índice de tablas

3.1. Regímenes de escala para cada métrica. Primer zona gris (gris claro): régimen de tormenta; zona gris del medio: régimen de sistemas frontales; tercera zona gris (gris oscuro): régimen de transición.	26
3.2. Media y desviación estándar de las 61 estaciones de cada métrica.	27
A.1. Estaciones de SACM con número de estación (localizable en la figura 1.1), etiqueta, localización en latitud, longitud y altitud. Todas las estaciones cuentan con datos de 1993-2017	40

Capítulo 1

Introducción

El estudio se centra en la zona de la Ciudad de México (CdMx, por sus siglas), que se ubica entre $19.6^{\circ}N$ lat, $19.0^{\circ}N$ lat, $-99.4^{\circ}O$ lon, $-98.9^{\circ}ON$ lon (norte, sur, este y oeste, respectivamente) a una altitud media de 2250 msnm . En CdMx, cada vez son más frecuentes los problemas de inundación en la época de lluvia. Estas pueden deberse a eventos de intensa precipitación que saturan la red de drenaje. Así mismo, estos eventos extremos no se llegan a registrar en toda la CdMx, dado que hay mayor ocurrencia de eventos extremos en ciertas zonas que en otras, perjudicando así, a la economía y la sociedad en general.

1.1. Antecedentes

La precipitación en Ciudad de México varía dependiendo de la altitud registrándose para la zona noreste $400 - 550\text{ mm}$ anuales en una altitud mínima de 2227 msnm (considerando las estaciones del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, SACMEX), hasta unos $700 - 1200\text{ mm}$ anuales en la zona suroeste situándose en una altitud máxima de 3298 msnm . Esto marca un gradiente de 1071 m para 800 mm anuales de

precipitación (para su mínimo y máximo). Estudios previos nos indican que se ha observado incremento en las precipitaciones extremas inducidos por la gran urbanización (Jauregui & Romales, 1996; Jáuregui, 2000), con una mayor ocurrencia por la tarde (Jauregui & Romales, 1996; Magaña, Pérez & Méndez, 2003). Otros autores señalan que estos cambios de la precipitación en Ciudad de México pueden ser debido a la isla de calor urbana (Jauregui & Romales, 1996; Ochoa, Quintanar, Raga & Baumgardner, 2015)

Dado lo anterior, es debido tener una mayor exploración a diferentes métodos que ahonden en la descripción de la precipitación.

Este estudio toma métodos que se centran en la intermitencia de la lluvia. Donde, la intermitencia de la lluvia en el dominio del tiempo se usa para indicar la distribución desigual en el espacio y el tiempo de cantidades a pequeña escala, como las variaciones en la tasa de disipación de energía cinética turbulenta. Es un concepto que se usa a menudo para referirse a dos aspectos diversos de la variabilidad: la alternancia de períodos secos y húmedos, identificados a través de la construcción de series binarias, que forman el llamado soporte de la medida (Kundu & Siddani, 2011; Schleiss, Jaffrain & Berne, 2011; Verrier, Mallet & Barthès, 2011); y las variaciones repentinas de la intensidad de la lluvia que se producen en el soporte (Deidda, 2000; Deidda, Badas & Piga, 2004; Deidda, Badas & Piga, 2006; Lovejoy & Schertzer, 1990; Molini, Katul & Porporato, 2009; Rigby & Porporato, 2010; Venugopal, Foufoula-Georgiou & Sapozhnikov, 1999). La intermitencia de la precipitación puede atribuirse a dos componentes: la variabilidad del soporte y, para un soporte dado, las fluctuaciones de las amplitudes de la intensidad de la lluvia (Langousis & Veneziano, 2007; Veneziano & Langousis, 2005; Veneziano, Langousis & Furcolo, 2006; Veneziano, Lepore, Langousis & Furcolo, 2007).

Para este proyecto, se han utilizado las técnicas originalmente adoptadas para examinar la turbulencia escalar, incluido el análisis espectral (Rebora, Ferraris, von Hardenberg & Provenzale, 2006), el análisis de invarianza de escala o multifractalidad (Veneziano

et al., 2006) y el análisis de exponentes de intermitencia (Bershadskii, Niemela, Praskovsky & Sreenivasan, 2004; Molini et al., 2009). La aplicación de tales herramientas ha revelado la existencia de diferentes regímenes de escala, es decir, intervalos de tiempo en los que las propiedades estadísticas de la lluvia pueden expresarse a través de escalas mediante relaciones de leyes de potencia (Deidda, Benzi & Siccardi, 1999; Fraedrich & Larnder, 1993; Verrier et al., 2011).

1.2. Objetivos

Dicho esto, se procederá a describir el comportamiento del patrón de precipitación extrema horaria para la CdMx. El cual, está rodeado al sur, este y oeste por grandes relieves (ver figura 1.1). Dicha orografía hace que la precipitación en la zona tenga un patrón determinado con mayor precipitación en la zona oeste. También se hará un análisis con métodos de potencias para obtener los regímenes de escala que corresponden a CdMx, con los datos de precipitación cada 10 *min*, y se analizarán los patrones espaciales de precipitación con dichos métodos.

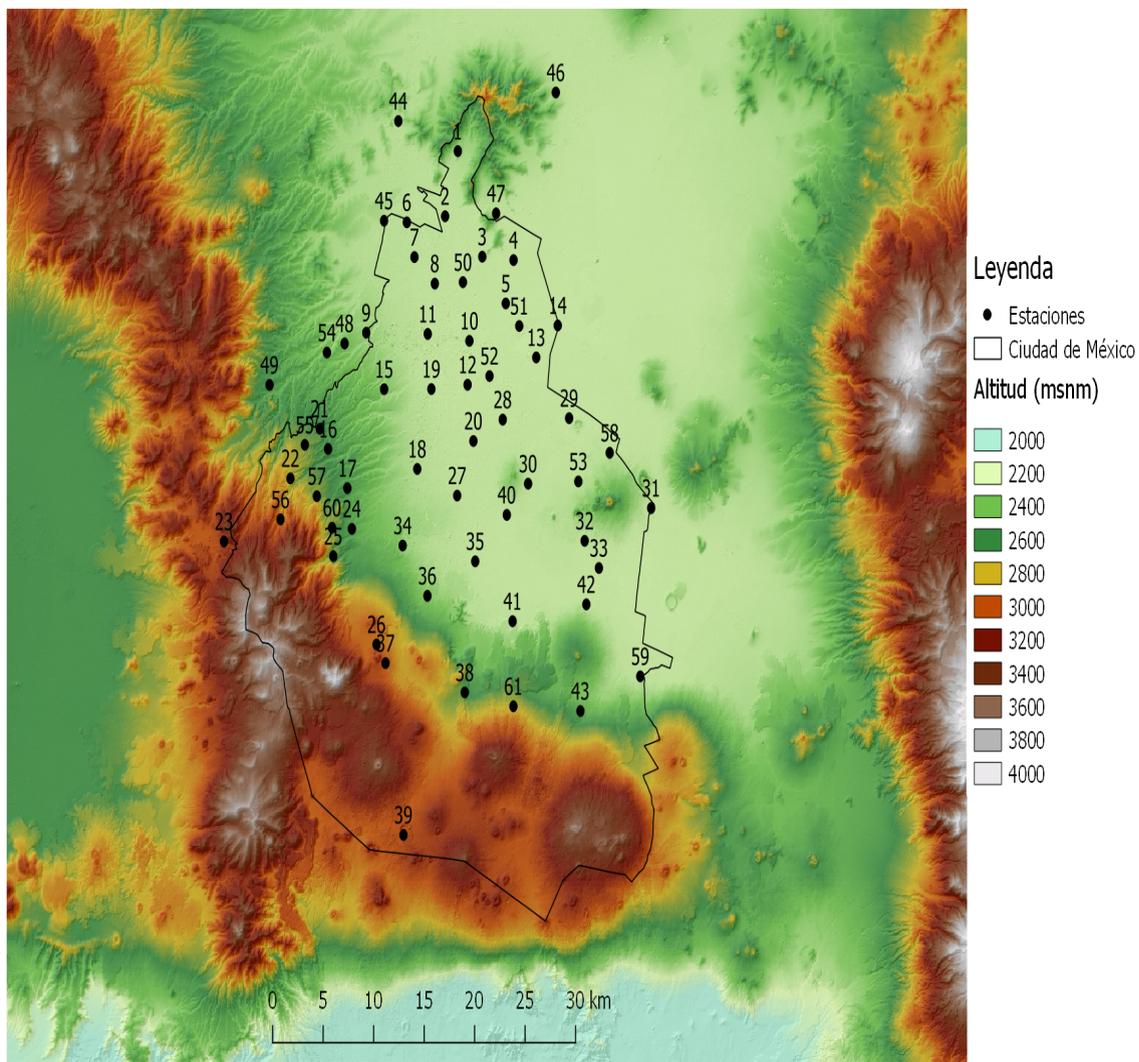


FIGURA 1.1: Mapa de orografía y ubicación de las estaciones de SACMEX.

Capítulo 2

Métodos

2.1. Datos

Para este trabajo se usaron los datos de precipitación de los pluviómetros del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), que proporcionó los datos crudos (.plu) de precipitación correspondientes al periodo de 1993 – 2017. Se utilizaron 61 estaciones automáticas distribuidas en la Cdmx incluyendo 9 que están en las inmediaciones de la Ciudad de México pero que forman parte de la red de SACMEX, como se aprecia en la figura 1.1, la geolocalización de las estaciones se puede consultar en el cuadro del apéndice A.1.

Las estaciones de SACMEX tienen un registrador de eventos de la marca *WeatherMeasure P521*, dicho registrador de eventos recibe la señal de un pluviómetro de balancín que tiene una sensibilidad y una resolución de $0.01 \text{ in} = 0.254 \text{ mm}$. Los eventos registrados se mandan a la estación automática central *PLUS*.

PLUS es el nombre del Programa Maestro de Supervisión de la Red Pluviométrica de Radioenlace. Es un sistema de información de lluvias en tiempo real de la Ciudad de México y que al mismo tiempo permite supervisar el funcionamiento de la red de

estaciones pluviométricas de la Ciudad de México. Este programa recibe y almacena los mensajes transmitidos de cada estación pluviométrica, obteniéndose unos datos crudos que informan sobre la estación, número de eventos, fecha y hora (PLUS, 1991).

A estos archivos se le realizó un pre-procesamiento en el lenguaje de programación *R* para obtener la precipitación horaria y cada 10 *min*.

A dicho pre-procesamiento se le agregaron unas restricciones, según el manual de *PLUS* (PLUS, 1991), que consistía en:

- Cada día dura de las 6 A.M. de ese día hasta las 6 A.M del día siguiente.
- Cada evento es un acumulado del anterior, el cual se reinicia cada día.
- La diferencia de tiempo con el siguiente evento tiene que ser menor a 16 h.
- La diferencia de eventos contiguos debe de ser menor a 40.
- Cada evento se debe de multiplicar por 0.254 para obtener la precipitación en mm.

Se dividió la CdMx como se muestra en la figura 2.1, para observar las tendencias que pueda haber de acuerdo a cada zona.

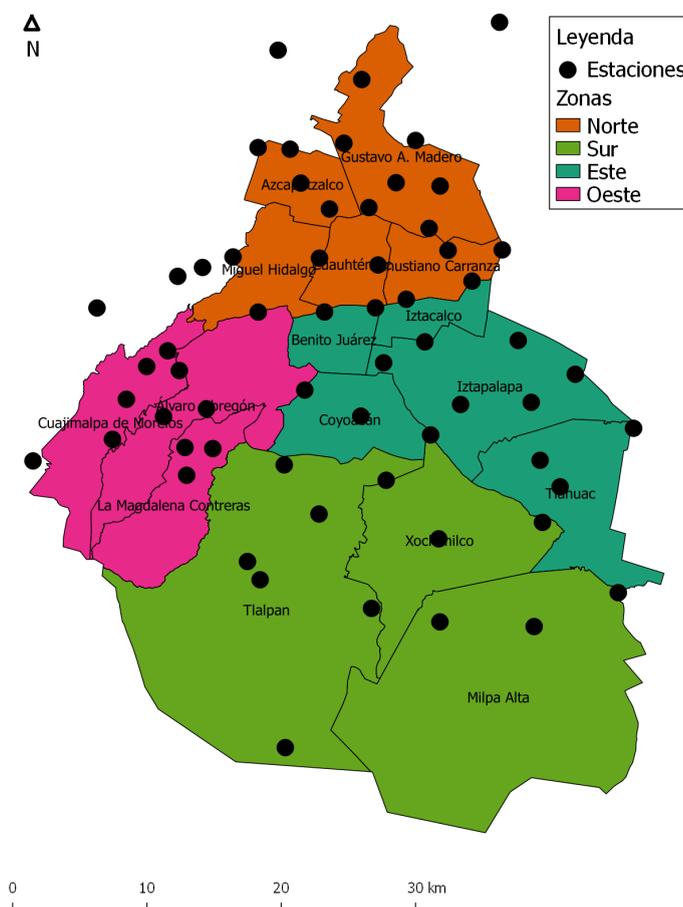


FIGURA 2.1: División cardinal de la Ciudad de México. Los puntos indican la localización de las estaciones de radioenlace.

2.2. Procedimiento

El análisis de extremos fue hecho con datos de las intensidades de precipitación horaria que se procesaron a través de los datos crudos de SACMEX, utilizándose las 61 estaciones. Por otro lado, el análisis de los métodos de potencias se realizó con la serie temporal de precipitación de cada 10 *min*, tomándose la intensidad de precipitación en ese intervalo. Para cada modelo se subdividió en $T = 10 \cdot 2^{13}$ *min*, que esto es aproximadamente $T \approx 56$ *dias*. Dado esto, se subdividió toda la serie temporal en

fragmentos de 56 *días* obteniéndose 160 divisiones en la serie completa de 25 años. A esta serie se le refiere como serie completa (FS, por sus siglas en inglés)

También se trabajó con la serie binaria (BS, por sus siglas en inglés) la cual se obtiene aplicando la ecuación de la aproximación telegráfica $T(t)$, ec. 2.2. Esta aproximación se obtiene mediante los datos medidos de precipitación fluctuando en 0 y 1, dándonos así una serie binaria, Bershadskii et al., 2004.

$$T(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Theta(t)}{|\Theta(t)|} + 1 \right) \quad (2.1)$$

donde Θ sera el valor medido de la precipitación de la serie original. Dado esto para valores de precipitación mayores a 0 obtendremos 1, y cuando hay precipitación nula se deja en 0. De la misma manera la serie binaria se subdivide en fragmentos de 56 *días*, obteniéndose, también, 160 divisiones de la serie temporal completa. Esta serie binaria sólo se aplica a los métodos espectral y de intermitencia.

En los resultados donde se presentan mapas, la interpolación espacial está hecha mediante interpolación lineal usando una función del lenguaje R .

2.2.1. Extremos

El criterio que se tomó para definir un evento de precipitación extrema fue aquellos datos que sobrepasaran el umbral de la precipitación del percentil 90 de la serie de datos horaria de todas las 61 estaciones combinadas, el cual para la serie de datos es $P_{90} = 4.318 \text{ mm h}^{-1}$. Como dato adicional los percentiles 95 y 99 de la serie fueron $P_{95} = 7.112 \text{ mm h}^{-1}$, $P_{99} = 15.748 \text{ mm h}^{-1}$, respectivamente. Anteriormente, en CdMx, se ha utilizado como precipitación extrema aquellos eventos que son mayores a 20 mm h^{-1} (Jauregui & Romales, 1996, y los valores que sobrepasen el umbral de

10% del área de probabilidad en el extremo derecho de la función de densidad de probabilidad Gamma Magaña et al., 2003). Según el IPCC, 2019, se considera evento extremo aquellos que sobrepasan el percentil 10 o 90 de una función de densidad de probabilidad estimada a partir de las observaciones. Entonces, aquella precipitación mayor a $P_{90} = 4.318 \text{ mm h}^{-1}$ se considerara un evento extremo para este trabajo.

Aunque sea un único umbral de precipitación extrema para toda la CdMx, es pertinente considerar sólo uno, ya que a nivel estructural no se cuenta con alguna ventaja que mitigue el impacto de una lluvia extrema de un sector a otro de la ciudad. Aún así, se puede perder variabilidad del umbral con respecto a la zona en la que se encuentre, ya que la zona sur y oeste recibe mayor precipitación que en la zona este.

El análisis de extremos fue hecho con las intensidades de precipitación horaria que se procesaron a través de los datos crudos de SACMEX, utilizandose las 61 estaciones.

Adicionalmente a lo anterior a los datos de acumulado de precipitación que se obtuvieron se le aplicaron tres métodos, espectral, multifractal e intermitencia.

2.2.2. Método espectral

Para este método, se estimó la densidad espectral mediante el calculo del periodograma usando una transformada rápida de Fourier.

Dado este procedimiento se obtiene una relación de potencias como la ecuación 2.2. De esta forma se encuentran los regímenes de escala, según Mascaro, Deidda & Hellies, 2013:

$$S(f) \sim f^{-\alpha} \quad (2.2)$$

donde f es la frecuencia de cada evento, que es igual a $f = 2^j$ con $j = 0, \dots, M$, donde M es un número entero y α es el coeficiente espectral. Mediante la ecuación 2.2 se

graficó en un plano log - log para encontrar la pendiente mediante una regresión lineal y así obtener el coeficiente espectral, α .

Dado el análisis del método espectral se encuentran valores en un rango determinado por la serie, dichos valores nos pueden describir algunos sucesos, los cuales a un valor de α alto nos indica un régimen típico de tormentas individuales; Los exponentes espectrales más altos implican una disminución más rápida de la energía del espectro de escalas temporales más grandes a menores, lo que indica la existencia de células individuales de precipitación localizadas en el tiempo. Por otro lado, un valor de α bajo nos indica un régimen típico de los sistemas frontales; La energía disminuye con una menor tasa de escalas de tiempo de más grandes a menores, consistente con la presencia de sistemas de precipitación estratiformes, Mascaro et al., 2013.

2.2.3. Método de análisis de invarianza de escala o multifractal

En este método se utilizó la intensidad de precipitación cada 10 min, aplicando el método a los 160 eventos de $T = 56$ días, y encontrando el promedio para cada τ con esto se procesó mediante la formula siguiente (la cual sólo es aplicable para la serie completa o diferencia de los otros dos métodos):

$$S_q(\tau) = \frac{1}{N(\tau)} \sum_{k=1}^{N(\tau)} [i_{\tau,k}]^q \quad (2.3)$$

donde $i_{\tau,k}$ es la intensidad de precipitación en un espacio de tiempo τ , τ es la escala de paso de tiempo igual a $\tau = \tau_0 \cdot 2^j$, con $j = 0, \dots, M$, $\tau_0 = 10$ min y $M = 13$. $N(\tau) = T/\tau$ es el número de pasos no sobrepuestos de τ incluidos en T , y q es el momento considerado. Para este estudio se tomó el valor $q = 3$, dado que, según Deidda et al., 1999, es el valor más pequeño del momento que a partir de él se puede distinguir el punto de ruptura.

Una vez que se obtuvo la invarianza multifractal, se utiliza una ley de potencia para encontrar los regímenes de escala característicos, de la siguiente manera:

$$S_q \sim \tau^{-K(q)} \quad (2.4)$$

Con las ecuaciones 2.3 y 2.4 se graficó en un plano log - log para encontrar la pendiente mediante una regresión lineal y así obtener el coeficiente multifractal, $K(q)$.

Valores de $K(q)$ alto nos indica un régimen típico de sistemas de tormentas. Esto se puede ver cuando la señal es más variable e intermitente y con presencia de picos irregulares. Estas variaciones repentinas se suavizan a medida que aumenta la escala de agregación. Los valores de $K(q)$ bajos nos indican un régimen típico de los sistemas frontales. Esto se puede ver en señales suaves con pequeñas fluctuaciones en la escala de agregación. En el caso de tener un valor de $K(q)$ intermedia esto nos indica un régimen de transición, Mascaro et al., 2013.

2.2.4. Método de intermitencia

Como en el método de análisis invariante de escala multifractal, la serie se divide en pasos no sobrepuestos de τ , utilizándose la serie completa se procedió a calcular el exponente de intermitencia mediante (Mascaro et al., 2013, Bershadskii et al., 2004):

$$\chi_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{N(\tau)} \left(\left| \frac{i_{\tau,k} - i_{\tau,k-1}}{\tau} \right|^2 \tau \right) \quad (2.5)$$

donde $i_{\tau,k}$ es la intensidad de precipitación, τ es la escala de paso de tiempo que es $\tau = \tau_0 \cdot 2^j$ ($j = 0, \dots, M$), $N(\tau)$ es el número de pasos no sobrepuestos de τ incluyendo T .

De la misma manera se procedió a analizarlo con una ley de potencia de la manera:

$$\frac{\langle \chi_\tau^2 \rangle}{\langle \chi_\tau \rangle^2} \sim \tau^{-\mu_2} \quad (2.6)$$

Con las ecuaciones 2.5 y 2.6 se graficó en un plano log - log para encontrar la pendiente mediante una regresión lineal y así obtener el coeficiente de intermitencia, μ_2 .

Un valor de μ_{FS} bajo nos indica un régimen de tormentas individuales. Lo que nos indica que las variaciones de las intensidades de la lluvia suavizan la intermitencia del soporte. Por otro lado un valor de μ_{FS} alto nos indica un régimen típico de sistemas frontales. Indicándonos que la señal es mas variable e intermitente.

A diferencia del método espectral, el método de intermitencia en BS tiene un significado diferente al de FS. Así, valores de μ_{BS} alto son los que nos indican un régimen típico de tormentas convectivas. Indicándonos una baja agrupación y alta aleatoriedad en el proceso, donde las intensidades de lluvia tienen el efecto de amplificar las fluctuaciones del soporte. Por otro lado, un valor μ_{BS} bajo nos indica un régimen típico de sistemas frontales. Denotándonos un mayor agrupamiento de procesos secos a húmedos (Mascaro et al., 2013; Molini et al., 2009).

Capítulo 3

Análisis y Resultados

En esta sección se abordaran los resultados obtenidos con los métodos descritos en la sección anterior. Primero se mostrara el análisis de los eventos de precipitación extrema, analizando los patrones de lluvia de la base de datos horaria. También se analiza la comparación de la precipitación acumulada en el periodo estudiado (1993 – 2017). Seguido de esto se presentan los resultados obtenidos con las métricas espectral, invarianza de escala e intermitencia, con la base de datos cada 10 *min* en FS y BS. En el cual se muestran los mapas de contornos y el significado que nos da cada uno de estos.

3.1. Precipitación en Ciudad de México

En la figura 3.1 se puede apreciar la precipitación acumulada mensual media para el periodo de 1993 – 2017. Donde en promedio, se ve que la temporada de lluvia abarca los meses de mayo a octubre, con un gradiente de precipitación de este a oeste. Concentrándose la mayor precipitación hacia Sierra de las cruces al poniente de la Ciudad. Esto también se puede destacar en la figura 3.2, donde se muestra la precipitación mensual acumulada promediada para las 61 estaciones en cuestión. Aquí se aprecian

la distinción de la temporada húmeda y seca, con los meses más húmedos de junio a septiembre, siendo los meses de transición mayo y octubre. En otros estudios como los de Jauregui & Romales, 1996 y Magaña et al., 2003, se menciona que la temporada húmeda abarca de mayo a octubre teniendo una precipitación anual entre 700 y 1200 *mm*, suscitándose la mayor ocurrencia de eventos extremos después de las 16 *h* LT. Jauregui & Romales, 1996, remarca que en las décadas de 1960 – 1969 y 1980 – 1989 el 80 % de la precipitación intensa ocurría entre las 12 – 18 *h* LT. También se describe un incremento en la tendencia de precipitación para el área oeste noroeste de la CdMx, más específico, para la estación de Tacubaya del estudio de Jáuregui, 2000. También, en Magaña et al., 2003, indican que hay mayor probabilidad de que ocurran tormentas severas ($> 20 \text{ mm/h}$) después de las 16 LT.

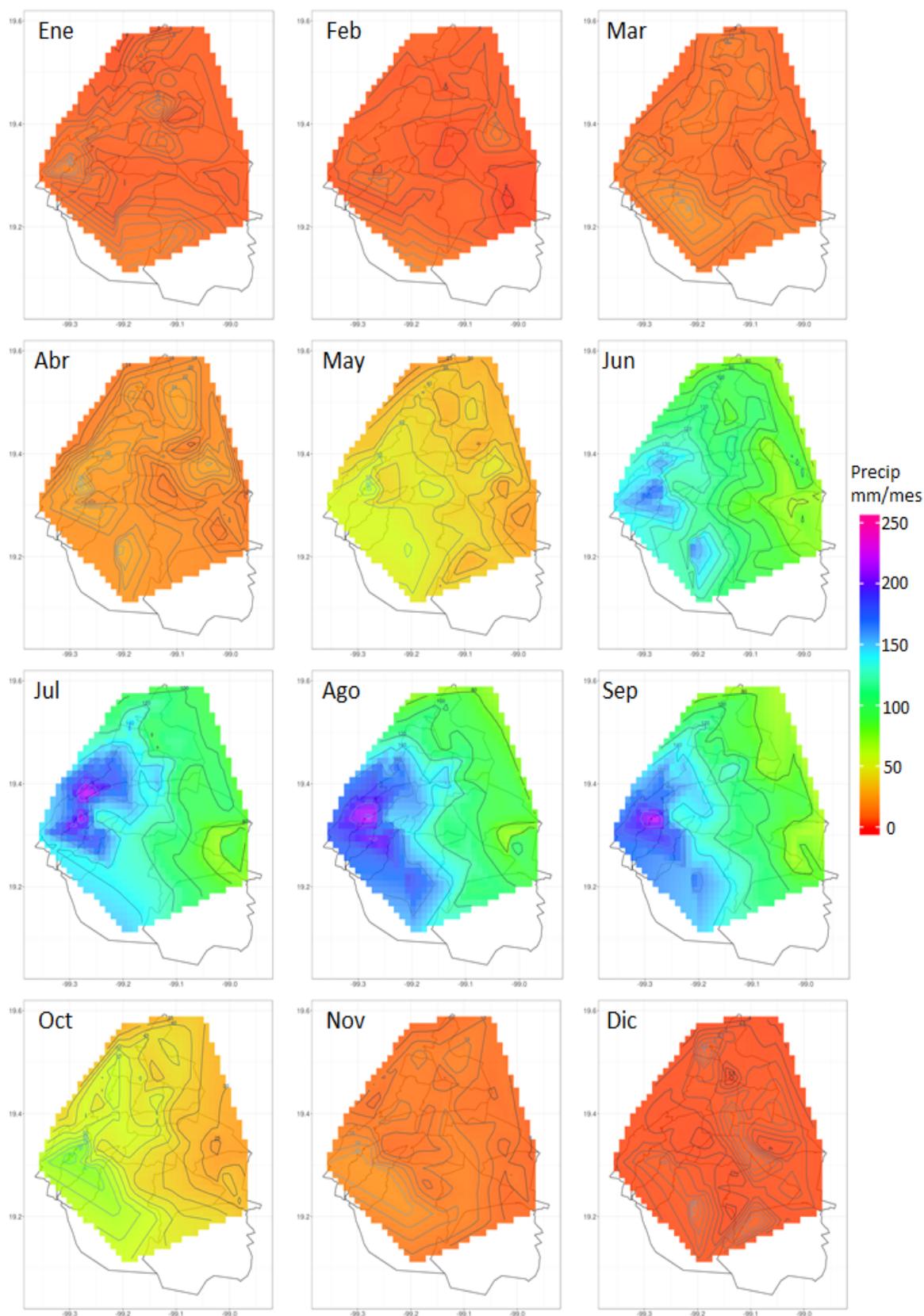


FIGURA 3.1: Precipitación media mensual de 1993 – 2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.

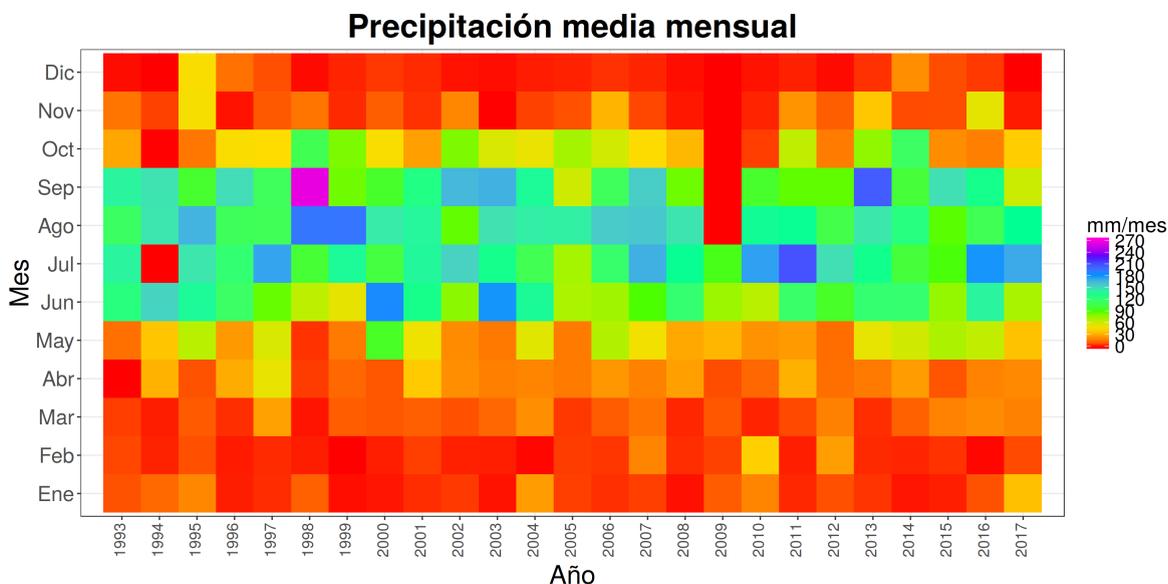


FIGURA 3.2: Precipitación acumulada mensual promedio para las 61 estaciones.

3.2. Análisis de precipitación extrema

De acuerdo al estudio de precipitación de la Ciudad de México de Jauregui & Romales, 1996, muestra una tendencia ascendente en la estación de Tacubaya para la precipitación durante el periodo de 1941 – 1985. En este trabajo también se puede observar una tendencia ascendente en la precipitación para el periodo de 1993 – 2017 en la estación 15, que es la más cercana a la estación de Tacubaya (ver figura 3.3), aun que tiene una r^2 muy baja para la regresión lineal, lo que se muestra es que no se ha invertido la tendencia, aún sigue siendo una tendencia positiva.

En la figura 3.4 se observa el ciclo diurno del número de eventos extremos de precipitación (P_{90}) para el total de las 61 estaciones. En el cuál el 50% de los eventos se presentan entre las 13 – 19 h , esto se puede ver en la gráfica de caja y bigotes que se sitúa debajo de la gráfica de barras.

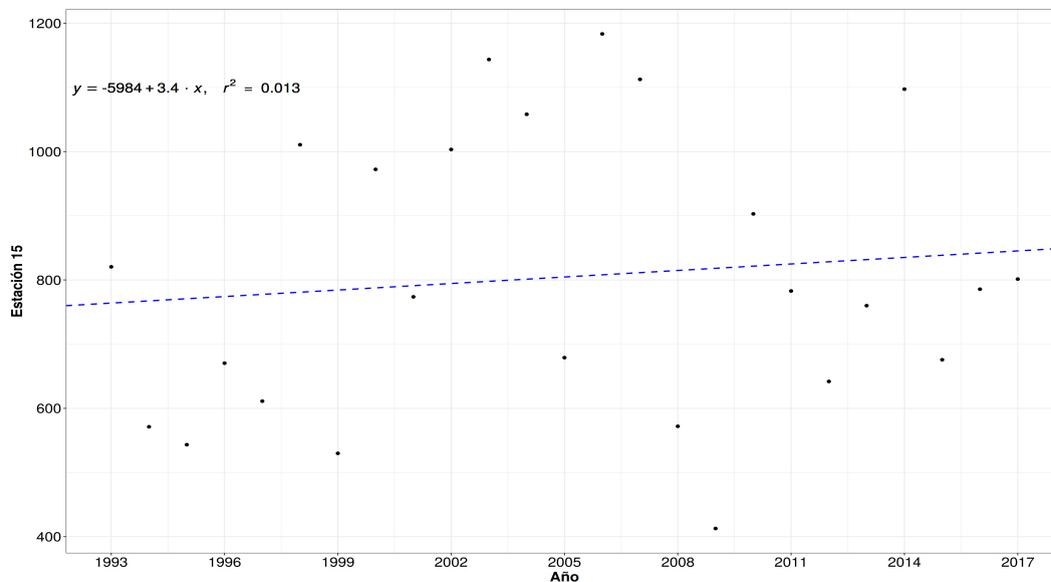


FIGURA 3.3: Serie temporal de la precipitación acumulada de la estación 15, con una regresión lineal.

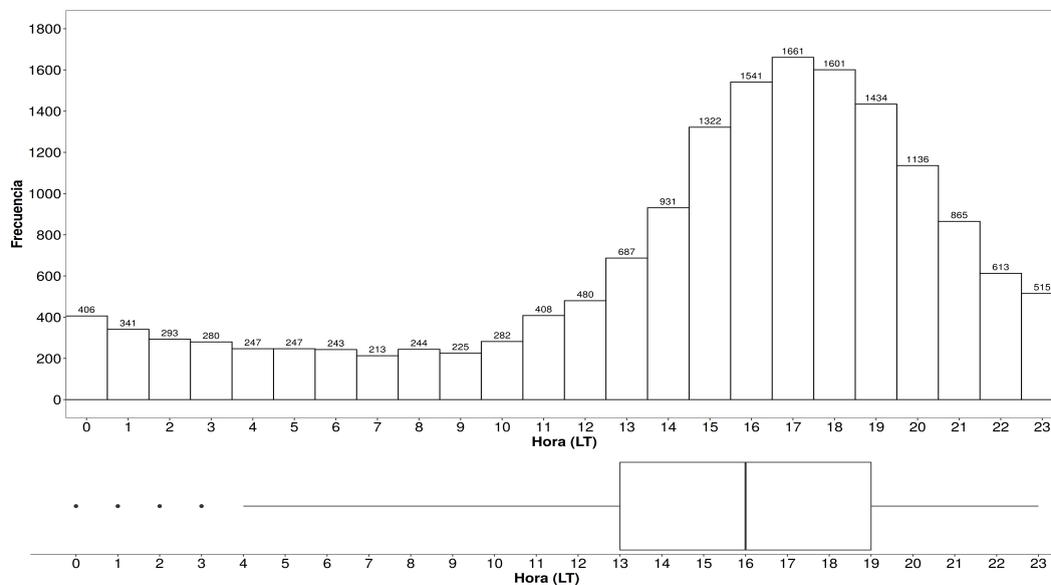


FIGURA 3.4: Ciclo diario del número de eventos extremos de precipitación, para la suma de todas las estaciones. Debajo, diagrama de caja del número de eventos extremos de precipitación.

Teniendo en cuenta lo anterior ahora observemos la figura (3.5), que es una climatología de la serie de datos completa, de 1993 a 2017, obtenida con los datos horarios procesados de SACMEX. En el cual el menor valor de 371.5 mm/año se sitúa en la parte este, y el mayor valor de 1080.13 mm/año se sitúa en el oeste. Así, observamos un gradiente de precipitación de este a oeste.

Analizando el acumulado de precipitación año con año, ver figura (3.6), que tiene una escala de 0 a 1500 mm/año, donde los colores rojos representan menor acumulado de precipitación y los colores azules a morados es un mayor acumulado de precipitación. De abajo hacia arriba se muestran: En la primera columna los años de 1993 – 1999, en la segunda columna los años de 2000 – 2006, en la tercera columna los años de 2007 – 2013, y en la cuarta columna los años de 2014 – 2017. Aquí se puede ver como hay años más secos que otros, como por ejemplo los años 1994, 2005, 2009, 2012 y 2015. Aunque 2009 tiene datos incompletos. También hay años que se ven más húmedos que otros, como por ejemplo los años 1995, 1998, 2003, 2007, 2013 y 2016.

En la figura 3.7, se observa el acumulado de precipitación media cada 5 años años de la serie completa: 1993 – 1997, 1998 – 2002, 2003 – 2007, 2008 – 2012 y 2013 – 2017. Se observa una mayor precipitación en la zona oeste, y una menor precipitación en la zona este, como en la climatología del lugar. También es destacable notar que tras cada lustro se ve un incremento en el acumulado de precipitación hacia las zonas suroeste y noroeste de la Ciudad de México. En los contornos de precipitación se mantiene que la zona con menor acumulado de precipitación es la zona este, nada más que para los últimos años de la serie se observa que hay una incursión desde el este de la Ciudad de México de la precipitación acumulada de menores cantidades. Así como también se ve una disminución de precipitación acumulada para la zona oeste pero un incremento para el área noroeste.

La figura 3.8 nos muestra la anomalía de precipitación cada 5 años de la serie completa: 1993–1997, 1998–2002, 2003–2007, 2008–2012 y 2013–2017. Se aprecia ver que en la zona oeste hay una anomalía positiva para el segundo lustro (1998 – 2002), mismo que

para el cuarto lustro (2008 – 2017) es una anomalía negativa. También se ve como en el último lustro hay una anomalía positiva en el área centro y noreste, coincidiendo con el aumento de precipitación que se observó en la gráfica anterior (figura 3.7). También hay una anomalía negativa por el borde oeste y suroeste de la Ciudad de México.

Se observa que en promedio de los 25 años de estudio se registró más precipitación extrema en el área oeste, seguida del área sur, norte y este, descendientemente. También podemos ver el acumulado de precipitación extrema en la figura 3.9 el mayor acumulado de precipitación es en el área oeste, área en la cual hubo más de 50 eventos extremos en promedio por año para este periodo, de acuerdo a la figura 3.10.

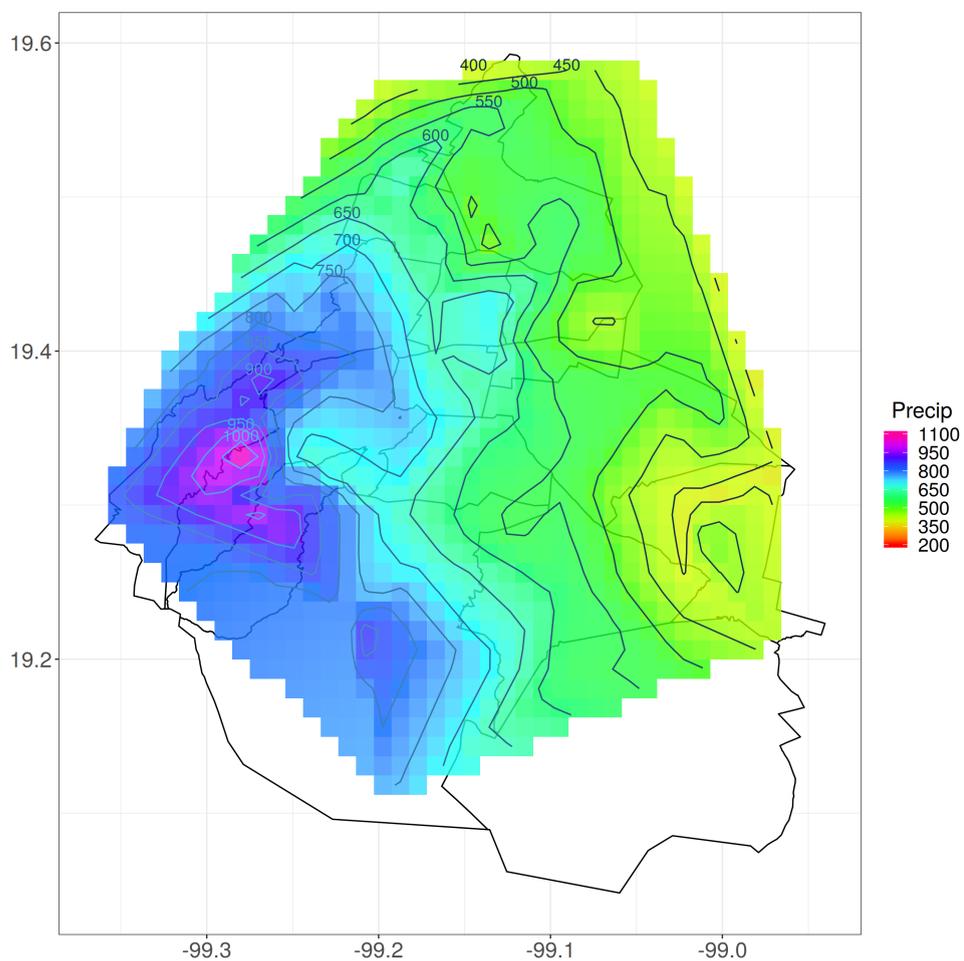


FIGURA 3.5: Climatología de precipitación de 1993 – 2017, con los datos de SACM. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.

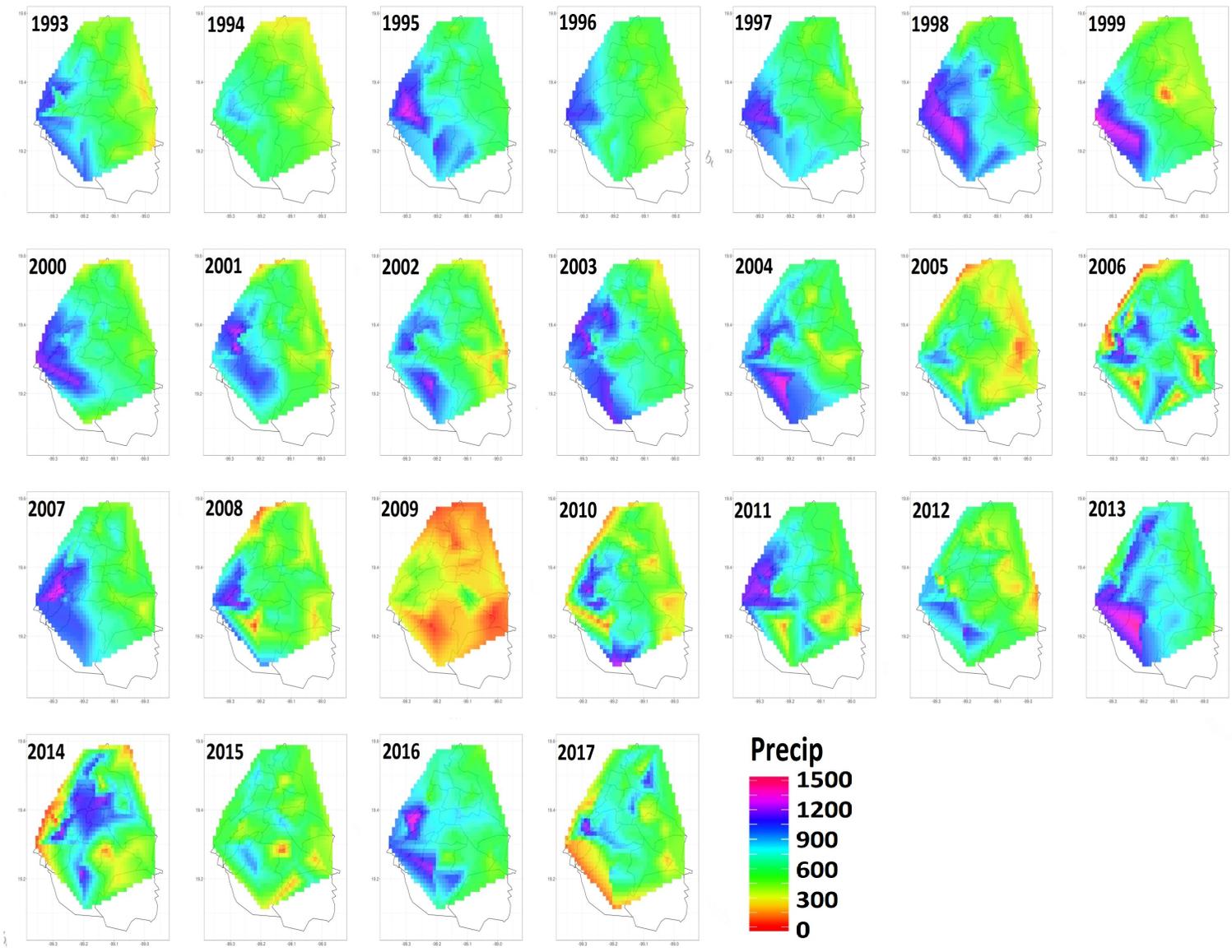
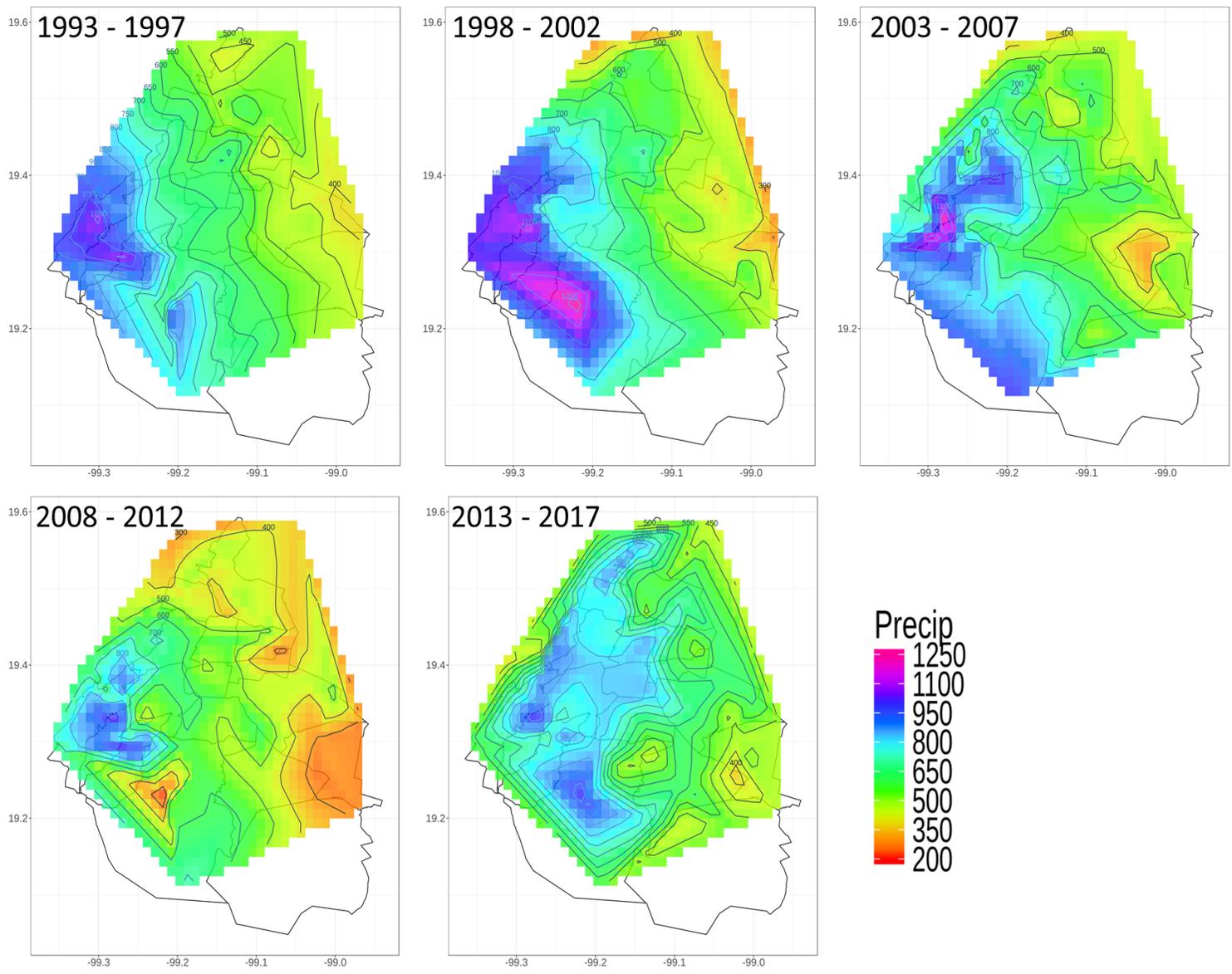


FIGURA 3.6: Acumulado anual de precipitación para los años de 1993 – 2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.

FIGURA 3.7: Acumulado medio de precipitación cada 5 años. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.



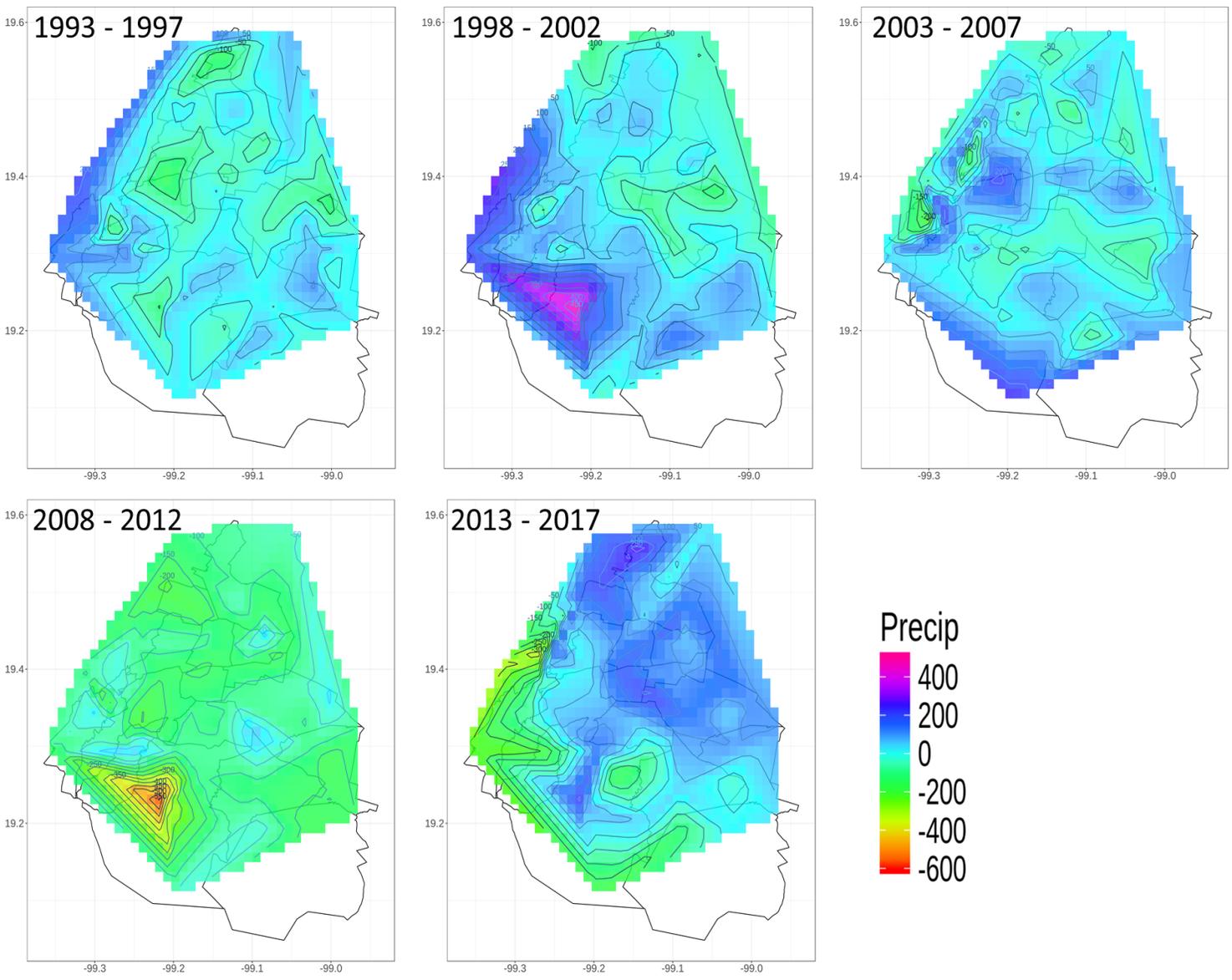


FIGURA 3.8: Anomalías de precipitación media cada 5 años. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isolinéas en anomalías de precipitación.

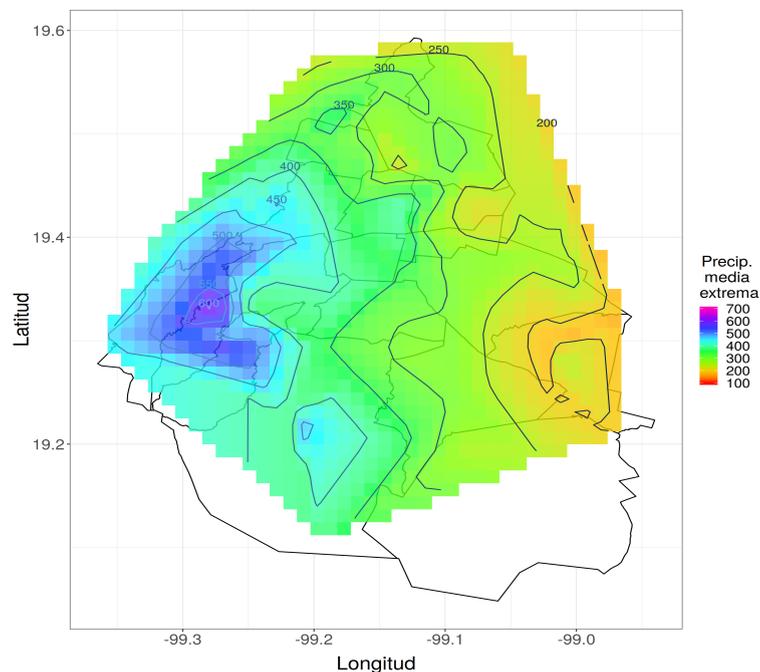


FIGURA 3.9: Acumulado medio de precipitación extrema horaria de 1993-2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isoyetas.

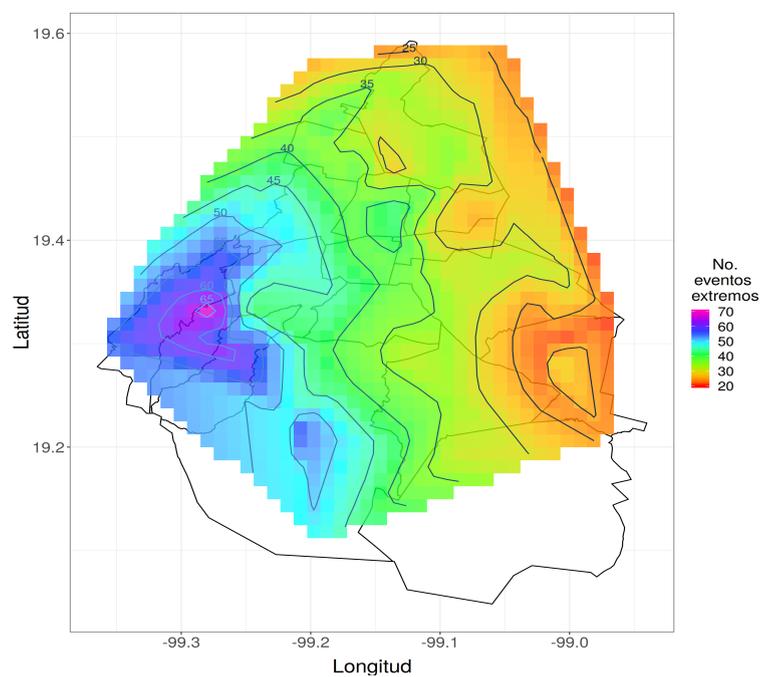


FIGURA 3.10: Número medio de eventos extremos horarios de 1993-2017. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isóneas de número de eventos.

3.3. Métricas y regímenes

Para los regímenes de escala de los espectros de las métricas en un plano log-log (espectral, intermitencia y multifractal, figuras 3.11, 3.12 y 3.13, respectivamente), tenemos que los regímenes de las métricas intermitencia y multifractal son muy parecidos. En el cuadro 3.1 se muestran los regímenes de escala para cada método, incluyendo FS y BS para el método espectral y de intermitencia. Cada una de estas zonas comprendidas, separadas por el punto de ruptura, son el régimen de tormentas, sistemas frontales y transición, en color gris claro, gris y gris oscuro, respectivamente. Cada punto de ruptura nos indica donde acaba un régimen y empieza el siguiente, cada uno teniendo diferente rango dependiendo del método. Aquí se puede notar que la ubicación de los puntos de ruptura cambia con la métrica, dándonos a entender que estos métodos proporcionan información diversa sobre las propiedades de intermitencia de la lluvia.

Se encontraron diferentes puntos de ruptura para cada uno de los regímenes de escala. Para la métrica espectral FS (BS) tenemos que: En el intervalo de 10 min a ~ 1 (1.6) h está dominado por tormentas convectivas o células de precipitación; el intervalo de ~ 1 (1.6) h a ~ 8 (8.5) h es típico de los sistemas frontales; en la porción del espectro a escalas mayores que ~ 8 (8.5) h es característica de una zona de transición.

Para la métrica de intermitencia FS (BS) tenemos que: En el intervalo de 10 min a ~ 1.3 (2.6) h está dominado por tormentas convectivas o células de precipitación; el intervalo de ~ 1.3 (2.6) h a ~ 21.3 (10.6) h es típico de los sistemas frontales; en la porción del espectro a escalas mayores que ~ 21.3 (10.6) h es característica de una zona de transición.

Y por último, para la métrica multifractal tenemos que: En el intervalo de 10 min a ~ 40 min está dominado por tormentas convectivas o células de precipitación; el intervalo de ~ 40 min a ~ 21.3 h es típico de los sistemas frontales; en la porción del espectro a escalas mayores que ~ 21.3 h es característica de una zona de transición.

CUADRO 3.1: Regímenes de escala para cada métrica. Primer zona gris (gris claro): régimen de tormenta; zona gris del medio: régimen de sistemas frontales; tercera zona gris (gris oscuro): régimen de transición.

τ	min	α_{FS}	α_{BS}	$K(3)$	μ_{FS}	μ_{BS}
0	10					
1	20					
2	40			40 min		
3	80	60 min			80 min	
4	160		1.6 h			2.6 h
5	320					
6	640	8 h	8.5 h			10.6 h
7	1280			21.3 h	21.3 h	
8	2560					
9	5120					
10	10240					
11	20480					
12	40960					
13	81920					

Esto lo podemos ver en el cuadro 3.1, donde la zona gris claro representa la zona de tormentas convectivas, la zona gris del medio representa la zona de sistemas frontales y la zona gris oscuro es la zona de transición.

El valor medio de las métricas y su desviación estándar se puede consultar en el cuadro 3.2, según Mascaro et al., 2013, podemos ver que $\sigma(BS) < \sigma(FS)$, esto implica que: si bien las propiedades estadísticas de la intensidad de la lluvia varían significativamente dentro del sitio de estudio; el soporte correspondiente tiene características de intermitencia muy similares en toda la CdMx, y el clima local tiene una influencia mínima

CUADRO 3.2: Media y desviación estándar de las 61 estaciones de cada métrica.

Métrica	Tormenta	SD	Frontal	SD	Transición	SD
α^{FS}	0.9911	0.130	0.4954	0.059	0.1141	0.023
α^{BS}	0.1754	0.047	0.8666	0.044	0.3119	0.028
$K(3)$	0.9349	0.081	1.5684	0.074	1.0056	0.124
μ^{FS}	0.4268	0.225	0.6077	0.403	0.3875	0.070
μ^{BS}	0.4289	0.107	0.3533	0.126	0.2378	0.018

sobre la fragmentación del soporte y un efecto más fuerte sobre la variabilidad de la intensidad de la lluvia.

Según Mascaro et al., 2013, tenemos que para el caso de régimen de sistemas frontales: $\mu_2^{BS} < \mu_2^{FS}$. Esto es que las intensidades de lluvia tienen efecto de amplificar las fluctuaciones del soporte. Esto quiere decir que si hay más precipitación que número de eventos la intensidad de lluvia amplificara la fluctuación de los intervalos húmedos y secos. Y para el régimen de tormentas convectivas $\mu_2^{FS} < \mu_2^{BS}$ las variaciones de la intensidad de lluvia suavizan la intermitencia del soporte, es decir, que cuando hay más eventos que precipitación, la variación de esta suaviza los cambios de los intervalos húmedos y secos.

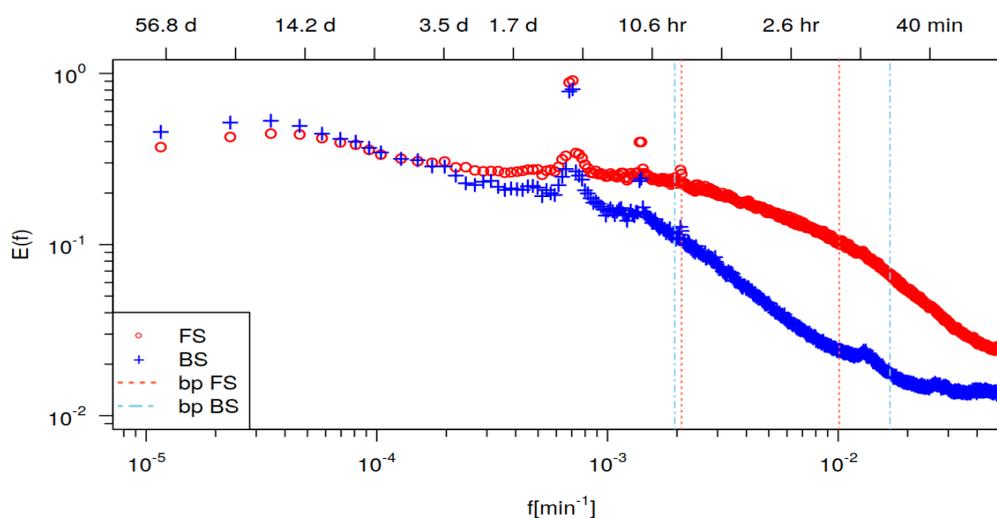


FIGURA 3.11: Regímenes de escala espectral promediado de todas las estaciones. Los círculos rojos representa la serie completa, FS, las cruces azules representa la serie binaria, BS, las líneas discontinuas son los puntos de ruptura, rojo para FS y azul para BS.

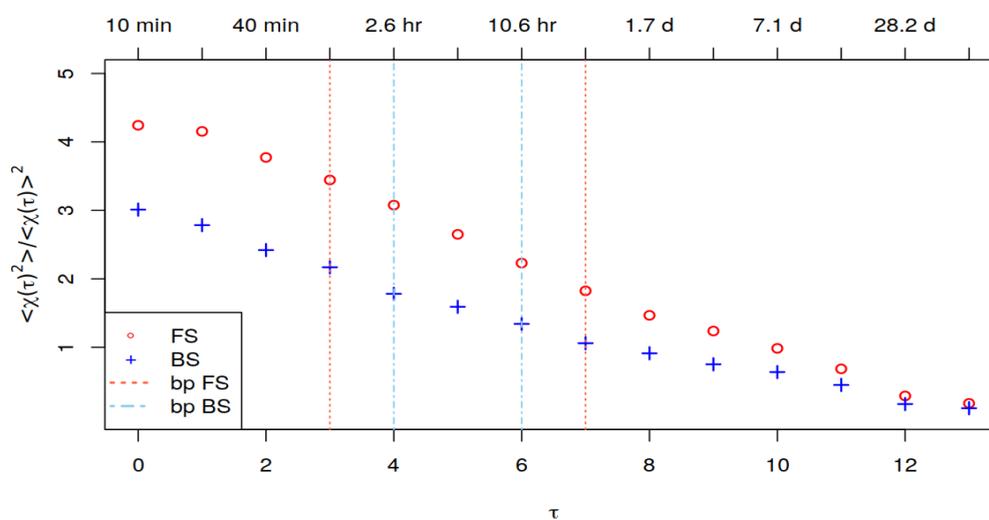


FIGURA 3.12: Regímenes de escala de intermitencia promediado de todas las estaciones. Los círculos rojos representa la serie completa, FS, las cruces azules representa la serie binaria, BS, las líneas discontinuas son los puntos de ruptura, rojo para FS y azul para BS.

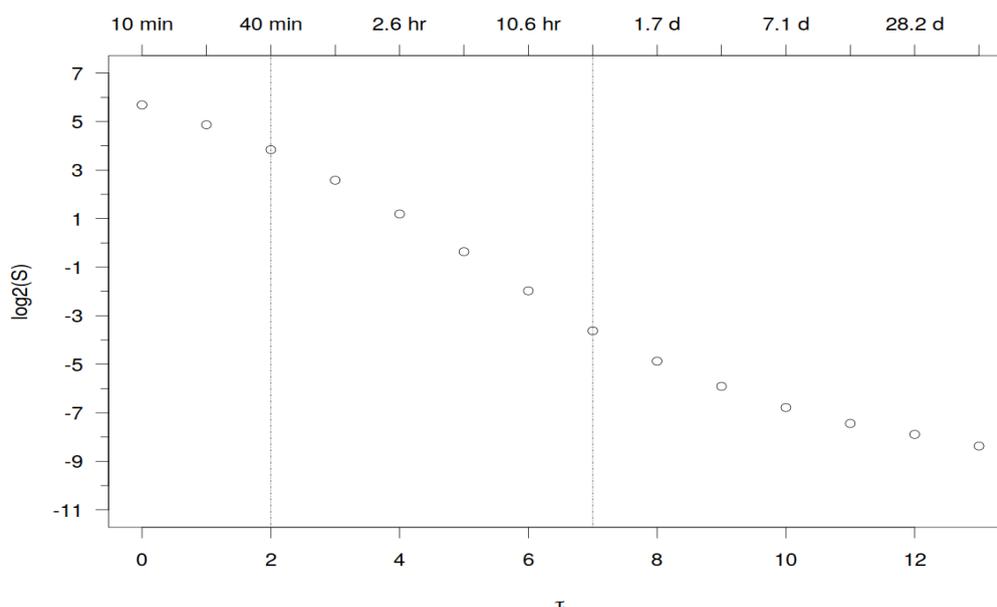


FIGURA 3.13: Regímenes de escala multifractal promediado de todas las estaciones.

En las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 se presentan los regímenes de escala promedio de las 61 estaciones para cada una de las métricas usadas, espectral, intermitencia y multifractal. La figura 3.11 muestran las gráficas de la función de estructura, $E(f)$ contra la frecuencia f , para la serie completa y binaria. Ambos ejes están graficados en $\log - \log$ para poder obtener el valor de la métrica a partir de la pendiente. Las figura 3.12 muestran las gráficas de los regímenes de escala del exponente de intermitencia en un plano $\log - \log$, para la serie completa y binaria. Igualmente, la figura 3.13 nos muestra el régimen de escala del exponente multifractal.

Ahora, analizando los mapas de contornos de la Ciudad de México para cada métrica, en el régimen de sistemas frontales (figuras 3.14, 3.15 y 3.16).

Se ve que para la métrica espectral (figuras 3.14(a) y 3.14(b)), los valores de α altos indican un régimen típico de tormentas individuales; Los exponentes espectrales más altos implican una disminución más rápida de la energía del espectro de escalas temporales más grandes a menores, lo que indica la existencia de células individuales de

precipitación localizadas en el tiempo. En cambio los valores de α bajos nos indican un régimen típico de los sistemas frontales, lo que indica que la energía disminuye con una menor tasa de escalas de tiempo más grandes a menores, consistente con la presencia de sistemas de precipitación estratiformes.

Para la métrica de intermitencia en FS (figura 3.15(a)) los valores más bajos de μ representan un régimen de escala de tormentas convectivas, mientras que valores altos de μ representan un régimen de sistemas frontales. Por otro lado, para la métrica de intermitencia en BS (figura 3.15(b)), valores bajos de μ coinciden con el régimen de sistemas frontales habiendo un mayor agrupamiento de periodos secos a húmedos. Y valores altos de μ coinciden con el régimen de tormentas convectivas, indicándonos baja agrupación y una alta aleatoriedad en el proceso (Purdy, Harris, Austin, Seed & Gray, 2001).

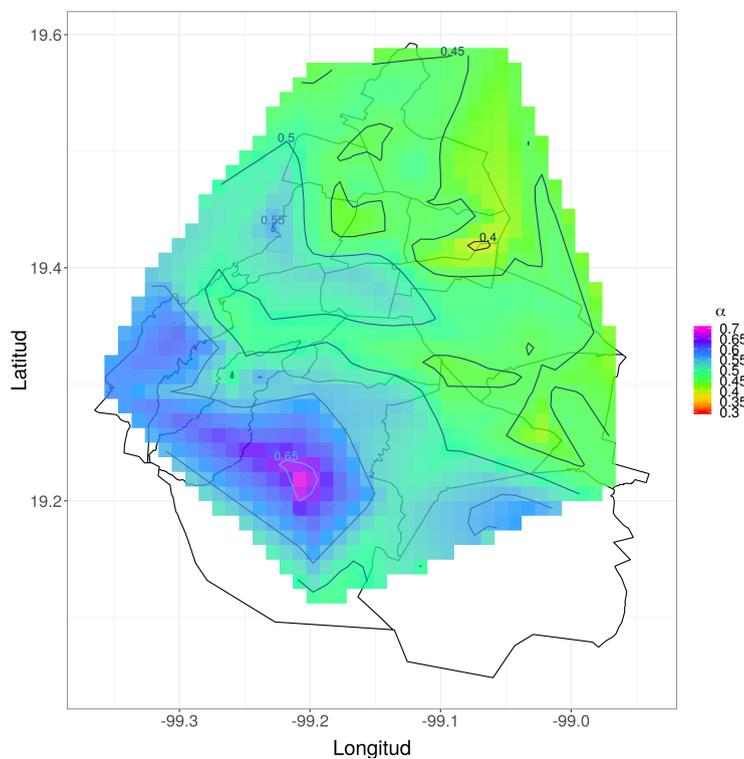
Los valores de $K(3)$ en el régimen de sistemas frontales, se aprecian en la figura 3.16. En los cuales los valores de $K(3)$ altos indica un régimen típico de sistemas frontales, que se refiere cuando la señal es más variable e intermitente, con presencia de picos irregulares, cuando se muestrea a escalas más pequeñas. Estas variaciones repentinas se suavizan a medida que aumenta la escala de agregación. En cambio, valores de $K(3)$ bajos nos indica un régimen típico de los sistemas de tormentas, las cuales se refieren a señales suaves con pequeñas fluctuaciones en las escalas de agregación.

Se observa que los mapas de contornos de la métrica espectral FS y BS (figuras 3.14(a) y 3.14(b)), son similares entre sí, nada más que el mapa en BS muestra más variabilidad que en FS, contando con una correlación de $\rho_{\alpha^{FS}, \alpha^{BS}} = 0.62$. También, según Mascaro et al., 2013, existe una correlación entre las métricas de intermitencia en FS y la métrica multifractal, pero en este estudio no se encontró ninguna correlación significativa, ya que esta resultó ser de $\rho_{K(3), \mu_2^{FS}} = 0.05$.

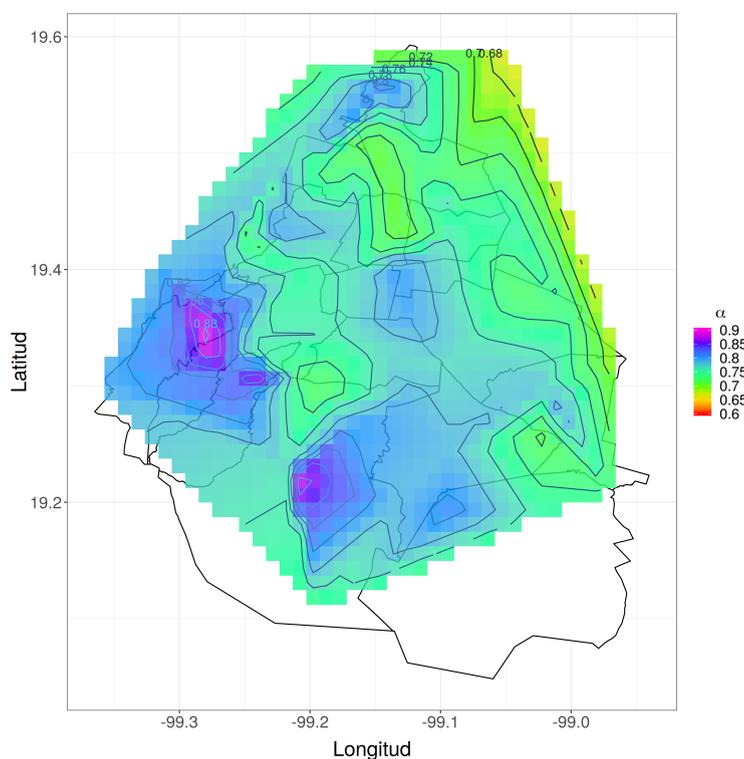
Por otro lado, se relacionan los patrones espaciales de las métricas, figuras 3.14, 3.15 y 3.16, con el promedio de precipitación de la serie de datos, figura 3.5, vemos que la

que más se ajusta es la métrica espectral en BS, figura 3.14(b), con una correlación de $\rho_{Precip.,\alpha^{BS}} = 0.72$ y la métrica espectral en FS, figura 3.14(a), con una correlación de $\rho_{Precip.,\alpha^{FS}} = 0.67$.

Vemos que en las gráficas de las métricas contra la altitud (figuras 3.17, 3.18 y 3.19) existen ciertos comportamientos, según Mascaro et al., 2013: A medida que aumenta la altitud, α^{FS} y α^{BS} aumentan, hay más eventos de precipitación individuales y más puntuales. También, mientras mayor va siendo la altitud decrecen $K(3)$ y μ_2^{FS} .

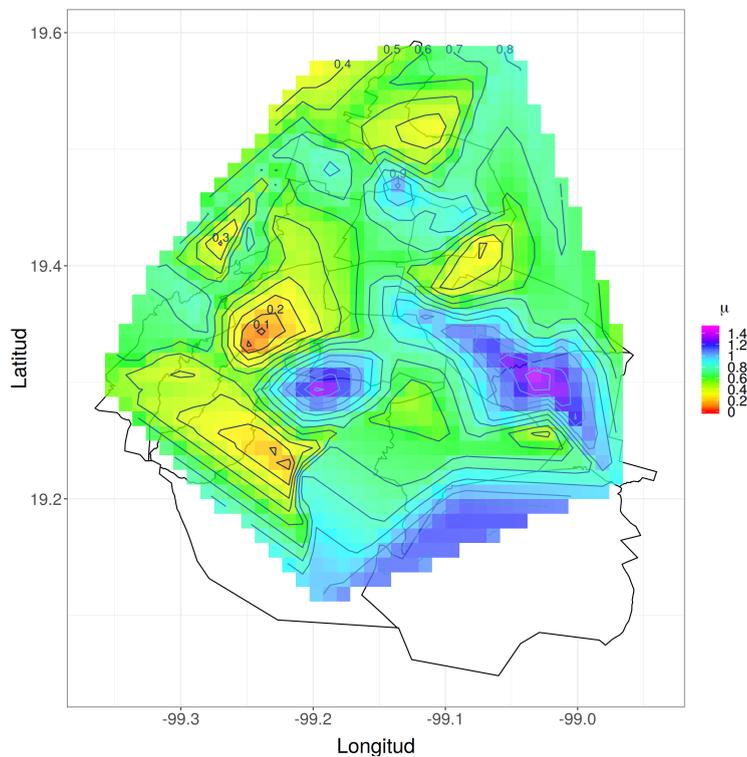


(a) Métrica espectral FS.

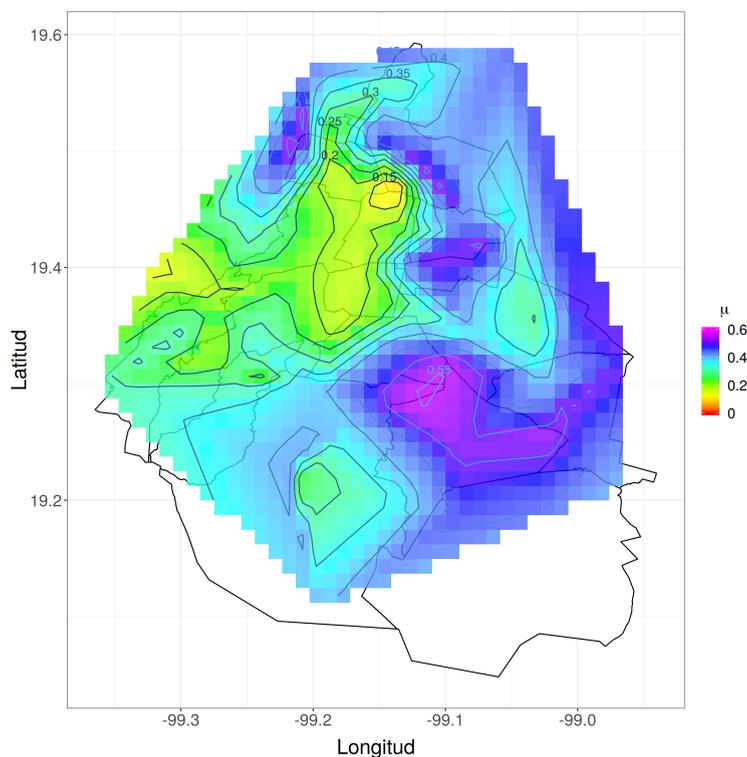


(b) Métrica espectral BS.

FIGURA 3.14: Mapas de contorno para la métrica espectral, promediando los regímenes de tormenta y frontal. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isolíneas de α .



(a) Métrica de intermitencia FS.



(b) Métrica de intermitencia BS.

FIGURA 3.15: Mapas de contorno para la métrica de intermitencia, promediando los regímenes de tormenta y frontal. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isolíneas de μ .

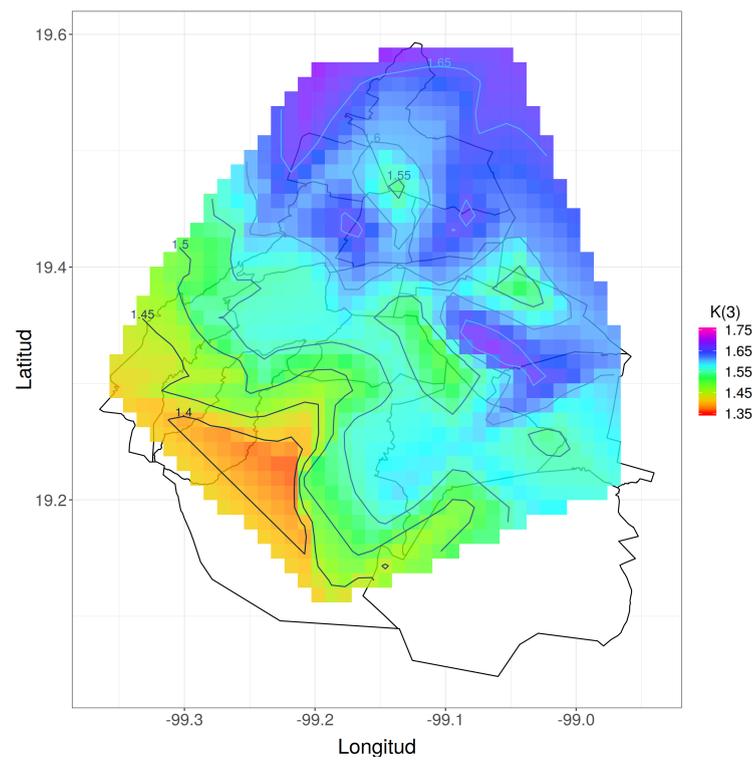
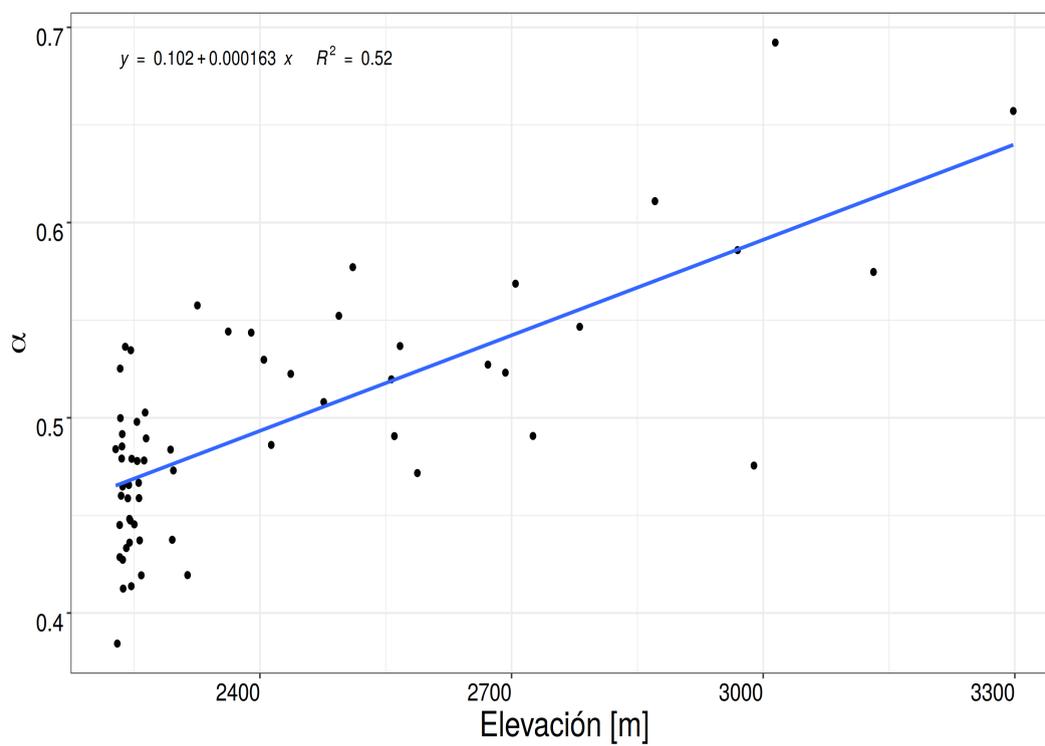
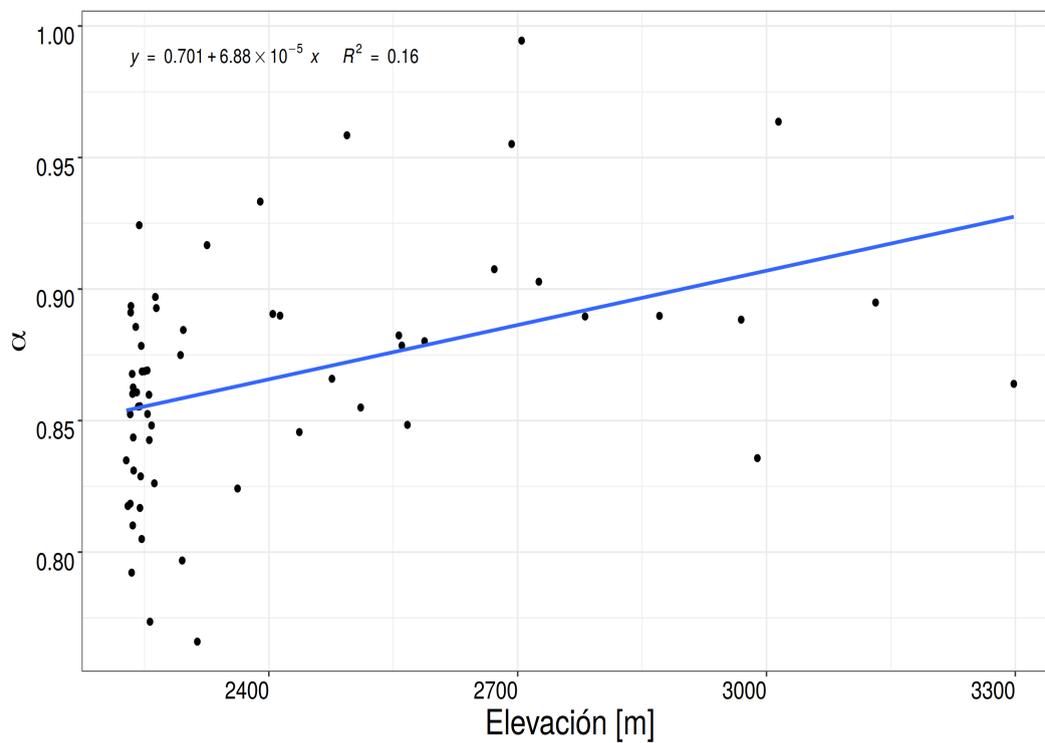


FIGURA 3.16: Mapas de contorno para la métrica multifractal, promediando los regímenes de tormenta y frontal. Mediante la aplicación de la técnica de interpolación lineal para las 61 estaciones en una cuadrícula irregular. Las líneas de contorno representan isóneas de $K(3)$.

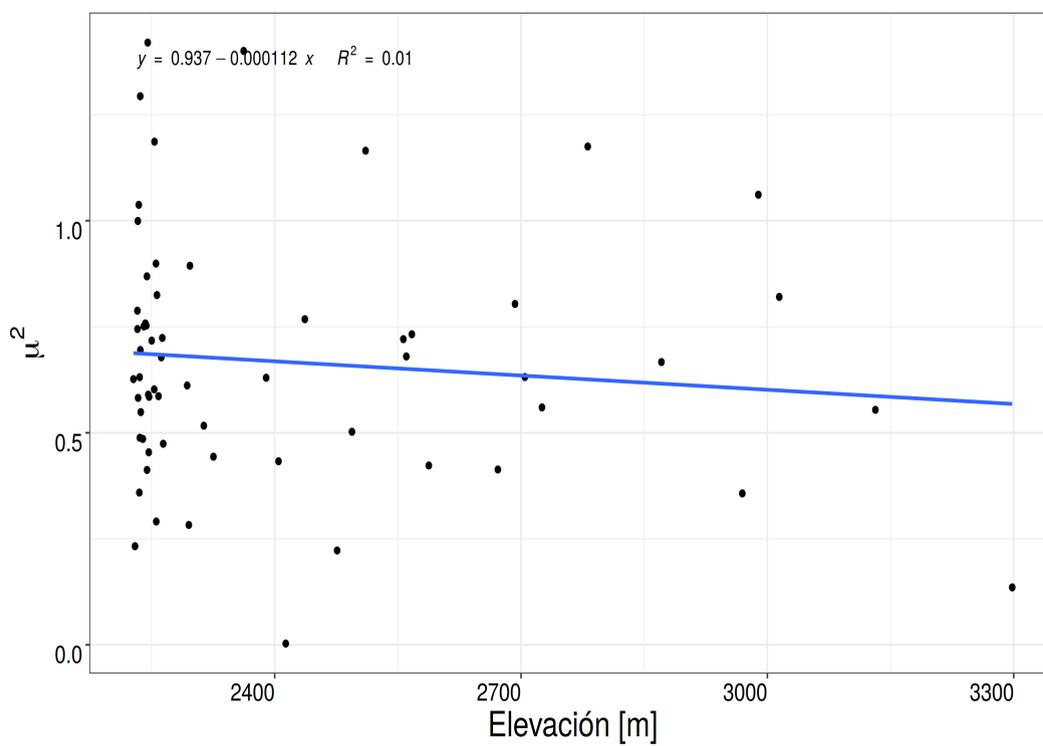


(a) Métrica espectral FS.

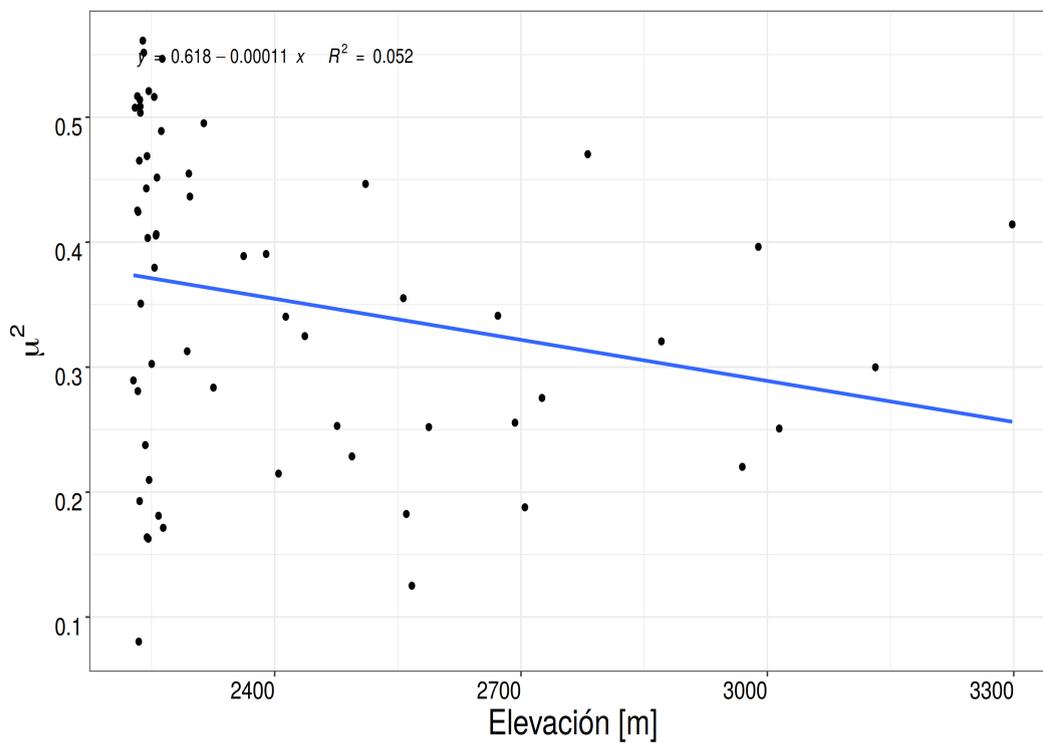


(b) Métrica espectral BS.

FIGURA 3.17: Tendencias de la métrica espectral contra la altitud.



(a) Métrica de intermitencia FS.



(b) Métrica de intermitencia BS.

FIGURA 3.18: Tendencias de la métrica de intermitencia contra la altitud.

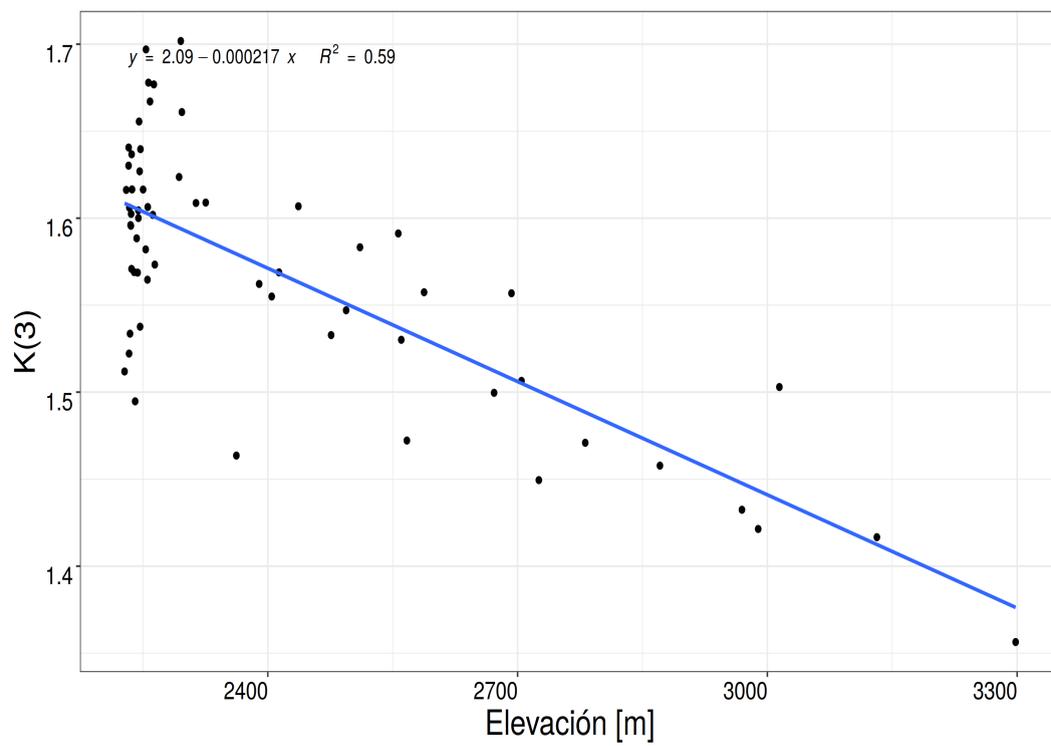


FIGURA 3.19: Tendencias de la métrica multifractal contra la altitud.

Capítulo 4

Conclusiones

Los resultados nos indican que para nuestra serie temporal de 1993 – 2017 se sigue manteniendo el periodo húmedo para la Ciudad de México de mayo a octubre, sirviendo mayo y octubre como meses de transición para la temporada húmeda y seca. Habiendo un 50 % de probabilidad de precipitación extrema, P_{90} , de las 13 – 19 h LT. En donde mientras más hacia el oeste de la Ciudad se sitúe habrá mayor número de eventos extremos y por ende mayor precipitación acumulada, en promedio anual.

Tenemos que la precipitación media para este estudio sigue concentrando la mayor precipitación hacia la zona oeste de la ciudad, y se observa una mayor precipitación acumulada hacia la parte sur y noroeste, que en cada lustro se fue expandiendo. Cabe destacar que para el último lustro del estudio, 2013 – 2017, hubo mayor precipitación en la zona con menor precipitación acumulada de la Ciudad de México, es decir, las zonas norte y este.

La métrica que mejor se ajusta al comportamiento de la precipitación, es la métrica espectral en FS, seguida de la métrica espectral en BS. También, la métrica espectral fue buena para encontrar los regímenes de escala. Aún así, de acuerdo a la literatura, para encontrar los regímenes de escala se obtuvieron mejores resultados con las métricas de intermitencia FS y multifractal. Con un intervalo de 10 *min* a 40 y 80 *min* para el

régimen de tormentas, de 40 y 80 *min* a 21.3 *h* (para ambos) para el régimen de sistemas frontales, y de 21.3 *h* en adelante (para la serie de tiempo de 56 días) para el régimen de transición, para las métricas de intermitencia FS y multifractal, respectivamente.

La métrica espectral nos indica muy bien donde se sitúan más los eventos de tormentas convectivas, dado que los valores altos de esta métrica implican una disminución más rápida de la energía. Mientras que la métrica de intermitencia en BS los valores altos nos indican una baja agrupación y una alta aleatoriedad en el proceso, en cambio los valores bajos nos indica un mayor agrupamiento de periodos secos a húmedos, así, mostrándonos un mayor agrupamiento hacia la zona centro y oeste de la ciudad. También, la métrica de invarianza de escala multifractal nos muestra las zonas con mayor influencia de eventos de sistemas frontales, así como las zonas a eventos de tormentas convectivas, siendo estas la zona noreste y suroeste, respectivamente. Dado que los frentes llegan primeramente por la zona norte y los sistemas convectivos de tormenta tiene una influencia a formarse cerca de la zona montañosa por el efecto orográfico de la ciudad.

Por último, se observa que a mayor altitud se tienen más eventos de precipitación individuales y puntuales, como se aprecia en la figura 3.17, dado que existen más eventos extremos en la zona oeste y norte, zonas que tienen más influencia orográfica, con una altitud de hasta cerca de 3300 *msnm*. Y a medida que aumenta la altitud y disminuye $K(3)$ y μ_{FS} hay una mayor disipación de las fluctuaciones de intensidad.

Apéndice A

Estaciones SACMX

CUADRO A.1: Estaciones de SACM con número de estación (localizable en la figura 1.1), etiqueta, localización en latitud, longitud y altitud. Todas las estaciones cuentan con datos de 1993-2017

Est	Etiqueta	lat	lon	Altitud
1	Chalmita	19.5562194	-99.142525	2293.424
2	Remedios	19.5132889	-99.154475	2244.545
3	Linda vista	19.4866667	-99.119525	2235.821
4	Coyol	19.4844139	-99.0900944	2232.886
5	Generadora ciento uno	19.4558556	-99.0974278	2232.78
6	Rosario	19.5092806	-99.190475	2247.061
7	Campamento Mecoaya	19.4863972	-99.1833333	2244.442
8	Nueva Sta. María	19.4689194	-99.1641417	2235.549
9	San Joaquín	19.4365778	-99.2286722	2325.408
10	DDF	19.4311806	-99.1316306	2242.461
11	Tizoc	19.4357667	-99.1708083	2258.513
12	Santa Cruz	19.402275	-99.1333333	2233.656
13	López Mateos	19.4202889	-99.06875	2229.937
14	Churubusco lago	19.4413472	-99.0485111	2236.92

Cuadro A.1 continuación de la página anterior

Est	Etiqueta	lat	lon	Altitud
15	Triángulo	19.3993694	-99.2118083	2404.687
16	Santa Lucia	19.3599778	-99.2645722	2587.701
17	Tanque lienzo	19.3341444	-99.2464194	2413.489
18	Universidad	19.3467944	-99.1806667	2264.263
19	Radio comunicación	19.39945	-99.1674278	2246.061
20	Municipio libre	19.3652083	-99.127875	2233.35
21	Cartero	19.373275	-99.2723639	2560.295
22	La venta	19.3405778	-99.3	2870.948
23	Zarco	19.299	-99.3625	3131.564
24	San Francisco	19.3073333	-99.2421667	2494.109
25	Río Magdalena	19.2893333	-99.2596667	2671.788
26	Monte alegre	19.2311667	-99.219	3298.166
27	Xotepingo	19.3292361	-99.1431333	2243.655
28	Aculco	19.3793028	-99.1002889	2235.151
29	Ejercito de oriente	19.3802528	-99.0378222	2227.966
30	P. Cerro estrella	19.3370861	-99.0764111	2253.654
31	Sub. Santa Catarina	19.3210111	-98.9606333	2313.698
32	P. Santa Catarina	19.2994417	-99.0231639	2245.366
33	Tlahuac	19.2815528	-99.0097861	2236.289
34	Bosque de Tlalpan	19.2963361	-99.1943806	2362.211
35	Villa Coapa	19.2859611	-99.1261639	2239.438
36	San Pedro Martir	19.2631944	-99.1711333	2389.616
37	Ajusco	19.2188722	-99.2105167	3014.438
38	Topilejo	19.19955	-99.1359889	2556.687
39	Caseta forestal	19.1056667	-99.1936667	2988.984
40	GAVM Sur	19.3165306	-99.096425	2240.653

Cuadro A.1 continuación de la página anterior

Est	Etiqueta	lat	lon	Altitud
41	Nativitas	19.2464806	-99.0910167	2253.309
42	San Luis T.	19.2575778	-99.0216	2246.631
43	Milpa Alta	19.1873028	-99.0271944	2510.711
44	Barrientos	19.576	-99.1985	2295.448
45	Vaso de Cristo	19.5103472	-99.2119056	2263.108
46	Chiconautla I	19.5948333	-99.0503333	2256.626
47	Chiconautla II	19.5151667	-99.1065	2255.788
48	Palmas	19.4294861	-99.2490472	2436.744
49	El venado	19.4021667	-99.3196667	2567.029
50	Cien metros	19.4698722	-99.1377139	2234.499
51	Penon	19.4409917	-99.0847556	2296.774
52	Deportiva	19.4080167	-99.1127194	2236.422
53	Sta. Cruz Meyehualco	19.3385528	-99.0291417	2250.203
54	Caída del borracho	19.4235056	-99.2656528	2476.06
55	Yaqui	19.3627	-99.2864167	2692.668
56	D. De los leones	19.3135611	-99.3093083	2969.463
57	San Bartolo Ameyalco	19.3288583	-99.2751556	2704.719
58	Carcel de mujeres	19.3574528	-98.9996417	2261.889
59	Tetelco	19.2101583	-98.970875	2255.415
60	Huayatla	19.308075	-99.2607861	2725.534
61	San Salvador C.	19.1904528	-99.0902111	2781.277

Bibliografía

- Bershadskii, A., Niemela, J., Praskovsky, A., & Sreenivasan, K. (2004). “clusterization” and intermittency of temperature fluctuations in turbulent convection. *Physical Review E*, 69(5), 056314.
- Deidda, R. (2000). Rainfall downscaling in a space-time multifractal framework. *Water Resources Research*, 36(7), 1779–1794.
- Deidda, R., Badas, M. G., & Piga, E. (2004). Space-time scaling in high-intensity tropical ocean global atmosphere coupled ocean-atmosphere response experiment (toga-coare) storms. *Water resources research*, 40(2).
- Deidda, R., Badas, M. G., & Piga, E. (2006). Space–time multifractality of remotely sensed rainfall fields. *Journal of hydrology*, 322(1-4), 2–13.
- Deidda, R., Benzi, R., & Siccardi, F. (1999). Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall. *Water resources research*, 35(6), 1853–1867.
- Fraedrich, K. & Larnder, C. (1993). Scaling regimes of composite rainfall time series. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 45(4), 289–298.
- IPCC (2019). Glosario de la página del ipcc. WEB. Obtenido de <https://ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/index.html>.
- Jáuregui, E. (2000). *El clima de la ciudad de México*, volume 1. Plaza y Valdés.

- Jauregui, E. & Romales, E. (1996). Urban effects on convective precipitation in Mexico city. *Atmospheric Environment*, 30(20), 3383–3389.
- Kundu, P. K. & Siddani, R. K. (2011). Scale dependence of spatiotemporal intermittence of rain. *Water Resources Research*, 47(8).
- Langousis, A. & Veneziano, D. (2007). Intensity-duration-frequency curves from scaling representations of rainfall. *Water Resources Research*, 43(2).
- Lovejoy, S. & Schertzer, D. (1990). Multifractals, universality classes and satellite and radar measurements of cloud and rain fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95(D3), 2021–2034.
- Magaña, V., Pérez, J., & Méndez, M. (2003). Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico city basin. *Geofísica Internacional*, 42(2), 247–259.
- Mascaro, G., Deidda, R., & Hellies, M. (2013). On the nature of rainfall intermittency as revealed by different metrics and sampling approaches. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), 355–369.
- Molini, A., Katul, G. G., & Porporato, A. (2009). Revisiting rainfall clustering and intermittency across different climatic regimes. *Water resources research*, 45(11).
- Ochoa, C. A., Quintanar, A. I., Raga, G. B., & Baumgardner, D. (2015). Changes in intense precipitation events in Mexico city. *Journal of Hydrometeorology*, 16(4), 1804–1820.
- PLUS, M. (1991). *Manual Binder de la Red Pluviométrica de Radioenlace*. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal.
- Purdy, J., Harris, D., Austin, G., Seed, A., & Gray, W. (2001). A case study of orographic rainfall processes incorporating multiscaling characterization techniques. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D8), 7837–7845.

- Rebora, N., Ferraris, L., von Hardenberg, J., & Provenzale, A. (2006). Rainfarm: Rainfall downscaling by a filtered autoregressive model. *Journal of Hydrometeorology*, 7(4), 724–738.
- Rigby, J. & Porporato, A. (2010). Precipitation, dynamical intermittency, and sporadic randomness. *Advances in Water Resources*, 33(8), 923–932.
- Schleiss, M., Jaffrain, J., & Berne, A. (2011). Statistical analysis of rainfall intermittency at small spatial and temporal scales. *Geophysical Research Letters*, 38(18).
- Veneziano, D. & Langousis, A. (2005). The areal reduction factor: A multifractal analysis. *Water Resources Research*, 41(7).
- Veneziano, D., Langousis, A., & Furcolo, P. (2006). Multifractality and rainfall extremes: A review. *Water resources research*, 42(6).
- Veneziano, D., Lepore, C., Langousis, A., & Furcolo, P. (2007). Marginal methods of intensity-duration-frequency estimation in scaling and nonscaling rainfall. *Water Resources Research*, 43(10).
- Venugopal, V., Foufoula-Georgiou, E., & Sapozhnikov, V. (1999). Evidence of dynamic scaling in space-time rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D24), 31599–31610.
- Verrier, S., Mallet, C., & Barthès, L. (2011). Multiscaling properties of rain in the time domain, taking into account rain support biases. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D20).