



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**Clasificación de eventos de
lluvia en la Ciudad de México
y su impacto**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero civil

P R E S E N T A

Erick Alexis Vergara Alcaraz

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Alejandro Sánchez Huerta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023

Agradecimientos

Este trabajo está dedicado a mis padres, María Sara Alcaraz Gálvez y Edgardo Vergara Dorantes, las personas más entregadas, amorosas, incondicionales y protectoras, las cuales han sido pilares de la construcción del hombre que ahora soy. Muchas gracias a ambos por todos los esfuerzos y sacrificios que han hecho a lo largo del tiempo para sacarnos adelante a mi hermano y a mi; por apoyarnos y confiar en nosotros. Gracias por su amor infinito y paciencia, a pesar de múltiples corajes y preocupaciones que les he hecho pasar.

Ambos que me han enseñado el camino correcto que debo seguir, son y serán mi ejemplo a seguir, de quienes no dejo de aprender.

Axel, hermano, gracias por estar de manera incondicional, por tu amistad, por apoyarme, por ser esa válvula de escape y ser parte fundamental de mi desarrollo como persona.

A mi abuela Lucía, una de las personas más importantes de mi vida, siempre siendo un ejemplo de fortaleza, amor y serenidad. Gracias por ser esa gran persona, por estar siempre para todos y por aportar tanto en mi formación.

A mi abuelito Roman, un ejemplo de arduo trabajo, constancia y cariño. Por enseñarme que la juventud puede ser eterna si se lleva en el alma.

A todas aquellas personas que tuve el honor de aprenderles poco o mucho pero que sin duda han conformado parte de lo que soy; en especial a mi abuelo Roberto Vergara quien fue como un segundo padre, quien me dejó mucha alegría, diversión y memorias entrañables en el transcurso de mi infancia.

A Estelita Alcaraz, la persona con el carácter más tierno que he podido conocer, y con una personalidad fuerte y determinada, llena de consejos y siempre con una sonrisa cálida que da paz. Muchas gracias donde quiera que estén.

Karla Jareny mi leal cómplice y mi conciencia ante cualquier situación. Y gracias por tantos años de amistad y locuras.

Un especial agradecimiento al Instituto de Ingeniería, en especial al Observatorio Hidrológico, al maestro Alejandro Sánchez Huerta como mi asesor de tesis. A Alejandra Amaro Loza por brindarme la oportunidad de realizar mi servicio social en el OH, por brindar su tiempo, esfuerzo y conocimiento para esta tesis. A ambos, muchas gracias por el apoyo, consejos, correcciones y por aguantar tanto tiempo.

Y un especial agradecimiento por el financiamiento de becas para estudiantes de licenciatura del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y a la secretaria de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI) por el financiamiento al Observatorio Hidrológico.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| ÍNDICE | 3 |
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | 5 |
| ÍNDICE DE TABLAS | 6 |
| ÍNDICE DE GRÁFICAS | 7 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| 2. OBJETIVOS | 10 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL..... | 10 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 10 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 11 |
| 4. HIPÓTESIS | 12 |
| 5. MARCO TEÓRICO | 13 |
| 5.1 FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN | 13 |
| 5.1.1 Formas de precipitación | 14 |
| 5.2 CLASIFICACIÓN DE LA LLUVIA..... | 15 |
| 5.2.1 Precipitación convectiva | 16 |
| 5.2.2 Precipitación mixta..... | 17 |
| 5.2.3 Precipitación estratiforme | 17 |
| 5.2.4 Características de las precipitaciones..... | 18 |
| 5.3 ISLAS DE CALOR Y LA MODIFICACIÓN DEL RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN 19 | |
| 5.4 INUNDACIONES URBANAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO..... | 21 |
| 6. METODOLOGÍA | 29 |
| 6.1 JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO | 29 |
| 6.2 ZONA DE ESTUDIO..... | 29 |
| 6.3 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN..... | 32 |
| 6.4 PROCESO DE DISCRETIZACIÓN DE EVENTOS Y SUS CLASIFICACIÓN..... | 38 |
| 6.5 MEDIDAS ESTADÍSTICAS..... | 38 |
| 6.5.1 Diagramas de caja de las características de los eventos | 39 |
| 7. RESULTADOS | 40 |
| 7.1 CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS SEGÚN EL TIPO DE LLUVIA | 40 |
| 7.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE EVENTOS POR AÑO | 42 |
| 7.2.1 Estadísticos de los eventos del 2018..... | 42 |
| 7.2.2 Estadísticos de los eventos del 2019..... | 43 |
| 7.2.3 Estadísticos de los eventos del 2020..... | 44 |
| 7.2.4 Estadísticos de los eventos del periodo del 2018 al 2020..... | 44 |

| | | |
|-------|--|----|
| 7.2.5 | Características de los eventos según el tipo de lluvia | 47 |
| 7.2.6 | Distribución temporal de los eventos extremos significativos según el tipo de lluvia | 52 |
| 8. | CONCLUSIONES | 58 |
| 9. | REFERENCIAS | 60 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|----|
| ILUSTRACIÓN 1 FORMACIÓN DE NUBES (MANUAL DE PRÁCTICAS DE HIDROLOGÍA, OH-ACADÉMICO) | 14 |
| ILUSTRACIÓN 2 FORMAS DE PRECIPITACIÓN | 15 |
| ILUSTRACIÓN 3 ISLA DE CALOR (TUATARA TECH) | 21 |
| ILUSTRACIÓN 4 INUNDACIONES A NIVEL MUNDIAL DE 2015-2020 (EM-DAT). | 23 |
| ILUSTRACIÓN 5 EVENTO REGISTRADO POR LA ESTACIÓN PREPA 8 EL 05 DE AGOSTO DEL 2018. | 25 |
| ILUSTRACIÓN 6 EVENTO REGISTRADO POR LA ESTACIÓN V.HERMOSA EL 30 DE AGOSTO DEL 2018. | 25 |
| ILUSTRACIÓN 7 EVENTO REGISTRADO POR LA ESTACIÓN V.HERMOSA EL 25 DE JULIO DEL 2019. | 26 |
| ILUSTRACIÓN 8 EVENTO REGISTRADO POR LA ESTACIÓN PREPA 2 EL 15 DE SEPTIEMBRE DEL 2020. | 27 |
| ILUSTRACIÓN 9 EVENTO REGISTRADO POR LA ESTACIÓN ZAPATA EL 16 DE SEPTIEMBRE DEL 2020. | 28 |
| ILUSTRACIÓN 10 MAPA DE ELEVACIONES DE LA CDMX. | 30 |
| ILUSTRACIÓN 11 CLIMA DE LA CDMX (INEGI). | 31 |
| ILUSTRACIÓN 12 PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL CDMX. | 32 |
| ILUSTRACIÓN 13 FUNCIONAMIENTO DEL DISDRÓMETRO ÓPTICO LÁSER (ACTUALIZACIÓN DE PROTOCOLO DE OPERACIÓN CONJUNTA PARA EL SISTEMA HIDROLÓGICO DEL VALLE DE MÉXICO)..... | 33 |
| ILUSTRACIÓN 14 PLUVIÓGRAFO DE PESAJE OTT PLUVIO ² S MOSTRANDO LA INTERFACE. | 33 |
| ILUSTRACIÓN 15 LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES DEL OBSERVATORIO HIDROLÓGICO IIUNAM (MANUAL- OH). | 34 |
| ILUSTRACIÓN 16 COMPONENTES DE ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS (MANUAL-OH). | 35 |
| ILUSTRACIÓN 17 SITIO WEB DEL OBSERVATORIO HIDROLÓGICO-IIUNAM. | 36 |
| ILUSTRACIÓN 18 OBTENCIÓN DE DATOS A ANALIZAR DEL SITIO WEB DEL OH-IIUNAM. | 37 |
| ILUSTRACIÓN 19 NÚMERO DE FRENTE FRÍOS EN EL 2019 Y 2020 (SMN, 2022). | 52 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1 EVENTOS EXTRAORDINARIOS DEL AÑO 2018..... | 24 |
| TABLA 2 EVENTOS EXTRAORDINARIOS DEL AÑO 2019..... | 26 |
| TABLA 3 EVENTOS EXTRAORDINARIOS DEL AÑO 2020..... | 27 |
| TABLA 4 TABLA DE ESTACIONES OHHIUNAM_ EQUIPOS DE MEDICIÓN. | 35 |
| TABLA 5 ANÁLISIS DE EVENTOS DURANTE EL AÑO 2018..... | 43 |
| TABLA 6 ANÁLISIS DE EVENTOS DURANTE EL AÑO 2019..... | 43 |
| TABLA 7 ANÁLISIS DE EVENTOS DURANTE EL AÑO 2020..... | 44 |
| TABLA 8 ANÁLISIS DE EVENTOS DEL 2018 AL 2020 | 46 |
| TABLA 9 PRECIPITACIÓN ACUMULADA ANUAL POR ESTACIÓN (2018-2020). | 51 |
| TABLA 10 EVENTOS DE MAYOR PRECIPITACIÓN EN CADA AÑO PARA CADA TIPO DE EVENTO. | 53 |

ÍNDICE DE GRÁFICAS

| | |
|---|----|
| GRÁFICA 1 PROMEDIO MENSUAL DE PRECIPITACIÓN EN LA CDMX. | 31 |
| GRÁFICA 2 REGISTRO DEL NÚMERO DE EVENTOS SEGÚN EL TIPO DE LLUVIA EN LAS ESTACIONES DEL OBSERVATORIO HIDROLÓGICO..... | 40 |
| GRÁFICA 3 PROPORCIÓN DE EVENTOS CLASIFICADOS POR EL TIPO DE LLUVIA ENTRE EL 2018 Y 2020. | 45 |
| GRÁFICA 4 PRECIPITACIÓN ACUMULADA POR LOS EVENTOS SEGÚN EL TIPO DE LLUVIA. | 46 |
| GRÁFICA 5 DIAGRAMA DE CAJA DE LAS ALTURAS DE PRECIPITACIÓN DE TODOS LOS EVENTOS COMPRENDIDOS ENTRE 2018-2020..... | 47 |
| GRÁFICA 6 DIAGRAMA DE LAS DURACIONES DE TODOS LOS EVENTOS COMPRENDIDOS ENTRE 2018-2020. | 48 |
| GRÁFICA 7 DIAGRAMA DE LAS INTENSIDADES DE TODOS LOS EVENTOS COMPRENDIDOS ENTRE 2018-2020..... | 49 |
| GRÁFICA 8 AGRUPACIÓN DEL NÚMERO DE EVENTOS EXTREMOS PARA CADA TIPO DE LLUVIA EN LA CDMX. .. | 50 |
| GRÁFICA 9 HIETOGRAMA DE UN EVENTO CONVECTIVO 23-09-2018 EN LA ESTACIÓN TAXQUEÑA..... | 53 |
| GRÁFICA 10 HIETOGRAMA UN EVENTO CONVECTIVO 27-10-2019 EN LA ESTACIÓN TACUBA. | 54 |
| GRÁFICA 11 HIETOGRAMA UN EVENTO CONVECTIVO 08-06-2020 EN LA ESTACIÓN ZAPATA. | 54 |
| GRÁFICA 12 HIETOGRAMA UN EVENTO ESTRATIFORME 30-08-2018 EN LA ESTACIÓN VISTA HERMOSA..... | 55 |
| GRÁFICA 13 HIETOGRAMA UN EVENTO ESTRATIFORME 23-10-2019 EN LA ESTACIÓN MADÍN. | 55 |
| GRÁFICA 14 HIETOGRAMA UN EVENTO ESTRATIFORME 23-06-2020 EN LA ESTACIÓN AJUSCO. | 55 |
| GRÁFICA 15 HIETOGRAMA UN EVENTO ESTRATIFORME 05-08-2018 EN LA ESTACIÓN ZAPATA. | 56 |
| GRÁFICA 16 HIETOGRAMA UN EVENTO ESTRATIFORME 03-08-2019 EN LA ESTACIÓN MADÍN. | 56 |
| GRÁFICA 17 HIETOGRAMA UN EVENTO ESTRATIFORME 16-09-2020 EN LA ESTACIÓN LA JOYA..... | 57 |

1. INTRODUCCIÓN

El agua es indispensable para el desarrollo del ser humano y la vida en general. La hidrología es una ciencia aplicada, la cual se encarga de estudiar el comportamiento del agua terrestre, desde sus propiedades químicas y físicas hasta su comportamiento de su ciclo natural y la interacción que se tiene con elementos físicos y biológicos. Dentro de la misma área de estudio se presenta la hidrología aplicada, la cual consiste en el estudio del comportamiento de agua en diferentes etapas dentro del ciclo hidrológico para poder diseñar, construir y/u operar obras civiles para el aprovechamiento y control de la misma.

México cuenta con una ubicación privilegiada en cuanto a aspectos climáticos, por lo mismo tiene una gran variedad en los eventos de lluvia. La Ciudad de México presenta graves problemas de inundaciones, como consecuencia de su ubicación rodeada por elementos montañosos, lo cual la hace una cuenca urbana, estas se definen como aquellas cuencas ocupadas por una importante densidad de población (Monforte García et al., 2012), en el aspecto hidrológico se caracterizan por tener una superficie menor que las cuencas fluviales, el orden de magnitud en superficie es ≤ 1 hectárea, y en cuencas fluviales de kilómetros. Asimismo, el factor de escala espacial en las cuencas urbanas afecta los procesos hidrológicos en el tiempo de medición, los tiempos de concentración se deben medir en resolución temporal de minutos, porque las cuencas urbanas son más sensibles a los efectos de lluvias intensas y de corta duración (Valentín, 2007). Por lo que el manejo del escurrimiento debido a los eventos de lluvia es extremadamente complejo.

En las últimas décadas se han alterado los ecosistemas y con esto las condiciones climatológicas del mundo como consecuencia de los cambios generados por el ser humano. Se espera que el cambio climático genere un aumento en la frecuencia de eventos de lluvia intensa y a su vez en la precipitación total.

La Ciudad de México ha llegado a modificar los flujos atmosféricos del ambiente como consecuencia de elementos antropogénicos; como lo son las edificaciones, alteraciones de la capacidad de filtración que pueda tener el suelo y, principalmente, la acumulación de asentamientos humanos (Jauregui, E., 1997).

El contar con información suficiente sobre las precipitaciones, su comportamiento y clasificación, es fundamental para poder tener una mejor planeación y diseño de elementos de prevención y mitigar las afectaciones que se puedan tener por las inundaciones.

Dentro de la clasificación de los eventos de lluvia se pueden considerar aspectos como la formación de nubes (mediante la condensación de vapor de agua, cuando una masa de aire lo enfría), la forma de precipitación, el tipo de nube, ya sea por su origen o por su forma, etc.

Para la clasificación empleada en esta investigación se basa en tres tipos de precipitación, los cuales son:

- Precipitación Convectiva
- Precipitación Estratiforme

- Precipitación Mixta

En cada tipo de evento se pueden presentar las mismas características, pero con distintos variables, dentro de los cuales destacan:

- Intensidad
- Duración
- Extensión
- Periodo de retorno

El objetivo de esta clasificación es constatar qué tipo de lluvias tienen mayor probabilidad y concurrencia de provocar una inundación, en un periodo de estudio que consta del 2018 al 2020 analizando los eventos registrados por la red de elementos de medición (disdrómetros y pluviómetros) que pertenecen al Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Tomando como referencia el sistema de clasificación de eventos empleado por Baltas, (2016) y con esto precisar mejor en qué temporadas y ante qué situaciones se podrían presentar y así poder tener previstas acciones preventivas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Clasificar los eventos de lluvia a una escala sub-horaria en la Ciudad de México a partir de los datos provenientes del Observatorio Hidrológico de la FI de la UNAM, a partir de las características más importantes como su duración e intensidad.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar qué tipo de precipitación según su origen es más frecuente y cuál aporta mayor cantidad de agua durante todo el año de estudio.
- Identificar si en ciertos periodos del año se presentan de manera específica las lluvias de tipo convectivo, mixto y estratiforme.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Cada año, durante la temporada de lluvias, se producen inundaciones urbanas debido a las lluvias convectivas o de verano. Algunos estudios se refieren a que las lluvias convectivas son las predominantes en la Ciudad de México (Jauregui & Romales, (1996), Jauregui, (1997)), H. Sin embargo, quedan abiertas algunas preguntas: ¿Cuántos eventos son de tipo convectivo y estratiforme ocurren durante el año? ¿Cuánta agua aportan las lluvias convectivas y estratiformes? ¿Cuánta es su duración? ¿De qué rango de intensidades son cada tipo de lluvia?

Como se indicó en el capítulo anterior, el objetivo de este trabajo es contribuir a dar una oportuna respuesta a estas preguntas a partir del análisis de eventos registrados, en tres años consecutivos (2018-2020), en la Ciudad de México por la red de estaciones de monitoreo de lluvia del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

4. HIPÓTESIS

Los eventos convectivos ocurren con menor frecuencia en todo el año, son típicos del verano entre los meses de mayo y agosto; pero se plantea que podrían aportar una mayor cantidad de agua en la Ciudad de México en la temporada de lluvias, debido a su intensidad y a que producen inundaciones en un poco tiempo. Por otro lado, la temporada de frentes fríos comprenden el periodo de septiembre a mayo que dan origen a las precipitaciones de tipo frontal que son de menor intensidad y larga duración, por ello se considera que su aportación en volumen de agua es menor en todo el año.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 FORMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

El ciclo hidrológico es un proceso de circulación del agua en la hidrósfera, a su vez es un ciclo biogeoquímico en el que intervienen reacciones químicas donde el agua se mueve de un lugar a otro cambiando de estado físico. En la interacción que se presenta en el ciclo hidrológico la atmósfera es un factor importante, ya que en este se presentan procesos importantes (como consecuencia de la reacción entre los gases que la conforman), como lo es la regulación de la cantidad de energía derivada de la radiación solar entra al planeta. partículas suspendidas (líquidas y sólidas).

La densidad de cantidad de vapor de agua es de suma importancia en la termodinámica atmosférica; ya que en los procesos de precipitación y termodinámica del aire atmosférico se puede idealizar como una mezcla de dos gases: aire seco y vapor de agua; esta mezcla de gases comúnmente es conocida como *aire húmedo* o *la humedad del ambiente*.

Las partículas sólidas y líquidas suspendidas en el ambiente son llamados *aerosoles* (haciendo referencia a las partículas). Dentro de los aerosoles más comunes podemos encontrar gotas de agua, cristales de hielo (hidrometeoros), sal de mar, polvo mineral (principalmente silicatos), materia orgánica y polen.

La cantidad de elementos sólidos depende mucho de la localización; ya que estos aerosoles entran a la atmósfera por elementos naturales y antropogénicos. En muchas ocasiones los aerosoles provenientes de fuentes naturales son mayores que los provenientes de elementos antropogénicos en una escala global. La relevancia de estos aerosoles puede ser atribuida a los núcleos hidrodinámicos, a los que se atribuye el inicio de las lluvias.

La formación de las nubes se produce cuando una masa de aire se enfría, el vapor de agua que contiene se comienza a condensar; pero puede que no exista precipitación. Para que la precipitación ocurra se requiere la formación de los hidrometeoros de tamaño considerable, como se muestra en la *Ilustración 1*. El crecimiento y formación de estos elementos se rige mediante procesos que tiene lugar a escalas comparables a sus tamaños (micrómetros o milímetros). Los últimos procesos conforman el núcleo de la microfísica de nubes, mientras que los procesos a gran escala, relacionados con la termodinámica de la humedad del aire y movimiento de masas de aire, forman el núcleo de la dinámica de las nubes. La precipitación es un efecto combinado de procesos a corto y largo plazo, y ambos procesos son necesarios para que pueda ocurrir la precipitación.

La variedad de formas existentes en los fenómenos de precipitación es consecuencia de la gran cantidad de variables macroscópicas dentro del proceso de precipitación en las escalas de tiempo y espacio.



Ilustración 1 Formación de nubes (Manual de Prácticas de Hidrología, OH-Académico)

5.1.1 Formas de precipitación

El fenómeno mejor conocido como *precipitación* puede ser explicado como un hidrometeoro, que se concentra en la atmósfera hasta que cuentan con un peso capaz de caer a la superficie de la tierra. La estructura térmica situada bajo la atmósfera es determinante para que se produzca la precipitación de manera líquida o sólida. Las diferentes formas de precipitación se denominan *hidrometeoros* (Koutsoyiannis & Langousis, 2011).

De manera estricta, la precipitación hace referencia a todo el líquido y formas congeladas de agua. Los eventos de precipitación más comunes son:

- **Lluvia**
En este tipo de precipitación las gotas de agua que caen, cuyo diámetro promedio es entre 0.5 mm y 2 mm; cuando se presentan gotas menores a 0.5 mm de diámetro, el evento es conocido como *llovizna*. La acumulación promedio en este tipo de precipitación es ≥ 1 mm/hora.
- **Nieve**
Esta forma de precipitación son cristales adheridos por agua en forma líquida en grietas o poros; de manera individual dichos cristales cuentan con una forma hexagonal. A temperaturas inferiores a los -40 °C los cristales pueden flotar en el aire y forman el denominado *polvo de diamante*.
- **Granizo**
Para este tipo de precipitación, se presentan formaciones de mayor densidad en formas circulares o irregulares con una longitud transversal de al menos 5 mm. Su núcleo está conformado por gotas de agua congeladas o una partícula de hielo.
- **Rocío**
Es la condensación de gotas en una superficie que se presentan cuando la temperatura superficial es menor que la temperatura del aire en su punto de rocío.
- **Escarcha**
Son depósitos de hielo que suceden cuando la niebla o neblina es enfriada, creciendo de

manera triangular en la dirección del viento.

De forma empírica podemos asegurar que solamente los eventos de lluvia y nieve son los que más contribuyen a las precipitaciones totales.



Lluvia

Nieve

Granizo

Rocío

Escarcha

Ilustración 2 Formas de Precipitación

5.2 CLASIFICACIÓN DE LA LLUVIA

A nivel mundial el 79% de la precipitación total sucede en los océanos; mientras que el restante 21% se presenta en tierra (Barry,1968). Dichos datos dependen de varios aspectos que afectan directamente el comportamiento de las precipitaciones como lo son:

- Los límites de humedad en la atmósfera por la temperatura que contenga la masa de aire.
- El que la delimitación de latitudes con mayor presencia de humedad se deba a la advección atmosférica (sistemas de viento globales).
- La presencia de vastas cordilleras con respecto a los vientos dominantes.

La presencia constante de precipitaciones en zonas montañosas es una característica muy común en las latitudes medias, donde el incremento de las velocidades de los vientos ascendentes promueve el flujo de humedad. Esto puede explicar la tendencia del aire a seguir subiendo, aún ya sobrepasado las crestas, y el tiempo de retraso para que ocurra el proceso de precipitación. Ante una zona de cordillera, la distancia entre las cumbres, puede que genere un tiempo óptimo para una máxima acumulación de nubes y con ello la presencia de precipitación.

A latitudes templadas, gran parte de la precipitación proviene de nubes del tipo estratiforme, las cuales comúnmente tiene una gran profundidad. Otra diferencia entre los tipos de precipitaciones en distintas ubicaciones se debe a la alta inestabilidad de las masas de aire. Puesto que las montañas obstruyen el flujo de humedad proveniente de masas de aire tropicales, y la turbulencia generada por los flujos ascendentes en esas zonas son suficiente para producir un evento máximo de lluvia a bajas elevaciones.

5.2.1 Precipitación convectiva

Los eventos de tipo convectivo son formados por celdas que cuentan con corrientes ascendentes. Este tipo de eventos regularmente tienen una duración menor a los 30 minutos, en los cuales las celdas se desarrollan y expanden de manera vertical, saturando el aire y los hidrometeoros crecen por la condensación de vapor y la fusión de estos.

Algunas partículas de agua y hielo crecen lo suficiente para poder empezar a caer; en un comienzo estos se encuentran bajo una condición saturada; pero conforme van descendiendo y mezclando con el aire subsaturado, se produce un enfriamiento por evaporación lo que introduce una fuerza negativa y acelera su descenso. La corriente de aire que genera el descenso llega hasta el suelo, generando cambios que pueden desarrollar un nuevo clima que favorezca el desarrollo de nuevas celdas. Las corrientes descendentes interactúan e interfieren con las corrientes ascendentes presentes en niveles inferiores y próximos a las nubes, hasta que se detiene por completo el flujo de dichas corrientes ascendentes. Estando en este punto, la celda se comienza a disipar.

Este tipo de precipitación se relaciona con las nubes de tipo *cumulus* y *cumulonimbus*; de las cuales se pueden subcategorizar con base en organización en el espacio.

- Celdas convectivas dispersas, se originan por el fuerte calentamiento en las superficies de tierra, sobre todo en la temporada de verano y cuando las bajas temperaturas en la tropósfera y capas superiores propicien una inestabilidad convectiva. En este tipo de precipitaciones convectivas comúnmente se presenta granizo y se desarrolla en áreas pequeñas (20 a 50 km²) de fuerte aguacero, con una duración común de 30 minutos a 1 hora.
- Las celdas de tipo *cumulonimbus* se pueden presentar de manera espiral en los ciclones tropicales. Este tipo de precipitaciones son de mayor duración e intensidad en áreas de varios miles de kilómetros a la redonda.

En general las lluvias de tipo convectivo están asociadas a lluvias intensas localizadas con extensiones de 3-10 km; su proceso es muy rápido y cuenta con zonas en las que no hay precipitación. Por otra parte, los patrones estratiformes se asocian a eventos de menor intensidad sobre extensas regiones y de amplia duración.

5.2.1.1 Tormentas extratropicales aisladas y convectivas

Las celdas de lluvia tienen extensiones de 10-100 km² y se desplazan sobre los 5-7 km más bajos de la tropósfera. Una tormenta conformada por múltiples celdas con corrientes de aire frío que se combinan para formar un frente. La convergencia a lo largo del borde frontal desencadena nuevas corrientes ascendentes y en consecuencia nuevas celdas, formando tormentas de múltiples celdas abarcando varios cientos de kilómetros. Este tipo de tormentas son las más intensas del tipo convectivo, contando con lapsos de varias horas de duración y teniendo un desarrollo vertical, produciendo fuertes vientos, intensas lluvias, o granizo, e incluso tornados de gran duración, con vórtices de diámetros entre 100-500 m.

5.2.1.2 Ciclonés tropicales

Estos sistemas de bajas presiones rotacionales se producen en aguas tropicales o sub-tropicales; los cuales tienen extensiones lineales del orden de 300-500 km; cuentan con una superficie de flujo de aire que es convectiva y ciclónica que se forma alrededor de la región de bajas presiones, y que comúnmente se conoce como “el ojo de la tormenta”. Este tipo de eventos son llamados como *huracanes o tifones*. Sin embargo, la acumulación de un evento de lluvia extrema por un día o más de duración, es usualmente producido por un ciclón tropical de baja o moderada intensidad.

Para que un *ciclón tropical* se pueda desarrollar, requiere que la temperatura de la superficie de las masas oceánicas sea igual o superior a los 27 °C y una condición de inestabilidad atmosférica en la que la temperatura del aire disminuya con la altura.

5.2.1.3 Precipitaciones orográficas

Este tipo de precipitaciones se presentan cuando una masa de aire caliente se encuentra con una barrera para que continúe con su desplazamiento horizontal. Este tipo de barreras lo que provocan es que la masa de aire se desplace hacia arriba; ante esta acción la humedad del aire se enfría adiabáticamente, el vapor de agua se condensa en partículas de agua o hielo y la probabilidad de precipitación es muy alta.

Después de superar la cima de la barrera el aire desciende y esto provoca un calentamiento adiabático del mismo; lo que genera una disipación de las nubes, por ende, que la precipitación se detenga.

5.2.2 Precipitación mixta

Los eventos intensos de lluvia, regularmente se presentan alineados con dimensiones de varios cientos de kilómetros. Las bandas de lluvia son áreas lo suficiente elongadas de débil convectividad; mientras que las líneas de chubascos cuentan con estructuras convectivas más fuertes. Este tipo de sistemas son manifestaciones de los flujos horizontales a nivel mesoescalar asociado con las fluctuaciones de la temperatura de las superficies y el contenido de humedad de las masas de aire.

5.2.3 Precipitación estratiforme

Las corrientes atmosféricas están conformadas por masas de aire de características uniformes, que dependiendo su origen, pueden contar distintas temperaturas y contenido de humedad. Un ejemplo de dichas características son las masas de aire continentales, las cuales son más secas y sus rangos de temperaturas es más amplio, en comparación con las masas de aire marinas. Al interactuar dos masas de aire que se encuentran a temperaturas y contenido de humedad diferentes es conocido como *frente*. En esta interacción la masa de aire más cálida es más liviana, por lo que se desplaza elevándose por encima de la masa de aire frío, ya que esta es más densa. Esta interacción provoca que la masa de aire cálida se enfríe adiabáticamente, y que el vapor de agua comience a condensarse, y que se puedan presentar precipitaciones.

Los frentes fríos se presentan cuando las masas de aire frío avanzan por debajo de masas de aire caliente, elevando estas últimas. Por otra parte, los frentes cálidos se presentan cuando una rápida

masa de aire cálido interactúa y anula una masa de aire frío. Un frente de tipo ocluido se presenta cuando una masa de aire caliente se encuentra entre dos masas de aire más frías y densas.

Los frentes se pueden extender a través de varios cientos de kilómetros de manera horizontal y se les asocian velocidades de elevación de varios centímetros por segundo. Esto es por la convergencia de vientos horizontales de escala sinóptica y de bajo flujo; por lo que las precipitaciones derivadas de los frentes son en su mayoría de tipo estratiforme, contando con extensas regiones de precipitaciones y de larga duración. Sin embargo, se han presentado áreas en las precipitaciones derivadas de frentes, en las cuales hay regiones a nivel meso escala en los que se presentan actividades de celdas.

En México, la temporada de frentes fríos abarca el periodo de septiembre a mayo del siguiente año, en estos meses ingresan a territorio nacional masas de aire frío provenientes de regiones polares marítimas o continentales y en ocasiones, desde las llanuras árticas cubiertas de hielo y nieve. En promedio al país ingresan 50 frentes fríos por temporada, no obstante, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) pronosticó que en la temporada 2021-2022 serán 56 frentes fríos los que ingresarán.

En invierno, las masas de aire que ingresan al país son predominantemente secas, lo que dificulta la formación de precipitaciones (SEDEMA, 2022). Fundamentalmente donde se localiza la zona metropolitana del Valle de México, las bandas frontales o el propio frente frío que es el que ocasiona las precipitaciones, en pocas ocasiones afecta directamente, pero la masa de aire frío y seco que impulsa el frente impacta con mayor frecuencia la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). El desplazamiento sobre la región de estas masas de aire frías, secas y más estables durante los meses de invierno genera inversiones térmicas más frecuentes y de mayor duración en las mañanas y, a veces hasta primeras horas de la tarde.

5.2.4 Características de las precipitaciones

5.2.4.1 Duración

Es el tiempo en la cual un evento de precipitación se presenta, puede medirse en horas o minutos.

5.2.4.2 Intensidad

La intensidad puede ser interpretada como resultado de la cantidad de precipitación entre la duración del evento de lluvia. Esta característica es de gran interés para aspectos hidrológicos para analizar situaciones de posible riesgo, problemas de conservación, erosión del suelo, etc. La representación gráfica de estos datos es conocida como hietograma; el cual nos sirve para evaluar las variaciones de la intensidad en el lapso que sea de interés en el evento.

Una alta intensidad de lluvia está más asociada a un crecimiento en el tamaño de las gotas, que a un incremento en la cantidad de estas. El tamaño de las gotas de lluvia varía desde pequeñas gotas de llovizna de apenas décimas de milímetros hasta grandes gotas (diámetro máximo de 6 milímetros, al superar este umbral se dividen en gotas de diámetros más pequeños). Las gotas de mayor tamaño caen a más rápido que las pequeñas, y con esto existe una correspondencia entre el tamaño de la gota

y la velocidad terminal de la misma, que ha sido estudiada y probada de manera experimental (Gunn y Kinzer, 1949; Beard y Pruppacher, 1969; Beard, 1976; Hosking y Stow, 1991; Testik y Barros, 2007).

5.2.4.3 Extensión

La extensión es el área en la que se percibe la precipitación durante una tormenta, la cual puede llegar a ser mucho menor que el área total de interés. En eventos de aproximadamente 24 horas de duración y cuyas extensiones promedio son de aproximadamente 100,000 km², de los cuales puede que solamente en 1/3 o hasta 1/10 de dicha área se esté presentando la tormenta.

5.2.4.4 Periodo de retorno (frecuencia)

Es de gran utilidad el poder estimar en que lapso se pueda llegar a presentar un evento de cierta intensidad; el cual puede que se repita cada 24 horas o hasta cada 100 años; pero el poder contar con esa estimación no garantiza que dicho evento pueda suscitarse en un lapso menor. Para poder realizar dichas estimaciones, se requiere de largos periodos de observación y recopilación de información, y la relación que se puedan generar de dichos datos son empleadas para el diseño y control de sistemas de inundaciones.

Estos conceptos son de suma importancia de manera independiente y la relación que pueda presentarse ante múltiples combinaciones de estas. Varios datos de las variables se pueden presentar ante varias combinaciones de estas; por lo que son de suma importancia para diseños o estimaciones en la hidrología.

5.3 ISLAS DE CALOR Y LA MODIFICACIÓN DEL RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

El crecimiento poblacional ha aumentado de manera exponencial las últimas décadas; lo que ha generado acumulación de personas en sitios específicos, que, debido a las necesidades, van en aumento. Este tipo de zonas son las conocidas como manchas urbanas, las cuales han generado variaciones climáticas internas, que se traduce en alteraciones de la composición atmosférica, cambio en la superficie del suelo y su composición y modificación en la temperatura Nuruzzaman(2015), Soto Montes de Oca, Gloria; Herrera Pantoja(2019).

Al tener grandes desarrollos urbanos también se tiene un incremento en la producción de emisiones, algunos de estos contaminantes tienen propiedades térmicas que son capaces de modificar las de la atmósfera (disminución de la capacidad del paso de luz solar, mayor concentración de núcleos de condensación) Koutsoyiannis & Langousis(2011), para estas modificaciones se tiene que considerar la concentración de los contaminantes y el movimiento de las masas de aire; ya que de esto depende la distribución o difusión de contaminantes (aerosoles y gases).

La generación o acumulación de aerosoles puede ser adjudicada a las actividades humanas en un 30%, un ejemplo de ello son las grandes concentraciones de humo (lo que representa una menor visibilidad,

menor transferencia de radiación) en zonas de industria y gran densidad de viviendas, ya que hay bajas corrientes de aire, baja turbulencia y humedad elevada. Estas capas de contaminación al igual que contribuyen con un menor porcentaje de radiación entrante también contribuyen a que sea menor la cantidad de radiación que logra salir del planeta por las noches, con lo que provoca un incremento de las temperaturas nocturnas. Al contar con una mayor cantidad de aerosoles se incrementa la capacidad de absorción de la radiación.

La quema de los combustibles fósiles producida en las grandes industrias y en zonas urbanas derivado de la combustión generada por los vehículos; estos generan una gran cantidad de emisiones contaminantes. Estos elementos combinados provocan alteraciones en las propiedades de la atmósfera (temperatura y velocidad del viento); con estas modificaciones se desarrolla una capa de acumulación de contaminación abarcando toda la zona urbana. Esta situación es asociada al desarrollo de los gases de efecto invernadero.

Las diferencias más contundentes por el efecto de estas manchas urbanas son:

- Cambios en los niveles de radiación entrante y saliente (modificación atmosférica).
- Cambios en los niveles de radiación en zonas específicas derivado del albedo y capacidad térmica de los materiales en las zonas urbanas.
- Incremento de temperaturas (industria y tráfico en vialidades).
- Menor difusión de calor en zonas urbanas, debido a la baja velocidad de las masas de aire en esas zonas.

El encontrar estas modificaciones en la atmósfera es difícil adjudicar exclusivamente a los efectos generados por las manchas urbanas, ya que estas modificaciones también pueden presentarse por otros factores climáticos. Con el análisis de diversos estudios se ha podido encontrar un patrón en el incremento de la temperatura media anual de las urbes; y que este incremento es en mayor consecuencia por el crecimiento de la densidad poblacional. Los elementos presentados previamente componen el término mejor conocido como *islas de calor*, como se muestra en la Ilustración 3.

Las temperaturas más altas que provienen del efecto isla de calor urbano se asocian a los cambios en la humedad atmosférica y la estabilidad, afectando la formación de nubes y los patrones de precipitación, en el caso de la Ciudad de México se asocia con un aumento de los eventos de precipitaciones extremas de tipo convectivo Jauregui & Romales(1996).

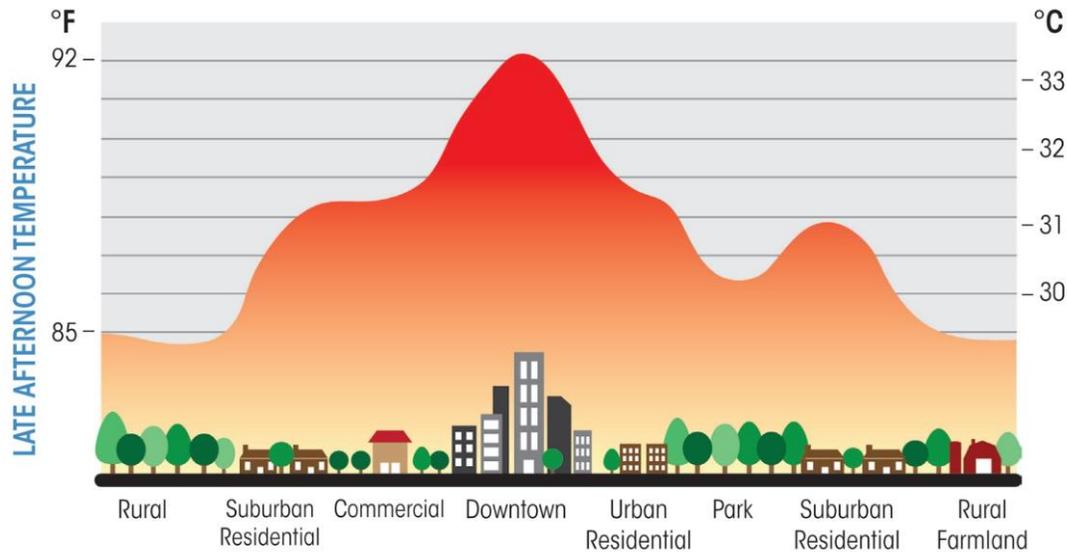


Ilustración 3 Isla de Calor (Tuatara tech)

5.4 INUNDACIONES URBANAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Las zonas urbanas pueden ser categorizadas como cuencas urbanas pequeñas desde una perspectiva hidrológica, siempre y cuando se cumpla con:

- Los eventos son uniformemente distribuidos en el tiempo.
- Los eventos son uniformemente distribuidos en el espacio.
- La duración de la tormenta es mayor que el tiempo de concentración.
- El escurrimiento principalmente proviene de flujo sobre el terreno.
- El almacenamiento de agua en cauces es despreciable.

El intervalo de tiempo de las mediciones de precipitaciones en las cuencas urbanas debe ser más pequeño que en los estudios hidrológicos de cauces naturales. Los intervalos de tiempo en cauces naturales son de una hora y media hora, lo cual no es admisible en cuencas urbanas donde las redes pluviométricas deben operar con pasos de tiempo de 5 a 10 minutos (Valentín, 2007), o incluso menores como las mediciones del Observatorio Hidrológico, cuya información detallada permite conocer la distribución de la lluvia en el tiempo, estas observaciones se reproducen en un hietograma continuo.

En este tipo de cuencas se pueden hacer estimaciones mediante métodos paramétricos simples, en los que se emplean menos variables (intensidad, tamaño de cuenca, coeficiente de evapotranspiración, infiltración, etc) para poder estimar los procesos hidrológicos.

Actualmente el crecimiento poblacional se ha incrementado de manera exponencial, contando con más de 7,674 millones de habitantes en el mundo y según datos de la ONU (2018) la mayoría de las

personas se concentra en mayor cantidad en las ciudades; debido a múltiples factores tanto sociales como económicos; dando como resultado que más del 55% de la población del mundo se encuentre en las zonas urbanizadas. México es un claro ejemplo de este fenómeno ya que sólo en la Ciudad de México en el año 2020 se contó con una población superior a los 9 millones de habitantes, lo que represento cerca del 14% de la población total del país para dicho año (INEGI, 2020).

Los elementos antropogénicos impactan de manera importante al ambiente, llegando a modificar los flujos atmosféricos debido a elementos como edificaciones, superficies pavimentadas y grandes aglomeraciones de gente; con lo que se desencadenan modificaciones en los tipos de tormentas, inundaciones (frecuencia, magnitud), con lo que a su vez impacta a la salud de la población.

Estas zonas urbanas se pueden considerar que cuenta con un ecosistema único, el cual afecta aspectos meteorológicos, generando un incremento en las temperaturas en comparación de sus alrededores, por lo previamente descrito a estos sitios se les denomina *isla de calor*. Sus alteraciones meteorológicas se presentan de manera más contundentes durante el día. Las *celdas convectivas* son otro efecto en la meteorología de las zonas urbanas. La *tasa de evaporación y albedo* son otros de los factores que presentan alteraciones en las zonas urbanas Koutsoyiannis & Langousis(2011).

El ciclo hidrológico presenta cambios notables en zonas urbanas. La *infiltración y escorrentía* que se presenta en las urbes derivadas de modificaciones de la vegetación y capas de suelo de la zona, así como la construcción de estructuras (contando con una mayor cantidad de superficies impermeables), genera un aumento en el volumen que se puede presentar de escorrentía, aumentando la intensidad de los eventos en un tiempo menor, lo que da como resultado una disminución del tiempo de respuesta que se pueda tener por lo que se producen *inundaciones súbitas*. Dentro de las inundaciones súbitas existen de dos tipos; las *fluviales*, que son elevaciones repentinas de los niveles de agua presentes en un río, y las *pluviales* se presentan por una deficiente o nula capacidad de infiltración o conducción mediante los sistemas de drenaje, teniendo una *creciente*, la cual se presenta cuando el escurrimiento superficial excede la capacidad de la obra de conducción.

Cada año a nivel nacional y global se pueden ver superados varios de los dimensionamientos o el diseño de varios sistemas de control u obras de defensa por el constante crecimiento de las inundaciones, como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; con lo que cada vez pesa más el tener una mayor certeza de los pronósticos de tiempo, para que con esto se pueda mitigar los daños y pérdidas humanas. También existen zonas que se emplean para poder manejar algunas inundaciones y que por razones económicas, técnicas o ambientales se emplean ciertos tipos de uso de suelo que puedan minimizar los daños, a este tipo de zonas se denominan *planicies de inundación* Rodríguez Vázquez(2012).

Las inundaciones presentadas en la Ciudad de México se deben a elementos antropogénicos que impactan de manera importante al ambiente, llegando a modificar los flujos atmosféricos como consecuencia de elementos como las edificaciones, superficies pavimentadas y grandes aglomeraciones de gente; con lo que se desencadenan modificaciones en los tipos de tormentas, inundaciones (frecuencia, magnitud), con lo que a su vez impacta a la salud de la población.

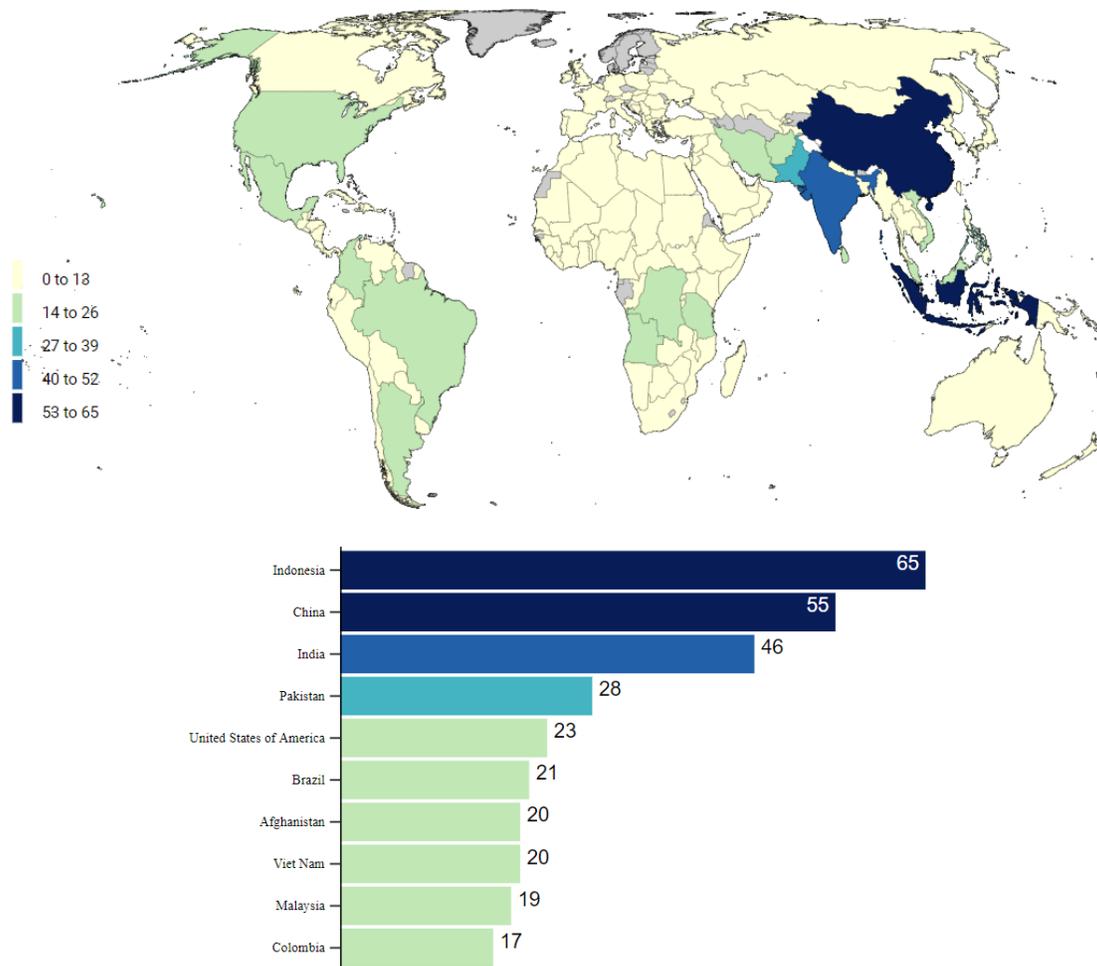


Ilustración 4 Inundaciones a nivel mundial de 2015-2020 (EM-DAT).

El Valle de México, al ser una cuenca de tipo cerrada, todo el flujo de lluvia depende de la capacidad de infiltración del suelo para poder ser extraída; ya que no cuenta con una salida natural; esto ha provocado una gran cantidad de sucesos de inundación desde hace varios cientos de años; en los cuales se destacan los siguientes eventos: 1446, 1449, 1629, 1856 y 1951.

Las dos primeras inundaciones constan de la época del imperio mexicana; y en estos años se presentaron lluvias de gran intensidad, que provocaron que los lagos de Texcoco y Zumpango incrementaran su volumen de manera importante, lo que provocó que el asentamiento de esa época (el cual fue sobre un lago), presentara inundaciones; ante estas situaciones los pobladores de aquella época construyeron un elemento elaborado de tablas y piedras, conocido como el *albarradón de Nezahualcóyotl*, cuya principal función era poder contener el agua ante posibles inundaciones y separar el agua dulce y salada de la zona. El siguiente evento de inundación se presentó por una lluvia de alrededor de 36 horas ininterrumpidas de duración lo que elevó el nivel 2 metros; lo que inició un periodo de 5 años en los cuales el asentamiento permaneció inundado (Códice Mexicano, 1952).

En 1856 se presentaron una serie de lluvias alcanzando un nivel de hasta 3 metros en algunas partes de la Ciudad de México; ante este tipo de problemática comenzaría el diseño y desarrollo de una obra

de desagüe para la ciudad; el cual concluyó 44 años después. Para Julio de 1951 se presentó una inundación que duraría 3 meses y que posteriormente propició la entubación del río Churubusco (Carballal y Flores,1997).

En nuestro periodo de estudio (que consta de los años 2018, 2019 y 2020) se han presentado eventos con precipitación acumulada superior a los 40 mm.

Eventos extremos de precipitación del 2018

En el año 2018 se presentaron varios eventos de gran magnitud, de los cuales destacan 9, y que fueron registrados con la red del Observatorio Hidrológico, los cuales se muestran de la *Tabla 1*. Durante este año el evento de mayor intensidad fue registrado por la estación Zapata, el cual inicio el 05 de agosto del 2018 a las 23:06 horas y concluyó el 06 de agosto del mismo año a las 02:01 horas y cuya precipitación acumulada durante el mismo fue de 88.99 mm.

| Estación | Inicio | Fin | Hp (mm) |
|----------------------|------------------|------------------|----------------|
| Taxqueña | 23/06/2018 22:49 | 24/06/2018 00:06 | 66.96 |
| Culhuacan | 28/07/2018 01:17 | 28/07/2018 03:10 | 52.2 |
| Zapata | 05/08/2018 23:06 | 06/08/2018 02:01 | 88.99 |
| Prepa 8 | 05/08/2018 17:09 | 05/08/2018 21:14 | 52.26 |
| Mexicaltzingo | 05/08/2018 23:59 | 06/08/2018 01:53 | 49.77 |
| Cuemanco | 10/08/2018 00:48 | 10/08/2018 04:20 | 78.64 |
| Cuajimalpa | 12/08/2018 13:31 | 12/08/2018 17:05 | 52.84 |
| Milpa alta | 26/10/2018 20:43 | 26/10/2018 13:18 | 52.9 |
| V. Hermosa | 30/08/2018 19:14 | 31/08/2018 04:05 | 59.61 |
| Padierna | 30/08/2018 18:07 | 31/08/2018 04:08 | 51.02 |
| Zapata | 12/09/2018 00:14 | 12/09/2018 03:33 | 49.41 |
| Bondojito | 30/10/2018 00:06 | 30/10/2018 03:38 | 51.66 |

Tabla 1 Eventos extraordinarios del año 2018.



Ilustración 5 Evento registrado por la estación Prepa 8 el 05 de agosto del 2018.



Ilustración 6 Evento registrado por la estación V.Hermosa el 30 de Agosto del 2018.

Eventos extremos de precipitación del 2019

A pesar de que en este año ocurrieron menos eventos de gran magnitud, destacan tres eventos de carácter extraordinario que se muestran en la Tabla 2.

| Estación | Inicio | Fin | Hp (mm) |
|-------------------|------------------|------------------|----------------|
| Dos Ríos | 01/10/2019 18:02 | 02/10/2019 01:00 | 60.32 |
| Tacuba | 27/10/2019 22:31 | 28/10/2019 02:41 | 58.39 |
| V. Hermosa | 25/07/2019 14:30 | 26/07/2019 01:59 | 55.97 |

Tabla 2 Eventos extraordinarios del año 2019.

De los eventos extraordinarios registrados en el año 2019 destaca la lluvia que se presentó el 01 de octubre del 2019, la cual fue la de mayor magnitud medido por la estación Dos Ríos, y cuya medición fue de 60.32 mm.



Ilustración 7 Evento registrado por la estación V.Hermosa el 25 de Julio del 2019.

Eventos extremos de precipitación del 2020

El 2020 fue el año que concentró mayor cantidad de eventos extremos como se muestra en la Tabla 3, de los cuales destaca el de mayor magnitud, con un registro de 96.65 mm, que se midió mediante la estación Zapata el 16 de septiembre de dicho año.

| Estación | Inicio | Fin | Hp (mm) |
|----------------------|------------------|------------------|----------------|
| Sacmex | 21/04/2020 19:53 | 21/04/2020 22:42 | 70.41 |
| Polanco | 05/05/2020 19:37 | 05/05/2020 20:26 | 44.25 |
| Zapata | 08/06/2020 19:13 | 08/06/2020 20:21 | 59.45 |
| Indios Verdes | 08/06/2020 18:44 | 08/06/2020 22:26 | 44.89 |
| Zapata | 31/07/2020 19:05 | 31/07/2020 21:09 | 89.79 |
| Prepa 2 | 15/09/2020 18:51 | 15/09/2020 21:30 | 93.46 |
| Zapata | 16/09/2020 17:58 | 25/09/2020 04:50 | 96.65 |

Tabla 3 Eventos extraordinarios del año 2020.



Ilustración 8 Evento registrado por la estación Prepa 2 el 15 de septiembre del 2020.

El 16 de septiembre de 2020 se presentó una lluvia histórica ya que hubo registros mayores a 100 mm, y este tipo de registros sólo se han presentado en otras 6 ocasiones (con base en los registros de SACMEX).



Ilustración 9 Evento registrado por la estación Zapata el 16 de septiembre del 2020.

6. METODOLOGÍA

6.1 JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO

Considerando las bases empleadas en Baltas(2016) cuyo propósito era el de encontrar la función que mejor describa la Distribución de Tamaño de Gotas (o por sus siglas en inglés DSD) de la zona de Grecia en el periodo de 2005 a 2014 y cuyo criterio para filtrar eventos de lluvia constaba de que para poder establecer como nuevo evento de lluvia, tendría que existir un lapso de 30 minutos sin lluvia después del evento anterior.

Los eventos de lluvia se clasificaron de acuerdo con el tipo de lluvia o a su mecanismo de generación, por lo que se tienen los eventos de tipo estratiforme y convectivo. Puesto que es complejo poder definir en su totalidad el mecanismo del origen de los eventos; se ha podido establecer la categoría de: lluvia mixta; en la cual se presentan celdas de tipo convectivo en nubes estratiformes.

Para la clasificación se consideró la duración de los eventos, debido a las características de formación para cada uno de ellos su duración e intensidad son diferentes. En eventos de tipo estratiforme el parámetro de duración mayor de los 360 minutos; y para poder ser caracterizado un evento de tipo convectivo debía tener una duración menor a 180 minutos. Por lo tanto, los eventos de lluvia de tipo mixta se clasifican aquellos que tengan una duración entre 180 y 360 minutos.

6.2 ZONA DE ESTUDIO

La Ciudad de México, siendo una de las entidades con mayor concentración de población en el país, cuenta con un área de 1,485 km², y se encuentra dentro del eje Neovolcánico o mejor conocida como *Sierra Volcánica Transversal*, la cual une a la Sierra Madre Occidental y la Sierra Madre Oriental; parte de estos elementos montañosos delimitan el parteaguas que conforman la Cuenca de México y que la Ciudad de México forma parte de dicha cuenca. La Ciudad de México cuenta con una elevación mínima de 2,206 m.s.n.m. y su punto más alto es de 3,932 m.s.n.m. como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

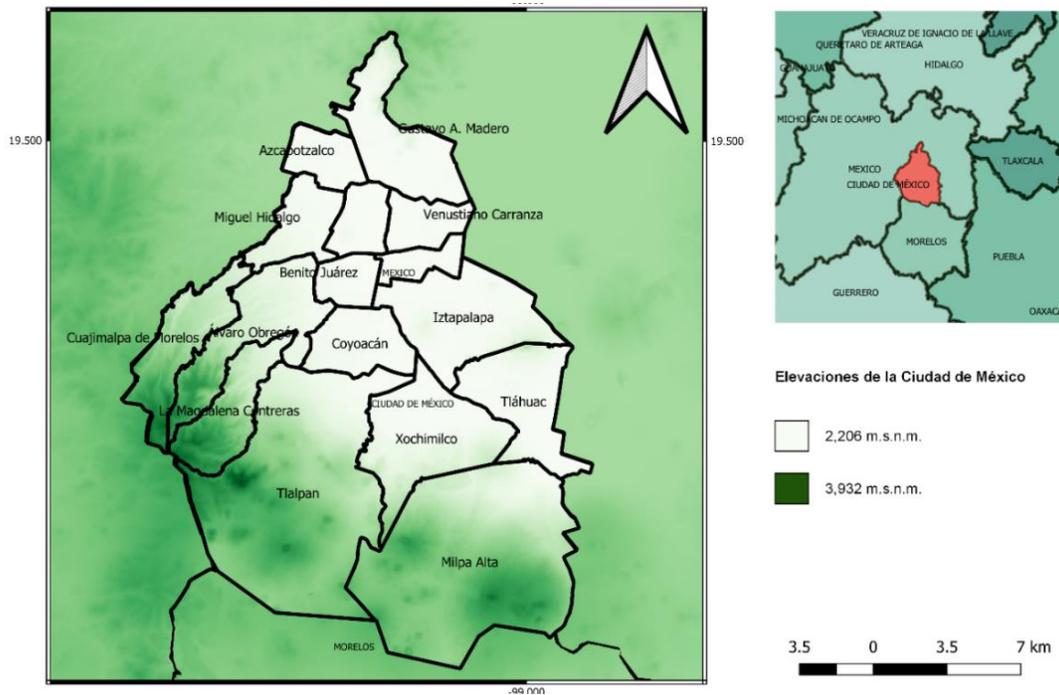
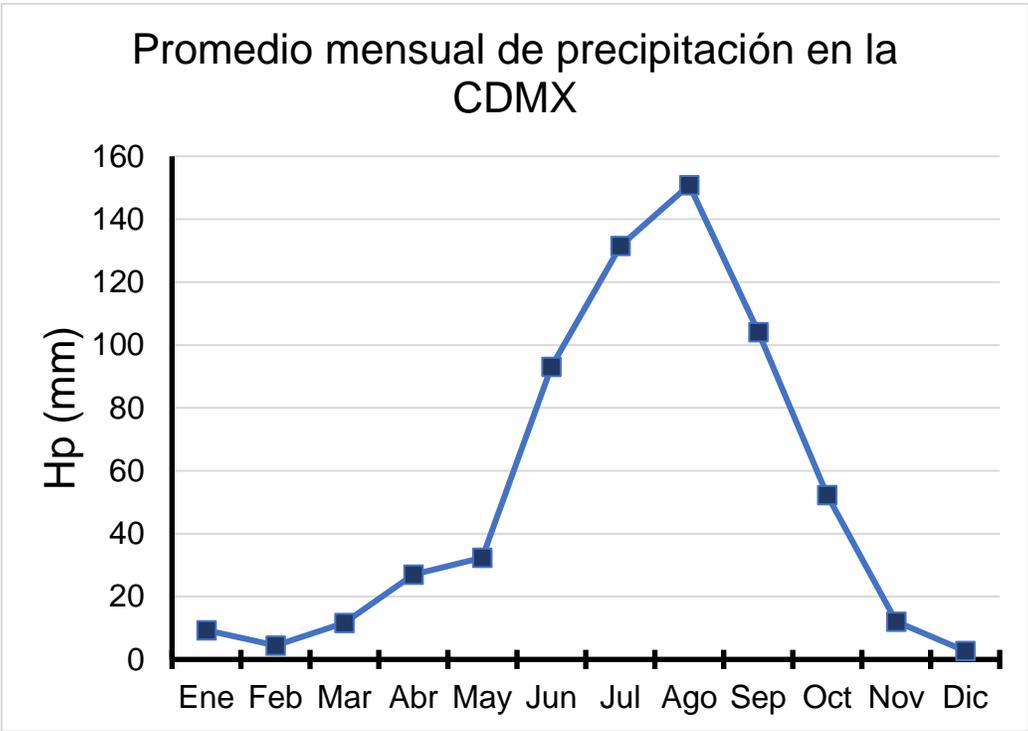


Ilustración 10 Mapa de Elevaciones de la CDMX.

Como podemos observar en la Ilustración 11 el clima de la Ciudad de México en su mayoría es de tipo templado subhúmedo, por lo que la temperatura media anual ronda en los 16 °C. Las precipitaciones que se presentan en la zona de estudio se pueden categorizar en dos periodos; el periodo lluvioso, consta de los meses de mayo a octubre, en los cuales se presentan alrededor del 90% del total de eventos registrados, y es donde los ciclones tropicales propician la humedad necesaria para generar eventos de precipitación; el periodo seco que consta de noviembre a abril es la temporada en donde las precipitaciones se presentan de manera más escasa y su generación está relacionada con la presencia de los frentes fríos. Como se puede observar en la Ilustración 12 la precipitación media anual en la Ciudad de México va desde los 800 mm hasta los 1,500 mm.



Gráfica 1 Promedio mensual de precipitación en la CDMX.

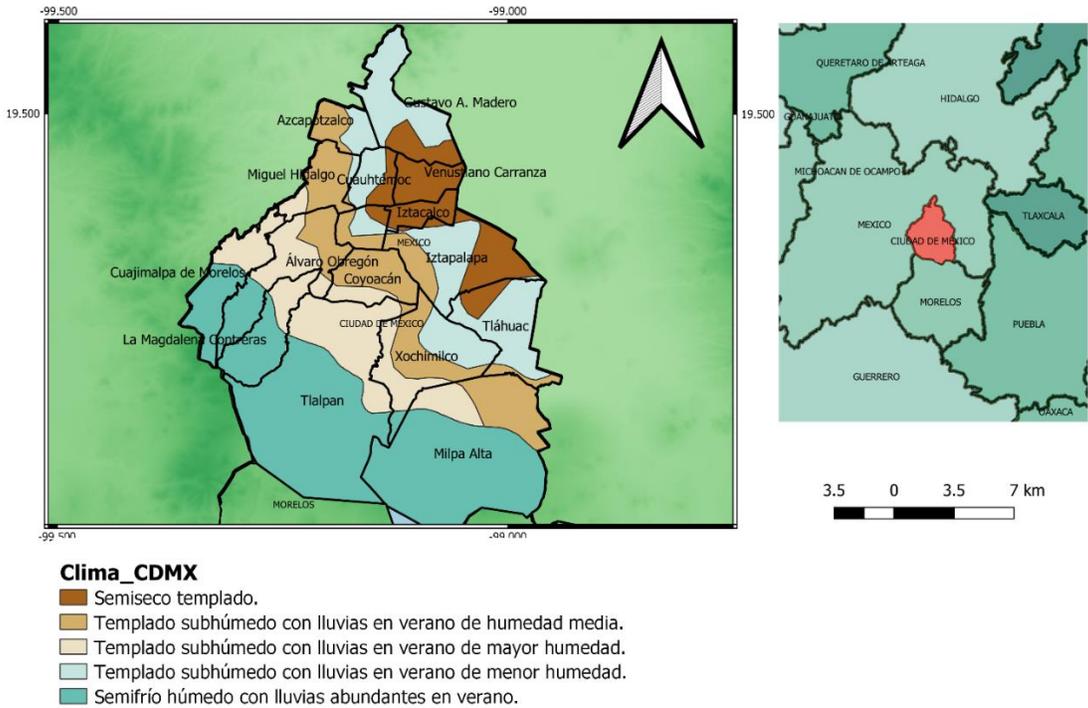


Ilustración 11 Clima de la CDMX (INEGI).

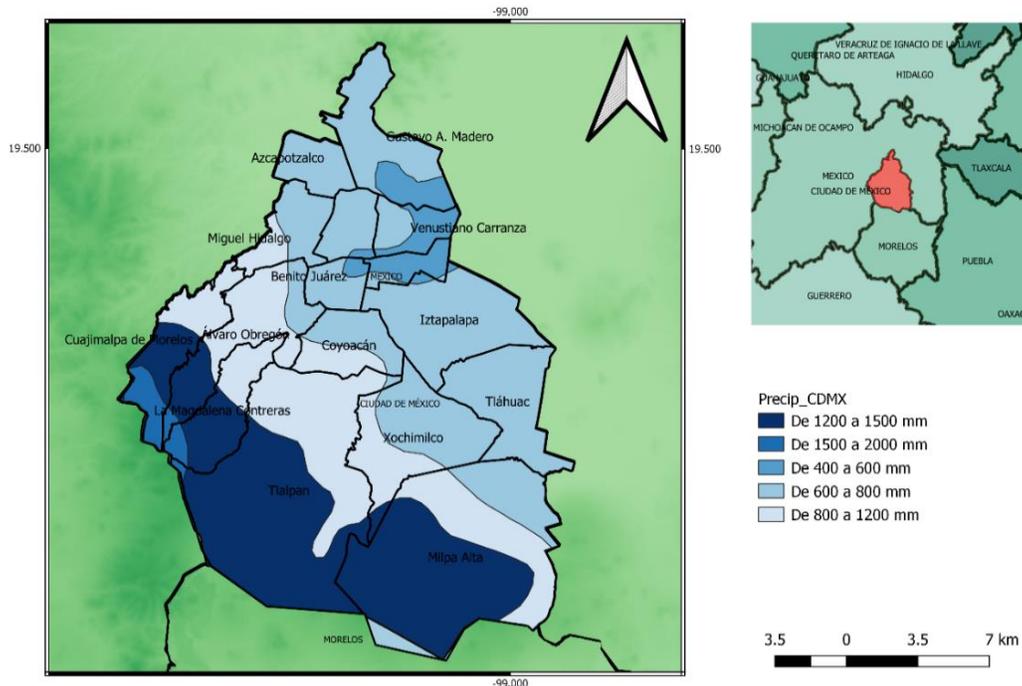


Ilustración 12 Precipitación media anual CDMX.

Para el estudio se analizan las precipitaciones recientes, los años 2018, 2019 y 2020, medidas con los pluviómetros de pesaje y los disdrómetros ópticos presentes en la red que conforman el OH; y se clasifican los eventos en convectivos o estratiformes con base en unos parámetros dados para la duración e intensidad de estos.

6.3 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

El gran desarrollo tecnológico y científico ha propiciado una generación de nuevos elementos de medición, y para nuestro tema de interés podemos destacar los empleados en la red del Observatorio Hidrológico, cuya distribución en el área de estudio es la que se puede observar en la Ilustración 15. La red empezó a funcionar desde el 2015 (con la instalación de la primera estación en el OH-IIUNAM), actualmente consta de 55 estaciones de medición de precipitación en tiempo real; de los cuales 16 son pluviómetros de pesaje y 39 disdrómetros láser. En la Tabla 4 se indica el tipo de instrumentos con los que cuenta cada una de las estaciones del Observatorio Hidrológico.

Para la medición del tamaño y velocidad de las gotas de lluvia se utilizan instrumentos llamados disdrómetros; cuyo significado proviene del inglés *disdrometer* (*distribution drop measuring*). Aunque existen desventajas en este tipo de elementos, como la subestimación de elementos de cierto diámetro que puede ser considerado lo suficientemente pequeño, para que lo desprecie o sean “pérdidas”. La red de disdrómetros que conforma el Observatorio Hidrológico son de tipo ópticos

láser, los cuales recopilan información detallada de las características de la lluvia durante algún evento, hasta estudiar la variabilidad entre eventos (Tokay, Bashor and Wolff, 2005). Su método es mediante un haz de luz horizontal, que cuando cae un hidrometeoro a través de el, correlaciona el tamaño del mismo y la velocidad de caída. Como se observa en la Ilustración 13.



Ilustración 13 Funcionamiento del disdrómetro óptico láser (actualización de protocolo de operación conjunta para el sistema hidrológico del valle de México).

Dentro de los elementos que conforman la red de mediciones del Observatorio Hidrológico también se cuentan con pluviógrafos de pesaje, Ilustración 14 los cuales registran de manera continua, mediante su mecanismo de resorte en un recipiente el cual mide el peso del mismo y de la precipitación acumulada; aunque este tipo de dispositivos cuentan con la desventaja de no contar con un sistema eficiente de “autovaciado”, por lo que sus mediciones pueden contar con un cierto porcentaje de error ante algunos eventos de lluvia. Por las características de este instrumento su precisión de medición es de 6 mm.



Ilustración 14 Pluviógrafo de pesaje OTT Pluvio² S mostrando la interface.

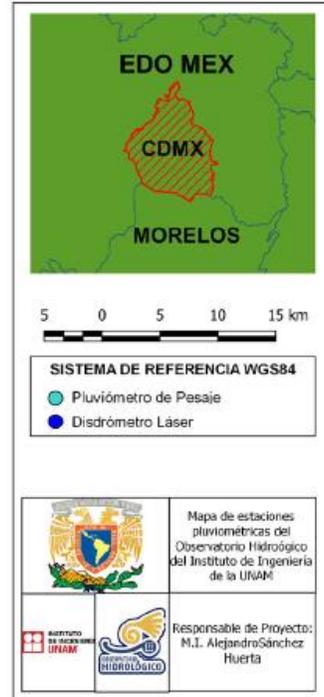
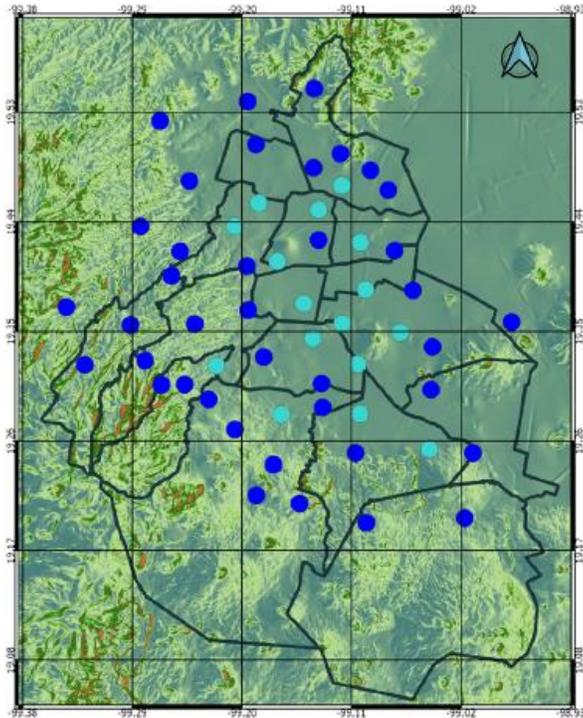


Ilustración 15 Localización de las estaciones del Observatorio Hidrológico IIUNAM (Manual-OH).

| Estación | Tipo de instrumento de medición |
|-------------|---------------------------------|
| Acopilco | Disdrómetro |
| Ajusco | Disdrómetro |
| AMC | Disdrómetro |
| Aragón | Disdrómetro |
| Balbuena | Pluviómetro |
| Bondojito | Pluviómetro |
| Bosque Real | Disdrómetro |
| CCH Oriente | Disdrómetro |
| CCH Vallejo | Disdrómetro |
| Centenario | Disdrómetro |
| Coapa | Disdrómetro |
| Condesa | Pluviómetro |
| Contreras | Disdrómetro |
| Cuajimalpa | Disdrómetro |
| Cuauhtémoc | Disdrómetro |
| Cuauhtepc | Disdrómetro |
| Cuemanco | Pluviómetro |
| Culhuacán | Pluviómetro |

| Estación | Tipo de instrumento de medición |
|--------------|---------------------------------|
| Meyehualco | Disdrómetro |
| Milpa Alta | Disdrómetro |
| Naucalpan | Disdrómetro |
| Nopalera | Disdrómetro |
| Padierna | Disdrómetro |
| Pantitlán | Disdrómetro |
| Picacho | Disdrómetro |
| Polanco | Pluviómetro |
| Prepa 2 | Pluviómetro |
| Prepa 3 | Disdrómetro |
| Prepa 4 | Disdrómetro |
| Prepa 5 | Disdrómetro |
| Prepa 8 | Disdrómetro |
| Sacmex | Disdrómetro |
| San Bartolo | Disdrómetro |
| San Bernabé | Disdrómetro |
| San Gregorio | Pluviómetro |
| Tacuba | Pluviómetro |

| | |
|-------------------------|-------------|
| Derechos Humanos | Pluviómetro |
| Dos Ríos | Disdrómetro |
| Herradura | Disdrómetro |
| IIUNAM | Disdrómetro |
| Indios Verdes | Disdrómetro |
| Iztapalapa | Pluviómetro |
| La Joya | Pluviómetro |
| Los Reyes | Disdrómetro |
| Presa Madín | Disdrómetro |
| Mexicaltzingo | Pluviómetro |

| | |
|---------------------|-------------|
| Taxqueña | Pluviómetro |
| Tlalnepantla | Disdrómetro |
| Tlatelolco | Pluviómetro |
| Topilejo | Disdrómetro |
| Tulyehualco | Disdrómetro |
| UAM Azcapotzalco | Disdrómetro |
| Vista Hermosa | Disdrómetro |
| Xochimilco | Disdrómetro |
| Zapata | Pluviómetro |
| | |

Tabla 4 Tabla de estaciones OHIIUNAM_ Equipos de medición.

Las estaciones pluviométricas del Observatorio Hidrológico están equipadas con un disdrómetro óptico de tipo Parsivel², un panel solar de 60 W y un gabinete que contiene una batería de plomo-ácido de 28 amp/hr, un dispositivo de banda ancha móvil y una microcomputadora Raspberry Pi3. Este sistema está diseñado para que funcionen de manera autónoma o independiente de la red eléctrica, ya que en el día el panel solar suministra la energía suficiente para su funcionamiento, a su vez carga la batería de plomo-ácido para poder seguir operando durante la noche. Como se observa en la Ilustración 16.

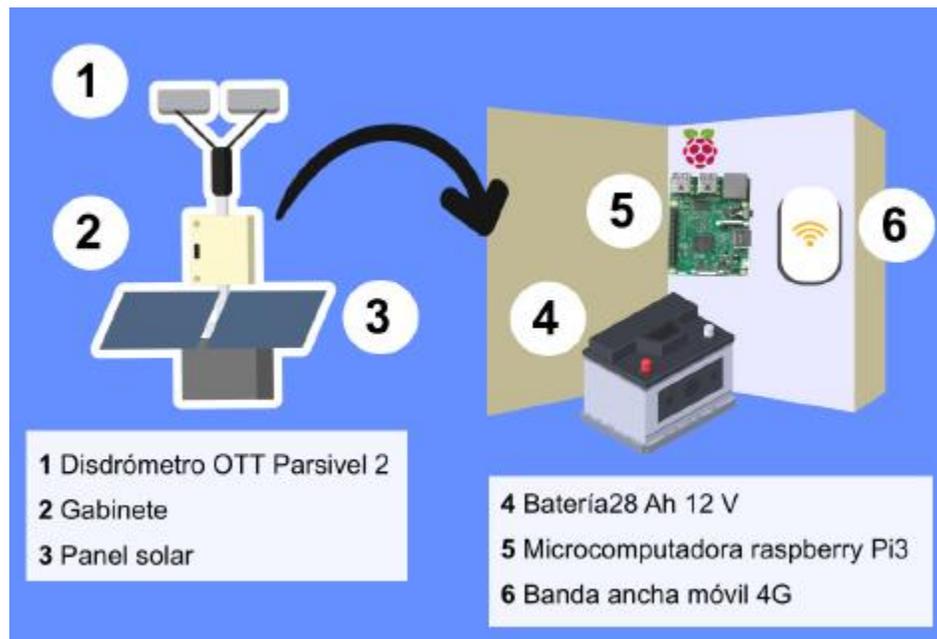


Ilustración 16 Componentes de estaciones pluviométricas (Manual-OH).

La información que se recopila en las estaciones, además de ser almacenada en un dispositivo físico como lo son las tarjetas SD, también es almacenada en la nube minuto a minuto gracias al dispositivo de banda ancha. Para el proceso de manejo de información en estos sistemas es necesario de 3 fases, las cuales son la *obtención y almacenamiento de información in situ* (la cual se da con los elementos que conforman las estaciones pluviométricas ante la presencia de eventos de lluvia), *gestión y almacenamiento de información en la nube* (con la cual se generan registros históricos, a su vez se dan alertas a través de redes sociales como Twitter ante eventos de alta intensidad con base en la clasificación de los tipos de lluvia definidos previamente por la Organización Meteorológica Mundial) y por último la *divulgación de información* (que consiste en la configuración y representación de manera visual la información en tiempo real de las distintas estaciones en un mapa en el sitio de internet del Observatorio Hidrológico <https://www.oh-iunam.mx/mapalluvia2.html>). Como se observa en la Ilustración 17.

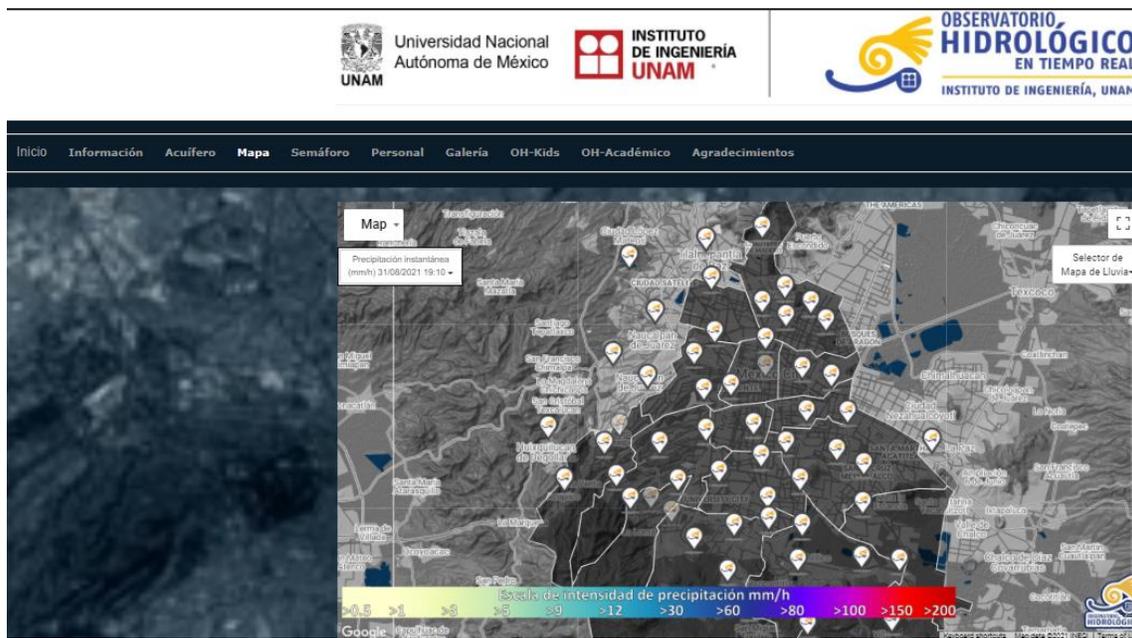
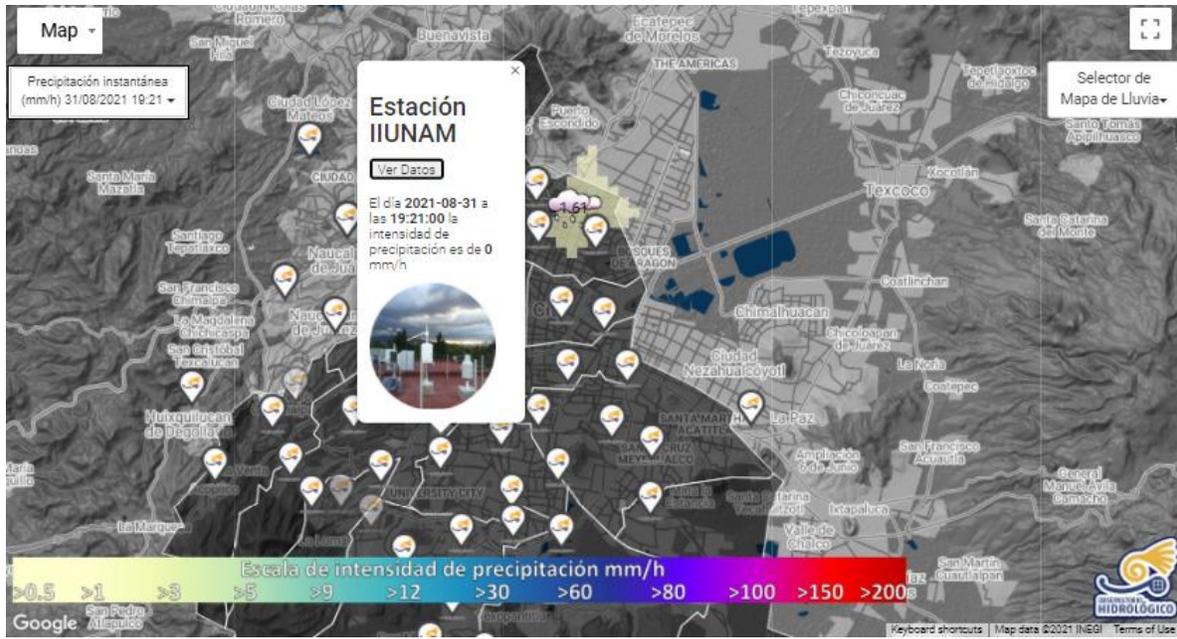


Ilustración 17 Sitio web del Observatorio Hidrológico-IIUNAM.

De las diversas estaciones que conforman la red de estaciones del Observatorio Hidrológico se tuvo acceso a sus datos de registros de los años 2018, 2019 y 2020 (como se muestra en la Ilustración 18) y se descargaron para posteriormente discretizar y seleccionar los eventos a analizar.



- Intensidad de P.
 - P. Acumulada
 - Visibilidad
 - Numero gotas
 - E. Cinética
- Actualización automática

Intensidad de Precipitación (mm/h)

IIUNAM

Zoom 3h Dia Sem **Todo**

Descarga



2017

- Ene
- Feb
- Mar
- Abr
- May
- Jun
- Jul
- Ago
- Sep
- Oct
- Nov
- Dic

Ilustración 18 Obtención de datos a analizar del sitio web del OH-IIUNAM.

6.4 PROCESO DE DISCRETIZACIÓN DE EVENTOS Y SUS CLASIFICACIÓN

La clasificación del tipo de lluvia según su origen depende en gran medida del clima y la ubicación geográfica. Como se ha referido en la sección 5.3 *Clasificación de la lluvia*, en países tropicales, por ejemplo, se tienen precipitaciones durante casi todo el año por la humedad y debido al calor que induce el proceso de condensación. Por otro lado, en sitios fríos por las corrientes de aire frío y seco cercanos a las montañas se producen otro tipo de precipitaciones.

Particularmente en la Zona Metropolitana del Valle de México, en términos climatológicos, se identifican dos temporadas: la temporada seca entre diciembre y febrero, con promedios en un solo día de 1 a 5 milímetros de lluvia al mes y durante el verano (mayo-octubre) la temporada de lluvias. Especialmente entre mayo y agosto ocurre que por el aumento de temperaturas durante el día la superficie se calienta provocando lluvias convectivas por la tarde y por la noche. Por otro lado, los frentes fríos que pueden ocurrir a partir del mes de septiembre y extenderse hasta enero o febrero, son causantes de precipitaciones de tipo frontal (SMN, 2022).

El primer paso consiste en la *discretización de los eventos de lluvia*. Cada evento de lluvia deberá contener una acumulación mínima de altura de precipitación de cinco milímetros ($h_p = 5 \text{ mm}$). Se consideran eventos individuales cuando entre ellos existe un lapso igual o mayor a 30 minutos sin registro de datos de lluvia. A partir del criterio establecido se identificaron 4,558 eventos de precipitación de las 55 estaciones del Observatorio Hidrológico correspondiente al periodo 2018-2020.

Una vez obtenidos los eventos de precipitación, se filtraron los eventos en tres categorías de duración, se considera como lluvia convectiva aquella cuya duración sea menor a los 120 minutos; la lluvia tipo mixta se estableció dentro de un rango de duración de 120 a 360 minutos, y se designa lluvia estratiforme aquellos eventos cuya duración es mayor a los 360 minutos.

6.5 MEDIDAS ESTADÍSTICAS

Las medidas de tendencia central son medidas estadísticas que pretenden resumir en un solo valor a un conjunto de valores. Representan un centro en torno al cual se encuentra ubicado el conjunto de los datos. La media aritmética o promedio es el valor promedio de un conjunto de datos numéricos, calculada como la suma del conjunto de valores dividida entre el número total de valores.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (1)$$

Donde:

X_i .- Representa cada uno de los valores o datos que se cuentan.

N .- Es el número total de datos que se tienen.

Por otro lado, la desviación estándar es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

La desviación estándar se puede utilizar para establecer un valor de referencia para estimar la variación general de un proceso (Minitab18, 2022).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (2)$$

Donde:

X_i .- Es el valor de los datos.

\bar{X} .- Es la media aritmética de los valores de los eventos registrados.

N .- Número de eventos que se tienen registro.

En la sección de resultados se presentan los valores estadísticos de los eventos analizados del 2018, 2019, 2020 y el resumen general.

6.5.1 Diagramas de caja de las características de los eventos

La precipitación acumulada, la duración y la intensidad promedio que es la altura de precipitación registrada por evento. Estos parámetros se han representado mediante diagramas de caja (box plot); los percentiles son valores que dividen un conjunto de datos estadísticos, de forma que un porcentaje de estos quede por debajo de dicho valor.

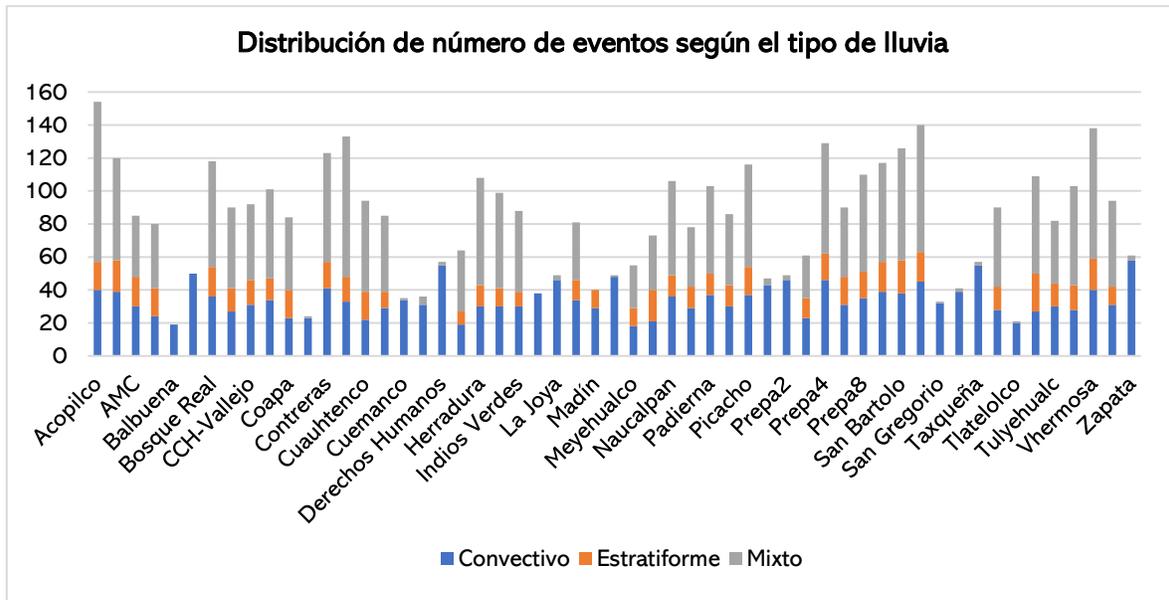
1. La parte inferior de la caja es el primer cuartil (Q1).
2. La barra del medio de la caja es la *mediana* o segundo cuartil (Q2).
3. La parte superior de la caja es el tercer cuartil (Q3)
4. El rango intercuartílico es la altura de la caja, es decir, la diferencia entre Q3 y Q1

Las barras del extremo después de los guiones indican el mínimo (barra inferior) y el máximo (barra superior). Los datos atípicos estarían representados fuera del intervalo del máximo y el mínimo.

7. RESULTADOS

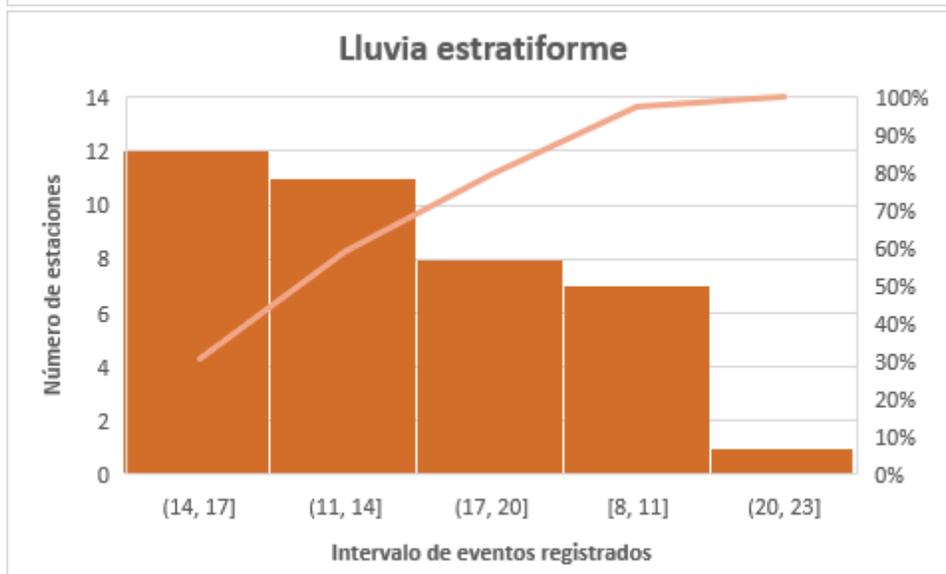
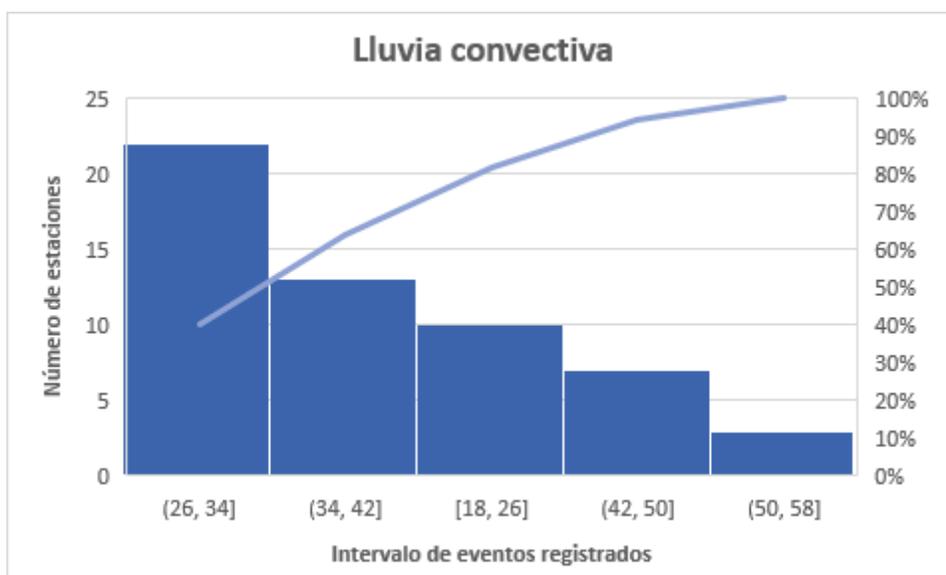
7.1 CLASIFICACIÓN DE LOS EVENTOS SEGÚN EL TIPO DE LLUVIA

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra la clasificación de 4,558 eventos de precipitación del 2018 al 2020 en las 55 estaciones del Observatorio Hidrológico. La gráfica revela que el 45.97% de los eventos son de tipo mixto (barra gris), seguido por un 40.69% de lluvia de tipo convectiva (barra azul) y finalmente 13.34% que corresponde a la lluvia estratiforme (barra naranja). Se puede apreciar que incluso en algunas estaciones como: Balbuena, Bondojito, Condesa, Cuemanco, Culhuacán, Derechos Humanos, Iztapalapa, La Joya, Mexicaltzingo, Polanco, Prepa 2, San Gregorio, Tacuba, Taxqueña, Tlatelolco y Zapata no se registraron eventos de lluvia mixta, ni estratiforme. Por otro lado, esta gráfica indica que en las estaciones en las cuales se han analizado menos de 40 eventos como Balbuena, Condesa, Cuemanco, Iztapalapa, San Gregorio y Tacuba registraron únicamente lluvia convectiva; esta falta de observaciones es como consecuencia que la precisión de medición con la que cuentan algunos instrumentos, ya que en las estaciones previamente mencionadas sus instrumentos de medición son los pluviómetros de pesaje y cuyo rango de precisión es a partir de los 6 mm, y para el criterio de discretización de eventos se tomó como referencia eventos a partir de 5 mm de lámina acumulada.



Gráfica 2 Registro del número de eventos según el tipo de lluvia en las estaciones del Observatorio Hidrológico.

Los histogramas de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** agrupan los datos de las 55 estaciones del Observatorio Hidrológico en categorías según el tipo de lluvia con la proporción de eventos registrados por el número de estaciones. Se observa que, en la categoría de lluvia convectiva, en 23 estaciones se registraron entre 26 y 35 eventos, 13 estaciones midieron entre 35 y 44 eventos, 10 estaciones observaron en intervalo entre 18 y 25 eventos, 6 estaciones registraron entre 44 y 52 eventos en este caso sólo 3 estaciones captaron entre 52 y 61 eventos. Por otro lado, en la clase de lluvia estratiforme contiene menos intervalos y menor cantidad de eventos, 23 estaciones midieron entre 14 y 20 eventos, 16 estaciones midieron entre 0 y 7 eventos, 15 estaciones entre 7 y 14 eventos y una sola estación midió 27 eventos. Cabe resaltar, que el registro de la lluvia mixta en el número de estaciones presenta una distribución uniforme, 15 estaciones midieron entre 0 y 25 eventos, 15 registraron de 25 a 50 eventos, 15 estaciones de 50 a 75 eventos y 4 estaciones midieron entre 75 a 100 eventos.



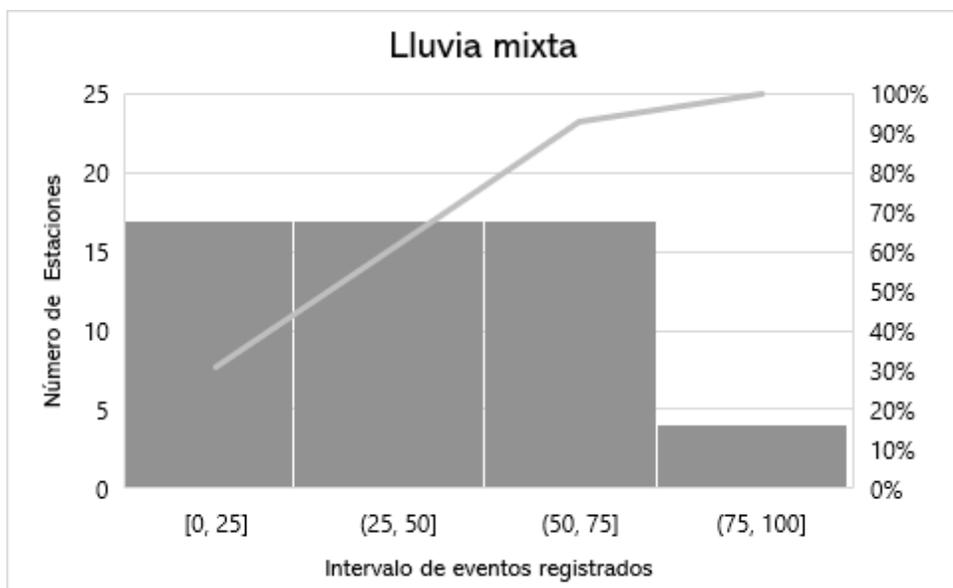


Gráfico 1 Histogramas de intervalos de eventos registrados por las estaciones del Observatorio Hidrológico.

7.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS DE EVENTOS POR AÑO

Posterior a la clasificación de los eventos de precipitación de acuerdo con su duración se procedió con el análisis estadístico.

7.2.1 Estadísticos de los eventos del 2018

La **Tabla 5** presenta el año con mayor cantidad de eventos registrados, durante el año 2018 las estaciones del Observatorio Hidrológico midieron un total de 1,763 eventos, el 46.74% de los eventos son de tipo mixto, el segundo tipo de lluvia más frecuente son de tipo convectivo, cuyo porcentaje es de 40.61% y finalmente, el tipo de evento con menor frecuencia durante el 2018 es el estratiforme, con un porcentaje de 12.65%. En la tercera columna se muestran las duraciones, en promedio los eventos de tipo convectivo duraban 1 hora y 11 minutos, los mixtos se prologaban hasta 3 horas y 33 minutos y los estratiforme perduraban casi hasta 11 horas, cabe indicar que este tipo de lluvia mostró una desviación estándar significativa de poco más de 4 horas, por lo tanto, refiere que existe una gran disparidad entre los datos de duración.

Respecto a la intensidad, la lluvia convectiva se estimó un promedio de intensidad de 63.39 mm/h, seguido por la lluvia mixta de 46.22 mm/h, los valores de desviación estándar de la intensidad mantienen la misma proporción. El mayor hallazgo observado es en la columna 7, el promedio de precipitación acumulada por evento lluvia convectiva es muy similar a la lluvia mixta, pero son superados por la precipitación acumulada por la lluvia estratiforme.

| Tipo de evento | Número de eventos | \bar{X} de Duración | S de Duración | \bar{X} de Intensidad Máxima (mm/h) | S de Intensidad Máxima (mm/h) | \bar{X} de HP(mm) | S de HP(mm) |
|---------------------|-------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-------------|
| Convectivo | 716 | 1:10:58 | 0:26:04 | 63.39 | 39.99 | 11.53 | 7.71 |
| Estratiforme | 223 | 10:54:40 | 4:20:05 | 25.01 | 26.98 | 13.96 | 8.46 |
| Mixto | 824 | 3:33:18 | 1:02:15 | 46.22 | 37.16 | 11.97 | 8.43 |

Tabla 5 Análisis de eventos durante el año 2018.

7.2.2 Estadísticos de los eventos del 2019

En la Tabla 6 se presenta el conteo de eventos clasificados por el tipo de lluvia durante el 2019. En el año 2019 se analizaron un total de 1,609 eventos, los eventos con mayor frecuencia durante este año son de tipo mixto, cuyo porcentaje es de 43.75%, el siguiente tipo de evento con mayor frecuencia son los convectivos, con un porcentaje de 40.58 %, finalmente el de menor frecuencia es el tipo estratiforme. Respecto a la duración, se encontró que en promedio la duración de la lluvia estratiforme fue más corta respecto al 2018 y 2020, siendo de 8 horas y 45 minutos; sin variación notable en las duraciones de la lluvia convectiva y estratiforme. La intensidad promedio más grande es de la lluvia convectiva de 63 mm/h, seguido por la lluvia mixta de 41mm/h y la estratiforme de 27 mm/h. Cabe destacar que en la columna 7 se distingue la lluvia estratiforme con una intensidad más ligera acumula mayor cantidad de volumen de lluvia.

| Tipo de evento | Número de eventos | \bar{X} de Duración | S de Duración | \bar{X} de Intensidad Máxima (mm/h) | S de Intensidad Máxima (mm/h) | \bar{X} de HP (mm) | S de HP (mm) |
|---------------------|-------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------|
| Convectivo | 653 | 1:10:46 | 0:26:46 | 62.96 | 38.03 | 11.27 | 6.77 |
| Estratiforme | 252 | 8:44:42 | 3:20:36 | 27.57 | 28.85 | 15.50 | 8.94 |
| Mixto | 704 | 3:44:19 | 1:11:50 | 41.25 | 31.66 | 12.02 | 6.66 |

Tabla 6 Análisis de eventos durante el año 2019.

7.2.3 Estadísticos de los eventos del 2020

Al comparar para el año 2020 los resultados de la Tabla 7, es el año que se contabilizaron una menor cantidad de eventos; pero no significa que se midió menor cantidad de lluvia; ya que en ese periodo varias de las estaciones se encontraban con problemas de mantenimiento. De los 1,186 eventos que se analizaron en el 2020, el 48.99% de los eventos son de tipo mixto, el segundo con mayor porcentaje es de tipo convectivo, con un 41.99 %, finalmente los eventos de tipo estratiforme fueron los de menor presencia durante ese año con un 9.02%.

A pesar de que no se observan diferencias notables en los valores promedios de la duración, llama la atención que la desviación estándar para la lluvia estratiforme es muy alta lo que podría indicar que ocurrieron uno o más eventos que duraron más de un día, en la columna 4 la desviación estándar es de 23 horas.

En la columna 5 se muestran los valores promedio de intensidad de lluvia mixta y estratiforme que superan a los años anteriores, el promedio de la lluvia convectiva es de 68 mm/h y de lluvia estratiforme de 30 mm/h. Por otro lado, la tendencia se mantiene como en años anteriores, los valores promedios de precipitación acumulada más alto corresponden a la lluvia estratiforme, aunque la cantidad de eventos registrados para ese año fueron menores para el tipo estratiforme; la desviación estándar en cuanto a la altura de precipitación es mayor, teniendo un valor de 11.90 milímetros.

| Tipo de evento | Número de evento | \bar{X} de Duración | S de Duración | \bar{X} de Intensidad Máxima (mm/h) | S de Intensidad Máxima (mm/h) | \bar{X} de HP (mm) | S de HP (mm) |
|----------------|------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------|
| Convectivo | 498 | 1:10:20 | 0:25:49 | 67.88 | 37.51 | 12.20 | 8.23 |
| Estratiforme | 107 | 10:50:59 | 23:17:20 | 30.03 | 24.77 | 16.67 | 11.90 |
| Mixto | 581 | 3:31:44 | 1:08:16 | 45.98 | 36.14 | 13.76 | 11.79 |

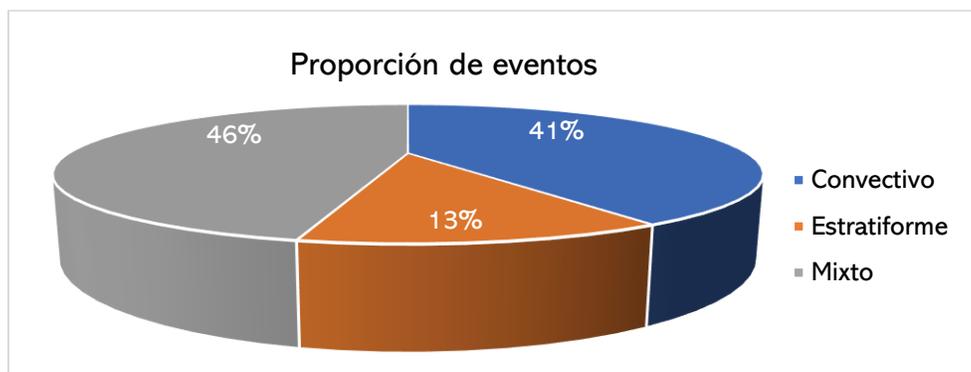
Tabla 7 Análisis de eventos durante el año 2020.

7.2.4 Estadísticos de los eventos del periodo del 2018 al 2020

El análisis en conjunto se presenta en la Gráfica 3, la cual es bastante concluyente en cuanto al tipo de precipitación dominante en la Ciudad de México. Con los registros del 2018 al 2020 se puede corroborar, que el tipo de precipitación mixta es el más frecuente, dado que la lluvia mixta tiene características intermedias, al posicionarse la lluvia convectiva como el segundo tipo de precipitación (por una diferencia de 5%) más común nos indica que es una lluvia mixta con más tendencia a convectiva.

La explicación para entender la ocurrencia de lluvia mixta, es que la llegada de los frentes fríos sucede en la transición de verano al otoño, iniciando en septiembre y finaliza en mayo del siguiente año de acuerdo con la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN), por lo que, durante un año se contabilizan sistemas frontales de dos temporadas (Pascual Ramírez et al., 2020).

Por otro lado, aunque el periodo de lluvias de tipo estratiforme es más largo casi de ocho meses (septiembre a mayo) se registraron menor cantidad de precipitaciones (13%=107 eventos).



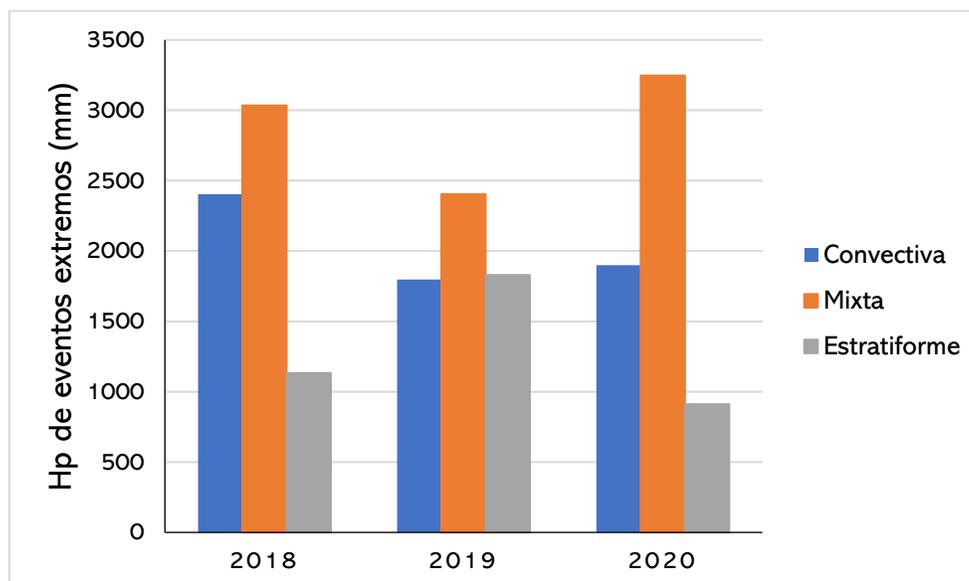
Gráfica 3 Proporción de eventos clasificados por el tipo de lluvia entre el 2018 y 2020.

Se puede observar que en la Tabla 8 la duración promedio de eventos convectivos es de 1 hora y 10 minutos, en eventos mixtos de 3 horas y 36 minutos y en lluvia estratiforme la duración es de 9 horas y 57 minutos. También se observa que el sesgo de la duración se incrementa ampliamente conforme a la duración, en los eventos convectivos es de 26 minutos, para estratiforme es de 10 horas y 15 minutos, mientras que para los mixtos es de 1 hora y 7 minutos, de modo que la desviación estándar más grande es para la lluvia estratiforme porque su variación puede desarrollarse con una duración entre 9 horas hasta un día completo. Es claro que la intensidad máxima promedio más alta es la registrada por la lluvia convectiva 64.44 mm/h, de igual forma su desviación estándar es la mayor. Resulta interesante que la altura de precipitación promedio de un tipo de lluvia a otro no varían ampliamente en un rango de 11.61 a 15.12 milímetros, así como la desviación estándar entre 7.55 a 9.42.

| Tipo de evento | \bar{X} de Duración | S de Duración | \bar{X} de Intensidad Máxima (mm/h) | S de Intensidad Máxima (mm/h) | \bar{X} de HP (mm) | S de HP (mm) |
|---------------------|-----------------------|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------|
| Convectivo | 1:10:44 | 0:26:14 | 64.44 | 38.70 | 11.61 | 7.55 |
| Estratiforme | 9:57:43 | 10:35:15 | 27.04 | 27.44 | 15.12 | 9.42 |
| Mixto | 3:36:32 | 1:07:26 | 44.49 | 35.18 | 12.48 | 9.02 |

Tabla 8 Análisis de eventos del 2018 al 2020 .

La Gráfica 4 muestra la acumulación anual en términos de altura de precipitación de todos los eventos ordenados por el tipo de lluvia para el periodo observado 2018-2020. Se advierte de la gran similitud entre el número de eventos y la altura de precipitación acumulada, los cuales varían a la par. En el periodo analizado la mayor proporción de lluvia acumulada es de tipo mixta, en orden descendente en el 2020 se obtuvieron 3,246 mm, 3,034 mm en 2018 y 2,404 mm en 2019. La segunda aportación de volumen corresponde a la lluvia convectiva, la mayor proporción se obtuvo en el 2018 con 2,403 mm, descendió a 1,797 mm en el 2019 e incrementó a 1,899 mm en 2020. Evidentemente la menor aportación de lluvia es por parte del tipo estratiforme, se estimó 912 mm en 2020 y es el único tipo de lluvia que incrementa en el 2019 a 1,829 mm en comparación con el año anterior cuyo valor de 2018 fue de 1,132 mm.



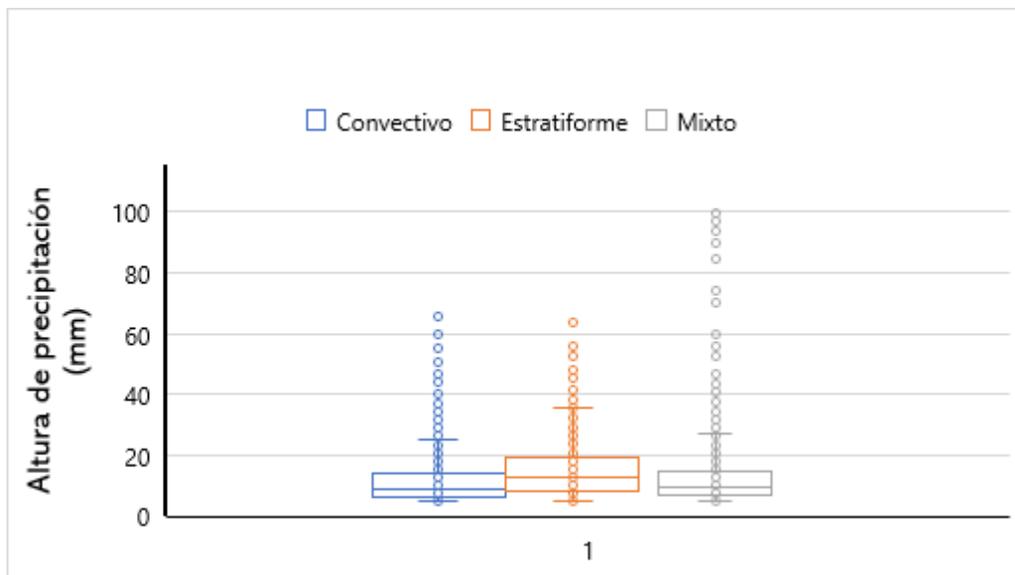
Gráfica 4 Precipitación acumulada por los eventos según el tipo de lluvia.

7.2.5 Características de los eventos según el tipo de lluvia

De acuerdo con la Gráfica 5 se establece que los eventos de tipo convectivo refieren una altura de precipitación promedio aproximada a 10 mm, y el margen de valores de eventos máximos atípicos varía entre 25 y 65 milímetros. Mientras tanto, los eventos estratiformes poseen un rango intercuartílico más amplio del conjunto analizado, el valor promedio por evento es de 12 mm, el valor máximo no atípico no supera 40 milímetros y los valores atípicos son menores a 60 mm. Por otra parte, los valores de los eventos mixtos se aproximan al tipo de lluvia convectiva, con una precipitación media (Q2) de 10 mm; pero a diferencia de los eventos convectivos los valores atípicos exceden el rango registrado por la lluvia convectiva, los valores atípicos se estiman entre 26 a 100 mm.

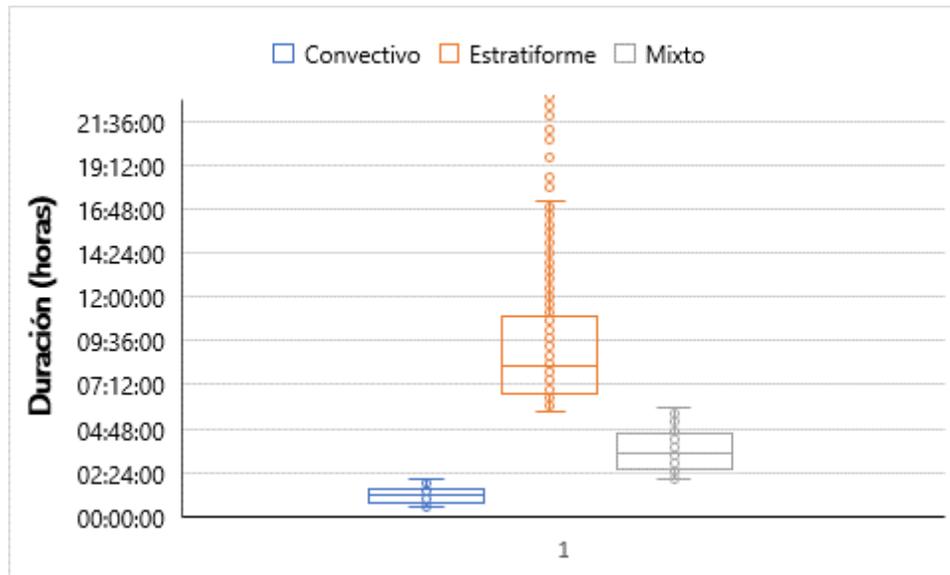
Si bien las lluvias estratiformes aportan la mayor cantidad de precipitación, son menos frecuentes que las lluvias convectivas, teniendo en cuenta que las lluvias estratiformes ocurren en la última mitad del periodo de lluvias.

La evidencia científica muestra que el número creciente de inundaciones se ha intensificado por el efecto del cambio climático en la precipitación (Cho et al 2016, Pall et al 2017, Ven der Wiel et al 2017, Philip et al 2018a, Teufel et al 2019). El incremento de lluvias extremas se ha observado a partir de los datos de lluvia sub-diarios especialmente en América del Norte, Asia y Europa (Chen y Sun 2017^a).



Gráfica 5 Diagrama de caja de las alturas de precipitación de todos los eventos comprendidos entre 2018-2020.

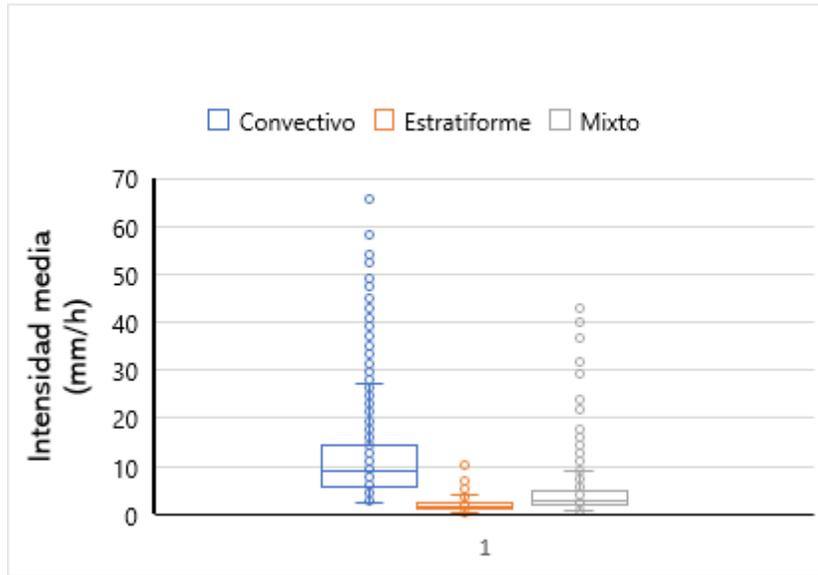
En la Gráfica 6 la mínima duración es la lluvia de tipo convectiva con una media (Q2) de 1:18:00 horas. Existe una gran diferencia con la lluvia estratiforme, su rango de duración es el máximo del conjunto de datos con un promedio de 8:01:00 horas. Finalmente, los eventos de tipo mixto demuestran una duración media (Q2) de 3:36:00 hrs, y un valor máximo promedio de 4:24:00 hrs (Q3).



Gráfica 6 Diagrama de las duraciones de todos los eventos comprendidos entre 2018-2020.

La intensidad según el tipo de lluvia se expone en la Gráfica 7. Se muestra que la lluvia de tipo convectiva dispone del rango intercuartílico más amplio, con un promedio de intensidad cerca de 9 mm/h (Q2), los valores extremos de intensidad (hasta 25 mm) superan notablemente sobre la lluvia mixta y estratiforme; la lluvia convectiva excede ante todo los valores atípicos (cifra máxima de 70 mm/h) registrados por los demás tipos de lluvia. Por otro lado, la lluvia estratiforme particularmente se caracteriza por las intensidades bajas, la intensidad media (Q2) es 1.7 mm/h, los valores máximos apuntan escasamente hasta 5 mm/h y se estima que los valores atípicos no exceden 10 mm/h. De forma similar, la lluvia mixta presenta intensidades moderadas, la media es 3 mm/h, el valor máximo no atípico es cercano a 10 mm/h, respecto al umbral de valores atípicos se estimaron a partir de 10

mm/h y 45 mm/h.

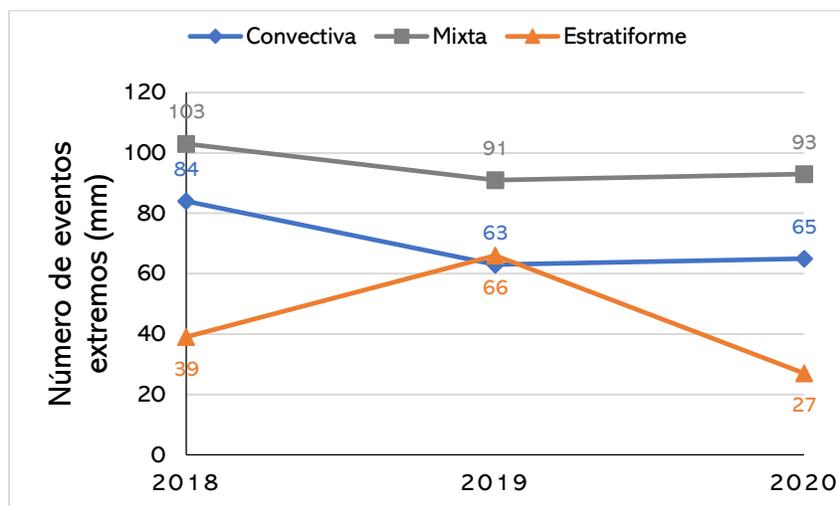


Gráfica 7 Diagrama de las intensidades de todos los eventos comprendidos entre 2018-2020.

El carácter extraordinario de las lluvias es condicionado por la forma en que ocurren: una precipitación muy intensa en horas de tipo convectiva, o un tren de tormentas prolongadas provenientes de frentes fríos cuya acumulación constituye un evento extraordinario, de modo que su efecto es la saturación paulatina de agua en el suelo donde no puede absorber más humedad, o en el caso de las ciudades la saturación de los sistemas de drenaje que cualquier lluvia posterior provoca una inundación, este tipo de precipitación se atribuyen al tipo estratiforme, o la combinación de ambas que dan origen a la lluvia mixta. En la **Gráfica 8** se presenta que la mayoría de los *eventos extremos* pertenecen a la categoría de lluvia mixta con 287 tormentas (45%), seguido por tormentas de lluvia convectiva con 212 eventos (34%) y en menor proporción 132 eventos extremos (21%) son clasificados como lluvia estratiforme. Por otro lado, se observa que en el 2018 la tendencia de *eventos extremos* es superior respecto a los dos años posteriores. Para el 2019 se redujo la cantidad de eventos extremos de lluvia convectiva y lluvia mixta, y un incremento de lluvia estratiforme; la razón es la temporada 2019 de frentes fríos entre los meses de *noviembre a marzo* fue una de las más activas se registró el ingreso de 39 sistemas frontales, 9 más que el promedio entre noviembre y marzo del periodo de 1981-2010 (*Ilustración 19*) que influyen en las condiciones de precipitación. De acuerdo con la **Gráfica 7** en el 2020 se registraron dos tormentas más de lluvia mixta y convectiva que en el 2019, por otro lado, descendió el número de eventos extremos de origen estratiforme.

Como podemos observar en la **Tabla 9** se encuentra el registro de la precipitación acumulada de las 55 estaciones (resaltadas en amarillo las estaciones que cuentan pluviómetros de pesaje) durante el periodo de estudio 24 estaciones registraron una precipitación acumulada anual por arriba del promedio, cuyo promedio de las 55 estaciones durante los 3 años de estudio (2018 al 2020) fue de 568.16 mm. Y de esas 24 estaciones 5 contaban con pluviómetros de pesajes como instrumentos de medición las cuales son: Condesa, Derechos Humanos, Iztapalapa, Mexicaltzingo, Taxqueña y

Zapata. El que 1/5 parte de las estaciones que registraran precipitaciones acumuladas por arriba del promedio, puede ser consecuencia de la precisión de medición de los pluviómetros.



Gráfica 8 Agrupación del número de eventos extremos para cada tipo de lluvia en la CDMX.

| Estación | Año | | | |
|-------------|---------|--------|--------|----------|
| | 2018 | 2019 | 2020 | Promedio |
| Acopilco | 896.35 | 934.70 | 740.85 | 857.30 |
| Ajusco | 684.91 | 643.18 | 801.04 | 709.71 |
| AMC | 454.62 | 527.20 | 651.03 | 544.28 |
| Aragón | 667.86 | 458.11 | 351.86 | 492.61 |
| Balbuena | 0.00 | 335.94 | 484.55 | 273.50 |
| Bondojito | 556.62 | 443.08 | 496.92 | 498.88 |
| Bosque Real | 842.76 | 577.52 | 485.25 | 635.18 |
| CCH Oriente | 834.43 | 415.44 | 385.58 | 545.15 |
| CCH Vallejo | 692.31 | 461.64 | 420.95 | 524.97 |
| Centenario | 736.32 | 460.15 | 575.78 | 590.75 |
| Centro | 787.95 | 721.42 | 633.22 | 714.19 |
| Coapa | 601.22 | 501.32 | 452.11 | 518.22 |
| Condesa | 46.16 | 488.57 | 152.13 | 228.95 |
| Contreras | 810.71 | 774.59 | 651.03 | 745.44 |
| Cuajimalpa | 1012.37 | 693.77 | 656.42 | 787.52 |
| Cuauhtenco | 503.24 | 475.83 | 705.61 | 561.56 |
| Cuauhtepc | 528.01 | 573.53 | 412.03 | 504.52 |
| Cuemanco | 383.96 | 337.84 | 747.48 | 489.76 |
| Culhuacán | 420.03 | 374.69 | 596.91 | 463.88 |

| | | | | |
|-------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| Derechos Humanos | 594.86 | 486.62 | 684.48 | 588.66 |
| Dos Ríos | 500.73 | 437.81 | 345.00 | 427.85 |
| Herradura | 765.29 | 680.55 | 121.01 | 522.28 |
| II UNAM | 785.67 | 449.55 | 958.75 | 731.32 |
| Indios Verdes | 590.49 | 540.21 | 392.06 | 507.59 |
| Iztapalapa | 456.95 | 389.64 | 1130.40 | 659.00 |
| La Joya | 440.04 | 454.60 | 754.44 | 549.69 |
| Los Reyes | 490.74 | 567.44 | 393.59 | 483.93 |
| Madín | 686.16 | 1026.96 | 341.11 | 684.74 |
| Mexicaltzingo | 568.07 | 436.89 | 767.29 | 590.75 |
| Meyehualco | 462.51 | 496.21 | 124.53 | 361.08 |
| Milpa Alta | 459.30 | 375.96 | 585.21 | 473.49 |
| Naucalpan | 634.05 | 639.63 | 501.59 | 591.76 |
| Nopalera | 423.79 | 443.72 | 486.01 | 451.17 |
| Padierna | 593.08 | 747.15 | 640.29 | 660.18 |
| Pantitlán | 458.75 | 613.26 | 401.54 | 491.18 |
| Picacho | 613.34 | 737.62 | 733.11 | 694.69 |
| Polanco | 399.53 | 431.10 | 652.43 | 494.35 |
| Prepa 2 | 458.35 | 386.66 | 550.04 | 465.02 |
| Prepa 3 | 494.70 | 514.90 | 289.99 | 433.20 |
| Prepa 4 | 797.19 | 678.00 | 561.99 | 679.06 |
| Prepa 5 | 510.93 | 591.52 | 632.08 | 578.17 |
| Prepa 8 | 786.97 | 644.21 | 675.72 | 702.30 |
| San Bartolo | 847.01 | 730.90 | 660.95 | 746.29 |
| San Bernabé | 812.38 | 862.52 | 666.59 | 780.50 |
| San Gregorio | 306.44 | 244.22 | 802.92 | 451.20 |
| Tacuba | 513.33 | 441.18 | 550.44 | 501.65 |
| Taxqueña | 545.47 | 408.96 | 803.52 | 585.98 |
| Tlalnepantla | 686.93 | 524.75 | 409.58 | 540.42 |
| Tlatelolco | 417.85 | 0.00 | 1284.10 | 567.32 |
| Topilejo | 548.08 | 517.98 | 773.77 | 613.28 |
| Tulyehualco | 397.23 | 403.92 | 477.10 | 426.08 |
| UAM Azcapo | 818.14 | 489.92 | 373.03 | 560.36 |
| Vista Hermosa | 978.29 | 685.24 | 590.53 | 751.35 |
| Xochimilco | 503.94 | 512.64 | 638.05 | 551.54 |
| Zapata | 660.71 | 389.26 | 944.79 | 664.92 |
| Promedio | 590.31 | 530.55 | 583.61 | 568.16 |

Tabla 9 Precipitación acumulada anual por estación (2018-2020).

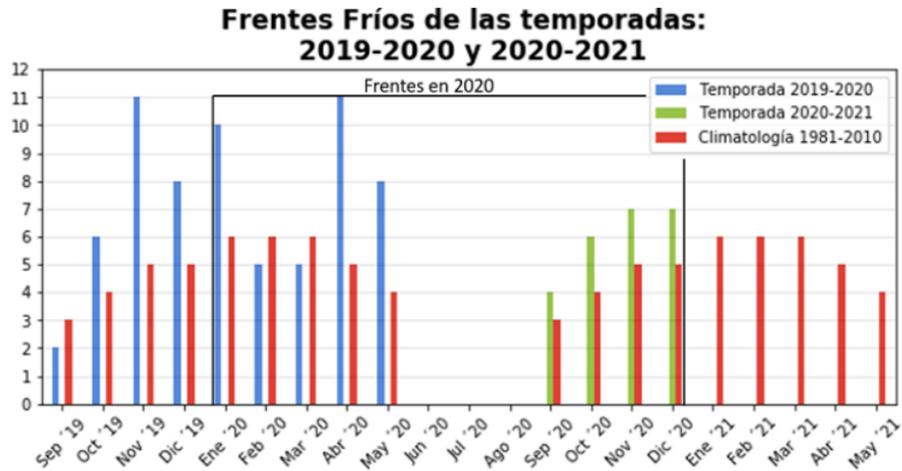


Ilustración 19 Número de frentes fríos en el 2019 y 2020 (SMN, 2022).

7.2.6 Distribución temporal de los eventos extremos significativos según el tipo de lluvia

En la Tabla 10 se muestran los eventos extraordinarios de mayor acumulación de precipitación registrados en cada uno de los años por las estaciones del Observatorio Hidrológicos, los cuales han sido clasificados por categoría de tipo de lluvia, algunos de los eventos podrían estar asociado a periodos de retorno ≥ 100 años. En este sentido, solo se analizó un caso, como el medido en la estación La Joya el 16/09/2020 con precipitación acumulada de 100 mm se estimó el $Tr=191$ años con el ajuste de la distribución Gamma con tres parámetros con base en los momentos-L (CONAGUA-OCAVM, 2021).

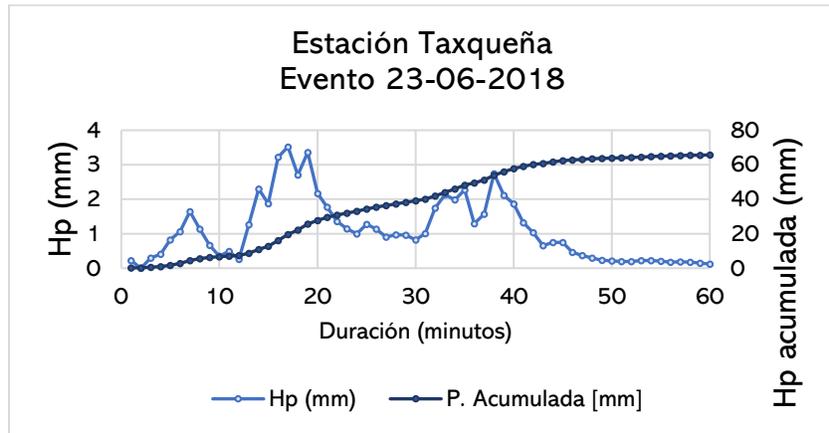
| Tipo de Evento | Año | Estación | Fecha/Hora | Duración (minutos) | Hp (mm) |
|---------------------|------|---------------|------------------|--------------------|---------|
| Convectivo | 2018 | Taxqueña | 23/06/2018 17:53 | 60 | 65.71 |
| | 2019 | Tacuba | 27/10/2019 16:44 | 71 | 48.83 |
| | 2020 | Zapata | 08/06/2020 19:13 | 68 | 59.45 |
| Estratiforme | 2018 | Vista Hermosa | 30/08/2018 19:14 | 532 | 54.18 |
| | 2019 | Madín | 23/10/2019 05:22 | 380 | 47.91 |

| | | | | | |
|--------------|------|---------|------------------|-----|-------|
| | 2020 | Ajusco | 23/06/2020 18:25 | 469 | 63.41 |
| Mixto | 2018 | Zapata | 05/08/2018 18:06 | 163 | 86.02 |
| | 2019 | Madín | 03/08/2019 05:32 | 338 | 43.62 |
| | 2020 | La Joya | 16/09/2020 17:42 | 296 | 99.29 |

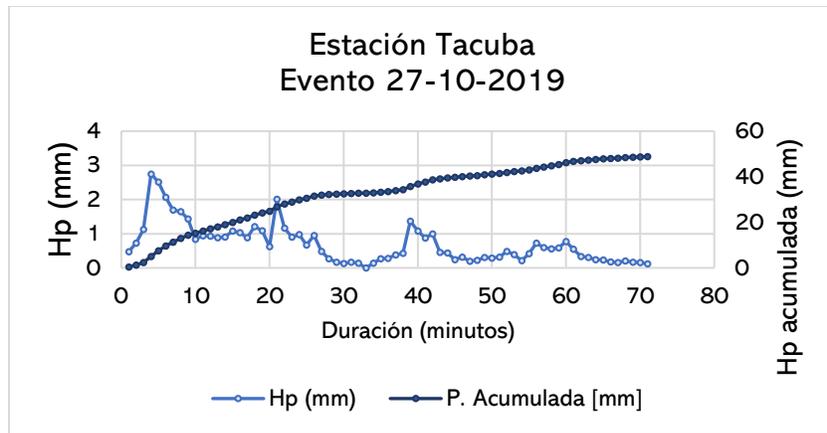
Tabla 10 Eventos de mayor precipitación en cada año para cada tipo de evento.

En este apartado se representan los hietogramas y curvas masa por eventos clasificados con resolución temporal al minuto. De las gráficas 10 a la 12 corresponden a la lluvia convectiva, de las gráficas 13 a la 14 lluvia estratiforme y de 16 a la 18 lluvia estratiforme.

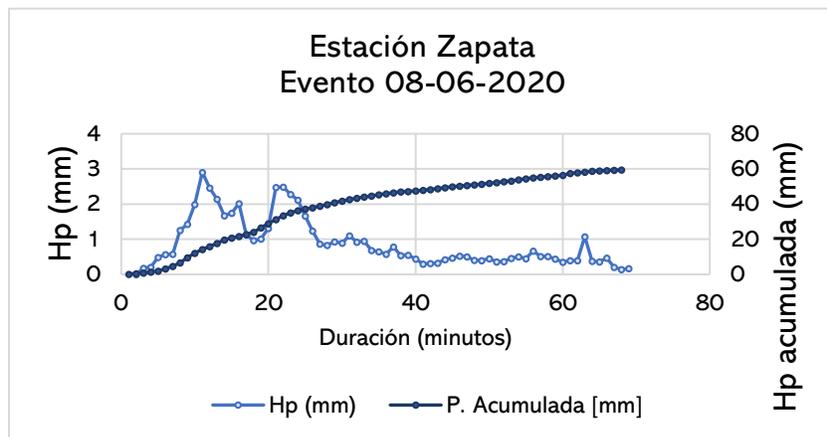
En la Gráfica 9 se muestra el registro de un evento convectivo en el cual se desarrollan 3 picos en un lapso de 60 minutos y una precipitación acumulada ≥ 60 milímetros. Los hietogramas de la Gráfica 10 y la Gráfica 11 presentan un comportamiento similar, comienzan con una fuerte intensidad y decrece conforme transcurre los próximos minutos, el primero con una acumulación de 50 mm y duración de 70 minutos y el segundo con una precipitación acumulada de 59 mm y una duración de 68 minutos.



Gráfica 9 Hietograma de un evento convectivo 23-09-2018 en la estación Taxqueña.

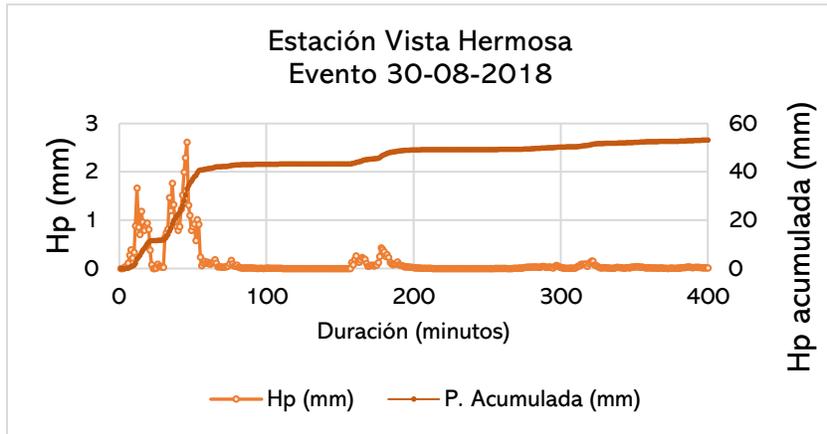


Gráfica 10 Hietograma un evento convectivo 27-10-2019 en la estación Tacuba.

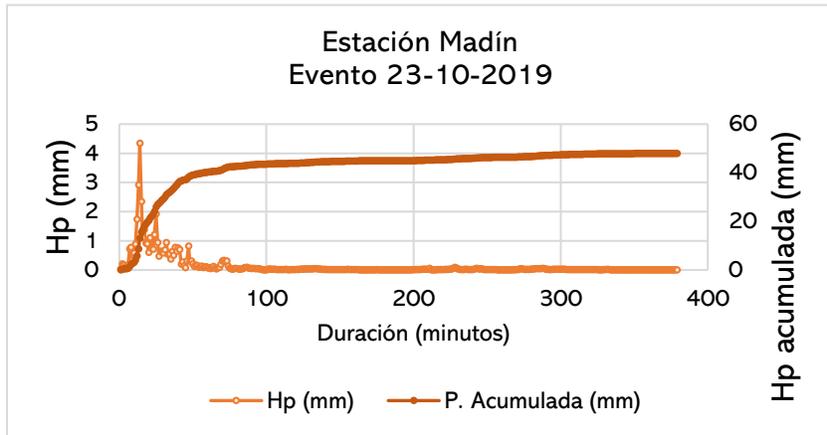


Gráfica 11 Hietograma un evento convectivo 08-06-2020 en la estación Zapata.

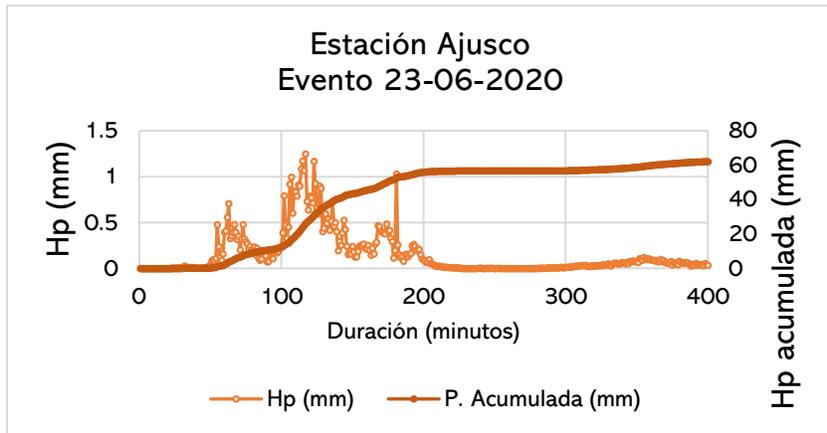
Los hietogramas de precipitación estratiforme que se muestran tienen una duración de más de 300 minutos. En los hietogramas de la Gráfica 12 y la Gráfica 13 se adquiere la mayor parte de la precipitación en los primeros minutos, conforme el evento transcurre la intensidad disminuye, aunque al final la precipitación acumulada fue superior a 50 milímetros. Particularmente en estos 2 eventos se puede interpretar que fueron de menor duración; pero debido a que se presentaron pequeños picos se pueden interpretar como un evento de gran duración. Por otro lado, en la Gráfica 14 el evento comienza con una intensidad más baja, después crece (entre el tiempo de 100 a 140 minutos), luego la intensidad se desarrolla con baja intensidad.



Gráfica 12 Hietograma un evento estratiforme 30-08-2018 en la estación Vista Hermosa.



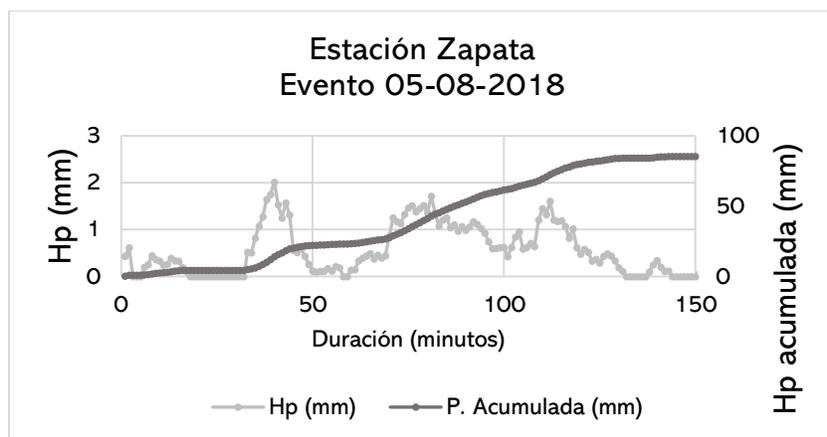
Gráfica 13 Hietograma un evento estratiforme 23-10-2019 en la estación Madín.



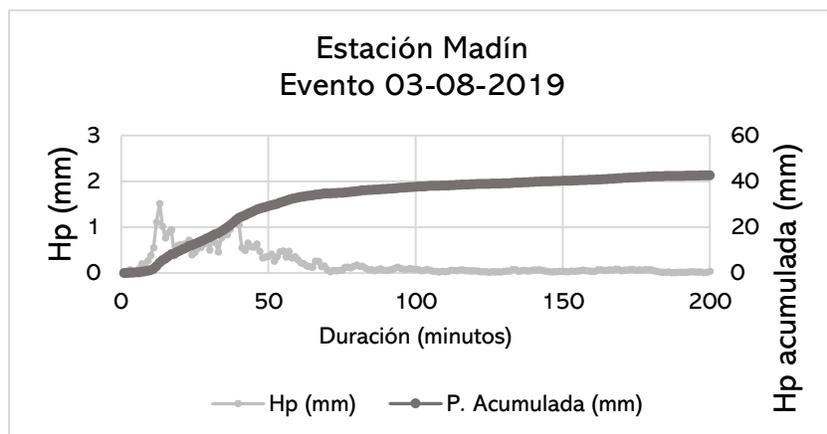
Gráfica 14 Hietograma un evento estratiforme 23-06-2020 en la estación Ajusco.

Ahora bien, los eventos mixtos son muy diferentes entre ellos, por ejemplo, en la Gráfica 15 se observa un comportamiento con grandes picos y algunos valles a lo largo de la duración de 160 minutos que produjo una precipitación acumulada superior a 80 mm. Mientras que, en la Gráfica 16 al inicio del evento registra intensidades altas, lo que generó una precipitación acumulada de 45 mm.

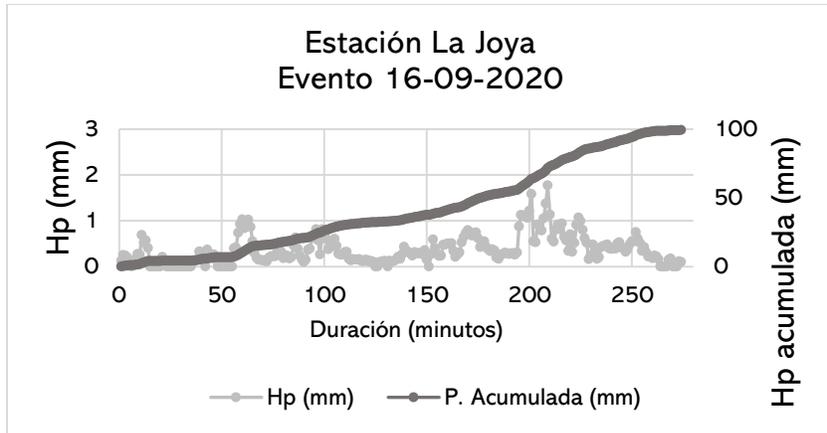
De modo similar, las gráficas de los eventos mixtos (Gráfica 16 y 18) coinciden en la forma de la curva masa de los eventos convectivos más inclinada respecto a los eventos estratiformes cuya curva masa tiende a ser más vertical en el pico del hietograma y la pendiente se mantiene constante el resto del evento.



Gráfica 15 Hietograma un evento estratiforme 05-08-2018 en la estación Zapata.



Gráfica 16 Hietograma un evento estratiforme 03-08-2019 en la estación Madín.



Gráfica 17 Hietograma un evento estratiforme 16-09-2020 en la estación La Joya.

8. CONCLUSIONES

La Ciudad de México alterna entre dos situaciones en torno al agua, por un lado, el estrés hídrico por lo que requiere de fuentes de suministro que provienen de cuencas circunvecinas que se bombean varios kilómetros y la sobreexplotación de los acuíferos, ninguna de estas alternativas es sostenible; y el efecto contrario las inundaciones pluviales. Ambas tanto el estrés hídrico y las inundaciones son consecuencia de la urbanización, al reducir los suelos de conservación, se generan nuevas islas de calor que obstaculizan la infiltración del agua hacia el subsuelo y por tanto genera grandes escurrimientos, a su vez las islas de calor modifican la dinámica atmosférica de la precipitación.

Al determinar el origen de la precipitación permite planificar soluciones para el abastecimiento de agua, como la opción de los sistemas de captación de lluvia denominados sistemas de captación de lluvia (SCALL), que se han convertido en una medida económica y sostenible en la gestión urbana del agua, que también podría implementarse para la recarga de acuíferos. En términos de volumen de agua es valioso determinar qué tipo de precipitación, no solo por periodo, estación o mes es la que aporta más agua sino bajo que mecanismo de generación sea lluvia estratiforme, mixta o convectiva tiene una tendencia a proporcionar más cantidad de agua.

En primer lugar, se determinaron más de 4 588 eventos de tormenta en el periodo de 2018 a 2020. De los cuales, 2 109 (46%) se establecieron como eventos de tipo mixto, 1 867 (41%) de origen convectivo y 582 (13%) de tipo estratiforme. La razón de que se cuenta con una mayor frecuencia de eventos mixtos es debido a los frentes fríos (para ser más precisos en la transición de verano a otoño), lo cual genera ascensos de aire cálido-húmedo provenientes del Océano Pacífico o del Golfo de México, lo que propicia la formación de nubes con tendencia a desarrollo vertical, mejor conocidas como cumulonimbus, stratocúmulus o cúmulus, lo que da origen a lluvias con duración intermedia (180 a 360 minutos) pero con un volumen importante de agua. Particularmente en el 2019 hubo presencia de varios frentes fríos que dieron origen a un incremento a las lluvias estratiformes que no supera a las lluvias mixtas y convectivas.

Posteriormente se estableció como eventos extremos a partir de un umbral de 20 milímetros de precipitación acumulada, en el análisis se establecieron 632 eventos extremos, es decir el 13% de los eventos contabilizados, la segunda reclasificación indica que 287 eventos extremos son lluvia mixta (45%), 212 eventos convectivos (34%) y 132 de lluvia tipo estratiforme (21%). Esta información nos revela que los eventos extremos más frecuentes poseen características de lluvia tipo mixta, en ese orden las lluvias convectivas también provocan gran parte de las inundaciones en la ciudad, a pesar de las grandes obras de infraestructura de drenaje que se han construido en la CDMX (como el Túnel Emisor Oriente) resulta insuficiente para conducir un gran volumen en un lapso corto y finalmente con menor frecuencia los eventos de lluvia estratiforme los cuales son de menor intensidad.

Dado que el propósito es identificar la aportación mayor en términos de altura de precipitación durante el periodo 2018-2020 según el tipo de lluvia se determinó que corresponde a la lluvia mixta (26 319 mm), seguido por la lluvia convectiva (21 684 mm) y con menor aportación la lluvia estratiforme (8 803 mm). Respecto a los eventos extremos, los valores más altos de precipitación acumulada corresponden a la lluvia mixta (8 684 mm), seguido por lluvia convectiva (6 100 mm) y la aportación más baja de la lluvia estratiforme (3 872 mm).

En cuanto a la aportación individual de cada tormenta se utilizaron diagramas de caja como indicadores promedio y de valores atípicos. La altura de precipitación promedio de los eventos convectivos muestra un valor de 10 mm, las lluvias estratiformes abarcaron un rango intercuartílico más amplio e incrementaron el valor promedio a 12 mm y las lluvias mixtas con un valor promedio cercano al de las convectivas. Sin embargo, los valores atípicos, es decir las lluvias extraordinarias

más recurrentes se posicionaron para las lluvias de tipo mixta con valores atípicos entre 26 y 100 mm. A pesar de que los eventos de las lluvias estratiformes aportan la mayor cantidad de precipitación no superan 60 mm, debido a su duración (la cual puede llegar a durar casi 10 horas), estos ocurren con menos frecuencia que los eventos de tipo convectivo, los cuales presentaron eventos máximos atípicos entre 25 y 65 mm.

Respecto a la duración, solo se hará referencia a los valores promedio de los eventos, el segundo cuartil, en la lluvia convectiva es de 1:18:00 horas, en la lluvia mixta de 3:36:00 horas y la duración más larga de la lluvia estratiforme de 8:01:00 horas. Análogamente, se puntualizará el promedio de intensidad, para la lluvia convectiva es de 9 mm/h, de lluvia estratiforme 1.7 mm/ y la intensidad media de la lluvia mixta es de 3 mm/h.

Así bien, los eventos extremos que se mostraron son los más relevantes que han ocurrido en el periodo 2018-2020, con valores mayores a 60 mm hasta llegar a 100 mm de precipitación acumulada. Por ello, es tan importante que la ciudadanía esté informada con plataformas tecnológicas como el Observatorio Hidrológico para que pueda anticiparse ante las precipitaciones extremas. Asimismo, con la filosofía de datos abiertos es posible analizar las tormentas a detalle, tal como se ha realizado en este trabajo de tesis, la cual pretende sea de gran utilidad.

9. REFERENCIAS

- Jauregui, E. (1997). Heat island development in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 31(22),3821–3831. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00136-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00136-2).
- SEDEMA (2022). Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Calidad del aire. Consultado el 11 de mayo de 2022. Sitio web: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?ref=YmJh#:~:text=En%20M%C3%A9xico%2C%20la%20temporada%20de,cubiertas%20de%20hielo%20y%20nieve>.
- Meteoblue. Precipitación. Weather close to you. Consultado el 05 de enero de 2022. Sitio web: <https://content.meteoblue.com/es/meteoscool/el-tiempo/precipitacion>.
- Mario Bidegain (2011). Elemento de meteorología y clima. Nubes y procesos de precipitación. Consultado el 10 de diciembre de 2021. Sitio web: http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2019/Elementos_de_meteo_clima/Nubes.pdf.
- Michaelides et al., 2010. Spatial and temporal characteristics of the annual rainfall at Chipre. *Atmospheric Environment* 44(4):606-615. https://www.researchgate.net/publication/248344590_Spatial_and_temporal_characteristics_of_the_annual_rainfall_frequency_distribution_in_Cyprus.
- Tapiador et al., 2011. Medición de la precipitación global: métodos, conjuntos de datos y aplicaciones. *Investigación atmosférica*. 104-105:70-97 https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/paper/document/paper_01698095_v104-105_n_p70_Tapiador.
- Testik y Gebremichael, 2010. Microphysics, measurement, and analyses of rainfall. <https://doi.org/10.1029/2010GM001025>.
- Kruger y Krajewski, 2002. Measurements of drop size distribution in southwestern Amazon. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019%3C0602:TDVDAD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019%3C0602:TDVDAD%3E2.0.CO;2).
- Schönhuber et al., 2007. One decade of imaging precipitation measurement by 2D-video-distrometer. 10, 85-90. <https://adgeo.copernicus.org/articles/10/85/2007/>.
- ONU (2018). La población mundial sigue en aumento, aunque sea cada vez más vieja. Consultado el 12 de enero de 2022. Sitio web: <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/world-population-prospects-2019.html#:~:text=a%20los%20y%20m%20C%20A%20s.-,En%202018%2C%20por%20primera%20vez%20en%20la%20historia%2C%20las%20peronas,a%20426%20millones%20en%202050>.

- INEGI (2010). Censo de población y vivienda 2010. Consultado el 11 de noviembre de 2021. Sitio web:
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>.
- Rodríguez Vázquez (2012). Inundaciones en zonas urbanas, medidas preventivas y correctivas, acciones estructurales y no estructurales. Consultado el 03 de febrero de 2022. Sitio web:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5281/Tesis.pdf?sequence=1>.
- EM-DAT (2020). The international disaster database. Center of research on the epidemiology of disasters. Consultado el 23 de enero de 2022. Sitio web:
<https://www.emdat.be/>.
- Roger G. Barry (1968). Atmosphere, weather and climate. Ed. Routledge. Octava edición 2008.
- A Langouis (2011) Precipitation. Ed. Elsevier B.V.
- Allen P. & R. McCuen (2005). Stormwater management for smart growth. Ed. Springer.
- A. Sánchez Huerta & A. Caffagi Félix (2020). Manual de Prácticas de Hidrología OH-Académico. Instituto de Ingeniería UNAM.
- V. García Loginova (2019). Parametrización de las distribuciones por tamaños de gotas de lluvia en la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- M. Gebremichael (2010). Microphysics, measurement, and analyses of rainfall. American Geophysical Union. 10.1029/2010GM001025.
- NASA (2016). Understanding earth, what's up with precipitation?. NP-2016-10-519-QSFC.
- E. Baltas (2016). Statistical analysis of the raindrop size distribution using disdrometer data. MDPI. Hydrology 2016, 3, 9: doi:10.3390/hydrology3010009.
- A. Pedrozo-Acuña (2017). Real time and precipitation monitoring in Mexico City: implementation and application. HydroSenSoft.
- R. Woods (2005). Hydrologic concepts of variability and scale. Encyclopedia of Hydrological Sciences.
- Jauregui, E. (1997) 'Heat island development in Mexico City', Atmospheric Environment, 31(22), pp. 3821–3831. doi: 10.1016/S1352-2310(97)00136-2.

- Jáuregui, E. (1995) 'Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la ciudad de México debidas a la urbanización.pdf', Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.
- Jáuregui, E. and Romales, E. (1996) 'Urban effects on convective precipitation in Mexico city', Atmospheric Environment, 30(20), pp. 3383–3389. doi: 10.1016/1352-2310(96)00041-6.