



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis de la Energía  
Cinética de la Lluvia Obtenida  
con la Red de Disdrómetros  
de la CDMX**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Carlos Sánchez Vargas

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

M.I. Alejandro Sánchez Huerta



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor agradece el financiamiento de las becas para estudiantes de licenciatura del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y a la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México por el financiamiento al proyecto del Observatorio Hidrológico.

## **DEDICATORIAS**

A mis padres, familia, amigos, compañeros y profesores que estuvieron presentes en mi camino.  
Gracias.

A Alejandra Amaro por todo su apoyo y tiempo dedicado.

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	6
2.	OBJETIVOS .....	8
2.1.	OBJETIVO GENERAL .....	8
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3.	HIPÓTESIS.....	9
4.	MARCO TEÓRICO.....	10
4.1.	LA EROSIÓN DEL SUELO .....	10
4.2.	FACTORES EROSIVOS DEL SUELO .....	12
4.3.	TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA .....	12
4.4.	ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DEL SUELO .....	14
4.4.1.	EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (FACTOR R).....	16
4.4.2.	ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K).....	17
4.4.3.	PENDIENTE DEL SUELO (FACTOR LS).....	18
4.4.4.	COBERTURA VEGETAL (FACTOR C).....	19
4.4.5.	PRÁCTICAS DE CULTIVO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO (FACTOR P).....	20
4.5.	MICROFÍSICA DE LA PRECIPITACIÓN .....	21
4.6.	AFECTACIONES POR LLUVIAS .....	23
4.6.1.	INUNDACIONES URBANAS EN LA CDMX.....	26
4.6.2.	DESLAVES EN LA CDMX.....	35
5.	METODOLOGÍA .....	37
5.1.	JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO .....	37
5.2.	ZONA DE ESTUDIO .....	40
5.2.1.	FISIOGRAFÍA E HIDROGRAFÍA.....	41
5.2.2.	CLIMA Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN .....	42
5.3.	ADQUISICIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN.....	43
5.4.	ANÁLISIS DE DATOS.....	51
5.4.1.	SELECCIÓN DEL AÑO CON MAYOR POTENCIAL EROSIVO.....	51
5.4.2.	SEPARACIÓN DE EVENTOS CONVECTIVOS, ESTRATIFORMES Y MIXTOS .....	54
6.	RESULTADOS.....	56
6.1.	CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA POR EVENTOS MEDIDOS CON DISDRÓMETRO.....	56
6.2.	ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA POR EVENTOS CON LA ECUACIÓN WISCHMEIER Y SMITH.....	58
6.3.	COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA MEDIDA Y CALCULADA .....	61

6.4.	ESTIMACIÓN DEL ERROR PORCENTUAL ENTRE LAS ENERGÍAS CINÉTICAS.....	63
7.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	65
8.	ANEXOS .....	67
9.	REFERENCIAS.....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Procesos de degradación de suelos en México. (SEMARNAT, 2001-2002).	11
Figura 2. Porcentajes de procesos degradativos. (SEMARNAT, 2001-2002).	11
Figura 3. Erosión por salpicadura, US Department of Agriculture - WEPP 95 CD-ROM.	13
Figura 4. Erosión laminar, Trevor Rickard, CC BY-SA 2.0.	13
Figura 5. Erosión por surcos, Norbert Probst.	13
Figura 6. Erosión por cárcavas, Raimundo Pastor - Trabajo propio, CC BY-SA 4.0.	13
Figura 7. Erosión en bancos aluviales, Jesús Enrique Santiago.	13
Figura 8. Tipos de erosión hídrica. (Pizarro, y otros, 2009).	13
Figura 9. Parcelas de escurrimiento. (Velasteguí Galeano, 2019).	14
Figura 10. Parcela con clavos de erosión. (Espinoso Paredes, 2017).	15
Figura 11. Tipos de modelos en la evaluación de la erosión hídrica. Adoptado de (García Rodríguez, 2006).	15
Figura 12. Erosividad de la lluvia. Adoptado de (Colotti Bizzarri, 1999).	22
Figura 13. Clasificación de los niveles de alerta por fenómenos meteorológicos, (SGIRPC, s.f.).	24
Figura 14. Criterios de clasificación de Alerta, (SGIRPC, s.f.).	24
Figura 15. Número de declaratorias emitidas por año y por tipo, extraído de (CENAPRED, 2021).	26
Figura 16. Tenochtitlan y el sistema lacustre del centro del Valle de México, Albarradón de Nezahualcóyotl en línea punteada. (Llanas Fernández & Segura Bautista, 2017).	27
Figura 17. Esquina entre calles de Motolinía y Francisco I. Madero en el Centro Histórico de la CDMX, la cabeza de león de piedra indica el nivel del agua durante la gran inundación de 1629. Josua Yael Contreras.	28
Figura 18. Inundación de 1951, Centro histórico.	28
Figura 19. Peligro por inundaciones de las alcaldías de la CDMX. Elaborado a partir de (CENAPRED, 2017).	30
Figura 20. Ubicación de los encharcamientos atendidos por la Unidad Tormenta 2016-2020. Elaborado a partir de (SGIRPC, 2021).	31
Figura 21. Av. Oceanía y Circuito Interior.	32
Figura 22. Eje 1 Norte y Asistencia Pública.	32
Figura 23. Av. Tláhuac y Ermita Iztapalapa.	32
Figura 24. Calz. I. Zaragoza y Rep. Federal.	32
Figura 25. Calz. I. Zaragoza y Luis T. Navarro.	32
Figura 26. Insurgentes Sur y Filadelfia.	32
Figura 27. Ctra. México Toluca.	33
Figura 28. Periférico Sur y Camino a Santa Teresa.	33
Figura 29. Av. México. Santa Cruz Acalpíxca.	33
Figura 30. Periférico y Av. Gran Canal.	33
Figura 31. Av. De la Torres y Ermita Iztapalapa.	33
Figura 32. Periféricos Sur, Hospital Pemex Sur.	33
Figura 33. Periférico y Picacho Ajusco.	34
Figura 34. Calle Tekal, Héroes Padierna.	34
Figura 35. Insurgentes Sur, MB La Joya.	34
Figura 36. Insurgentes Sur, Instituto Nacional de Neurología.	34
Figura 37. Canal de Miramontes, Alameda del Sur.	34
Figura 38. Ctra. México Puebla, Metro Santa Marta.	34

Figura 39. Laderas con algún grado de inestabilidad y colonias de la CDMX. Elaborado a partir de (SGIRPC, 2021).....	35
Figura 40. Inestabilidad de laderas en alcaldía Gustavo A. Madero.....	36
Figura 41. Inestabilidad de laderas en alcaldías Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras. .....	36
Figura 42. Inestabilidad de laderas en alcaldías Iztapalapa y Tláhuac.....	36
Figura 43. Inestabilidad de laderas en alcaldías Xochimilco y Milpa Alta.....	36
Figura 44. Relación entre energía cinética (EC) e intensidad de la lluvia (I) según tres modelos alternativos (Angulo Martínez, 2012).....	39
Figura 45. Diagrama de metodología.....	39
Figura 46. Mapa de estaciones pluviométricas del OH-IIUNAM. (Sánchez Huerta & Cafaggi Félix, 2020).....	40
Figura 47. Fisiografía e hidrografía de la CDMX.....	42
Figura 48. Distribución de la precipitación para la CDMX, elaborado para el periodo 2011-2020 a partir de (CONAGUA, 2021).....	43
Figura 49. Isoyetas de para la Ciudad de México, elaborado a partir de (CONAGUA) para el periodo 2004-2019.....	43
Figura 50. Estación OH-IIUNAM y sus partes. (Sánchez Huerta & Cafaggi Félix, 2020). ....	44
Figura 51. Interfaz de inicio de la página web OH-IIUNAM. ....	46
Figura 52. Mapa de estaciones.....	46
Figura 53. Visualización de evento de lluvia en tiempo real. ....	46
Figura 54. Selección de estación.....	47
Figura 55. Serie de datos disponibles.....	47
Figura 56. Gráfica de energía cinética. ....	47
Figura 57. Estación con pluviómetro de pesaje. ....	48
Figura 58. Archivo de datos descargados. ....	48
Figura 59. Eventos clasificados por intensidad, 2018.....	53
Figura 60. Eventos clasificados por intensidad, 2019.....	53
Figura 61. Eventos clasificados por intensidad, 2020.....	54
Figura 62. EC e I para evento 2108, 14/03/2018, estación OH-IIUNAM Madín.....	57
Figura 63 EC e I para evento 4338, 25/07/2019, estación OH-IIUNAM Vista Hermosa.....	57
Figura 64. Gráfica Intensidad vs Energía Cinética por unidad de tiempo. OH-IIUNAM. (Amaro Loza, Arciniega Esparza, Pedrozo Acuña, & Breña Naranjo, 2016).....	59
Figura 65. Gráfica Intensidad vs Energía Cinética por unidad de volumen. OH-IIUNAM. (Amaro Loza, Arciniega Esparza, Pedrozo Acuña, & Breña Naranjo, 2016). ....	59
Figura 66. Comparativa de relaciones empíricas de energía cinética e intensidad. ....	60
Figura 67. Relación de energía cinética de la precipitación medida por los disdrómetros del Observatorio Hidrológico y la energía cinética estimada por diversos autores. ....	61

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Código de estructura del suelo.....	18
Tabla 2. Código de permeabilidad del suelo.....	18
Tabla 3. Valores del Factor de cubierta vegetal.....	20
Tabla 4. Valores de factor C para bosques no alterados.....	20
Tabla 5. Valores del factor P.....	21
Tabla 6. Cantidades físicas que se obtienen a partir de la DSD.....	23
Tabla 7. Activación de alerta debido a precipitación, (SGIRPC, s.f.).....	25
Tabla 8. Resumen de los daños y pérdidas materiales y económicas de los desastres en 2020, (CENAPRED, 2021).....	25
Tabla 9. Encharcamientos atendidos por la Unidad Tormenta 2016-2020. Elaborado a partir de (SGIRPC, 2021).....	30
Tabla 10. Relaciones empíricas entre la energía cinética, EC [ $\text{MJ ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ] e intensidad de la precipitación, I [ $\text{mm hr}^{-1}$ ], en distintos lugares, con indicación del rango de intensidad de los datos utilizados (n.c.: no consta). (Angulo Martínez, 2012). .....	38
Tabla 11. Estaciones OH-IIUNAM y equipo de medición.....	41
Tabla 12. Registro mensual de precipitación por estación OH-IIUNAM de 2016 a 2020. ....	49
Tabla 13. Eventos registrados 2018-2020.....	51
Tabla 14. Eventos registrados por estación.....	52
Tabla 15. Eventos erosivos y no erosivos por año.....	54
Tabla 16. Clasificación de eventos según su tipo por estación del OH-IIUNAM. ....	55
Tabla 17. Energía cinética de eventos erosivos registrados con disdrómetro (dos eventos erosivos no incluidos). .....	56
Tabla 18. Intensidad media promedio por tipo de evento de precipitación. ....	58
Tabla 19. Cuantificación de la EC con diferentes ajustes empíricos. ....	60
Tabla 20. EC por evento obtenida con diferentes ajustes empíricos.....	62
Tabla 21. Error porcentual para cada ajuste seleccionado. ....	63

# 1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de México es la quinta megaciudad más grande del mundo, y como muchas mega urbes atraviesa desde hace varios años una crisis de sus recursos naturales. Atender este gran reto implica la gestión del agua y los suelos, partiendo de estudios como éste en el cual se determine la energía cinética e intensidad de las precipitaciones que son necesarias en la estimación de la erosividad hídrica causadas por las precipitaciones.

El presente trabajo de tesis tiene como principal objetivo el aprovechamiento y la asimilación de los datos medidos a partir de los registros de la primera red de disdrómetros del Observatorio Hidrológico de la UNAM instalados en la Ciudad de México, de modo que su desempeño en la medición de las variables: la intensidad y la energía cinética de la precipitación sean evaluados a partir de las fórmulas que provienen de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) propuestas por Wischmeier y Smith (1979) y otras ecuaciones empíricas que se han ido transformando a partir del modelo tradicional USLE, incorporándose con estudios realizados en otros países y representadas con diferentes funciones como lineal, potencial, logarítmica y exponencial.

La importancia de abordar este tema radica en la ocurrencia periódica (junio a septiembre) de lluvias convectivas caracterizadas por una alta intensidad y corta duración, que en estudios microfísicos de la precipitación indican que el tamaño y velocidad terminal de las gotas inciden directamente en la disgregación de las partículas del suelo. Aunque la Ciudad de México posee una superficie impermeable en la mayor proporción de su territorio aún persisten zonas suburbanas con suelos que se aprovechan en la producción agrícola y preservación de bosques. Las alcaldías con mayor extensión de áreas rurales y de conservación son Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac, Xochimilco, Magdalena Contreras y Cuajimalpa, de acuerdo con la Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades de la Ciudad de México (SEDEREC, 2022).

En primer lugar, el marco teórico desarrollado en el capítulo 4 describe someramente el fenómeno de erosión de los suelos, esta sección sirve para enmarcar los tipos de erosión hídrica, desde el proceso inicial a partir de la caída de las gotas de lluvia donde se desprende la capa superior del suelo, seguida por la erosión laminar debida a la recurrencia de precipitaciones y la formación de surcos y cárcavas por donde el material desprendido es arrastrado por el agua. En el contexto histórico en el siglo XX, ya se contaba con ecuaciones empíricas (formuladas en diferentes partes del mundo) para poder estimar estas pérdidas, dichas ecuaciones, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada (RUSLE), que toman en consideración diferentes factores dependientes tanto de las características del suelo (su capacidad de ser erosionado, la pendiente del suelo, la cobertura vegetal y prácticas de conservación) como de la lluvia (su erosividad que es dependiente de la energía cinética de la misma), cada uno de estos componente son ampliamente explicados en esta sección. En efecto, la erosión hídrica de los suelos se ha cuantificado en términos anuales por la mayor disponibilidad de datos mensuales incluso horarios y en menor cantidad datos sub- horarios de precipitación. El estudio de la erosión a menor escala temporal y espacial es de gran interés en el análisis de los eventos de tormenta, particularmente aquellos de corta duración; en este sentido, el desarrollo de la tecnología permite identificar en escala

microfísica el tamaño y la velocidad de las gotas que inciden directamente en la cantidad de energía cinética de la precipitación. El último punto se centra en las inundaciones más importantes que se han registrado en la Ciudad de México; en definitiva .es necesario impulsar medidas preventivas como la medición en tiempo real de diferentes variables.

Por otro lado, la metodología descrita en el capítulo 5 aborda los aspectos que se relacionan con otras investigaciones. En la justificación de la metodología se explica cuáles investigaciones se han referido como bases de los criterios adoptados para la realización del estudio; también se agregó un diagrama del proceso utilizado por el autor. Uno de los mayores beneficios de esta tesis que se ha resaltado es la importancia de contar con ecuaciones propias del sitio porque las condiciones medioambientales varían de región en región, estos factores son analizados en la zona de estudio que describe la fisiografía, la hidrografía, el clima y el régimen de las precipitaciones. Si bien, este trabajo ha aprovechado los datos abiertos del Observatorio Hidrológico, se indica cómo la información fue recopilada, filtrada y analizada para el estudio de la relación de energía cinética e intensidad de la precipitación.

En el capítulo 6 se muestran los resultados del análisis de la relación energía cinética e intensidad de precipitación de 24 eventos de tormenta medidos por los disdrómetros ópticos láser y su comparación con otras ecuaciones de estudios de diferentes países. Se obtuvieron valores satisfactorios en términos de porcentajes de errores más pequeños particularmente con estudios en los que la intensidad de la precipitación resultó similar a las registradas en la Ciudad de México.

Finalmente, en el capítulo 7 se exponen las conclusiones derivadas de los análisis realizados a lo largo de la tesis. De tal forma, que en este capítulo se sintetizan las ideas más importantes, destacando los hallazgos relevantes en los resultados incluyendo además la opinión del autor a partir de la investigación.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Comparar la energía cinética medida a partir de los registros de los disdrómetros del Observatorio Hidrológico y la energía cinética obtenida con la ecuación Wischmeier y Smith.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Seleccionar el año con eventos de precipitación más erosivos del periodo 2017- 2020 con intensidad mayor o igual a 25 [*mm/h*].

Clasificar los eventos según el tipo de lluvia (convectiva y estratiforme) y observar la variación de la energía cinética.

### **3. HIPÓTESIS**

La energía cinética medida a partir de los disdrómetros y la energía cinética calculada con ecuación Wischmeier y Smith podrían variar ampliamente.

Se espera que los eventos de lluvia convectiva sean más erosivos y con mayor energía cinética que los eventos estratiformes cuya intensidad es menor.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. LA EROSIÓN DEL SUELO

La erosión del suelo ocurre cuando las capas superiores del terreno se pierden o se destruyen por diferentes causas como el viento, el movimiento del agua o por acción directa de las lluvias.

En relación con su origen, la erosión natural o geológica es un fenómeno que se presenta en su estado natural sin intervención humana. También existe la erosión acelerada o antrópica que es un proceso acelerado por la destrucción de la capa de vegetación que protege los suelos de los efectos de la lluvia y viento.

Según la naturaleza del proceso de degradación del suelo se pueden considerar tres tipos de esta: degradación biológica, degradación química y degradación física las cuales pueden intervenir de manera conjunta en la degradación de los suelos.

Respecto a la degradación biológica consiste en la pérdida de materia orgánica debido a una disminución de aportes vegetales, así como las alteraciones a la flora y fauna del suelo.

Por otro lado, la degradación química se refiere a la pérdida de nutrientes o fertilidad, cambio en el pH, salinización y contaminación debido a diferentes químicos usados en la agricultura.

Finalmente, la degradación física abarca la erosión eólica e hídrica. La erosión eólica ocasiona una disminución en el espesor del suelo por la remoción del material por acción del viento, esta remoción puede no ser uniforme. La erosión hídrica se presenta como la disminución del espesor del suelo debido una remoción uniforme de material por lluvia y escurrimiento, y una remoción irregular cuando se forman canales o cárcavas en el terreno.

En este sentido, entre los efectos derivados de la erosión se encuentra la disminución en el rendimiento de la agricultura por la pérdida de nutrientes, la deformación del terreno por la formación de canales, la disminución de la profundidad de enraizamiento y la reducción de las tasas de infiltración y retención de agua, también efectos fuera del sitio como puede ser la generación de inundaciones y deslaves; en embalses todo el material erosionado ocupa los denominados volúmenes muertos disminuyendo su capacidad, incrementando su turbiedad y contaminación de los cauces y los cuerpos de agua que las reciben.

Según la “Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana” realizada por la SEMARNAT en 2002 indica que un 44.9% de los suelos del país contaban con algún proceso de degradación como se puede apreciar en la Figura 1. En primer lugar, se encontraba la degradación química seguida de la erosión hídrica, erosión eólica y la degradación física según el estudio de SEMARNAT, (ver Figura 2).

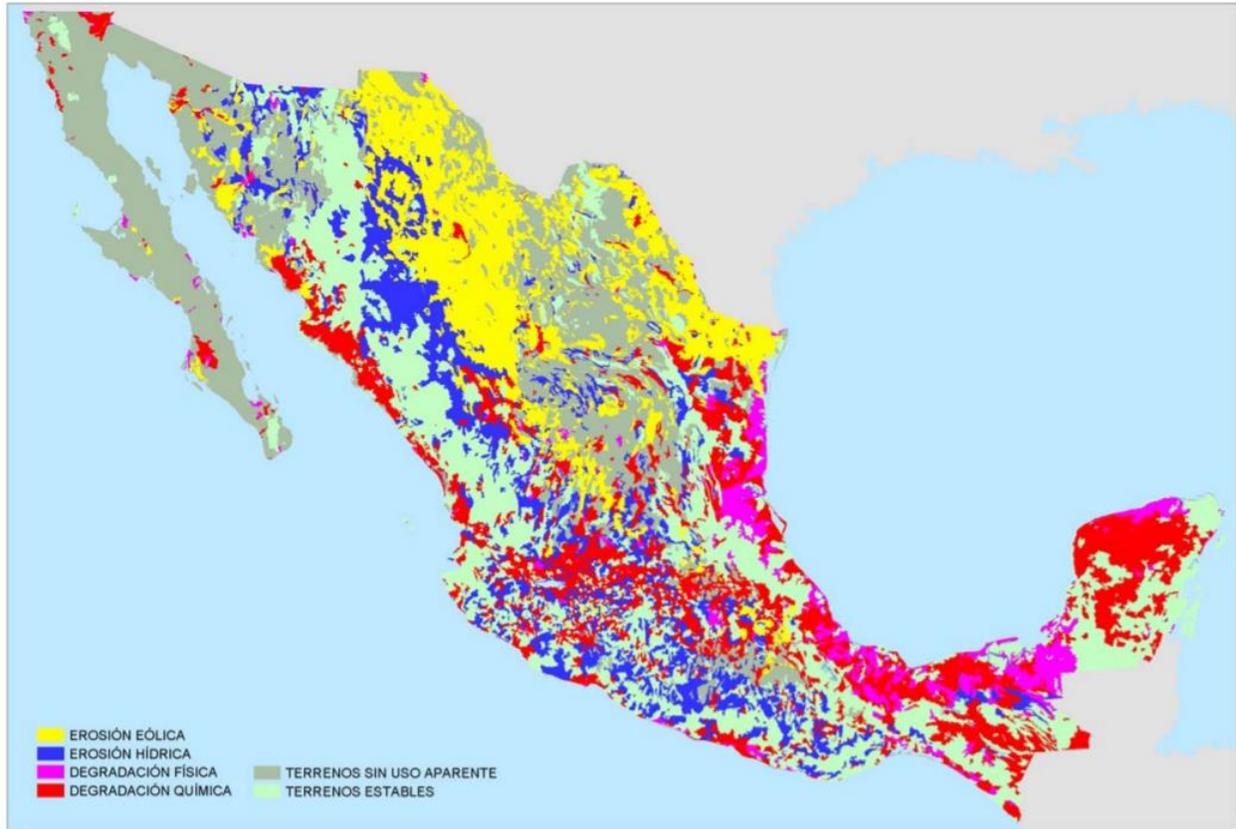


Figura 1. Procesos de degradación de suelos en México. (SEMARNAT, 2001-2002).

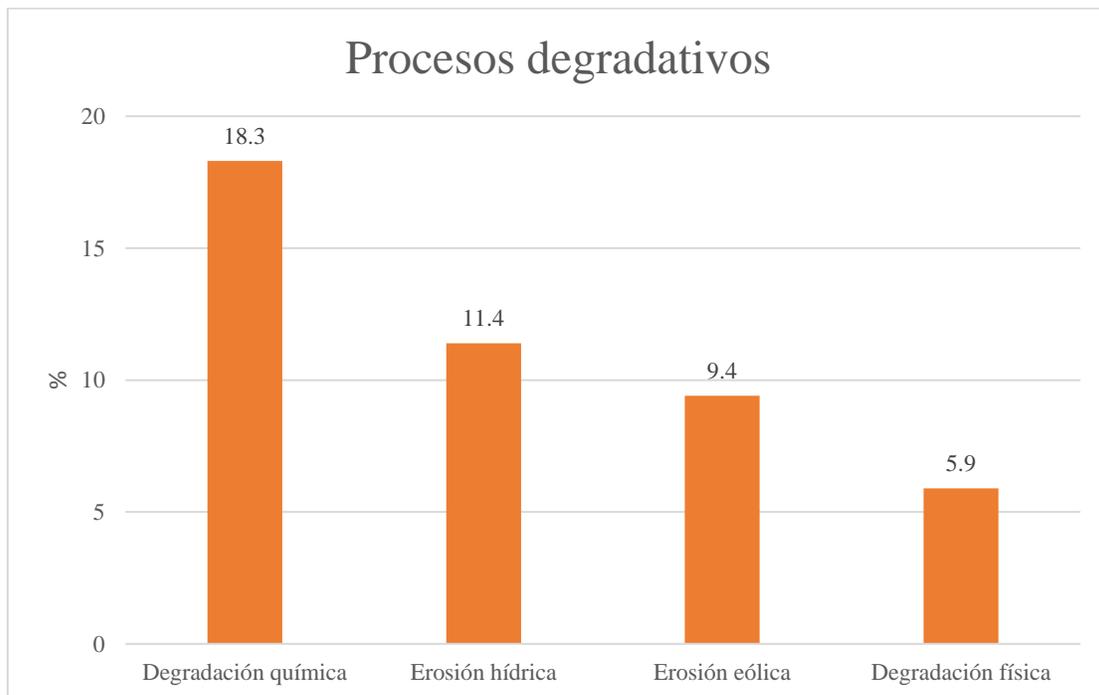


Figura 2. Porcentajes de procesos degradativos. (SEMARNAT, 2001-2002).

## 4.2. FACTORES EROSIVOS DEL SUELO

Entre los diferentes factores erosivos del suelo que intervienen se encuentran: las pendientes pronunciadas, las sequías o lluvias de intensidades altas, grandes velocidades de flujo, una inadecuada utilización del suelo, cubierta vegetal fina, desastres ecológicos como incendios forestales o suelos con escaso desarrollo de horizontes superiores, textura limosa o bajo contenido de materia orgánica. De manera general, la combinación de la acción del hombre y fenómenos físicos incrementan la erosión de los suelos.

La degradación de suelos en México se asocia principalmente con las actividades relacionadas con la agricultura y la ganadería, posteriormente a la pérdida de cubierta vegetal, urbanización, actividades industriales y sobreexplotación de la vegetación. En las zonas montañosas aumenta la erosión hídrica por efecto de las pendientes junto con otros factores como puede ser la deforestación y el sobrepastoreo.

## 4.3. TIPOS DE EROSIÓN HÍDRICA

Como los procesos de erosión hídrica se realizan de manera gradual, por lo general no son evidentes por lo que no se tratan, pero esto se agrava cuando en la zona coinciden suelos vulnerables con precipitaciones intensas, esto es relevante para identificar dichas zonas con alto potencial de erosión por la acción del agua. A continuación, se menciona en qué consisten los diferentes tipos de erosión hídrica.

La **erosión por salpicadura** ocurre con el impacto en la superficie con energía cinética suficiente para desplazar partículas de material sin consolidar, (ver Figura 3).

La remoción de capas delgadas uniformes del suelo en toda el área debido a la duración, intensidad y frecuencias de los eventos de precipitación es llamada **erosión laminar**, (ver Figura 4).

Cuando se forman canales miniatura por acción del escurrimiento que transporta material erosionado, materia orgánica y nutrientes se denomina **erosión por surcos**, la acción constante produce barrancos o cárcavas, (ver Figura 5).

En la **erosión por barrancos o cárcavas** estos tienen cabeceras y saltos a lo largo del curso, poseen mayor profundidad y menor anchura que los cauces estables y transportan más cantidad de sedimentos, (ver Figura 6).

Finalmente, la **erosión en bancos aluviales** es un proceso erosivo que se genera en el lecho de barrancos o cárcavas haciéndose más profundos favoreciendo con esto que el material de las riberas se vuelva inestable y se desprenda como se observa en la Figura 7. En la Figura 8 se muestra el desarrollo del proceso de erosión.



Figura 3. Erosión por salpicadura, US Department of Agriculture - WEPP 95 CD-ROM.



Figura 4. Erosión laminar, Trevor Rickard, CC BY-SA 2.0.



Figura 5. Erosión por surcos, Norbert Probst.



Figura 6. Erosión por cárcavas, Raimundo Pastor - Trabajo propio, CC BY-SA 4.0.



Figura 7. Erosión en bancos aluviales, Jesús Enrique Santiago.

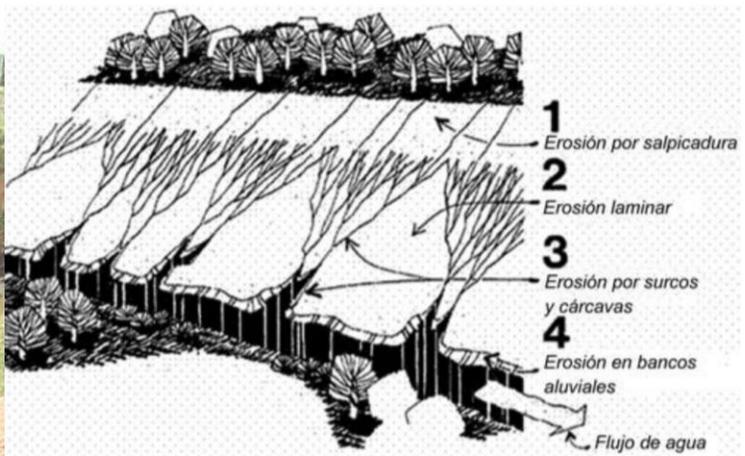


Figura 8. Tipos de erosión hídrica. (Pizarro, y otros, 2009).

#### 4.4. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DEL SUELO

La Ecuación Universal de Pérdida del Suelo, USLE (Universal Soil Loss Equation) por sus siglas en inglés. Es una ecuación empírica, propuesta por Wischmeier y Smith en 1962 y publicada finalmente en 1978, que mide la cantidad de suelo erosionado por unidad de área anualmente por acción de la erosión hídrica [*ton/ha*].

La erosión se puede estimar mediante modelos cualitativos que son útiles para la representación cartográfica, identificación y/o evaluación de la cantidad de erosión (Moreira, 1991). Por otro lado, los modelos cuantitativos hacen una estimación numérica de las pérdidas de suelo debidas a la erosión; a su vez pueden clasificarse en modelos de evaluación directa o indirecta. En los primeros se destina un área para la cuantificación in situ de las pérdidas de suelo, en estos tipos de evaluación se pueden encontrar las parcelas de escurrimiento, (ver Figura 9), donde se captan los volúmenes del suelo desplazados dentro de un área definida, en cuanto a las parcelas con clavos de erosión, (ver Figura 10), estos se colocan para marcar el nivel inicial del suelo y posteriormente medir la diferencia de niveles después de un evento erosivo, con estas diferencias se puede calcular el volumen erosionado en la parcela.



*Figura 9. Parcelas de escurrimiento. (Velasteguí Galeano, 2019).*



Figura 10. Parcela con clavos de erosión. (Espinoso Paredes, 2017).

Los modelos de evaluación indirecta pueden tener una base física mediante el uso de ecuaciones de conservación de masa y energía. Los modelos conceptuales igual tienen base física, pero integran modelos de transporte de sedimentos, hidráulicos y de erosión, finalmente los modelos paramétricos son calibrados mediante los parámetros considerados en cada modelo, en esta categoría podemos ubicar a la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo, USLE. En la Figura 11 se muestra la clasificación de los modelos de medición de la erosión.

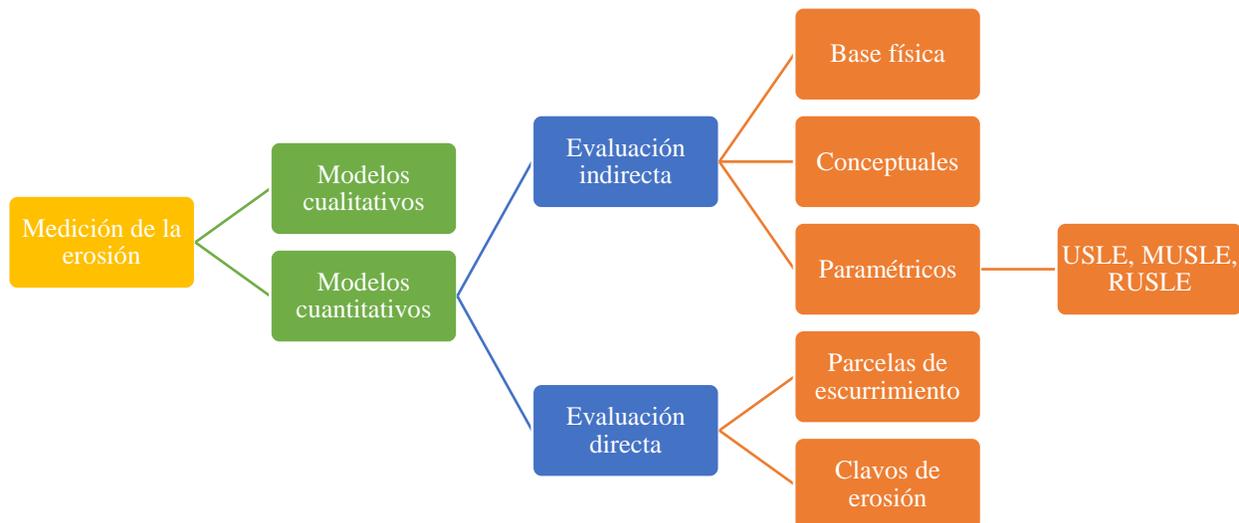


Figura 11. Tipos de modelos en la evaluación de la erosión hídrica. Adoptado de (García Rodríguez, 2006).

En 1977 Williams y Berndt publican la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Modificada (MUSLE), esta ecuación cuenta con mayor precisión en la estimación de la pérdida de suelos que su predecesora, haciendo una modificación en la obtención del factor de erosividad de la lluvia, además de poder ser aplicada para eventos de lluvia aislados.

Posteriormente en la década de los ochenta surge la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), la cual tiene capacidad para calcular las pérdidas de suelo para sistemas específicos de manejo, además permite determinar sectores críticos y así poder seleccionar prácticas de control para disminuir la erosión hasta un valor considerable.

En la ecuación del RUSLE (1) intervienen 5 parámetros en los que se consideran ciertas características físicas del sitio de estudio y de las precipitaciones que provocan la degradación del suelo. La mayor ventaja del uso de esta ecuación es que se puede aplicar de manera rápida y simple debido a la facilidad de evaluar todos sus factores y una gran cantidad de autores expresan una alta confiabilidad y universalidad de la ecuación al contar su aplicación alrededor del mundo, pero su uso se ve limitado a situaciones donde los factores puedan ser evaluados con precisión y en condiciones donde puedan ser correctamente aplicados, (United States Department of Agriculture, 2011) (González Del Tánago, 1991).

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

donde:

- A* Pérdida anual del suelo, [ton/ha]
- R* Factor de erosividad de la lluvia, [MJ \* mm/ha \* h]
- K* Factor de erodabilidad del suelo, [ton \* h/MJ \* mm]
- LS* Factor de pendiente del suelo, adimensional
- C* Factor de cobertura vegetal, adimensional
- P* Factor de prácticas de cultivo y conservación del suelo, adimensional

#### 4.4.1. EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (FACTOR R)

El primer factor de la ecuación USLE depende de la energía cinética de la lluvia, principalmente está en función de la intensidad de la lluvia, la altura de precipitación y la intensidad máxima de lluvia en 30 minutos.

Al ser un factor que considera todos los eventos erosivos dentro de un periodo de un año, su obtención puede llegar a ser tardada pues hay que contar con registros detallados de los eventos de precipitación del año en cuestión o para un periodo de análisis, pero al ser un factor que considera muchos eventos, sus valores no varían tanto entre los años de análisis. También se puede calcular el factor de erosividad de lluvia por mes y así es posible tener una mayor precisión de en qué épocas del año la erosión ocurre con mayor intensidad, de tal forma que se tomen medidas al respecto.

Este factor R se obtiene con la suma de los eventos erosivos ocurridos en un periodo, el cual generalmente es de un año como se muestra en la ecuación (2); para efectos de este trabajo el evento erosivo se va a considerar como aquel evento con precipitación acumulada superior a 5 mm y duración superior a 30 minutos como propone (Tokay, Kruger, & Krajewski, 2001).

$$R = \left( \sum_{k=1}^m e_c(k) * \Delta H_p(k) \right) * I_{30} \quad (2)$$

donde:

$R$  Factor de erosividad de la lluvia, [ $MJ * mm/ha * h$ ]

$e_c$  Energía cinética, [ $MJ/ha * mm$ ]

$\Delta H_p$  Altura de precipitación, [ $mm$ ]

$I_{30}$  Intensidad máxima de lluvia en 30 min, [ $mm/h$ ]

En la formulación original de Wischmeier y Smith la energía cinética se calcula según la ecuación (3) [ $ft * tonf/acre * in$ ] para intensidades iguales o inferiores a 3 [ $in/h$ ] y se tomará un valor constante de 1074 para intensidades superiores.

$$e_c = 916 + 331 \log_{10} i \quad (3)$$

donde:

$i$  Intensidad, [ $in/h$ ]

En 1987 Brown y Foster presentan su modificación para la obtención de energía cinética [ $MJ/ha * mm$ ] según la ecuación (4).

$$e_c = 0.29[1 - 0.72e^{-0.05i}] \quad (4)$$

donde:

$i$  Intensidad, [ $mm/h$ ]

#### 4.4.2. ERODABILIDAD DEL SUELO (FACTOR K)

La erodabilidad del suelo está relacionada con la facilidad con la que se desprende el material del suelo ante salpicaduras durante eventos de lluvia o flujos superficiales. Este factor representa las propiedades y características del suelo durante la erosión hídrica, está en función de la materia orgánica, el código de estructura del suelo, el código de permeabilidad, las fracciones de partículas primarias, indicadas en la ecuación (5). En ocasiones es complejo obtener todas estas variables por lo que hay expresiones alternativas que están únicamente en función de las fracciones de las partículas primarias y el tamaño de estas.

$$K = 2.71 * 10^{-4} * M^{1.14}(12 - a) + 4.20(b - 2) + 3.23(c - 3) \quad (5)$$

donde:

- K* Factor de erodabilidad del suelo, [*ton \* h/MJ \* mm*]
- M* Producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias, (*%limo + %arena fina*)(100 – *%arcilla*)
- a* Porcentaje de materia orgánica, [%]
- b* Código de estructura del suelo, Tabla 1.
- c* Código de permeabilidad del suelo, Tabla 2.

Código de estructura del suelo	
Valor	Descripción
1	Granular muy fina
2	Granular fina
3	Granular media o gruesa
4	Masiva, plana o en bloques

Tabla 1. Código de estructura del suelo.

Código de permeabilidad del suelo	
Valor	Descripción
1	Rápida
2	Moderada a rápida
3	Moderada
4	Moderada a lenta
5	Lenta
6	Muy lenta

Tabla 2. Código de permeabilidad del suelo.

Se ha observado que los suelos con alto porcentaje de limos son los más susceptibles a ser erosionados pues las arcillas le brindan cohesión a los suelos y los materiales más gruesos como la arena aumentan las tasas de infiltración y ralentizan los escurrimientos. La cantidad de materia orgánica contenida en los suelos también tiene su papel, pues le da resistencia y mejora su estructura.

#### 4.4.3. PENDIENTE DEL SUELO (FACTOR LS)

Este factor toma en consideración la inclinación de una pendiente, así como su longitud, en las laderas, las zonas más altas presentan poca erosión y esta aumenta conforme se observan las zonas medias, todo el material finalmente se acumula en las zonas bajas donde también comúnmente disminuye la pendiente.

La longitud de ladera se refiere a la distancia que recorre una gota de escurrimiento desde que se forma hasta que se encuentra con un cauce definido o se sedimenta. Se ha observado que conforme aumenta la longitud de ladera, la cantidad de material arrastrado aumenta, pues al acumularse el escurrimiento y formar canales miniatura esta aumenta su velocidad y por lo tanto su capacidad de

arrastre de sedimentos. En la ecuación (6) se muestra la propuesta de Wischmeier y Smith para el cálculo del factor de longitud de ladera. Respecto a la pendiente, el aumento de esta es directamente proporcional al escurrimiento que se puede generar, a su velocidad y también a su capacidad de arrastre. La ecuación (7) muestra la obtención del factor de pendiente según la USLE, finalmente el factor LS se obtiene como el producto de los factores L y S.

$$L = \left( \frac{l}{22.1} \right)^m \quad (6)$$

donde:

$L$  Factor de longitud de ladera, adimensional

$l$  longitud de ladera, [ $m$ ]

$m$  exponente, variando entre 0.2 para pendientes suaves y homogéneas (<1%) y 0.5 para pendientes más pronunciadas (>5%)

$$S = 0.006541s^2 + 0.0456s + 0.065 \quad (7)$$

donde:

$S$  Factor de pendiente de ladera, adimensional

$s$  Pendiente de la ladera, [%]

#### 4.4.4. COBERTURA VEGETAL (FACTOR C)

El factor C de cobertura vegetal considera la protección que le brinda la vegetación a los suelos, primero disminuyendo la energía cinética con la que las gotas de lluvia impactan en la superficie y después disminuyendo las velocidades de arrastre, también hay que notar que cuando la vegetación supera los 10 metros de altura su efecto casi se vuelve imperceptible en la superficie.

Existen tablas donde se puede obtener el valor de C para ciertos porcentajes de suelo cubierto y el tipo de cubierta, la Tabla 3 y Tabla 4 presentan valores sugeridos por Wischmeier y Smith.

Valores del Factor de cubierta vegetal C para matorrales y vegetación permanente (1) (Wischmeier y Smith, 1979)								
Cubierta de copas		Cubierta en contacto con el suelo Porcentaje de suelo cubierto						
Tipo y altura (2)	% cubierta (3)	Tipo (4)	0	20	40	60	80	+95
No apreciable.		G	0.45	0.20	0.10	0.042	0.013	0.003
		W	0.45	0.24	0.15	0.091	0.043	0.011
Herbáceas altas o matorral bajo, con altura media de caída de la gota de lluvia 0.5 m.	25	G	0.36	0.17	0.09	0.038	0.013	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.26	0.13	0.07	0.035	0.012	0.003
		W	0.26	0.16	0.11	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.17	0.10	0.06	0.032	0.011	0.003
		W	0.17	0.12	0.09	0.068	0.038	0.011
Apreciable cubierta de matorral y arbustos con una altura media de caída de la gota de lluvia de 2 m.	25	G	0.40	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.40	0.22	0.14	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.34	0.16	0.08	0.038	0.012	0.003
		W	0.34	0.19	0.13	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.28	0.14	0.08	0.036	0.012	0.003
		W	0.28	0.17	0.12	0.078	0.040	0.011
Árboles, pero sin cubierta apreciable de matorral. Altura media de caída de la gota de lluvia de 4-5 m.	25	G	0.42	0.19	0.10	0.041	0.013	0.003
		W	0.42	0.23	0.14	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.39	0.18	0.09	0.040	0.013	0.003
		W	0.39	0.21	0.14	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.36	0.17	0.09	0.039	0.012	0.003
		W	0.36	0.20	0.13	0.084	0.041	0.011

Tabla 3. Valores del Factor de cubierta vegetal.

Nota: (1) Los valores de C asumen que la vegetación presenta una distribución aleatoria sobre el suelo. (2) La altura de copas se mide como altura media de caída de las gotas de lluvia desde la parte aérea de la vegetación. El efecto de las copas es inversamente proporcional a dicha altura media de caída de las gotas de lluvia, siendo nulo si esta es mayor a 10 m. (3) Porción de superficie que quedaría oculta por las copas en una proyección vertical de estas. (4) G: cubierta sobre el suelo de césped o similares, restos vegetales en descomposición o humus de al menos 5 cm de espesor. W: cubierta sobre el suelo de herbáceas de hoja ancha, con escasa extensión lateral de su sistema radial, o residuos vegetales sin descomponer.

Valores de factor C para bosques no alterados (Wischmeier y Smith, 1979)		
% superficie cubierta por capas de árboles y sotobosques	% superficie cubierta por humus de al menos 5 cm de espesor	Factor C
100-75	100-90	0.0001-0.001
70-45	85-75	0.002-0.004
40-20	70-40	0.003-0.009

Tabla 4. Valores de factor C para bosques no alterados.

#### 4.4.5. PRÁCTICAS DE CULTIVO Y CONSERVACIÓN DEL SUELO (FACTOR P)

Estas prácticas de cultivo y conservación del suelo tienen como objetivo disminuir la cantidad de suelo erosionado mediante disposición de vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o terrazas de cultivo que al disminuir las pendientes naturales reducen los escurrimientos significativamente.

Este factor se refiere al porcentaje al que se disminuye la erosión cuando se aplican una o varias prácticas de cultivo en conjunto. La Tabla 5 presenta valores sugeridos para su aplicación en la USLE.

Valores del factor P para las distintas prácticas de conservación de suelos (Wischmeier y Smith, 1979)							
Pendiente (%)	Trabajos a nivel		Trabajos en fajas			Trabajos en terrazas (2)	
	Factor	Máxima longitud del declive (m)	Factor P (1)	Anchura de faja (m)	Máxima longitud de declive (m)	Desagüe en canales encespedados	Desagüe subterráneo en contrapendiente
1-2	0.60	130	0.30-0.60	43	260	0.12	0.05
3-5	0.50	100	0.25-0.50	33	200	0.10	0.05
6-8	0.50	65	0.25-0.50	33	130	0.10	0.05
9-12	0.60	40	0.30-0.60	26	80	0.12	0.05
13-16	0.70	26	0.35-0.70	26	55	0.14	0.05
17-20	0.80	20	0.40-0.80	20	40	0.16	0.06
21-25	0.90	16	0.45-0.90	16	33	0.18	0.06

Tabla 5. Valores del factor P.

Nota: (1) los valores dados de P dependen del tipo y duración de la rotación agrícola. (2) los valores de P incluyen la capacidad de retención de sedimentos dentro de la ladera y deben utilizarse para calcular la salida de sedimentos fuera de la misma o su contribución a la degradación específica de la cuenca a la que pertenece.

#### 4.5. MICROFÍSICA DE LA PRECIPITACIÓN

El determinar la magnitud de la erosividad de un lugar implica estimar el potencial erosivo de la lluvia sobre el suelo pues la erosividad de la lluvia es la capacidad potencial de ésta para causar erosión. La erosividad puede estimarse a través de algunos parámetros basados en la cantidad de gotas, su tamaño y velocidad, lo cual se estudia mediante la microfísica de la precipitación, que a su vez sirve para calcular la energía cinética con la que caen las gotas de lluvia. De aquí que el estudio de la lluvia dejara de centrarse en su distribución geográfica, distribución temporal de la acumulación e intensidad de la precipitación y se profundizara en el estudio de la estructura interna de la precipitación, en cómo se modifica dicha estructura y en los procesos físicos implicados. En la Figura 12 se muestra la relación entre las características de la lluvia que generan el fenómeno de erosión del suelo.

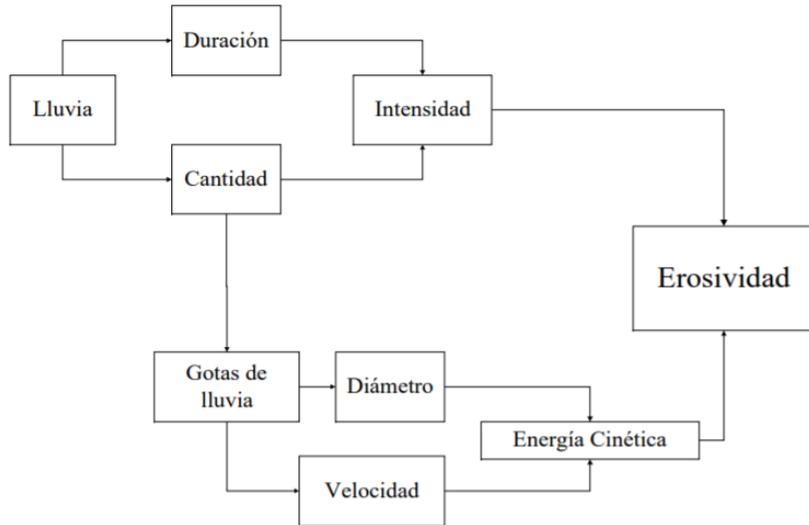


Figura 12. Erosividad de la lluvia. Adoptado de (Colotti Bizzarri, 1999).

La formación de las nubes comienza con una saturación y condensación de vapor de agua que es arrastrado por corrientes de aire caliente, cuando este vapor se enfría comienza la condensación y se forman pequeñas gotas de agua o cristales de hielo que aumentan su tamaño cuando barren con otras partículas o cuando se agrupan formando hidrometeoros más grandes, éstas se mantienen en suspensión hasta formar gotas de mayor tamaño (0.2 mm) y éstas se precipitan debido a la fuerza gravitacional, independientemente de en qué estado se precipiten las partículas, éstas en su mayoría caen en estado líquido a la superficie debido que el hielo y la nieve se derriten una vez superan los 0°C. Las gotas se siguen uniendo mientras se precipitan, pero también se produce una rotura en ellas cuando se llegan a diámetros relativamente grandes (5-6 mm), de igual manera las gotas con diámetros superiores a 1 milímetro se han encontrado con formas elipsoidal por lo que esta forma se deberá tener en cuenta a la hora de calcular la energía cinética de la lluvia pues se pueden sobreestimar los eventos.

La variación entre los diámetros de las gotas de lluvia se puede relacionar con la formación misma de las gotas, debido a que la generación de gotas grandes se lleva a cabo a expensas de gotas más pequeñas y estas gotas grandes después se pueden seguir haciendo más grandes hasta el punto de romperse en más pequeñas debido a la fuerza del viento. Es debido a estas variaciones en los diámetros de las gotas que nace el concepto de distribución de tamaño de gotas (DSD por sus siglas en inglés Drop Size Distribution), que define el número de gotas que se precipitan por unidad de volumen con un diámetro comprendido en un intervalo. De forma matemática y general se puede expresar según la ecuación (8).

$$N(D) = N_T p(D) \quad (8)$$

donde:

$N(D)$  Distribución de tamaño de gotas

$N_T$  Numero de gotas por unidad de volumen

$p(D)$  Función densidad de probabilidad de diámetros

La importancia de la DSD recae en que se pueden estimar a partir de ella, diferentes cantidades físicas de interés únicamente encontrando una adecuada relación entre ellas como son el Coeficiente de extinción óptica (S), Contenido de agua líquida (LWC), Intensidad de lluvia  $\text{®}$  e Factor de Reflectividad (Z), (ecuaciones (9) a (12) donde:  $\rho_w$  densidad del agua [ $g\ m^{-3}$ ],  $v(D)$  velocidad terminal de caída de las gotas [ $m\ s^{-1}$ ], ver Tabla 6). Estas variables no solo tienen aplicación para el cálculo de la erosión hídrica de suelos, también para estudios de contaminación del aire y uso en telecomunicaciones. La función densidad de probabilidad en ocasiones se puede ajustar a una función Gamma, Log Normal o más comúnmente a una exponencial (García Leal, 2013) así la DSD se puede expresar en función de pocos parámetros y a la hora de obtener las cantidades integrales (R, Z, etc.) éstas se expresan de igual manera en función de estos parámetros.

Descripción	Fórmula	Cantidad
Coeficiente de extinción óptica (S)	$\frac{\pi}{2} 10^{-3} \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^2 dD$ (9)	$km^{-1}$
Contenido de agua líquida (LWC)	$\frac{\pi}{6} \rho_w \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^3 dD$ (10)	$g\ m^{-3}$
Intensidad de lluvia $\text{®}$	$6\pi 10^{-4} \int_{D_{min}}^{D_{max}} v(D) N(D) D^3 dD$ (11)	$mm\ h^{-1}$
Factor de reflectividad (Z)	$\int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^6 dD$ (12)	$mm^6\ m^{-3}$

Tabla 6. Cantidades físicas que se obtienen a partir de la DSD.

#### 4.6. AFECTACIONES POR LLUVIAS

Las lluvias intensas ocasionan tres afectaciones: inundaciones, fuertes corrientes y deslaves. En las zonas bajas y planas, cercanas a cuerpos de agua, se debe estar atento a las posibles inundaciones durante la temporada de lluvias. De igual manera cerca de los cauces pueden ocurrir desbordamientos con corrientes capaces de arrastrar piedras, basura e inclusive personas y vehículos. En el último caso se reblandece el suelo y combinado con la deforestación se facilita el desprendimiento de material en pendientes pronunciadas o terrenos inestables. En el caso de que haya asentamientos humanos cerca de zonas donde haya riesgo de estas afectaciones se deberá estar atento a las señales de aviso, alarma y emergencia y estar preparado en caso de tener que evacuar. En la Ciudad de México las inundaciones ocurren año con año y son la principal afectación; los desbordamientos son menos comunes debido a que ya no existen cauces naturales dentro de la zona urbanizada, pero llegan a ocurrir en los canales, y en el caso de los deslaves, la CDMX tiene ubicadas 70 colonias en situación de peligro, la mayoría ubicadas en la delegación Gustavo A. Madero.

La Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (SGIRPC) de la CDMX tiene su programa de Alerta Temprana (SGIRPC, s.f.) en donde se informa diariamente sobre los pronósticos de fenómenos meteorológicos, incluida la lluvia, estas alertas se actualizan en tiempo real en caso de cambiar las condiciones climáticas y, en caso de afectaciones ocasionadas por estos fenómenos, se despliegan cuerpos de emergencia de la SGIRPC para atenderlos. En la Figura 13

se muestra la clasificación de los niveles de alerta según las variables meteorológicas de lluvia, viento, granizo, temperaturas altas o bajas y nevadas, y en la Figura 14 sus criterios de clasificación según su frecuencia o nivel de afectación. En el caso de la precipitación las condiciones normales de la CDMX corresponden a la precipitación acumulada en 24 horas menor a 10 milímetros, para lluvia fuerte o alerta amarilla corresponde al intervalo de 10 a menos de 30 mm, la alerta naranja se activa cuando ocurren precipitaciones de 30 a menos de 50 mm, las lluvias intensas correspondientes a la alerta roja van de 50 a 70 mm y finalmente la alerta púrpura se activa con precipitaciones acumuladas mayores a 70 milímetros.

CLASIFICACIÓN DE LOS NIVELES DE ALERTA  
POR FENÓMENOS METEOROLÓGICOS

Alerta <b>Verde</b>	<b>Lluvia ligera</b> <10 mm/24h	<b>Viento</b> <29 km/h	<b>Granizo</b> Sin presencia	<b>Onda de calor</b> <25° C	<b>Onda Gélida</b> >8° C	<b>Nevada</b> Sin presencia
Alerta <b>Amarilla</b>	<b>Lluvia fuerte</b> 10-29 mm/24h	<b>Viento</b> 30-49 km/h	<b>Granizo</b> Pequeño	<b>Onda de calor</b> 25-27° C	<b>Onda Gélida</b> 4-8° C	<b>Nevada</b> Aguanieve
Alerta <b>Naranja</b>	<b>Lluvia muy fuerte</b> 30-49 mm/24h	<b>Viento</b> 50-59 km/h	<b>Granizo</b> Mediano	<b>Onda de calor</b> 28-30° C	<b>Onda Gélida</b> 0-3° C	<b>Nevada</b> Ligera
Alerta <b>Roja</b>	<b>Lluvia intensa</b> 50-70 mm/24h	<b>Viento</b> 60-69 km/h	<b>Granizo</b> Grande	<b>Onda de calor</b> 31-33° C	<b>Onda Gélida</b> (-4)-(-1)° C	<b>Nevada</b> Nevada
Alerta <b>Púrpura</b>	<b>Lluvia severa</b> >70 mm/24h	<b>Viento</b> >70 km/h	<b>Granizo</b> Muy grande	<b>Onda de calor</b> >33° C	<b>Onda Gélida</b> < (-4)° C	<b>Nevada</b> Abundante

Figura 13. Clasificación de los niveles de alerta por fenómenos meteorológicos, (SGIRPC, s.f.).

Alerta	Criterios de clasificación					
<b>Verde</b>	Condiciones promedio en la CDMX					
<b>Amarillo</b>	Presencia de hidrometeoros ligeros que ocasionan daños si se asocian a otras circunstancias					
<b>Naranja</b>	Fenómenos meteorológicos cuya intensidad puede producir daños en estructuras frágiles					
<b>Rojo</b>	Fenómenos meteorológicos cuya intensidad provoca daños					
<b>Púrpura</b>	Fenómenos meteorológicos con intensidad pocas veces registrada, que ocasiona daños graves					

Figura 14. Criterios de clasificación de Alerta, (SGIRPC, s.f.).

De 2018 a 2020 se cambió el color de alerta un total de 300 veces, de las cuales 235 fueron alerta amarilla, 52 veces naranja, 11 veces roja y 2 veces púrpura, resalta 2018 con más del 60% de las

alertas en estos tres años, (ver Tabla 7). Las únicas dos veces que se activó la alerta púrpura fue en días consecutivos el 15 y 16 de septiembre de 2020 ocasionado por una onda tropical proveniente del Golfo de México que provocó fuertes lluvias con periodos de retorno superiores a 150 años, en estas fechas se llegaron a registrar precipitaciones acumuladas superiores a 100 mm que solo habían ocurrido 6 veces en los 20 años de registro pluviométricos de CONAGUA y SACMEX, (Sheinbaum, 2020).

Año	Nivel de Alerta				
	Amarilla	Naranja	Roja	Púrpura	Total
2018	142	37	7	0	186
2019	57	8	0	0	65
2020	36	7	4	2	49
Total	235	52	11	2	300

Tabla 7. Activación de alerta debido a precipitación, (SGIRPC, s.f.).

Si bien en la Ciudad de México no se emitieron declaratorias de desastre o emergencia en el transcurso de 2020, a nivel nacional el 73.6% de estas fueron emitidas a causa de los fenómenos hidrometeorológicos, lluvia e inundaciones, que causaron situaciones de emergencia y desastre. En cuanto a las defunciones debido a fenómenos naturales, las lluvias e inundaciones generaron el 29.3% a nivel nacional (segunda causa principal), incluidas 2 en la CDMX ocurridas durante los eventos del 16 de septiembre, (CENAPRED, 2021). En la Tabla 8, extraída del documento “Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en México 2020”, elaborado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), se detalla la cantidad de defunciones por fenómeno, daños y pérdidas anuales, viviendas, escuelas y hospitales afectados, así como la población afectada; los fenómenos hidrometeorológicos resaltan como los que más daños y pérdidas generaron a nivel nacional durante el 2020.

Fenómeno	Defunciones por fenómeno	Daños				
		Pérdidas anuales (miles de pesos corrientes)	Viviendas	Escuelas	Hospitales	Población
Hidrometeorológicos	116	25,585,830.1	253,341	537	11	839,739
Geológicos	31	4,564,834.9	2,354	69	21	3,169
Químicos	80	566,715.3	257	0	0	13,554
Socioorganizativos	170	144,578.6	2	0	0	2,186
Sanitarios	1	5.5	0	0	0	87
Total	398	31,861,964.4	255,954	606	32	858,735

Tabla 8. Resumen de los daños y pérdidas materiales y económicas de los desastres en 2020, (CENAPRED, 2021).

En el periodo de 2000 a 2020, según el Atlas Nacional de Riesgos, se emitió un total de 15 veces algún tipo de declaratoria de las cuales 6 fueron originadas por lluvia, (ver Figura 15). De acuerdo con la base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y pérdidas ocasionados por los desastres en México, de 2000 a 2015 en la CDMX las fuertes lluvias ocasionaron lamentablemente 5 defunciones, 58,629 personas fueron afectadas, 10,500 viviendas fueron dañadas, 156 escuelas y 1 hospital recibieron daños, 3,128 hectáreas de cultivo se perdieron, entre otros daños como interrupciones de energía eléctrica y telefonía, vehículos dañados, árboles caídos y afectaciones a

la circulación y al transporte público los daños representaron un total de 777.37 millones de pesos, (CENAPRED, 2021).

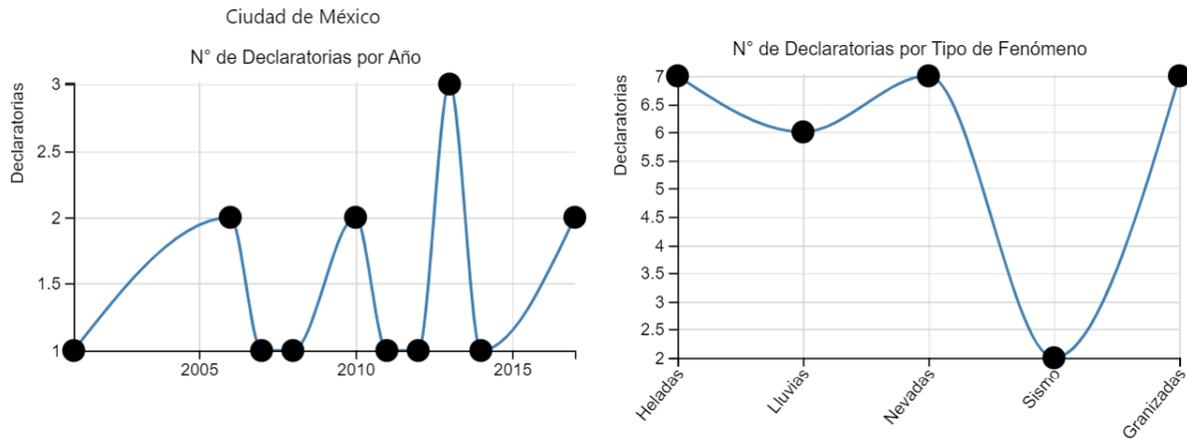


Figura 15. Número de declaratorias emitidas por año y por tipo, extraído de (CENAPRED, 2021).  
Nota: las declaratorias de heladas, nevadas y granizadas se emiten en conjunto.

#### 4.6.1. INUNDACIONES URBANAS EN LA CDMX

Durante toda su historia, la CDMX ha estado relacionada con las inundaciones pues al ser edificada sobre un sistema lacustre es propensa a afectaciones de este tipo, debido a esto en el siglo XV en la antigua Tenochtitlan, Moctezuma, con ayuda de Nezahualcóyotl, destina una gran obra conocida como el Albarradón de Nezahualcóyotl, consistía en un gran dique que recorría la ciudad de norte a sur de Atzacualco a Iztapalapa, como se observa en la Figura 16, y que separaba las aguas del sistema de lagos, al oriente quedó el lago de Texcoco con sus aguas salobres y al poniente la gran Tenochtitlan rodeada de las aguas dulces provenientes de los lagos de Xochimilco y Chalco. Esta obra no solo separaba las aguas para fines de abastecimiento, también controlaba los niveles del agua con ayuda de esclusas por lo que se podía evacuar el agua durante la época de lluvias.



Figura 16. Tenochtitlan y el sistema lacustre del centro del Valle de México, Albarradón de Nezahualcóyotl en línea punteada. (Llanas Fernández & Segura Bautista, 2017).

Con la llegada de los españoles y la colonización también llega un nuevo modelo de urbanización que dejó a la ciudad vulnerable ante las inundaciones, pues no se contaba con sistemas de drenaje adecuados para sus necesidades, es por esto por lo que a principios del siglo XVII se tuvieron al menos 5 inundaciones las cuales impulsaron en 1607 la creación de un canal de desagüe a cargo del Ingeniero Enrico Martínez, él observó los factores erosivos del suelo presentes en la Ciudad de México los cuales eran el sobrepastoreo, el crecimiento en las áreas de cultivo y la deforestación, con ayuda de las lluvias el material erosionado era arrastrado hasta el Lago de Texcoco y se asentaba en el fondo provocando que el nivel del agua aumentara poco a poco (Everett Boyer, 1975). Mas de 20 años después la obra todavía no se concluía y el 20 de septiembre de 1629 ocurrió una lluvia que duró alrededor de 36 horas ininterrumpidas lo cual ocasionó una gran inundación que elevó el nivel del agua hasta dos metros, (ver Figura 17), y permaneció así durante 5 años. Las pérdidas humanas debido a la inundación se contaron por miles durante esos años (por ahogamiento o por enfermedades propagadas por el agua estancada), principalmente de personas de origen indígena que habitaban en la periferia de la ciudad, las casas de adobe más frágiles se derrumbaron y las que quedaron en pie se les colocaron muros en la planta baja para evitar más daños en las cimentaciones, mucha gente emigró y la ciudad quedó casi desierta, los pocos habitantes vivían en los segundos pisos, se transportaban en canoa y cruzaban de edificio en edificio con ayuda de tablas en los techos hasta que el nivel del agua bajó.



*Figura 17. Esquina entre calles de Motolinía y Francisco I. Madero en el Centro Histórico de la CDMX, la cabeza de león de piedra indica el nivel del agua durante la gran inundación de 1629. Josua Yael Contreras.*

En 1856 la Ciudad de México volvió a sufrir debido a las inundaciones, el nivel del agua llegó hasta tres metros en algunas zonas de la ciudad y se lanzó una nueva convocatoria para el desarrollo de un desagüe, la obra conocida como el Gran Canal de Desagüe se demoró debido a conflictos políticos y finalmente se inauguró mucho después hasta el Porfiriato en el año de 1900. Para julio de 1951 este canal se desbordó debido a las fuertes lluvias y varias colonias quedaron inundadas por tres meses, la población tuvo nuevamente la necesidad de transportarse mediante lanchas y reparar daños en casas y negocios, (ver Figura 18). Con el paso de los años también perdió pendiente y capacidad de conducción debido al hundimiento en la CDMX hasta que finalmente se revirtió la pendiente natural.



*Figura 18. Inundación de 1951, Centro histórico.*

En 2007, el jefe de gobierno, del en ese entonces Distrito Federal, Marcelo Ebrard, creó la Unidad Tormenta que atiende emergencias relacionadas con las inundaciones que se forman en la capital debido a las fuertes lluvias y está coordinada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). Sus objetivos son dar rápida atención a los encharcamientos y atender sus efectos en la infraestructura de la ciudad, así como minimizar las afectaciones a las vialidades y viviendas. La Unidad Tormenta nació de los recursos de la Secretaría de Seguridad Pública, el H. Cuerpo de Bomberos, las 16 alcaldías y el SACMEX, dependencias que unifican capacidades para atender coordinadamente las inundaciones. Cuentan con vehículos, equipos y camiones hidroneumáticos, estaciones pluviométricas, cuadrillas de desazolve y cerca de 2,000 elementos para realizar sus actividades, (SACMEX, s.f.).

Su marco de acción se basa en:

1. Tomar todas las previsiones con base en pronósticos de lluvias.
2. Establecer campamentos provisionales en 90 sitios estratégicamente seleccionados y realizar operativos en atención de dónde y cuánto llueve.
3. Establecer un sistema de coordinación con las instituciones que cuentan con recursos y personal para emergencias como: Secretaría de Seguridad Pública, Secretaría de Protección Civil, H. Cuerpo de Bomberos, las 16 Alcaldías y el Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
4. Efectuar durante toda la temporada de lluvias una supervisión constante de la infraestructura hidráulica para hacer eficiente su operación.

El Gobierno de la Ciudad de México realiza de igual manera acciones preventivas como son: mantenimiento a instalaciones, infraestructura y equipos, desazolve de presas, lagunas, redes y accesorios de drenaje, y el establecimiento de un protocolo de operación entre otros.

A pesar de los esfuerzos de las autoridades por combatir las inundaciones, estas se han vuelto más frecuentes para la población y sufren año con año estas afectaciones provocadas en conjunto por la temporada de lluvias y la insuficiencia de los sistemas de drenaje de la ciudad. El CENAPRED clasifica el peligro de inundación de cada delegación según su porcentaje de área propenso a este fenómeno, de las 16 alcaldías que conforman la CDMX, 11 están consideradas con peligro muy alto de inundación (Azcapotzalco, Benito Juárez, Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Miguel Hidalgo, Tláhuac, Venustiano Carranza y Xochimilco), 1 con peligro alto (Tlalpan), 1 con peligro medio (Álvaro Obregón), 2 con peligro bajo (La Magdalena Contreras y Milpa Alta) y solamente 1 cuenta con peligro muy bajo (Cuajimalpa), (CENAPRED, 2017). Se observa en la Figura 19 que la zona con peligro muy alto coincide con la antigua ubicación de los Lagos de Texcoco, Chalco y Xochimilco.

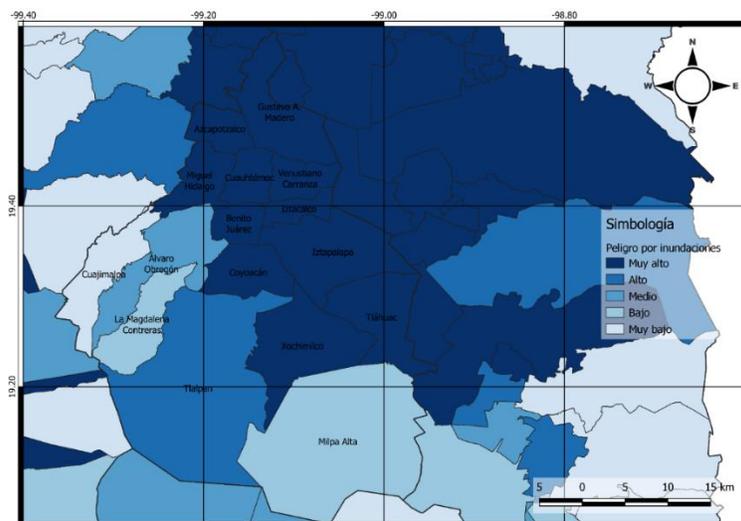


Figura 19. Peligro por inundaciones de las alcaldías de la CDMX. Elaborado a partir de (CENAPRED, 2017).

Entre los años 2016 a 2020 se registró atención a 2,050 encharcamientos por parte de las autoridades de la CDMX mediante la unidad Tormenta según la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil, destacan las primeras 4 alcaldías: Iztapalapa, Tlalpan, Gustavo A. Madero y Benito Juárez que en conjunto tienen el 52% de los reportes, dejando a las 12 alcaldías restantes con casi la misma cantidad de reportes. Sobresale 2016 como el año con mayor cantidad de reportes atendidos, (ver Tabla 9 y Figura 20).

Encharcamientos en la Ciudad de México						
Delegación	2016	2017	2018	2019	2020	Total
Iztapalapa	134	36	94	84	69	417
Tlalpan	65	52	60	66	37	280
Gustavo A. Madero	70	41	46	16	25	198
Benito Juárez	69	11	40	4	48	172
Coyoacán	36	38	22	17	31	144
Cuauhtémoc	65	12	15	14	34	140
Venustiano Carranza	61	13	20	19	15	128
Xochimilco	30	24	18	20	32	124
Miguel Hidalgo	40	46	8	5	6	105
Álvaro Obregón	32	9	21	12	12	86
Tláhuac	21	17	16	13	17	84
Iztacalco	44	6	13	7	6	76
Azcapotzalco	10	10	5	2	4	31
Cuajimalpa	25	2	3	0	0	30
Magdalena Contreras	11	9	1	2	5	28
Milpa Alta	1	1	1	1	3	7
<b>Total</b>	<b>714</b>	<b>327</b>	<b>383</b>	<b>282</b>	<b>344</b>	<b>2050</b>

Tabla 9. Encharcamientos atendidos por la Unidad Tormenta 2016-2020. Elaborado a partir de (SGIRPC, 2021).

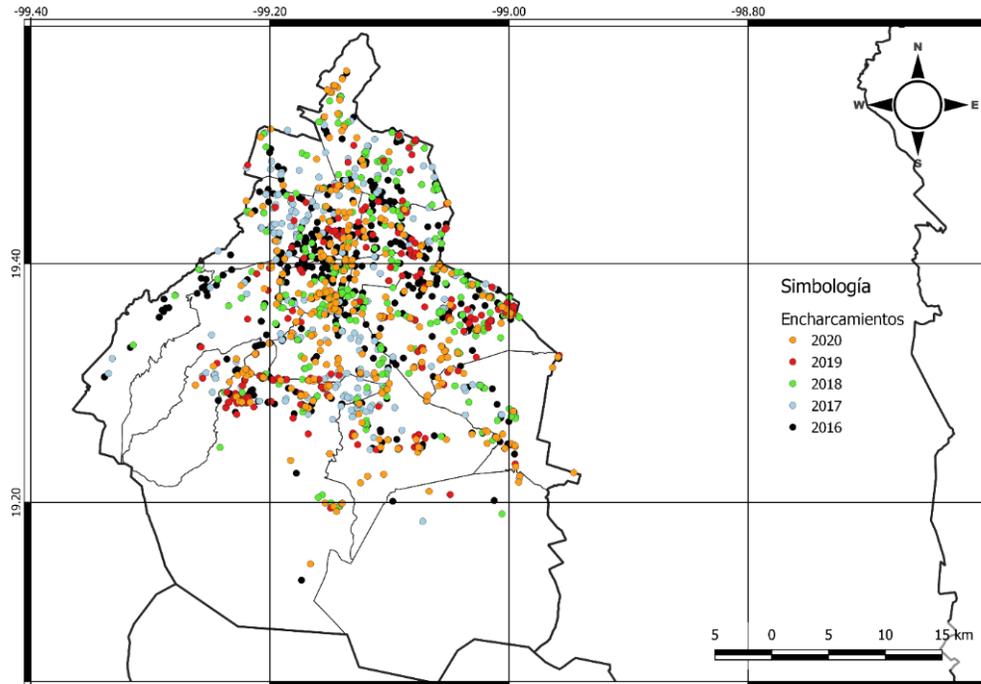


Figura 20. Ubicación de los encharcamientos atendidos por la Unidad Tormenta 2016-2020. Elaborado a partir de (SGIRPC, 2021).

De igual manera destaca que el 17 de septiembre en la madrugada, a las 2 a.m., debido a los eventos del día anterior, las brigadas de SACMEX ya habían atendido un total de 102 encharcamientos; Benito Juárez 46, Coyoacán 23, Iztapalapa 12, Tlalpan 7, Álvaro Obregón 4, Iztacalco 5, Tláhuac 2, Xochimilco 2 y Cuauhtémoc 1; (SACMEX, 2020), cerca de un tercio de los encharcamientos atendidos ese año, también se reportaron más de mil viviendas con afectaciones entre estas alcaldías y varios lesionados.

Posteriormente de tener ubicados los puntos donde se han registrado encharcamientos para la muestra de 2016-2020, se pueden observar las zonas donde hay más recurrencia, y así poder tener ubicadas las vialidades principales que se puedan ver afectadas. La cobertura de las zonas recurrentes a encharcamiento se obtiene a partir de las muestras con un radio de 130 m que es el espejo de agua promedio, y se delimita con la cobertura de manzanas. Para el periodo delimitado, la SGIRPC encontró 18 zonas donde se reportan más encharcamientos que afecten al tránsito de vehículos, ver Figura 21 a Figura 38, elaboradas a partir de (SGIRPC, 2021).



Figura 21. Av. Oceanía y Circuito Interior.



Figura 22. Eje 1 Norte y Asistencia Pública.



Figura 23. Av. Tláhuac y Ermita Iztapalapa.

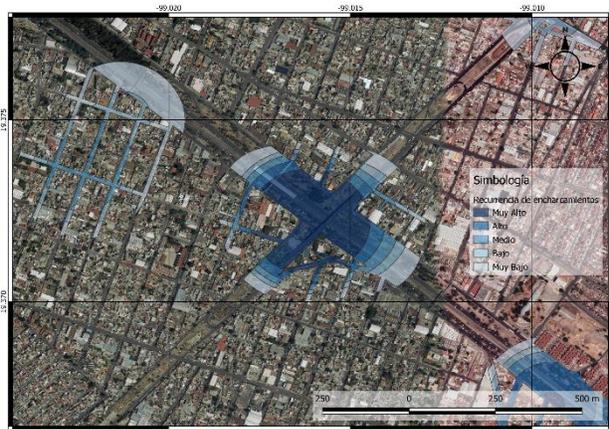


Figura 24. Calz. I. Zaragoza y Rep. Federal.

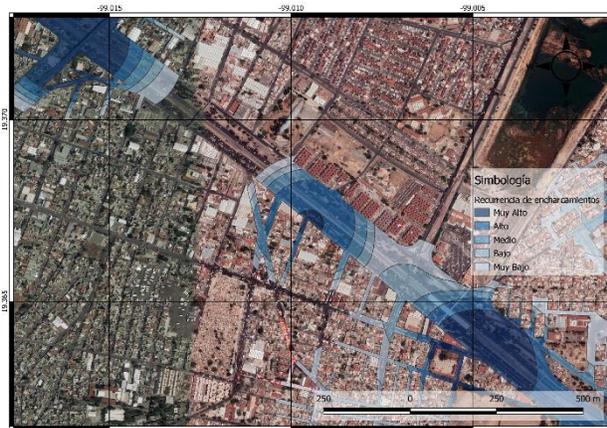


Figura 25. Calz. I. Zaragoza y Luis T. Navarro.



Figura 26. Insurgentes Sur y Filadelfia.



Figura 27. Ctra. México Toluca.

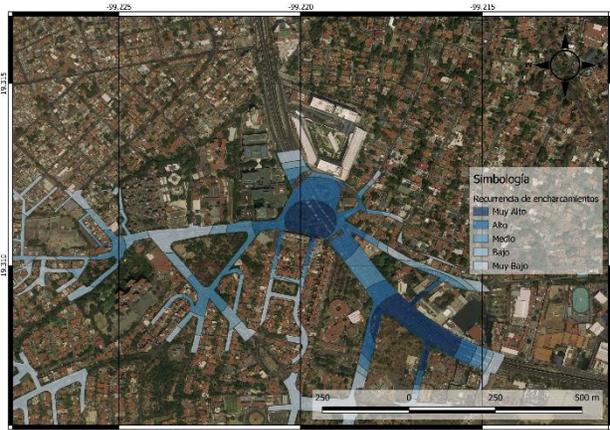


Figura 28. Periférico Sur y Camino a Santa Teresa.



Figura 29. Av. México. Santa Cruz Acalpixca.



Figura 30. Periférico y Av. Gran Canal.



Figura 31. Av. De la Torres y Ermita Iztapalapa.

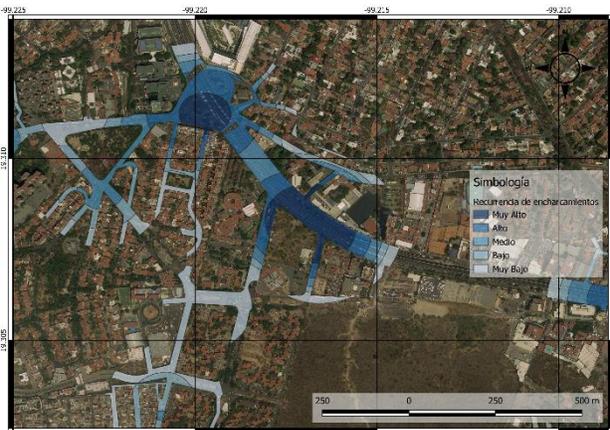


Figura 32. Periféricos Sur, Hospital Pemex Sur.



Figura 33. Periférico y Picacho Ajusco.



Figura 34. Calle Tekal, Héroes Padierna.



Figura 35. Insurgentes Sur, MB La Joya.



Figura 36. Insurgentes Sur, Instituto Nacional de Neurología.



Figura 37. Canal de Miramontes, Alameda del Sur.

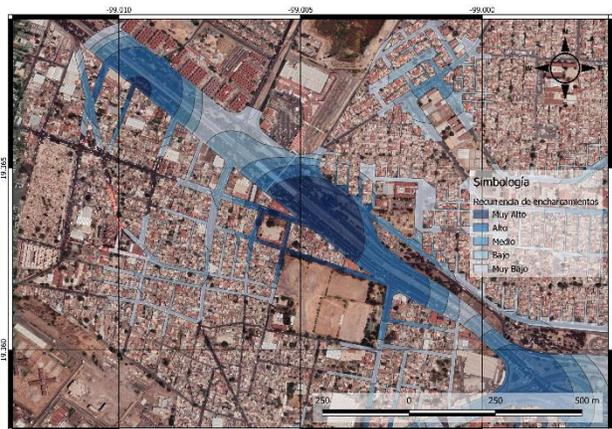


Figura 38. Ctra. México Puebla, Metro Santa Marta.

#### 4.6.2. DESLAVES EN LA CDMX

En la CDMX hay zonas propensas a deslaves, estos ocurren en la temporada de lluvias o a causa de sismos, la influencia del hombre también contribuye a que ocurran, cuando se construye en terrenos débiles o realizando excavaciones que desestabilizan laderas en conjunto con la deforestación que deja desprotegido al suelo.

La Figura 39 muestra las zonas con laderas con algún grado de inestabilidad en la CDMX, obtenido del Atlas de Riesgos, también se muestran las zonas habitadas en la ciudad, se puede observar que son muchas las colonias que están en zonas de riesgo de sufrir algún deslave. Al norte en la alcaldía Gustavo A. Madero, al menos 35 colonias ubicadas en el cerro del Chiquihuite están en constante peligro, según base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y pérdidas ocasionados por los desastres en México, de 2000 a 2015 fallecieron 2 personas, 69 resultaron afectadas y 3 viviendas recibieron daños únicamente en la alcaldía GAM a causa de deslizamientos. El 10 de septiembre de 2021 ocurrió un deslave en el cerro del Chiquihuite pero en el municipio de Tlalnepantla, Estado de México, en donde 4 personas perdieron la vida y más de 100 familias resultaron afectadas o quedaron en riesgo, estos incidentes ocurren por la acción constante del agua durante muchos años aunado a otros factores geológicos.

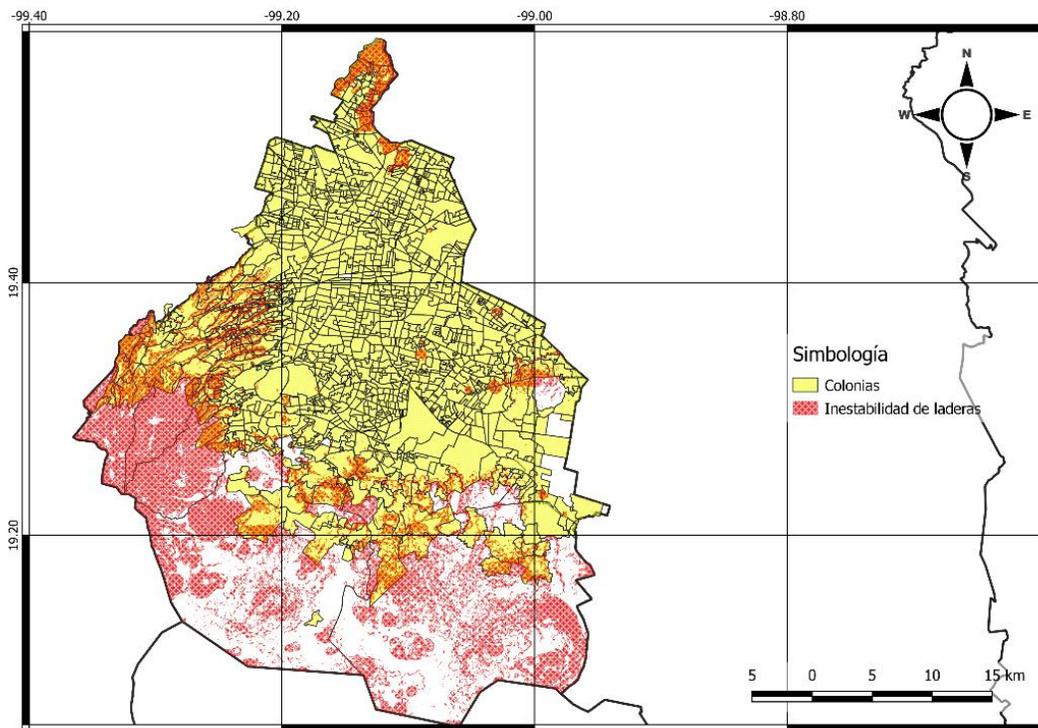


Figura 39. Laderas con algún grado de inestabilidad y colonias de la CDMX. Elaborado a partir de (SGIRPC, 2021).

Algunas de las alcaldías que han sufrido de estos incidentes son: Tlalpan, Álvaro Obregón, Gustavo A. Madero, Cuajimalpa, Iztapalapa y Magdalena Contreras. Entre el periodo de 2000 a 2015 más de 100 viviendas fueron afectadas por deslizamientos, 754 personas fueron afectadas y

14 perdieron la vida, los costos por los daños ocasionados ascendieron a 19.13 millones de pesos. De la Figura 40 a la Figura 43 se muestran las alcaldías con mayor riesgo de sufrir deslizamientos pues tienen asentamientos humanos en zonas altas o en cerros. En Iztapalapa, el mayor riesgo de deslaves está en las colonias Fraccionamiento Popular Álvaro Obregón y El Paraíso, cercanas al cerro del Peñón Viejo, Lomas de la Estancia e Ixtlahuacán. En el caso de Álvaro Obregón, algunas son las colonias Ampliación Águilas, Lomas de Becerra, Jalalpa, Olivar del Conde, Lomas de la Era y La Presa, donde hay asentamientos irregulares. Colonias ubicadas en las partes altas de las alcaldías Magdalena Contreras, Cuajimalpa, Tlalpan y Xochimilco también son susceptibles a estos riesgos.

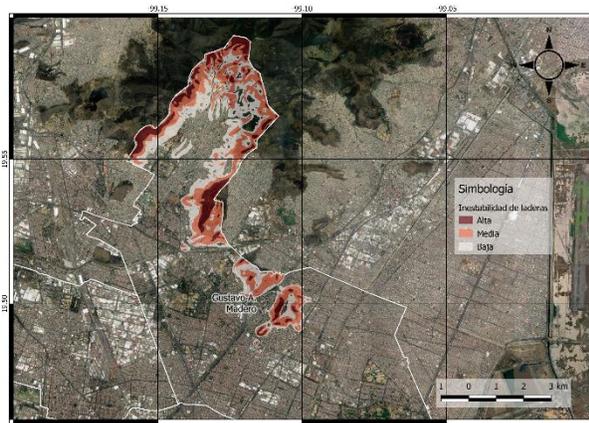


Figura 40. Inestabilidad de laderas en alcaldía Gustavo A. Madero.

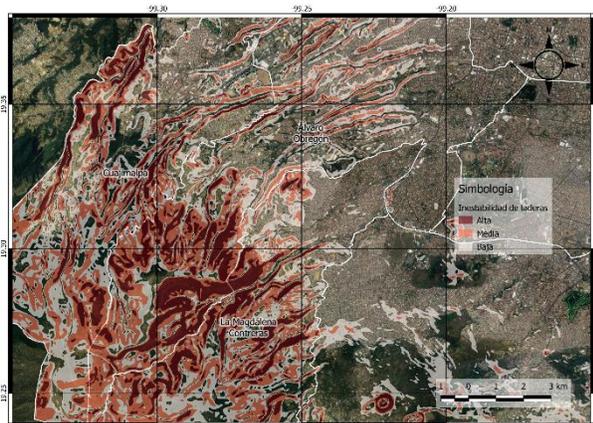


Figura 41. Inestabilidad de laderas en alcaldías Cuajimalpa, Álvaro Obregón y Magdalena Contreras.

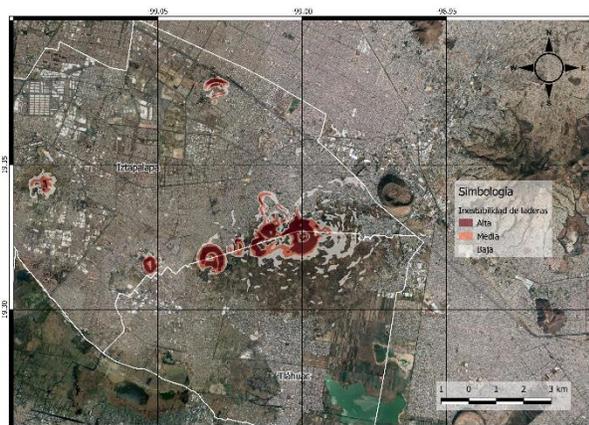


Figura 42. Inestabilidad de laderas en alcaldías Iztapalapa y Tláhuac.

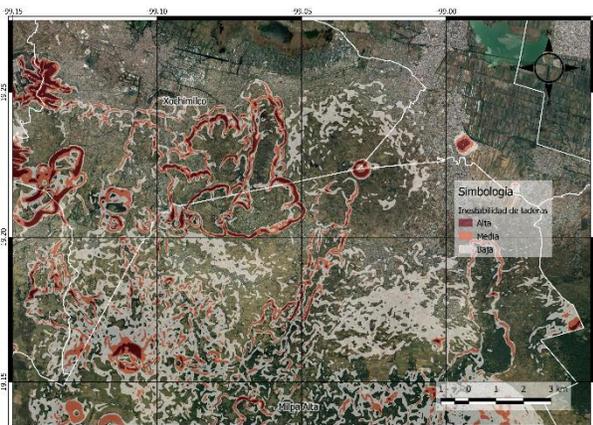


Figura 43. Inestabilidad de laderas en alcaldías Xochimilco y Milpa Alta.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. JUSTIFICACIÓN DEL MÉTODO

Históricamente se ha buscado el conocer algunas características de la lluvia que son de interés para cuantificar la energía cinética (EC) de la lluvia y así poder conocer la erosividad de ésta; el diámetro de las gotas de lluvia, así como su velocidad de caída fueron el objetivo de interés, pero debido a la falta de tecnología en ese tiempo se tuvieron que realizar formulaciones, experimentos basados en el empirismo o con las pocas herramientas o información que se tenían disponibles.

Primero, el conocer el tamaño de las gotas de lluvia fue un reto que llevo a realizar diferentes experimentos y desarrollar métodos para poder medir los diámetros de dichas gotas. En 1895 Wiesner fue el primero en desarrollar una metodología la cual consistía en que las gotas impactaran sobre un papel de filtro teñido en el cual quedaban marcadas las gotas de lluvia y así se pudiera relacionar los diámetros de la mancha con los de las gotas, pero posteriormente esta metodología fue señalada por sobreestimar los diámetros cuando se presentaban eventos de altas intensidades. En 1904 Bently formula el “método de las bolitas de harina” (flour pellets) el cual consiste en colocar un contenedor con harina en la cual al impactar las gotas de lluvia forman bolitas con el tamaño de la gota, posteriormente se deja secar la harina y se tamiza con ayuda de una malla de 210  $\mu\text{m}$ , este método es utilizado inclusive en la actualidad debido a su fiabilidad pero con el avance de la tecnología se han desarrollado aparatos capaces de medir diámetros de gotas de lluvia como lo son los disdrómetros acústicos y más recientemente los disdrómetros ópticos.

Posteriormente otra problemática fue conocer el diámetro medio de lluvia ( $D_{50}$ ) por lo que se llevaron a cabo numerosos experimentos durante el siglo XX, pero este parámetro se encontró insuficiente y se buscó conocer la distribución del tamaño de gotas (DSD), que brinda más información sobre los diámetros de las gotas, para estimarla se buscó relacionarla con una variable que si es de fácil medición y con la que se cuenta gran cantidad de registros históricos como es la intensidad. Diversos autores han formulado ecuaciones que relacionan la DSD o el  $D_{50}$  con la intensidad de precipitación. De manera general se encontró que la DSD,  $D_{50}$ , la velocidad terminal de caída y la intensidad de precipitación están relacionadas entre ellas y se pueden encontrar expresiones que representen estas relaciones.

Se ha encontrado que la DSD se ve influida por diferentes factores geográficos como pueden ser la altitud, latitud y cercanía con cuerpos acuosos por lo que la DSD variará según el sitio de estudio. Otro punto que genera alteraciones en la DSD es la climatología debido a que los tamaños de gota y velocidades de caída dependen de la presión atmosférica y la temperatura del aire por lo que la presencia de frentes fríos o cálidos afecta estas características de la precipitación y por lo tanto la energía cinética de la misma, por lo que la obtención de un modelo universal de EC a partir de un solo parámetro como es la intensidad no es tarea fácil.

En la Tabla 10 se muestran diferentes formulaciones para determinar la energía cinética de la lluvia a partir de la intensidad de precipitación, la ubicación para las que fueron formuladas, y por lo tanto su validez, así como rangos de intensidad en algunos casos. Se observan tres tipos de funciones matemáticas: potencial, exponencial y logarítmica.

Fuente	Localización	Ecuación	Rango de intensidad
USLE; Wischmeier & Smith 1978; basado en Laws y Parsons (1943)	EE. UU.	$EC = 0.0119 + 0.0873 \log_{10} I$	0.4 – 144
Marshall y Palmer (1948)	Canadá	$EC = 0.0895 + 0.0844 \log_{10} I$	0 – 23
Hudson (1965)	Zimbabue	$EC = 0.298 \left(1 - \frac{4.29}{I}\right)$	n.c.
Carter et al. (1974)	Sur y centro EE. UU.	$EC = 0.1132 + 0.0055I - 0.005 * 10^{-3}I^2 + 0.00126 * 10^{-4}I^3$	< 260
Zanchi y Torri (1980)	Italia, Toscana	$EC = 0.0981 + 0.1125 \log_{10} I$	1 – 140
Park et al. (1982,1983)	EE. UU.	$EC = 0.2111 * I^{1.156}$	n.c.
Bolline et al. (1984)	Bélgica	$EC = 0.123 + 0.56 * I$	0.3 – 39
Rosewell (1986)	Nueva Gales del Sur, Australia	$EC = 0.29(1 - 0.6e^{-0.04I})$	1 – 146
Rosewell (1986)	Queensland, Australia	$EC = 0.26(1 - 0.7e^{-0.035I})$	1 – 161
RUSLE; Brown y Foster (1987)	Sur EE. UU.	$EC = 0.29(1 - 0.72e^{-I/20})$	0 – 250
Onaga et al. (1988)	Okinawa, Japón	$EC = 0.0981 + 0.106 \log_{10} I$	4 – 103
Brandt (1990)	EE. UU.	$EC = 0.895 + 0.844 \log_{10} I$	n.c.
Sempere Torres et al. (1992)	Cevenas, Francia	$EC = 0.34 * I - 0.19$	n.c.
Coutinho y Tomas (1995)	Portugal	$EC = 0.29(1 - 0.72e^{-0.34I})$	0 – 120
Cerro et al. (1998)	Barcelona, España	$EC = 0.384(1 - 0.54e^{-0.029I})$	1 – 150
Uijlenhoet y Stricker (1999)	Canadá	$EC = 0.072 * I^{1.32}$	< 23
Jayawardena y Rezaur (2000)	Hong Kong	$EC = 0.369(1 - 0.69e^{-0.038I})$	12 – 120
Van Dijk et al. (2002)	Universal	$EC = 0.283(1 - 0.52e^{-0.042I})$	n.c.
Usón y Ramos (2001)	España	$EC = 0.34 * I - 0.18$	0 – 20
Roldán Soriano, M. (2006)	Madrid, España	$EC_{min} = 65 - e^{(-9.8679*10^{-5}I^2 - 4.987*10^{-3}I + 4.1779)}$	47.5

Tabla 10. Relaciones empíricas entre la energía cinética, en distintos lugares, con indicación del rango de intensidad de los datos utilizados, (Angulo Martínez, 2012).

Nota:  $EC [MJ ha^{-1} mm^{-1}]$  e intensidad de la precipitación,  $I [mm hr^{-1}]$ , (n.c.: no consta).

Los tres tipos de modelos matemáticos tienen un diferente comportamiento como se observa Figura 44, tanto el potencial como el logarítmico presentan un buen ajuste para intensidades bajas, pero conforme sigue aumentando también lo hace la energía cinética sin límite alguno, contrario a lo que sucede con el modelo exponencial en donde el valor de EC encuentra un valor estable a partir de cierta intensidad como varios estudios sugieren que ocurre en la naturaleza, (Angulo Martínez, 2012).

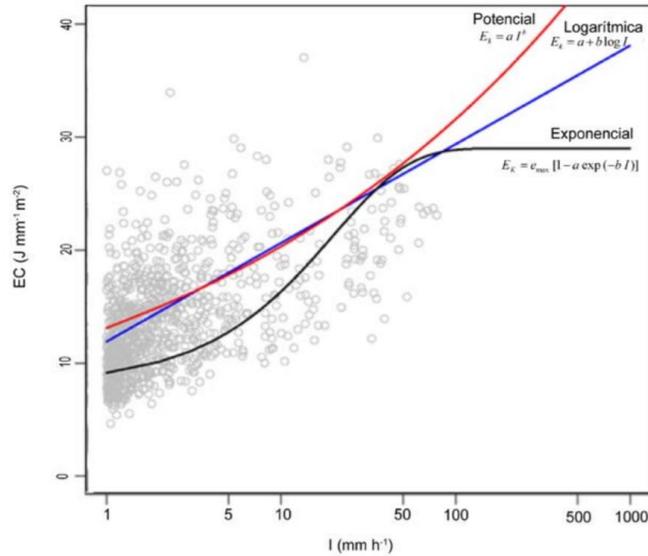


Figura 44. Relación entre energía cinética (EC) e intensidad de la lluvia (I) según tres modelos alternativos (Angulo Martínez, 2012).

La metodología por seguir se muestra en la Figura 45 donde primero se detalla la zona de estudio, en este caso la Ciudad de México, su fisiografía, hidrografía y clima; seguido de la adquisición de datos del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM, sus equipos de medición e información disponible; posteriormente en el procesamiento de datos se delimitan y filtran los eventos de precipitación obtenidos a partir del Observatorio Hidrológico así como se clasifican por intensidad; después en el análisis de datos se selecciona el año más erosivo y se separan los eventos según sean de tipo estratiforme, mixto o convectivo; finalmente se compara la energía cinética que se cuantifica a partir de los equipos del Observatorio con la que se obtiene con la ecuación de Wischmeier y Smith para posteriormente calcular el error porcentual.



Figura 45. Diagrama de metodología.

## 5.2. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio para este trabajo será delimitada por la red de disdrómetros y pluviómetros de pesaje ubicada en la Zona Metropolitana del Valle de México operada por el Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (OH II-UNAM), esta red cuenta con 55 estaciones de medición, 39 equipadas con disdrómetros modelo OTT Parsivel<sup>2</sup> y 16 con pluviómetros de pesaje como se observa en la Figura 46 y la Tabla 11, están repartidas entre la Ciudad de México y la zona conurbada del Estado de México.

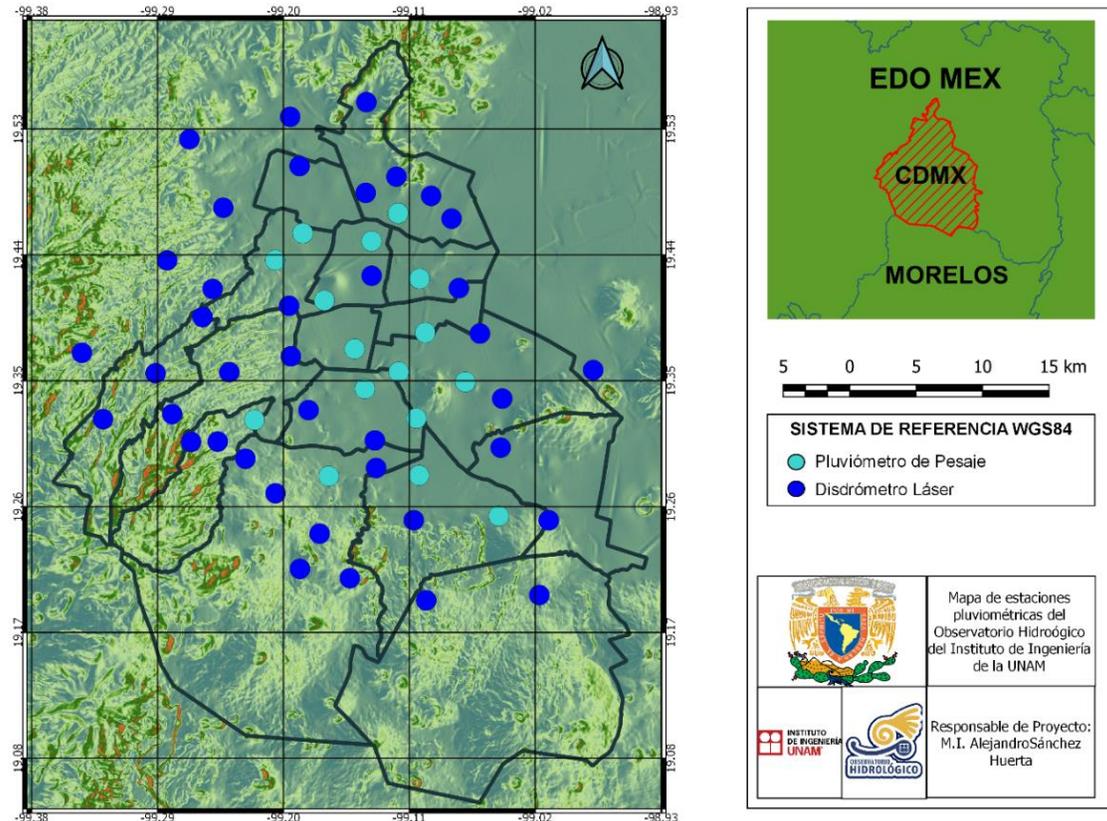


Figura 46. Mapa de estaciones pluviométricas del OH-IIUNAM. (Sánchez Huerta & Cafaggi Félix, 2020).

Número	Estación	Tipo	Número	Estación	Tipo
1	Acopilco	Disdrómetro	29	Meyehualco	Disdrómetro
2	Ajusco	Disdrómetro	30	Milpa Alta	Disdrómetro
3	AMC	Disdrómetro	31	Naucalpan	Disdrómetro
4	Aragón	Disdrómetro	32	Nopalera	Disdrómetro
5	Balbuena	Pluviómetro	33	Padierna	Disdrómetro
6	Bondojo	Pluviómetro	34	Pantitlán	Disdrómetro
7	Bosque Real	Disdrómetro	35	Picacho	Disdrómetro
8	CCH Oriente	Disdrómetro	36	Polanco	Pluviómetro
9	CCH Vallejo	Disdrómetro	37	Prepa 2	Pluviómetro
10	Centenario	Disdrómetro	38	Prepa 3	Disdrómetro
11	Coapa	Disdrómetro	39	Prepa 4	Disdrómetro
12	Condesa	Pluviómetro	40	Prepa 5	Disdrómetro
13	Contreras	Disdrómetro	41	Prepa 8	Disdrómetro
14	Cuajimalpa	Disdrómetro	42	Sacmex	Disdrómetro
15	Cuauhtenco	Disdrómetro	43	San Bartolo	Disdrómetro
16	Cuauhtepic	Disdrómetro	44	San Bernabé	Disdrómetro
17	Cuemanco	Pluviómetro	45	San Gregorio	Pluviómetro
18	Culhuacán	Pluviómetro	46	Tacuba	Pluviómetro
19	Derechos Humanos	Pluviómetro	47	Taxqueña	Pluviómetro
20	Dos Ríos	Disdrómetro	48	Tlalnepantla	Disdrómetro
21	Herradura	Disdrómetro	49	Tlatelolco	Pluviómetro
22	IIUNAM	Disdrómetro	50	Topilejo	Disdrómetro
23	Indios Verdes	Disdrómetro	51	Tulyehualco	Disdrómetro
24	Iztapalapa	Pluviómetro	52	UAM Azcapotzalco	Disdrómetro
25	La Joya	Pluviómetro	53	Vista Hermosa	Disdrómetro
26	Los Reyes	Disdrómetro	54	Xochimilco	Disdrómetro
27	Madín	Disdrómetro	55	Zapata	Pluviómetro
28	Mexicaltzingo	Pluviómetro			

Tabla 11. Estaciones OH-IIUNAM y equipo de medición.

### 5.2.1. FISIOGRAFÍA E HIDROGRAFÍA

En México cruza el Eje Neovolcánico sobre todo el país desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México el cual forma una serie de volcanes y cumbres en toda su extensión, entre los cuales se encuentran, en la zona centro sur del país los volcanes del Ajusco, Tlaloc, Cuauhtzin, Chichinauhtzin, de Guadalupe y Teuhtli, los cerros del Chiquihuite, de la Estrella y Chapultepec algunos de los cuales ayudaron a delimitar el Valle de México, en la Figura 47 se observa que los principales volcanes se ubican al sur de la ciudad en la zona de mayores elevaciones y junto con los cuerpos montañosos del Estado de México e Hidalgo crearon una cuenca endorreica con un sistema de lagos interconectados: Texcoco, Chalco, Zumpango y Xochimilco. Estos lagos ubicados al centro del valle eran alimentados por los ríos que fluían desde las sierras que delimitan el valle, actualmente estos ríos en la sierra son su mayoría intermitentes y se encuentran entubados

en la zona urbana de la CDMX (el Río Magdalena es la única corriente viva dentro de la urbe) y sus afluentes son evacuados por el sistema de drenaje de la ciudad hacia el estado de Hidalgo y posteriormente hacia el Golfo de México, el desalojo de estas aguas desde el siglo pasado tuvo como propósito desecar los lagos y con esto evitar inundaciones en las zonas bajas de la CDMX, sin embargo esto no ha ocurrido como se planeaba.

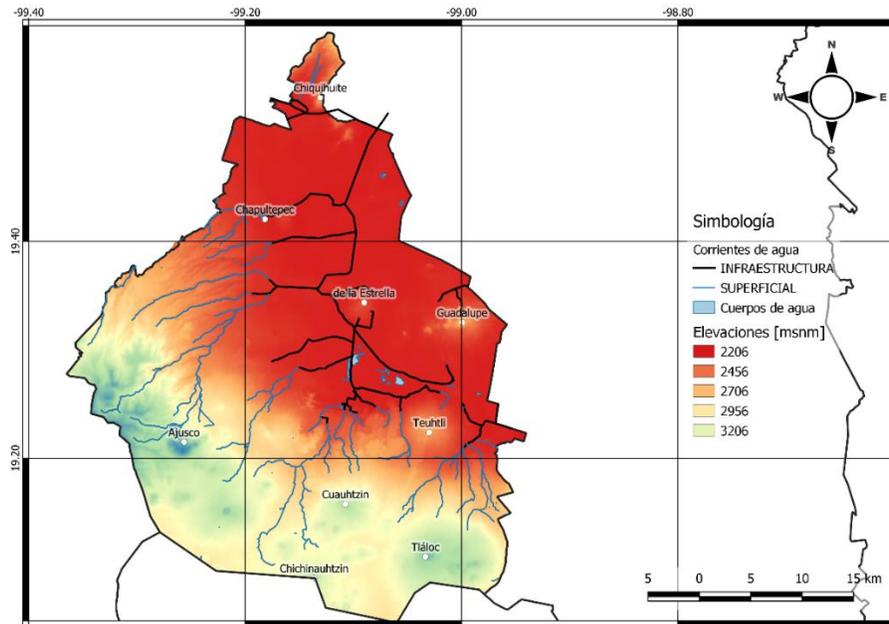


Figura 47. Fisiografía e hidrografía de la CDMX.

### 5.2.2. CLIMA Y RÉGIMEN DE PRECIPITACIÓN

La CDMX cuenta con un clima cálido templado que según el sistema Köppen Geiger se puede identificar como CWB (Oceánico de montaña con invierno seco y verano suave) que como características tiene temperatura media inferior a los 22°C en el mes cálido y superior a los 10°C en al menos 4 meses al año, este clima se presenta en ciudades a grandes alturas en zonas de climas templados y tropicales como es el caso de la CDMX que tiene como altitud promedio 2240 metros sobre el nivel del mar. En cuanto a las precipitaciones en la CDMX rondan valores superiores a los 700 milímetros medios anualmente (SEMARNAT, 2021) con aproximadamente el 74% de esta precipitación ocurriendo entre los meses de junio, julio, agosto y septiembre y precipitaciones mínimas en los meses de invierno como se observa en la Figura 48. En cuanto a su distribución espacial, en la Figura 49 se aprecia que en la zona suroeste de la CDMX es donde se presenta mayor altura de precipitación año con año, las alcaldías de Cuajimalpa, Álvaro Obregón, Magdalena Contreras y Tlalpan presentan zonas con promedio superior a 1000 mm al año, en cambio la zona sureste es donde menor lluvia se recibe, en las alcaldías Iztapalapa, Tláhuac, Xochimilco y Milpa Alta se llegan a tener menos de 600 mm al año.

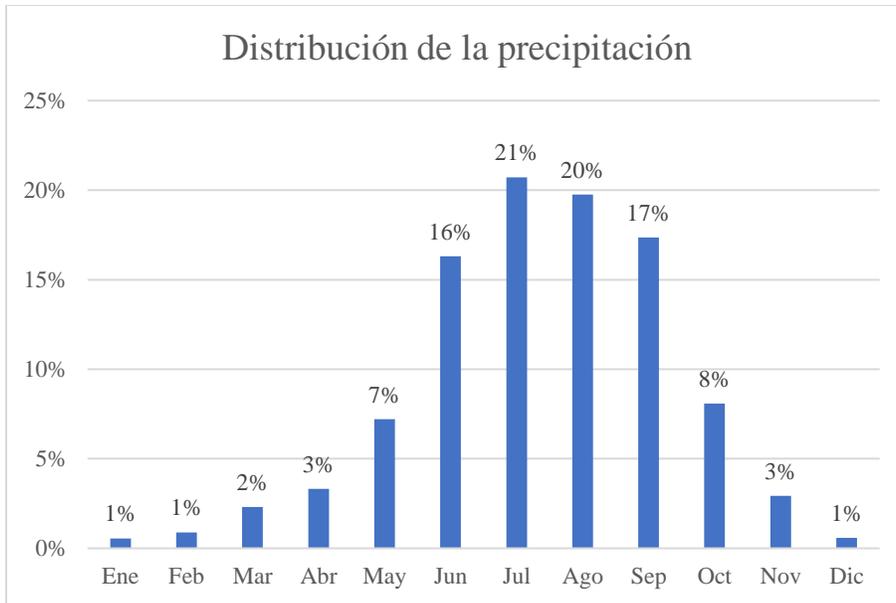


Figura 48. Distribución de la precipitación para la CDMX, elaborado para el periodo 2011-2020 a partir de (CONAGUA, 2021).

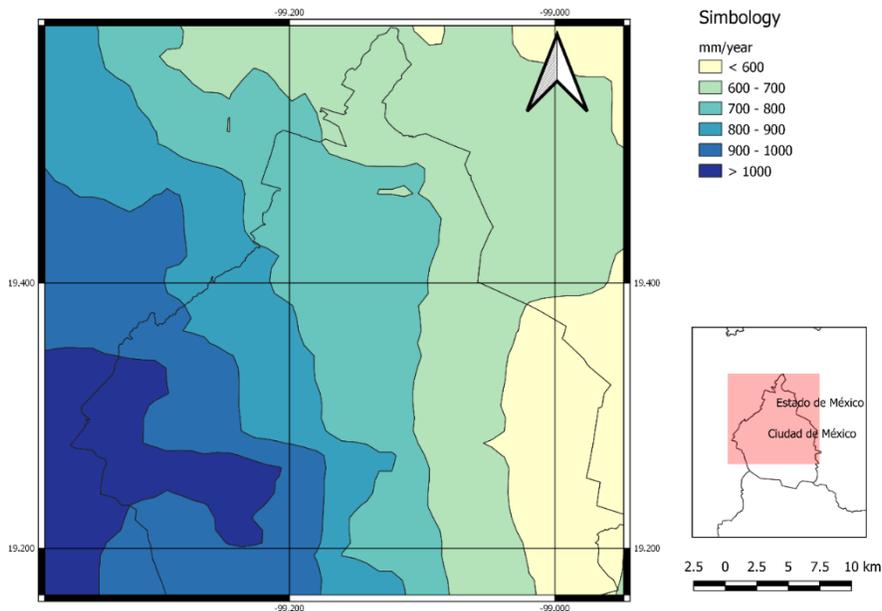


Figura 49. Isoyetas de para la Ciudad de México, elaborado a partir de (CONAGUA) para el periodo 2004-2019.

### 5.3. ADQUISICIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN

Para el objetivo de esta tesis, los datos de precipitación de los cuales se obtendrá la energía cinética medida serán los disponibles en la página web del Observatorio Hidrológico II-UNAM (<https://www.oh-iiunam.mx/>), el cual es un proyecto que tiene como finalidad el brindar datos abiertos en tiempo real respecto a la precipitación, tanto para las autoridades y la población; de modo que, los tomadores de decisiones tengan conocimiento de donde está lloviendo y con qué

intensidad. Por otro lado, se tienen alertas vía Twitter ([@ohiunam](https://twitter.com/ohiunam)) en donde se publica la información cuando comienza a llover y los ciudadanos puedan tomar en consideración la lluvia en sus actividades y las afectaciones que pueda tener la movilidad dentro de la ciudad. Se muestran los umbrales según el tipo de intensidad de precipitación y la acumulación. Adicionalmente están disponibles los mapas de precipitación acumulada e intensidad.

Las estaciones del Observatorio Hidrológico que están conformadas por un disdrómetro óptico laser cuentan las gotas de lluvia, su velocidad y diámetro cuando estas cruzan por ella (OTT Hydromet, 2016). Las estaciones que no están equipadas con disdrómetros cuentan con pluviómetros de pesaje que, si bien no pueden medir las mismas variables que con el disdrómetro, si pueden obtener la intensidad de precipitación. En la Figura 50 se muestran las partes que integran las estaciones, todas cuentan con una microcomputadora de bajo costo Raspberry Pi3, que es la que procesa la información obtenida por los equipos y la almacena en la nube para después poder disponerla en la página web y en alertas de Twitter en cuestión de 1 minuto con ayuda de la banda ancha 4G. De igual manera las estaciones son alimentadas con ayuda de un panel solar y una batería para poder brindar autonomía energética.

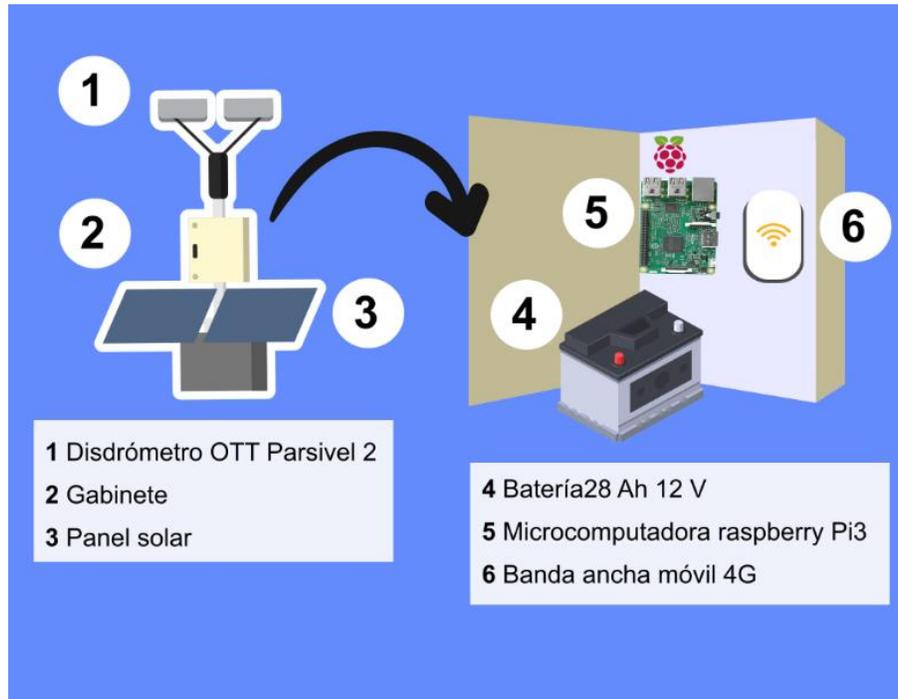


Figura 50. Estación OH-IIUNAM y sus partes. (Sánchez Huerta & Cafaggi Félix, 2020).

El disdrómetro OTT Parsivel2 registra para cada partícula que atraviese el sensor laser: el tamaño y velocidad final, a partir de estas dos se obtienen las demás variables que están disponibles en el sitio web del Observatorio Hidrológico. Para el caso de la energía cinética, esta se obtiene según la ecuación (13), derivada de la ecuación para cuantificar la energía cinética de la mecánica clásica.

$$EC[J/m^2h] = 3.6 \times 10^{-6} \frac{\rho \pi}{12} \sum_i X(D_i) D_i^3 V_t^2(D_i) \quad (13)$$

donde:

$\rho$  Densidad del agua en condiciones normales,  $[kg/m^3]$ .

$X(D_i)$  Número de gotas con diámetro  $D_i$   $[mm]$  que llegan por unidad de tiempo y por unidad de área,  $[gotas/m^2s]$ .

$V_t(D_i)$  Velocidad terminal de caída de una gota con diámetro  $D_i$ ,  $[m/s]$ .

La energía cinética de la lluvia puede ser expresada de dos maneras, la primera y más común es por una unidad de tiempo,  $EC_T [J/m^2h]$ , la otra forma es por unidad de volumen,  $EC_V [J/m^2mm]$ , estas dos formas se relacionan entre sí a través de la intensidad de la lluvia según la ecuación (14).

$$EC_T [J/m^2h] = I [mm/h] * EC_V [J/m^2mm] \quad (14)$$

Si bien se pueden ocupar indistintamente, se tiene referencia (Amaro Loza, Arciniega Esparza, Pedrozo Acuña, & Breña Naranjo, 2016) que la distribución de la energía cinética de la lluvia por unidad de tiempo es más homogénea que por unidad de volumen.

Al ingresar a la página web del OH-IIUNAM se puede observar la interfaz de sitio como se ve en la Figura 51, dando clic al menú “Mapa” se podrá observar el mapa de las estaciones que operan para el Observatorio, (ver Figura 52), en la esquina superior derecha en “Selector de Mapa de Lluvia” se puede seleccionar entre visualizar las intensidades instantáneas o la precipitación acumulada para diferentes intervalos de tiempo, en la parte superior izquierda se mostrarán una lista de las estaciones con su respectivo valor para el caso seleccionado. En caso de que en el momento de ingresar al mapa esté ocurriendo un evento de precipitación, este se mostrará en las zonas en donde se presente de acuerdo con la escala de intensidad incluida, (ver Figura 53). Seleccionando cualquier estación y dando clic en “Ver Datos”, (ver Figura 54), se abrirá una ventana donde se presentan gráficamente varias variables relacionadas con la precipitación, (ver Figura 55), como son, en el caso de las estaciones equipadas con disdrómetro: intensidad, precipitación acumulada, visibilidad, número de gotas y energía cinética. En la parte superior de la ventana se podrá cambiar la variable a visualizar y en la parte inferior se selecciona el mes que se muestra en la gráfica, en el menú “Descarga” se selecciona el formato y la o las variables a descargar para el mes mostrado. La energía cinética será la variable de interés para fines de esta tesis, (ver Figura 56). Para el caso de las estaciones equipadas únicamente con pluviómetro de pesaje solo se registran las variables: intensidad, precipitación eventual y precipitación acumulada, (ver Figura 57), por lo que se descartará el uso de estas estaciones. El archivo descargable en formato de valores separados por comas, (ver Figura 58), es el que se usará para el procesamiento de información que se realizará.



Figura 51. Interfaz de inicio de la página web OH-IIUNAM.

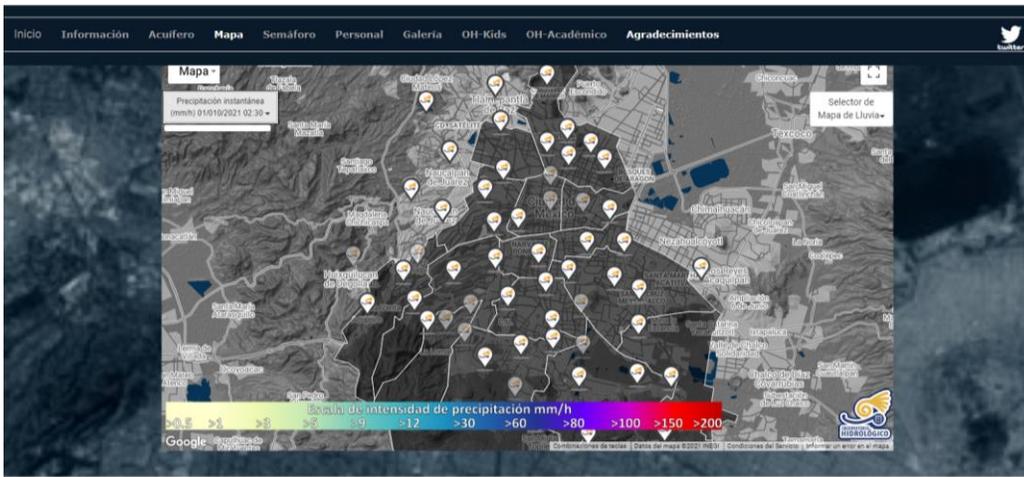


Figura 52. Mapa de estaciones.

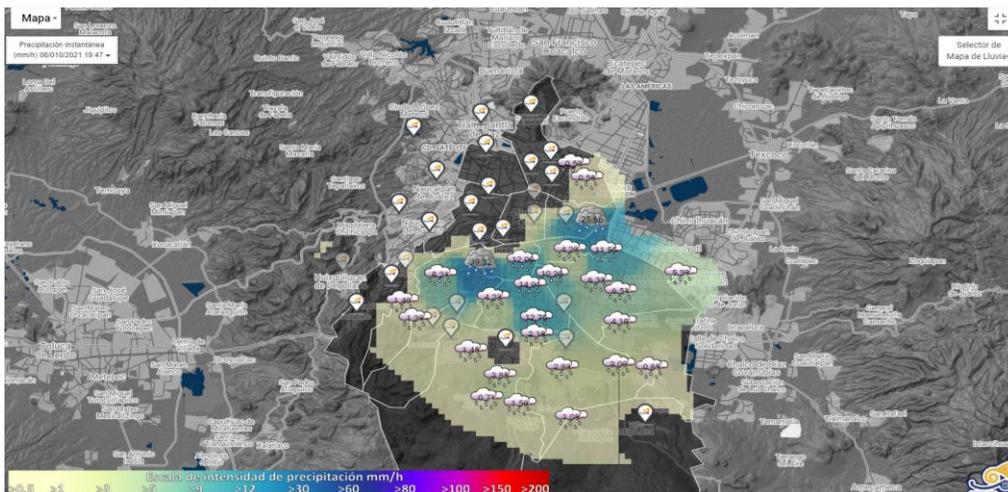


Figura 53. Visualización de evento de lluvia en tiempo real.

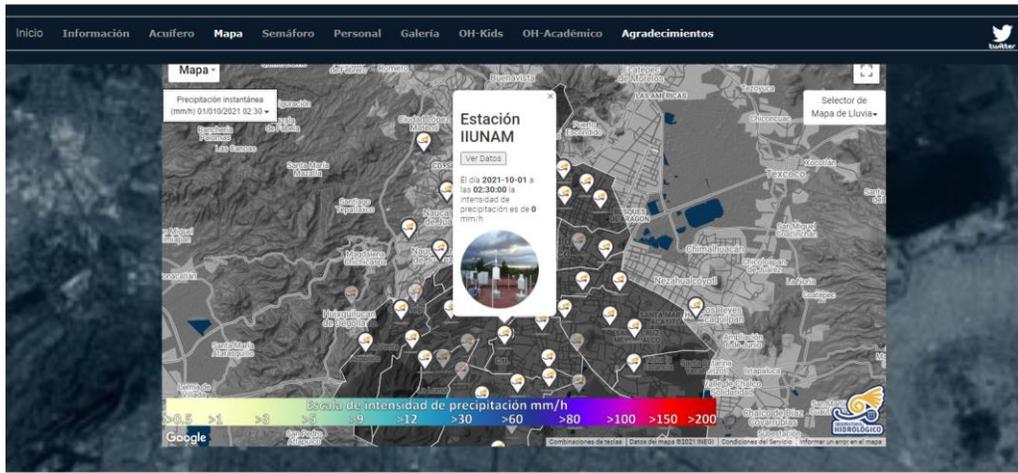


Figura 54. Selección de estación.

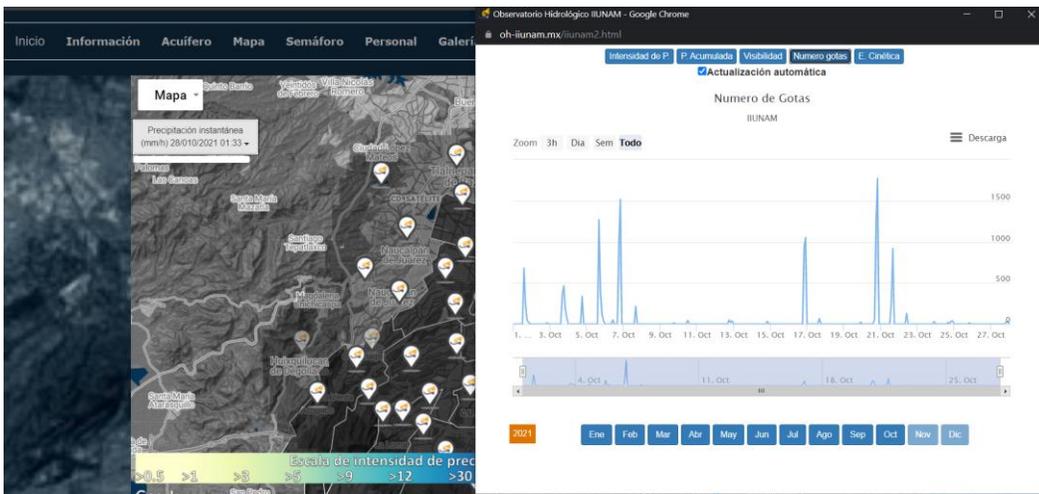


Figura 55. Serie de datos disponibles.

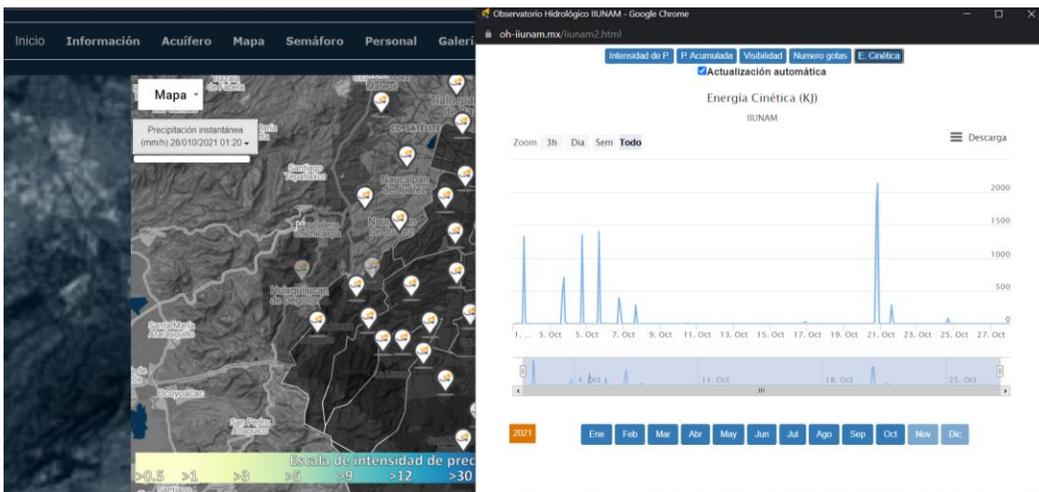


Figura 56. Gráfica de energía cinética.

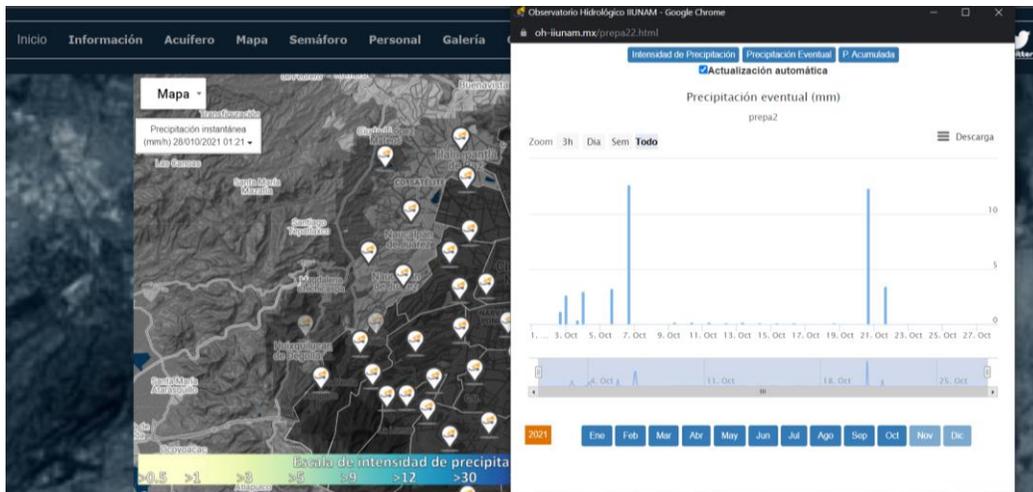


Figura 57. Estación con pluviómetro de pesaje.

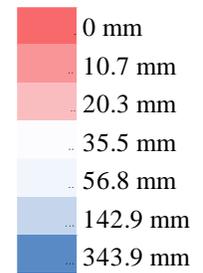
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Estación	Fecha/hora	Intensidad [mm/h]	Acumulada [mm]	Reflectividad [dB]	Visibilidad [m]	Número de gotas	Energía Cinética [KJ]
1	IIUNAM	01/05/2021 00:00	0	0	-9.999	20000	0	0
2	IIUNAM	01/05/2021 00:01	0	0	-9.999	20000	0	0
3	IIUNAM	01/05/2021 00:02	0	0	-9.999	20000	0	0
4	IIUNAM	01/05/2021 00:03	0	0	-9.999	20000	0	0
5	IIUNAM	01/05/2021 00:04	0	0	-9.999	20000	0	0
6	IIUNAM	01/05/2021 00:05	0	0	-9.999	20000	0	0
7	IIUNAM	01/05/2021 00:06	0	0	-9.999	20000	0	0
8	IIUNAM	01/05/2021 00:07	0	0	-9.999	20000	0	0
9	IIUNAM	01/05/2021 00:08	0	0	-9.999	20000	0	0
10	IIUNAM	01/05/2021 00:09	0	0	-9.999	20000	0	0
11	IIUNAM	01/05/2021 00:10	0	0	-9.999	20000	0	0
12	IIUNAM	01/05/2021 00:11	0	0	-9.999	20000	0	0
13	IIUNAM	01/05/2021 00:12	0	0	-9.999	20000	0	0
14	IIUNAM	01/05/2021 00:13	0	0	-9.999	20000	0	0
15	IIUNAM	01/05/2021 00:14	0	0	-9.999	20000	0	0
16	IIUNAM	01/05/2021 00:15	0	0	-9.999	20000	0	0
17	IIUNAM	01/05/2021 00:16	0	0	-9.999	20000	0	0
18	IIUNAM	01/05/2021 00:17	0	0	-9.999	20000	0	0
19	IIUNAM	01/05/2021 00:18	0	0	-9.999	20000	0	0
20	IIUNAM	01/05/2021 00:19	0	0	-9.999	20000	0	0
21	IIUNAM	01/05/2021 00:20	0	0	-9.999	20000	0	0
22	IIUNAM	01/05/2021 00:21	0	0	-9.999	20000	0	0
23	IIUNAM	01/05/2021 00:22	0	0	-9.999	20000	0	0
24	IIUNAM	01/05/2021 00:23	0	0	-9.999	20000	0	0
25	IIUNAM	01/05/2021 00:24	0	0	-9.999	20000	0	0
26	IIUNAM	01/05/2021 00:25	0	0	-9.999	20000	0	0
27	IIUNAM	01/05/2021 00:26	0	0	-9.999	20000	0	0
28	IIUNAM	01/05/2021 00:27	0	0	-9.999	20000	0	0
29	IIUNAM	01/05/2021 00:28	0	0	-9.999	20000	0	0
30	IIUNAM	01/05/2021 00:29	0	0	-9.999	20000	0	0
31	IIUNAM	01/05/2021 00:30	0	0	-9.999	20000	0	0
32	IIUNAM	01/05/2021 00:30	0	0	-9.999	20000	0	0

Figura 58. Archivo de datos descargados.

El proyecto del OH-IIUNAM se puso en marcha en el año 2016 con 9 estaciones en operación y para el 2018 ya contaba con 55 como se observa en la Tabla 12, a partir de 2018 se cuenta con la mayor cantidad de registros, por lo que de este año en adelante será el intervalo que se considerará para la selección del año con mayor potencial de erosión.



Estación	Año Mes	2019												2020											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Acopilco																									
Ajusco																									
AMC																									
Aragón																									
Balbuena																									
Bondojito																									
BosqueReal																									
CCHOte																									
CCHVallejo																									
Centenario																									
Coapa																									
Condesa																									
Contreras																									
Cuajimalpa																									
Cuauhtenco																									
Cuatepec																									
Cuemanco																									
Culhuacán																									
DHumanos																									
DosRíos																									
Herradura																									
IIUNAM																									
IndiosVer																									
Iztapalapa																									
LaJoya																									
LosReyes																									
Madin																									
Mexicaltzingo																									
Meyehualco																									
MilpaAlta																									
Naucalpan																									
Nopalera																									
Padierna																									
Pantitlán																									
Picacho																									
Polanco																									
Prepa2																									
Prepa3																									
Prepa4																									
Prepa5																									
Prepa8																									
Sacmex																									
SanBartolo																									
SanBernabe																									
SGregorio																									
Tacuba																									
Taxquena																									
Tlalne																									
Tlatelolco																									
Topilejo																									
Tulyehualco																									
UAMAzc																									
Vhermosa																									
Xochimilco																									
Zapata																									



Continuación Tabla 12.

## 5.4. ANÁLISIS DE DATOS

### 5.4.1. SELECCIÓN DEL AÑO CON MAYOR POTENCIAL EROSIVO

Uno de los objetivos específicos de esta tesis es seleccionar el año con eventos de precipitación más erosivos del periodo 2018 a 2020. Lo anterior requiere que primero se seleccionen los eventos de precipitación bajo un criterio definido por lo que los eventos serán delimitados como aquellos eventos con duración y separación mínima de 30 minutos y precipitación acumulada superior a 5 milímetros, para el periodo de análisis se obtuvieron 4 558 eventos, los cuales se repartieron en 1 763, 1 609 y 1 186 eventos en 2018, 2019 y 2020 respectivamente, en la Tabla 13 se muestran estos eventos con su duración, intensidad media e intensidad máxima instantánea respectiva, las primeras dos variables servirán posteriormente para obtener la clasificación del evento, así como su erosividad. En la Tabla 14 se muestran los eventos registrados en cada estación por año.

Evento	Estación	Inicio	Fin	Duración	HP [mm]	Intensidad Máxima [mm/h]	Intensidad Media [mm/h]
1	Acopilco	06/06/2018 21:34	06/06/2018 22:30	00:56:00	10.05	90.43	14.70
2	Acopilco	07/06/2018 19:03	07/06/2018 20:19	01:16:00	9.28	59.25	8.98
3	Acopilco	12/06/2018 12:40	12/06/2018 16:27	03:47:00	8.71	28.33	3.13
4	Acopilco	12/06/2018 17:32	13/06/2018 11:13	17:41:00	9.32	4.61	0.66
...							
4555	Zapata	15/09/2020 18:35	15/09/2020 20:14	01:39:00	39.93	92.19	25.76
4556	Zapata	16/09/2020 17:58	16/09/2020 20:51	02:53:00	96.65	182.37	36.70
4557	Zapata	20/09/2020 18:55	20/09/2020 20:02	01:07:00	7.36	19.74	7.49
4558	Zapata	11/10/2020 23:13	12/10/2020 00:05	00:52:00	9.26	40.05	12.92

Tabla 13. Eventos registrados 2018-2020.

Estación	Total	2018	2019	2020
Acopilco	154	55	60	39
Ajusco	120	42	38	40
AMC	85	25	32	28
Aragón	80	37	27	16
Balbuena	19	0	12	7
Bondoquito	50	19	19	12
Bosque Real	118	55	34	29
CCH Oriente	90	49	24	17
CCH Vallejo	92	44	30	18
Centenario	101	43	27	31
Coapa	84	27	30	27
Condesa	24	2	22	0
Contreras	123	51	44	28
Cuajimalpa	133	58	41	34
Cuauhtenco	94	32	25	37
Cuautepec	85	29	40	16
Cuemanco	35	8	13	14
Culhuacán	36	11	14	11
Derechos Humanos	57	21	22	14
Dos Ríos	64	29	29	6
Herradura	108	52	49	7
IIUNAM	99	50	24	25
Indios Verdes	88	34	34	20
Iztapalapa	38	14	15	9
La Joya	49	14	19	16
Los Reyes	81	29	34	18
Madín	87	42	45	0
Mexicaltzingo	49	15	14	20

Estación	Total	2018	2019	2020
Meyehualco	55	22	27	6
Milpa Alta	73	22	21	30
Naucalpan	106	40	40	26
Nopalera	78	26	23	29
Padierna	103	37	42	24
Pantitlán	86	26	36	24
Picacho	116	38	42	36
Polanco	47	14	15	18
Prepa 2	49	19	15	15
Prepa 3	61	26	28	7
Prepa 4	129	47	47	35
Prepa 5	90	34	35	21
Prepa 8	110	42	40	28
Sacmex	117	48	38	31
San Bartolo	126	55	40	31
San Bernabé	140	49	55	36
San Gregorio	33	13	9	11
Tacuba	41	13	14	14
Taxqueña	57	18	19	20
Tlalnepantla	90	43	30	17
Tlatelolco	21	21	0	0
Topilejo	109	33	33	43
Tulyehualco	82	25	27	30
UAM Azcapo	103	50	33	20
Vista Hermosa	138	55	43	40
Xochimilco	94	35	25	34
Zapata	61	25	15	21
Suma	4558	1763	1609	1186

Tabla 14. Eventos registrados por estación.

La definición de un evento erosivo varía según el autor o estudio y pueden ser a partir de su altura y duración o intensidad (Angulo Martínez & Beguería, 2013). Para fines de esta tesis un evento erosivo se considerará como aquel que cuenta con una Intensidad media de precipitación igual o superior a 25 [mm/h], para cada año se hace el conteo de eventos erosivos y se obtiene el año con mayor cantidad de eventos erosivos, (ver Figura 59 a Figura 61), resultando 2018 en el año con mayor potencial erosivo, (ver Tabla 15).

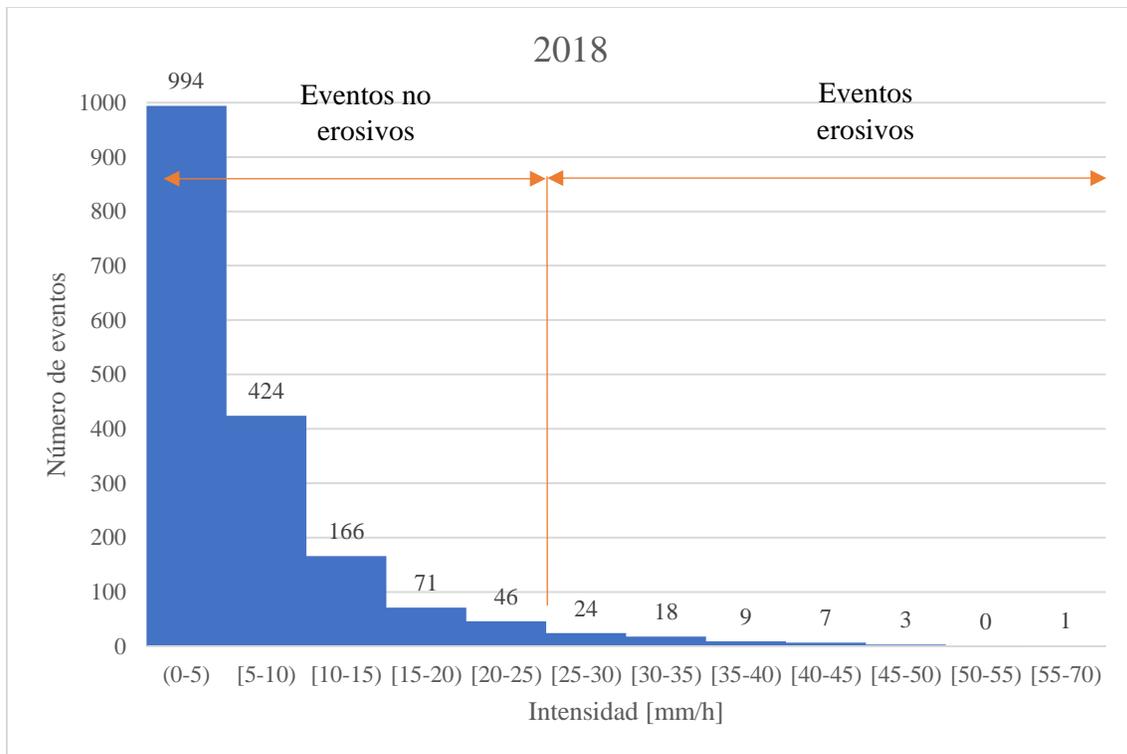


Figura 59. Eventos clasificados por intensidad, 2018.

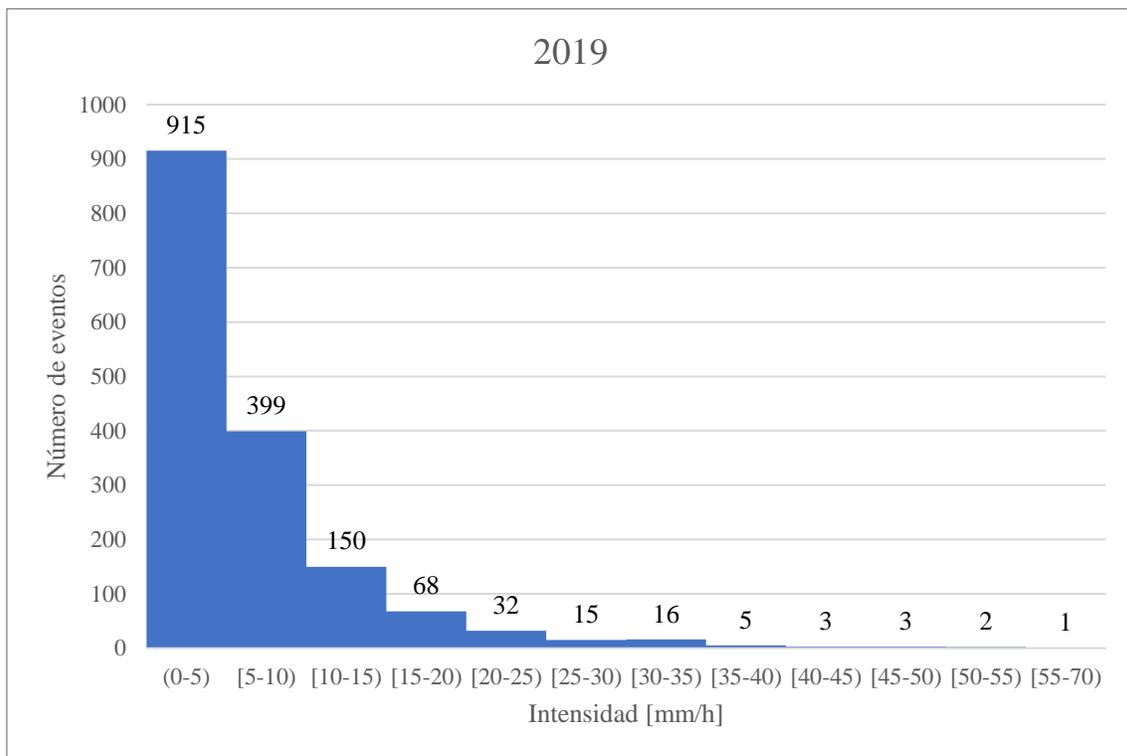


Figura 60. Eventos clasificados por intensidad, 2019.

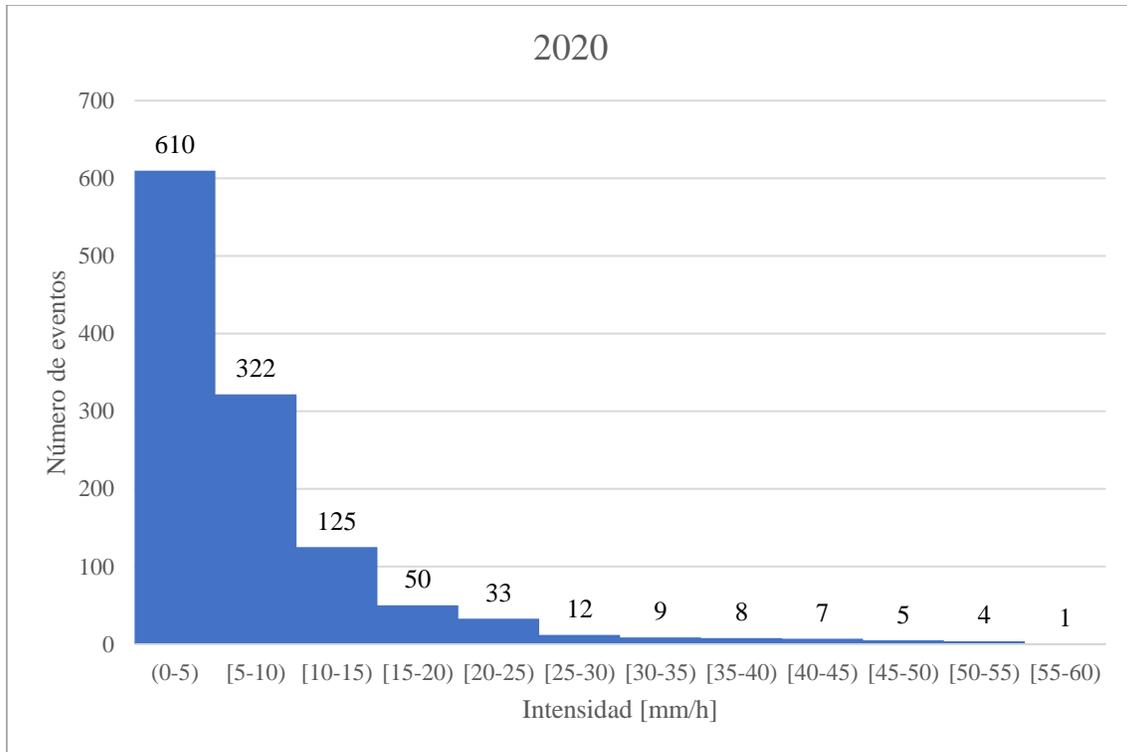


Figura 61. Eventos clasificados por intensidad, 2020.

Año	Número de eventos	Erosivos	No erosivos
2018	1763	62	1701
2019	1609	45	1564
2020	1186	46	1140

Tabla 15. Eventos erosivos y no erosivos por año.

#### 5.4.2. SEPARACIÓN DE EVENTOS CONVECTIVOS, ESTRATIFORMES Y MIXTOS

El comportamiento de los eventos de precipitación varía según las características de la zona de estudio. La ubicación, el relieve y diversos factores meteorológicos hacen que los eventos varíen en su duración e intensidad. De manera general se conoce como eventos de precipitación de tipo convectivo a aquellos en donde la lluvia comienza de manera repentina y con intensidades altas, los tamaños de las gotas son muy variados, estos eventos se originan en nubes con desarrollo vertical, en cambio los eventos estratiformes son aquellos donde la lluvia cae de manera constante, continua y suave desde nubes con desarrollo horizontal.

Para la Ciudad de México se clasifican los eventos convectivos como aquellos con duración menor a 120 minutos, los eventos estratiformes como aquellos con mayor a 360 y los eventos mixtos pertenecientes al intervalo intermedio de 120 a 360 minutos.

Para los eventos obtenidos del periodo de 2018 a 2020 se realizó la clasificación según su duración, en la Tabla 16 se puede observar el número de eventos de tipo convectivo, estratiforme y mixto

por cada estación, de total de 4558 eventos registrados predominan los de tipo mixto y convectivo con 46% y 41% respectivamente mientras que los de tipos estratiforme solo cuentan con el 13%.

Estación	Convectivo	Mixt	Estratiforme
Acopilco	40	97	17
Ajusco	39	62	19
AMC	30	37	18
Aragón	24	39	17
Balbuena	19	0	0
Bondoquito	50	0	0
Bosque Real	36	64	18
CCH Oriente	27	49	14
CCH Vallejo	31	46	15
Centenario	34	54	13
Coapa	23	44	17
Condesa	23	1	0
Contreras	41	66	16
Cuajimalpa	33	85	15
Cuauhtenco	22	55	17
Cuauhtepc	29	46	10
Cuemanco	34	1	0
Culhuacán	31	5	0
Derechos	55	2	0
Dos Ríos	19	37	8
Herradura	30	65	13
IIUNAM	30	58	11
Indios Verdes	30	49	9
Iztapalapa	38	0	0
La Joya	46	3	0
Los Reyes	34	35	12
Madín	29	47	11
Mexicaltzingo	48	1	0

Estación	Convectivo	Mixt	Estratiforme
Meyehualco	18	26	11
Milpa Alta	21	33	19
Naucalpan	36	57	13
Nopalera	29	36	13
Padierna	37	53	13
Pantitlán	30	43	13
Picacho	37	62	17
Polanco	43	4	0
Prepa 2	46	3	0
Prepa 3	23	26	12
Prepa 4	46	67	16
Prepa 5	31	42	17
Prepa 8	35	59	16
Sacmex	39	60	18
San Bartolo	38	68	20
San Bernabé	45	77	18
San Gregorio	32	1	0
Tacuba	39	2	0
Taxqueña	55	2	0
Tlalnepantla	28	48	14
Tlatelolco	20	1	0
Topilejo	27	59	23
Tulyehualco	30	38	14
UAM Azcapo	28	60	15
Vista	40	79	19
Xochimilco	31	52	11
Zapata	58	3	0
Suma	1867	2109	582

Tabla 16. Clasificación de eventos según su tipo por estación del OH-IIUNAM.

Cabe resaltar que del total de 153 eventos erosivos registrados durante los tres años de análisis 147 fueron de tipo convectivo y 6 de tipo mixto. Esto es debido a que las lluvias convectivas son de intensidades altas y de duraciones cortas por lo que las intensidades medias son más propensas a tener valores elevados a las mixtas. Para los eventos de tipo estratiforme al ser de intensidades suaves y duraciones prolongadas es casi imposible que puedan ser considerados eventos erosivos.

## 6. RESULTADOS

### 6.1. CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA POR EVENTOS MEDIDOS CON DISDRÓMETRO

Como se mostró en la Figura 58 haciendo uso de la ecuación (13), para cada minuto el OH-IIUNAM registra la energía cinética junto con las demás variables por lo que únicamente se realiza la sumatoria desde el comienzo hasta el final de cada evento erosivo. De los 153 eventos erosivos contados en la Tabla 15, 24 corresponden a eventos registrados con el disdrómetro óptico laser y los 129 restantes fueron mediante estaciones equipadas con pluviómetro. En la Tabla 17 se presentan 22 de los 24 eventos antes mencionados, los dos eventos no incluidos se relacionan a problemas de transmisión de datos.

Evento	Estación	Tipo de evento	Energía Cinética [ $J/m^2/h$ ]	Intensidad Media [ $mm/h$ ]
561	Bosque Real	Convectivo	38,414.26	25.16
809	Centenario	Convectivo	43,324.80	40.46
813	Centenario	Mixto	76,926.32	31.61
853	Centenario	Convectivo	24,340.92	31.51
1393	Cuauhtepic	Convectivo	76,593.19	34.56
1686	Herradura	Convectivo	79,858.94	26.22
1826	IIUNAM	Convectivo	42,288.51	32.97
1852	Indios Verdes	Convectivo	60,252.79	31.78
2108	Madín	Convectivo	93,354.00	25.21
2283	Meyehualco	Convectivo	41,354.38	33.35
2303	Milpa Alta	Convectivo	84,683.50	31.87
2371	Milpa Alta	Convectivo	15,757.97	37.30
2382	Naucalpan	Convectivo	57,238.37	26.61
3198	Prepa 5	Convectivo	42,987.86	26.11
3374	Sacmex	Convectivo	40,694.27	29.69
3395	Sacmex	Convectivo	82,781.09	41.35
3508	San Bartolo	Convectivo	71,344.02	26.70
3619	San Bernabé	Convectivo	46,631.97	28.63
3937	Tlalnepantla	Convectivo	30,448.97	25.99
4297	Vista Hermosa	Convectivo	84,713.08	32.27
4338	Vista Hermosa	Convectivo	90,253.08	36.99
4340	Vista Hermosa	Convectivo	93,071.65	32.95

Tabla 17. Energía cinética de eventos erosivos registrados con disdrómetro (dos eventos erosivos no incluidos).

Comparando el comportamiento de la Energía cinética y de la Intensidad de precipitación en eventos erosivos se puede observar que son relativamente similares, en la Figura 62 y Figura 63 se muestra la comparativa para los eventos 2108 y 4338 registrados por las estaciones Madín y Vista Hermosa respectivamente. En ambos casos se presentaron instantes con intensidades altas de valores superiores a 150 [ $mm/h$ ], donde a su vez se presentan las EC mayores.

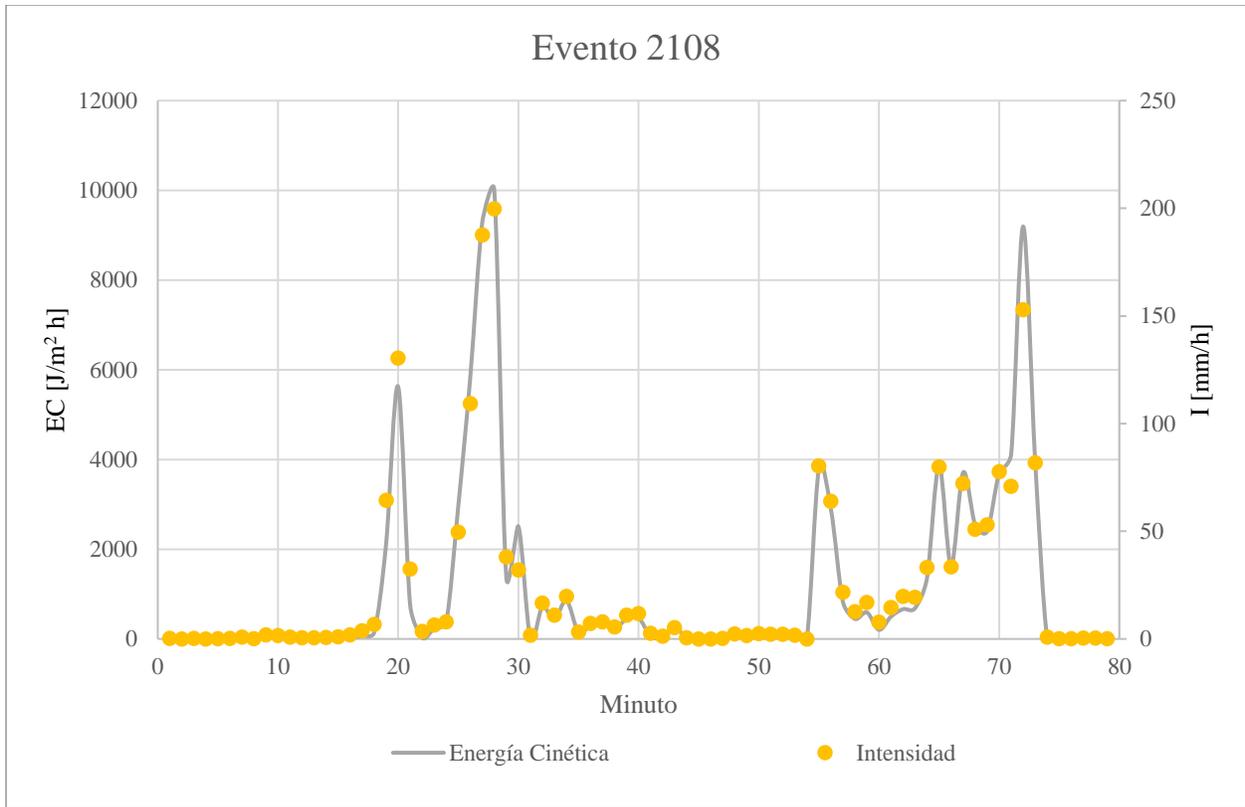


Figura 62. EC e I para evento 2108, 14/03/2018, estación OH-IIUNAM Madín.

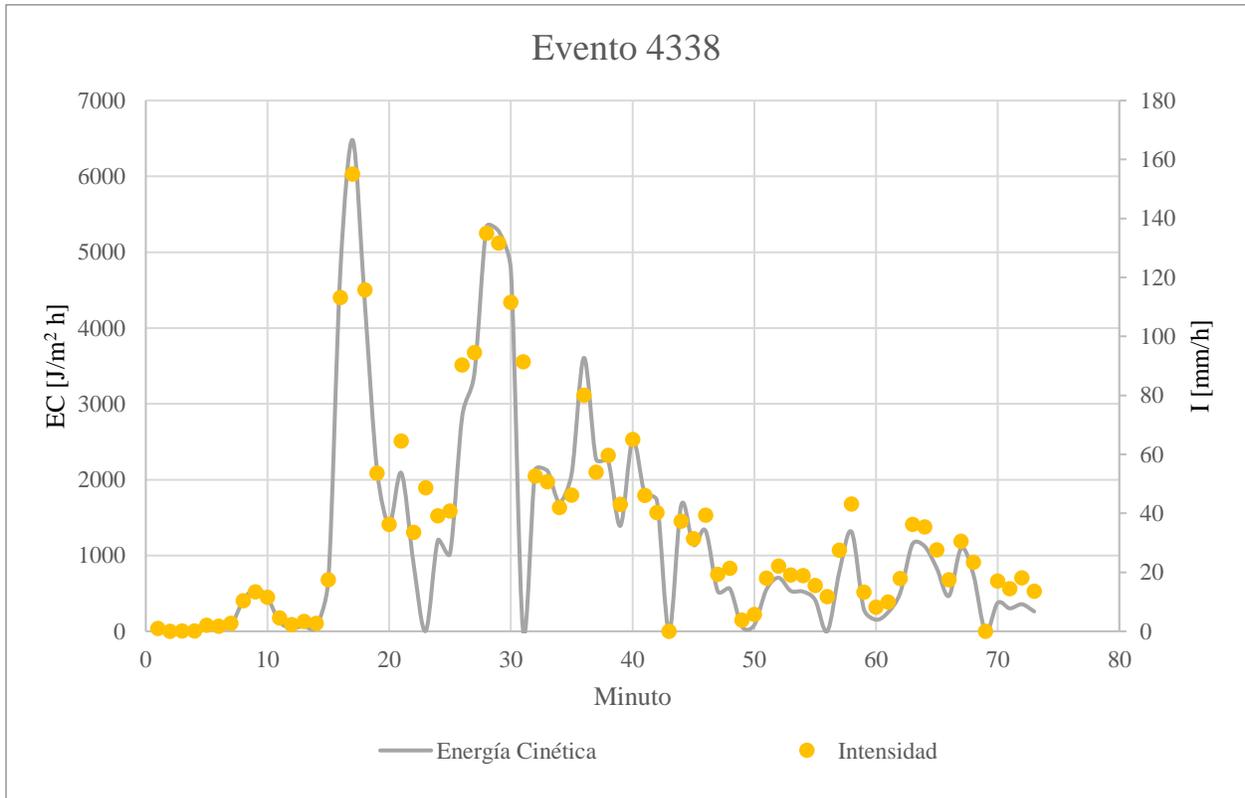


Figura 63. EC e I para evento 4338, 25/07/2019, estación OH-IIUNAM Vista Hermosa.

Esta correlación entre la intensidad y la energía cinética de la precipitación también puede ayudar a corroborar la hipótesis referente a la mayor erosividad de los eventos de precipitación convectivos respecto a los estratiformes, obteniendo el promedio de la intensidad media obtenida en la Tabla 13 para cada evento según su clasificación (convectivo, mixto o estratiforme) se pudo observar que los eventos de tipo convectivo tuvieron mayor intensidad promedio, esto se puede asociar a un mayor potencial erosivo.

Clasificación	Cantidad	Intensidad media promedio [mm/h]
Convectivo	1867	11.67
Mixto	2109	3.92
Estratiforme	582	1.85
Total	4558	6.83

Tabla 18. Intensidad media promedio por tipo de evento de precipitación.

## 6.2. ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA POR EVENTOS CON LA ECUACIÓN WISCHMEIER Y SMITH

La energía cinética de la lluvia puede ser expresada de dos maneras, la primera y más común es por una unidad de tiempo,  $EC_T [J/m^2h]$ , la otra forma es por unidad de volumen,  $EC_V [J/m^2mm]$ , estas dos formas se relacionan entre sí a través de la intensidad de la lluvia según la ecuación (15).

$$EC_T [J/m^2h] = I [mm/h] * EC_V [J/m^2mm] \quad (15)$$

Si bien se pueden ocupar indistintamente, se tiene referencia (Amaro Loza, Arciniega Esparza, Pedrozo Acuña, & Breña Naranjo, 2016) que la distribución de la energía cinética de la lluvia por unidad de tiempo es más homogénea que por unidad de volumen. En la Figura 64 se ilustra la energía cinética expresada en términos de tiempo y la energía cinética por unidad de volumen en la Figura 65, de modo se ajustaron a las ecuaciones de tipo: lineal (azul), potencial (rosa), exponencial (rojo) y logarítmico (verde).

Al relacionar la intensidad de precipitación con las dos formas de expresión de energía cinética se observan comportamientos notablemente diferentes, sin embargo el correspondiente al de EC por unidad de tiempo presenta menor dispersión en la serie por lo que es más conveniente al momento de intentar representar su comportamiento a través de algún ajuste.

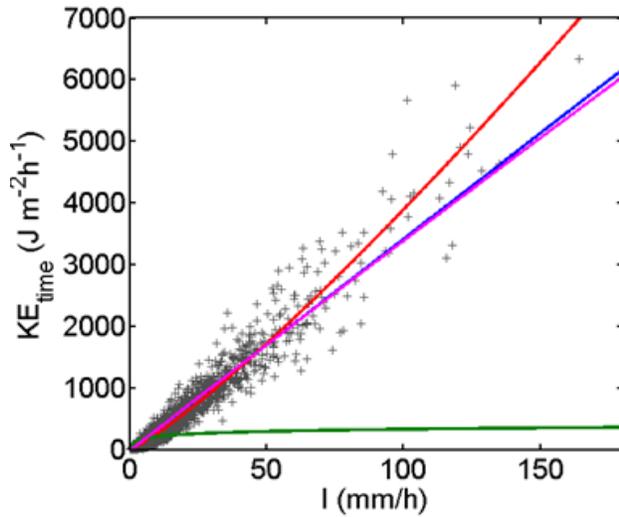


Figura 64. Gráfica Intensidad vs Energía Cinética por unidad de tiempo. OH-IIUNAM. (Amaro Loza, Arciniega Esparza, Pedrozo Acuña, & Breña Naranjo, 2016).

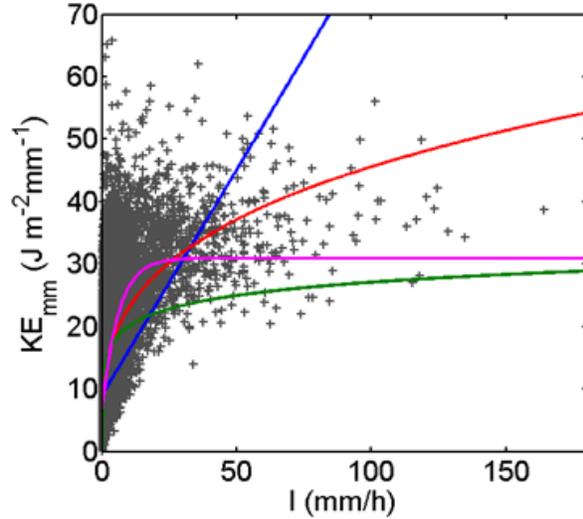


Figura 65. Gráfica Intensidad vs Energía Cinética por unidad de volumen. OH-IIUNAM. (Amaro Loza, Arciniega Esparza, Pedrozo Acuña, & Breña Naranjo, 2016).

Diversas metodologías se han desarrollado a lo largo de los años en diferentes partes del mundo para la obtención de la energía cinética de la lluvia. En el caso de las ecuaciones empíricas USLE y RUSLE la EC que se calcula es la  $EC_v$ , se puede representar por unidad de tiempo mediante la Ecuación (15) con la finalidad de comparar con algunos autores que se enlistaron en la Tabla 10 y (Seung Sook, Sang Deog, & Byoung Koo, 2016), como se muestra en la Figura 66. La estimación de EC para cada evento se obtuvo aplicando las fórmulas del USLE y RUSLE a cada registro de intensidad del OH, posteriormente se realizó la sumatoria de los valores obtenidos para cada evento, en la Tabla 19 se observa una parte de los valores obtenidos en donde también se obtuvo la EC con algunos de los ajustes mostrados en la Figura 66.

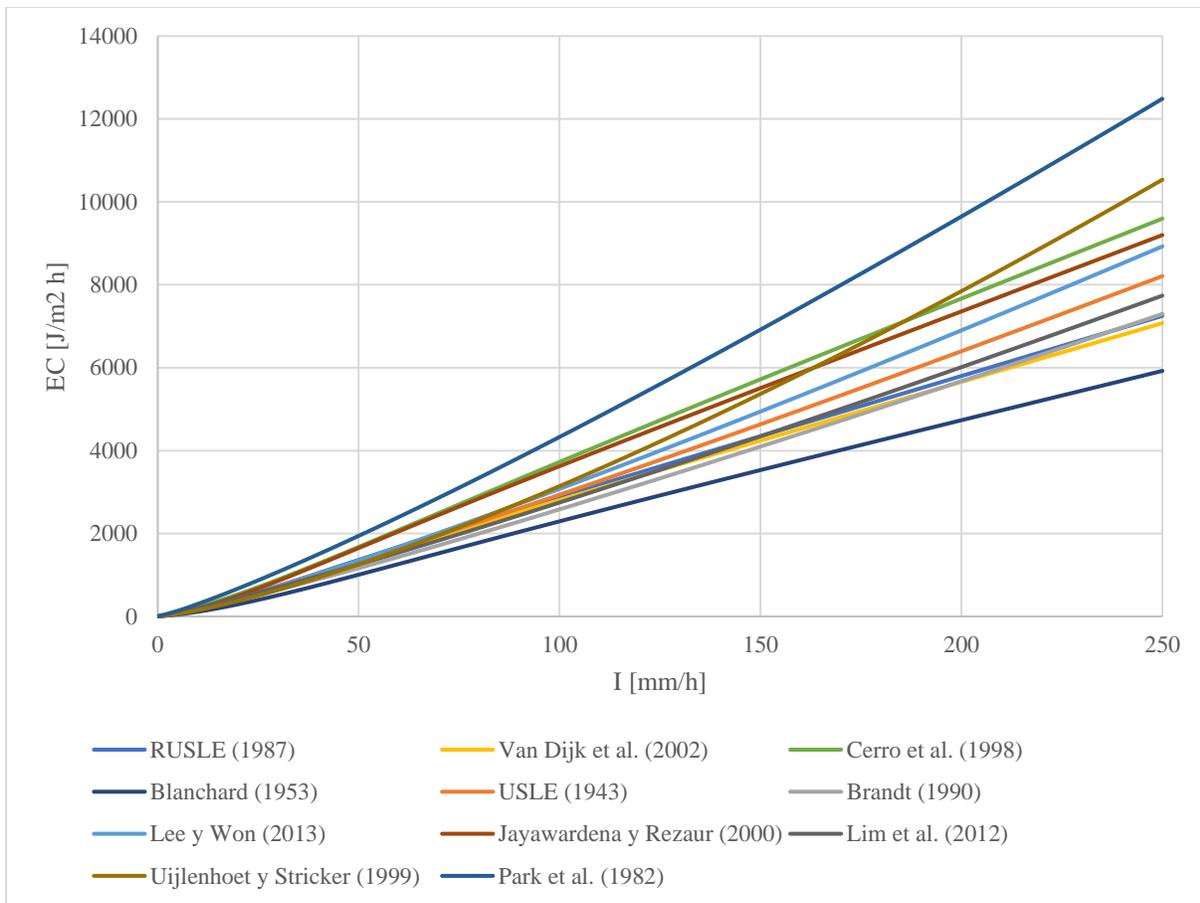


Figura 66. Comparativa de relaciones empíricas de energía cinética e intensidad.

Evento	Estación	Fecha/hora	Intensidad [mm/h]	Energía Cinética OH-IIUNAM	RUSLE (1987)	USLE (1943)	Van Dijk et al. (2002)	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:19	0.364	9.11	3.09	0.00	5.03	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:20	0.408	10.54	3.48	3.47	5.64	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:21	0.286	6.05	2.41	0.00	3.94	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:22	1.981	57.16	19.99	28.71	29.24	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:23	3.559	99.59	41.01	59.48	55.62	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:24	49.187	1,578.11	1,338.62	1,311.81	1,300.27	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:25	64.027	2,041.27	1,802.36	1,771.60	1,747.95	...
1	BOSQUEREAL	15/10/2018 16:27	69.872	3,078.35	1,981.95	1,956.47	1,922.73	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...

Tabla 19. Cuantificación de la EC con diferentes ajustes empíricos.

Nota: unidades de EC en [J/m² h].

### 6.3. COMPARACIÓN DE LA ENERGÍA CINÉTICA MEDIDA Y CALCULADA

Posteriormente a la estimación de la energía cinética por evento de precipitación, se compararon los valores de energía cinética medidos directamente por el disdrómetro versus los valores calculados. De manera general, los resultados indican que los ajustes de los autores Jayawardena y Rezaur (2000), Lim et al. (2012) y Van Dijk et al. (2002) subestiman ligeramente la energía cinética. De la comparación mostrada en la Figura 66, únicamente Park et al. (1982) presenta una tendencia más alta dentro de este grupo. En cuanto a los modelos USLE y RUSLE ambos presentaron valores bastante similares pero muy por debajo de la EC medida.

La Tabla 20, en la cual se presentan 24 eventos, todos son de tipo convectivo, excepto el número 813 que se asocia como mixto, la energía cinética medida por las estaciones del Observatorio Hidrológico de la UNAM (columna 4) y la energía cinética calculada a partir de las referencias de la RUSLE, USLE y los autores Van Dijk et al. (2002), Cerro et al. (1998), Blanchard (1953), Jayawardena y Rezaur (2000), Brandt (1990), Lee y Won (2013), Lim et al. (2012), Uijlenhoet y Stricker (1999) y Park et al. (1982), (de la columna 5 a la 15 respectivamente). Tanto la energía cinética medida y las teóricas se han expresado en términos de tiempo.

Al analizar la Figura 67 se comparan los datos registrados por el OH-IIUNAM, en donde, como se mencionó anteriormente, Park et al. (1982) junto con Cerro et al. (1998) se ajustan mejor a la serie de datos principalmente para intensidades bajas ( $0-75 \text{ mm h}^{-1}$ ), donde hay mayor concentración de puntos.

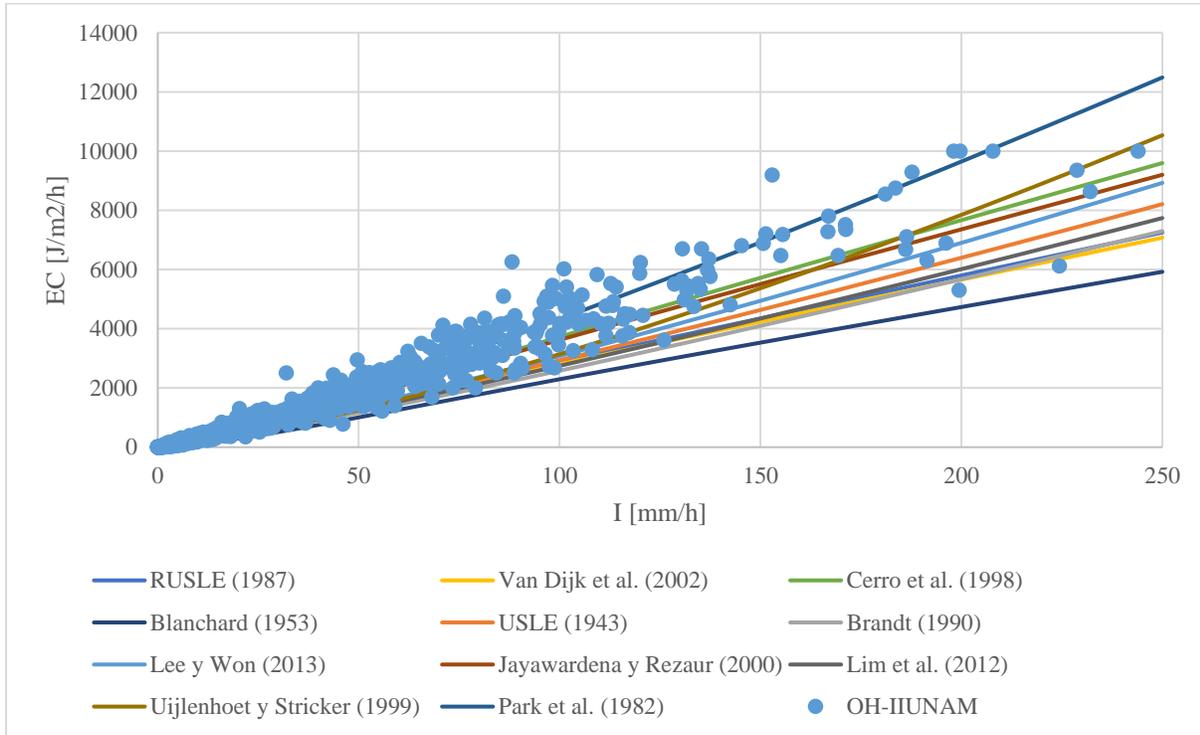


Figura 67. Relación de energía cinética de la precipitación medida por los disdrómetros del Observatorio Hidrológico y la energía cinética estimada por diversos autores.

Energía Cinética [ $kJ/m^2 h$ ]														
Evento	Estación	T E	OH- IIUNAM	RUSLE (1987)	USLE (1943)	Van Dijk et al. (2002)	Cerro et al. (1998)	Blanchard (1953)	Jayawardena y Rezaur (2000)	Brandt (1990)	Lee y Won (2013)	Lim et al. (2012)	Uijlenhoet y Stricker (1999)	Park et al. (1982)
561	Bosque Real	C	38.41	26.01	26.08	25.44	32.78	19.74	31.92	22.78	26.63	24.55	25.65	38.18
809	Centenario	C	43.32	34.18	35.72	33.53	43.83	26.46	42.29	31.33	37.05	33.64	37.89	52.83
813	Centenario	M	76.93	46.66	47.21	45.60	59.64	36.27	57.94	41.37	48.77	44.37	48.54	69.44
853	Centenario	C	24.34	23.29	23.72	23.03	29.13	17.13	28.12	20.60	23.73	22.42	21.98	34.56
1393	Cuautepec	C	76.59	53.77	57.83	52.76	70.09	42.67	67.35	50.97	61.01	54.55	66.20	86.53
1686	Herradura	C	79.86	56.34	57.77	55.14	72.61	44.24	70.29	50.73	60.07	54.34	61.05	85.35
1826	IIUNAM	C	42.29	32.84	33.51	32.49	41.19	24.25	39.74	29.12	33.57	31.67	31.25	48.86
1852	Indios Verdes	C	60.25	43.51	44.43	42.81	55.54	33.38	53.68	38.81	45.42	41.86	44.36	65.20
2108	Madín	C	93.35	52.59	54.94	51.90	67.81	40.76	65.18	48.11	56.60	51.88	57.31	81.23
2283	Meyehualco	C	41.35	30.33	31.54	29.76	39.13	23.74	37.77	27.69	32.79	29.70	33.66	46.68
2303	Milpa Alta	C	84.68	56.71	57.89	55.70	72.17	43.41	69.86	50.60	59.27	54.52	58.08	84.98
2371	Milpa Alta	C	15.76	9.49	9.51	9.25	12.12	7.41	11.82	8.34	9.84	8.92	9.77	13.97
2382	Naucalpan	C	57.24	46.55	48.75	45.75	60.14	36.40	57.93	42.80	50.68	45.96	52.27	72.26
3198	Prepa 5	C	42.99	29.22	29.85	28.97	36.79	21.65	35.44	25.92	29.86	28.24	27.83	43.55
3374	Sacmex	C	40.69	25.97	27.02	25.61	33.23	19.89	31.98	23.62	27.69	25.49	27.51	39.79
3395	Sacmex	C	82.78	51.47	52.09	50.32	65.56	39.77	63.71	45.61	53.68	48.94	53.01	76.49
3508	San Bartolo	C	71.34	54.89	56.96	54.19	70.77	42.52	68.03	49.83	58.49	53.75	58.35	83.97
3619	San Bernabé	C	46.63	33.33	33.59	32.90	41.16	24.07	39.89	29.11	33.35	31.77	30.23	48.79
3937	Tlalnepantla	C	30.45	27.17	27.31	26.69	34.34	20.60	33.34	23.82	27.74	25.75	26.56	39.97
4297	Vista Hermosa	C	84.71	59.50	62.24	58.33	76.62	46.44	73.94	54.67	64.83	58.64	67.09	92.28
4338	Vista Hermosa	C	90.25	69.59	71.42	68.52	88.34	52.79	85.32	62.34	72.78	67.32	70.68	104.72
4340	Vista Hermosa	C	93.07	70.64	73.25	69.19	91.27	55.57	88.19	64.36	76.37	68.92	78.68	108.46

Tabla 20. EC por evento obtenida con diferentes ajustes empíricos.

#### 6.4. ESTIMACIÓN DEL ERROR PORCENTUAL ENTRE LAS ENERGÍAS CINÉTICAS

Es de particular interés determinar qué tan aproximadas son las ecuaciones empíricas de la energía cinética-intensidad de la lluvia, propuestas por algunos autores y la medida en sitio por los disdrómetros del Observatorio Hidrológico de la UNAM. En esta sección se ha evaluado por medio del cálculo del error porcentual estimado para cada evento, según la Ecuación (16). Posteriormente, se promedian los errores para cada relación empírica de energía cinética-intensidad de precipitación (Tabla 21).

$$\% \text{ error} = \frac{|EC_{med} - EC_{calc}|}{EC_{med}} \times 100 \quad (16)$$

Ajuste	Error
RUSLE (1987)	27.9%
USLE (1943)	25.9%
Van Dijk et al. (2002)	29.1%
Cerro et al. (1998)	11.6%
Blanchard (1953)	44.7%
Jayawardena y Rezaur (2000)	13.5%
Brandt (1990)	35.2%
Lee y Won (2013)	24.0%
Lim et al. (2012)	30.1%
Uijlenhoet y Stricker (1999)	24.8%
Park et al. (1982)	13.1%

Tabla 21. Error porcentual para cada ajuste seleccionado.

Las características de los regímenes de precipitación de los sitios de estudios son diversas entre ellas, la recolección de datos proviene de diferentes latitudes, en el caso de Cerro et al. (1998) su investigación refiere a España, Jayawardena y Rezaur (2000) en Hong Kong y Park et al. (1982) desarrolló su trabajo en Estados Unidos.

Sin embargo, a pesar de la remota o nula influencia geográfica que condiciona los tipos de climas, se observó que los rangos de intensidad que se registraron son similares. Este hallazgo es consistente en el caso de Cerro et al. (1998) su investigación comprende intensidades entre 1 a 150 [mm/h] y en la investigación de Jayawardena y Rezaur (2000) cuyas intensidades comprenden de 0 a 150 [mm/h], salvo el estudio de Park et. al (1982) que no especifica los umbrales de intensidad.

Por otra parte, las relaciones empíricas ampliamente utilizadas USLE de Laws y Parsons (1943) y la ecuación RUSLE de Brown y Foster (1987) se desarrollaron con múltiples observaciones en Estados Unidos. Laws y Parsons (1943) emplearon intensidades de 0.4 a 144 [mm/h], y Brown y Foster (1987), que tiene un porcentaje de error ligeramente mayor, se obtuvo a partir de intensidades más altas de 0 a 250 [mm/h].

Si bien, con estas correlaciones fue posible evaluar los valores de energía cinética de la precipitación medida en la Ciudad de México, que se caracteriza por un régimen de precipitación

convectiva de verano, se verificó que no son valores tan altos de intensidad como otros estudios, de los cuales se observa que con valores altos de intensidad aumenta el error porcentual y la dispersión.

La importancia de contar con instrumentos como los disdrómetros ópticos láser del Observatorio Hidrológico permiten establecer una ecuación más representativa de la energía cinética de la precipitación propia de las condiciones de la Ciudad de México, como la altitud y latitud, y otros factores dinámicos como la humedad, el viento y fenómenos meteorológicos.

## 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se analizan los procesos graduales de erosión hídrica, los cuales empiezan desde que las gotas de lluvia impactan contra el suelo, donde la energía cinética de las gotas es capaz de desplazar las partículas de material superior no consolidadas. De igual manera se concluye que como estos procesos no son evidentes y se realizan de manera gradual, no se busca mitigarlos lo que hace que el problema se agrave cuando en la zona se encuentran suelos vulnerables con precipitaciones intensas, dichas zonas presentan un alto potencial de erosión.

Se destaca el factor R para la estimación de las pérdidas de suelo por erosión en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, dependiente de la energía cinética de la lluvia, que en formulaciones empíricas se estima con la intensidad de la lluvia, la altura de precipitación y la intensidad máxima de la lluvia en 30 minutos. Hoy en día es posible medir a menor escala temporal los eventos de precipitación, con resolución de minutos, con el uso de dispositivos como el disdrómetro óptico laser.

En la Ciudad de México se han registrado inundaciones cada vez más recurrentes y la población se ve afectada año con año durante la temporada de lluvias. Por el contrario, las zonas altas de la CDMX son propensas a deslaves, estos ocurren de igual manera en la temporada de lluvias o a causa de sismos, y son influenciados por el hombre que al construir o excavar en terrenos débiles, desestabiliza laderas afectadas aún más por la deforestación.

En cuanto al régimen de precipitación de la CDMX, el 74% ocurre durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre y se distribuye de diferente manera, las zonas altas de alcaldías ubicadas al sur son las que registran mayores precipitaciones anuales, esto es importante debido que en dichas zonas altas es donde se realizan en su totalidad las actividades agrícolas de la Ciudad de México (Milpa Alta, Tlalpan, Tláhuac, Xochimilco, La Magdalena Contreras y Cuajimalpa) por lo que también son las zonas más vulnerables a la erosión hídrica.

En el capítulo de resultados se analizó la relación energía cinética e intensidad de precipitación (EC-I), se compararon los valores medidos directamente por el disdrómetro versus los valores calculados. Los resultados mostraron que los ajustes de los autores Jayawardena y Rezaur (2000), Lim et al. (2012) y Van Dijk et al. (2002) subestiman ligeramente la energía cinética obtenida con los datos de la red de disdrómetros del OH-IIUNAM en la CDMX. Cabe destacar que, entre las comparaciones, los modelos USLE y RUSLE presentaron valores bastante similares pero muy por debajo de la energía cinética medida. A pesar de la diferentes latitudes y condiciones climáticas donde se formularon las ecuaciones empíricas estudiadas, se observó que los rangos de intensidad de aplicación son similares.

Si bien, al momento de realizar este trabajo de tesis no se tiene registro de alguna ecuación empírica formulada para la obtención de energía cinética en la CDMX o en la República Mexicana, se pudo observar que existen modelos, como Cerro et al. (1998) y Park et al. (1982) que fueron formulados para otras zonas de estudio, que si tienen comportamientos que se asemejan a los registrados por el Observatorio Hidrológico y teóricamente se podrían aplicar para estimar la erosión de la lluvia para la CDMX. Esto también ocurrió para otros estudios referentes a erosividad, debido a la

escasez de información sobre las relaciones EC-I la gran mayoría de los estudios de erosividad de la lluvia han adoptado relaciones provenientes de otros lugares y solo algunos investigadores utilizan relaciones locales propias de la zona de interés. Estudios como (Roldán Soriano & Fernández Yuste , 2005) se han dedicado a comparar valores estimados de EC con valores medidos mediante técnicas automáticas, en el caso de ese estudio, se encontró que la formulación realizada por Wischmeier y Smith proporciona resultados muy razonables con errores relativos bajos para la zona de estudio delimitada en Madrid. Para los resultados obtenidos en este estudio de tesis se observó que la formulación de EC, tanto para el modelo USLE como para el RUSLE, no son tan adecuadas pues su aplicación conlleva un mayor error en los valores calculados. Por su parte, modelos como Cerro et al. (1998) tienen menor incertidumbre para la obtención de valores de EC en la CDMX, aunque en ambos estudios se hayan realizado con formulaciones obtenidas con datos registrados en locaciones geográficas con condiciones meteorológicas y origen de precipitaciones muy diferentes a la zona de estudio.

Enfocándose en los objetivos e hipótesis planteados, se pudo comprar la energía cinética registrada por el OH-IIUNAM con la estimada por la formulación de Wischmeier y Smith, se mostró la variación entre ambas y se presentaron modelos más adecuados para la estimación de la EC para la erosión de la lluvia en la CDMX. Se destacó 2018 como el año con mayor potencial erosivo para los datos analizados, información que concuerda con los niveles de alertas meteorológicas activadas por la SGIRPC durante el periodo de estudio, así como con el número de encharcamientos atendidos por la Unidad Tormenta puesto que ante mayores intensidades de precipitación, estas afectaciones se agravan. Se clasificaron los eventos según el tipo de lluvia y se cumplió la hipótesis que planteaba que los eventos de lluvia convectivos fueran más erosivos y con mayor EC que los eventos estratiformes pues ningún evento de esta última categoría cumplió con las características fijadas para un evento de lluvia erosivo, de igual manera se mostró que los eventos convectivos presentan mayor intensidad media promedio, si bien la clasificación de evento de precipitación erosivo cambia según el autor o la zona de estudio debido a los diferentes factores que interfieren, todas coinciden que a mayor intensidad de precipitación mayor potencial erosivo.

En conclusión, aunque las condiciones climatológicas de la CDMX hacen que se caracterice por regímenes convectivos en verano, las intensidades de precipitación registradas en los 4,558 eventos registrados de 2018 a 2020 por el OH-IIUNAM, no presentan valores tan altos como en otros estudios, en los que se observó que al aumentar la intensidad, también aumenta la dispersión de datos y por lo tanto el error porcentual, entonces los eventos erosivos en la Ciudad de México se pueden estimar con mayor precisión en comparación con otras zonas geográficas. De igual manera, al disponer de información sobre las variables hidrológicas que registra el Observatorio Hidrológico, se facilita el establecimiento de un modelo representativo de las condiciones de la CDMX. Es necesario seguir avanzando en la estimación de los valores de energía cinética de la precipitación, la estimación de la erosividad de la precipitación y posteriormente la elaboración de mapas de erosividad lo cual dotará de un panorama más completo sobre los efectos que las precipitaciones representan para los suelos.

## 8. ANEXOS

Se dispone de la Tabla 13 y Tabla 19 completas, así como más información en la obtención de la EC para los diferentes ajustes en la liga: <https://tinyurl.com/2yjlk4ch>



## 9. REFERENCIAS

- Amaro Loza, A., Arciniega Esparza, S., Pedrozo Acuña, A., & Breña Naranjo, J. A. (2016). Rainfall kinetic energy and intensity relationships in Mexico City. 30th Conference of Hydrology. 2016 American Meteorological Society (AMS) Annual Meeting.
- Angulo Martínez, M. (2012). *El factor climático en la erosión del suelo: erosividad de la lluvia en la cuenca del Ebro*. Zaragoza: Universidad Zaragoza.
- Angulo Martínez, M., & Beguería, S. (2013). Análisis de la erosividad de la lluvia: procesos, índices y fronteras de conocimiento. *Cuaternario y Geomorfología*, 53-69.
- CENAPRED. (2017). *Centro Nacional de Prevención de Desastres*. Obtenido de Peligro por inundaciones a nivel municipal: <https://datos.gob.mx/busca/dataset/peligro-por-inundaciones-a-nivel-municipal>
- CENAPRED. (2021). *Atlas Nacional de Riesgos*. Obtenido de Sistema de Consulta de Declaratorias: <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- CENAPRED. (2021). *Atlas Nacional de Riesgos*. Obtenido de Base de datos sobre el impacto socioeconómico de los daños y pérdidas ocasionados por los desastres en México. 2000-2015.: [http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/BASE\\_IMPACTO\\_SOCIOECONOMICO\\_DESASTRES%202000\\_2015.xlsx](http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/BASE_IMPACTO_SOCIOECONOMICO_DESASTRES%202000_2015.xlsx)
- CENAPRED. (2021). *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en México. Resumen Ejecutivo 2020*. CDMX: CENAPRED.
- Colotti Bizzarri, E. (1999). La Erosividad: Calidad de la Lluvia Poco Conocida. *Terra Nueva Etapa*, 99-116.
- CONAGUA. (2021). *Servicio Meteorológico Nacional*. Recuperado el 7 de Octubre de 2021, de Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- CONAGUA. (s.f.). *SINA Sistema Nacional de Información del Agua*. Recuperado el Octubre de 2021, de Precipitación: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=precipitacion&ver=mapa&o=3&n=nacional>
- De Urbanisten, Deltares. (2016). *Towards a water sensitive Mexico City, Public space as a rain managment strategy*. Róterdam.
- Espinosa Paredes, B. (2017). *Informe Medición de parcelas de clavos de erosión*. Alumini.
- Everett Boyer, R. (1975). *La gran inundación: vida y sociedad en México (1629-1638)*. (A. Sánchez Mejorada, Trad.) México: Secretaría de Educación Publica.

- García Leal, J. A. (2013). *Clasificación Bayesiana de Hidrometeoros Orientados a la Estimación de la Cantidad Precipitada a partir de las Medidas de Radar Polarimétrico*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- García Rodríguez, J. L. (2006). *Los modelos de erosión*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- González Del Tánago, M. (1991). La ecuación universal de la pérdida de suelo. Pasado presente y futuro. *Ecología*, 13-50.
- Llanas Fernández, R., & Segura Bautista, J. (2017). Prevención de desastres por lluvia en la Ciudad de México de 1552 a 1864. *Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM*, 8-10.
- Moreira, J. (1991). *Capacidad de uso y erosión de los suelos en el valle central del río Guadalquivir*. Andalucía: Junta de Andalucía.
- OTT Hydromet. (2016). *OTT Medioambiente-Recursos*. Obtenido de Operating instructions, Present Weather Sensor, OTT Parsivel2: <https://www.ott.com/es-es/recursos/>
- Pedrozo Acuña, A., Magos Hernández, J. A., Sánchez Peralta, J. A., Amaro Loza, A., & Breña Naranjo, A. (2017). *Real-time and discrete precipitation monitoring in Mexico City: implementation and application*. Madrid: Hydrosensof.
- Pizarro, R., Morales, C., Vega, L., Olivares, C., Valdés, R., & Balocchi, F. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile*. Talca: UNESCO.
- Roldán Soriano, M., & Fernández Yuste, J. A. (2005). *Comparación de valores de energía cinética de la lluvia obtenidos mediante técnicas automáticas y calculados con la ecuación de Wischmeier y Smith*. Madrid: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- SACMEX. (17 de Septiembre de 2020). *Las #BrigadaSACMEX atienden un total de 102 encharcamientos, Benito Juárez 46; Coyoacán 23; Iztapalapa 12; Tlalpan 7; Álvaro Obregón 4; Iztacalco 5; Tláhuac 2; Xochimilco 2 y Cuauhtémoc 1. #OperativoLluvias2020 #TrabajandoJuntos*. Obtenido de Twitter [@SacmexCDMX]: <https://twitter.com/SacmexCDMX/status/1306492166076801026>
- SACMEX. (s.f.). *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. Recuperado el 16 de Octubre de 2021, de Programa Operativo de Lluvias: <https://www.sacmex.cdmx.gob.mx/programa-operativo-lluvias>
- Sánchez Huerta, A., & Cafaggi Félix, A. A. (2020). *Manual de prácticas de hidrología, OH-Académico*. CDMX: Instituto de Ingeniería UNAM.
- SEDEREC. (Mayo de 2022). *Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades de la Ciudad de México*. Obtenido de CDMX, guardiana del maíz nativo: <https://www.sepi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/cdmx-guardiana-del-maiz-nativo.pdf>

- SEMARNAT. (2001-2002). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana*.
- SEMARNAT. (2021). *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Recuperado el 7 de Octubre de 2021, de Precipitación media histórica por entidad federativa:  
[http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi\\_apps/WFServlet?IBIF\\_ex=D3\\_AGUA01\\_01&IBIC\\_user=dgeia\\_mce&IBIC\\_pass=dgeia\\_mce&NOMBREENTIDAD=\\* &NOMBREANIO=\\*](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA01_01&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=*)
- Seung Sook, S., Sang Deog, P., & Byoung Koo, C. (2016). Universal Power Law for Relationship between Rainfall Kinetic Energy and Rainfall Intensity. *Advances in Meteorology*.
- SGIRPC. (2021). *Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil*. Recuperado el 20 de Octubre de 2020, de Atlas de Riesgos CDMX:  
<https://www.atlas.cdmx.gob.mx/principal/inicio>
- SGIRPC. (s.f.). *Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil*. Recuperado el Octubre de 2021, de Red de Alerta Temprana:  
<https://www.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/redalertatemprana>
- Sheinbaum, C. (16 de Septiembre de 2020). *En los registros históricos con más de 20 años de datos del @SacmexCDMX y la @conagua\_mx, solo en 6 ocasiones se han registrado lluvias mayores a 100 mm. acumuladas en un día*. Obtenido de Twitter [@Claudiashein]:  
<https://twitter.com/Claudiashein/status/1306446835943436289>
- Tokay, A., Kruger, A., & Krajewski, W. F. (2001). Comparison of Drop Size Distribution Measurements by Impact and Optical Disdrometers. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2083-2097.
- Torres Cadena, J. L. (2018). *Cálculo del factor erosivo R, a partir de la lluvia acumulada en 24 horas en la Republica Mexicana*. CDMX: Universidad Nacional Autónoma de México.
- United States Department of Agriculture. (2011). *National Agronomy Manual, Water Erosion*.
- Velasteguí Galeano, C. A. (2019). *Determinación de la pérdida de suelo y el escurrimiento superficial, bajo dos sistemas de labranza en el cultivo de avena (avena sativa l.) en la Granja Experimental La Pradera - Chaltura*. Antonio Ante: Universidad Técnica del Norte.