

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-06-10

Artículos

Innovación tecnológica a través de las TIC para la gestión urbana del agua y de riesgos de precipitaciones extremas

Technological innovation for urban water and rainfall extreme disaster risk management

Alejandra Amaro-Loza¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-9179>

Adrián Pedrozo-Acuña², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6921-4363>

Alejandro Sánchez-Huerta³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4886-3449>

Norma Patricia López-Acosta⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4269-2562>

¹Posgrado de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, amaro.aloza@gmail.com

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México, adrian_pedrozo@tlaloc.imta.mx

³Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, asanchezh@iingen.unam.mx

⁴Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, nlopeza@iingen.unam.mx

Autora para correspondencia: Alejandra Amaro-Loza,
amaro.aloza@gmail.com

Resumen

En este trabajo se presenta una aplicación práctica del uso de las tecnologías de la información y comunicación (TIC) en la gestión de riesgos de desastres debidos a precipitaciones extremas en regiones urbanas. El objetivo es plantear, a partir del caso de estudio del deslizamiento del cerro del Chiquihuite, una de las formas en las que se puede aprovechar la información del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (OH-IIUNAM) para mejorar la gestión de desastres generadas por precipitaciones extremas. En el caso de estudio, se utilizan los datos del OH-IIUNAM para el análisis temporal y espacial de las tormentas que se presentaron en la Zona Metropolitana del Valle de México entre el 1 y 9 de septiembre de 2021; también se considera el sismo que ocurrió el 7 de septiembre del mismo año. La conjunción de ambos fenómenos produjo un deslizamiento del cerro el 10 de septiembre de 2021, que provocó grandes daños en las viviendas y pérdidas humanas. En el análisis temporal realizado se encontró que las tormentas más importantes ocurrieron entre los días 1 y 8 de septiembre, destacando las tormentas de los días 6 y 7 en intensidad y precipitación acumulada. En cuanto al análisis espacial, se utilizó la interpolación IDW (interpolación de distancia inversa ponderada) para estimar la precipitación en toda la Ciudad de México (CDMX) en el periodo del 1 al 9 de septiembre,

encontrándose que la zona del cerro del Chiquihuite fue una de las áreas donde cayó mayor cantidad de agua de lluvia.

Palabras clave: innovación, tecnologías de la información y comunicación (TIC), gestión urbana de riesgos, gestión urbana del agua, precipitación, precipitaciones extremas, deslizamiento, cerro del Chiquihuite.

Abstract

This paper presents a practical application of the use of Information and Communication Technologies (ICT) in disaster risk management in urban regions. The objective is to propose, based on a case study: The Chiquihuite hill landslide, one of how the information from the Hydrological Observatory of the UNAM can be used to improve disaster management generated by extreme rainfall. In this case study, the OH-IIUNAM data are used for the temporal and spatial analysis of the storms that occurred in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico between September 1st and 9th, 2021, together with the earthquake that occurred on September 7, the conjunction of both phenomena produced a landslide of the hill on September 10th, 2021, which caused great damage to homes and human losses. The temporal analysis found that the most important storms occurred between September 1st and 8th, with the storms of days 6th and 7th standing out in terms of intensity and accumulated precipitation. As for the spatial analysis, IDW interpolation was used to estimate the precipitation in the entire Mexico City from September 1st to 9th. It was found that the Chiquihuite hill area was one where the greatest amount of precipitation.

Keywords: Innovation, information and communication technologies (ICT), urban risk management, urban water management, precipitation, extreme rainfall, landslides, Chiquihuite hill.

Recibido: 15/02/2023

Aceptado: 11/12/2023

Publicado Online: 20/12/2023

Introducción

Desde la perspectiva global, la tendencia de la urbanización es superior a la rural. De acuerdo con datos de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se determinó que desde 2007 más del 60 % de la población mundial está concentrada en las ciudades. Los centros urbanos son actores del desarrollo, puesto que contribuyen con poco más del 70 % del producto interno bruto (Seto, Güneralp, & Hutyra, 2012) y consumen entre el 56 y 76 % de la energía producida (Rodríguez Camino, Picatoste-Ruggeroni, Heras-Hernández, 2015; Solecki & Marcotullio, 2013). A pesar del desarrollo económico y social, las megaciudades enfrentan desafíos complejos, como los problemas ambientales (entre ellos, el cambio climático, el calentamiento global y otros), las oportunidades de desarrollo y la calidad de vida. La modificación de las superficies terrestres en los centros urbanos, como la capacidad calorífica, el albedo y la rugosidad, afecta el clima de la superficie al desequilibrar el balance energético e hídrico, lo que da lugar a climas locales distintos sobre la región urbana y los suburbios colindantes (Ren, Zhu, Wang, & Cheng,

2016). Como se muestra en la Figura 1, la escorrentía aumenta de 10 a 55 % debido al cambio de uso de suelo y la reducción de la cobertura vegetal a causa del desarrollo urbano.



Figura 1. Modificación de los escurrimientos asociados con el proceso de urbanización. Fuente: adaptación y traducción al español a partir de (Endreny, 2005).

Los fenómenos extremos relacionados con el tiempo, el clima y el agua son cada vez más frecuentes e intensos como consecuencia del cambio climático y con mayor exposición a múltiples peligros conexos (OMM, 2021). De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), 90 % de los desastres a nivel mundial se asocian con eventos hidrometeorológicos (CRED, 2019) y afectan a millones de personas (Cole & Murphy, 2014; Steenge & Bočkarjova, 2007; van der Veen, 2004), especialmente en las megaciudades (ciudades cuya población supera los 10 millones de habitantes) tienen un efecto multiplicador porque existe más población y bienes concentrados por unidad de superficie expuestos a estos fenómenos (Garrocho & Sobrino, 2018; UNFPA, 2012). Adicionalmente, existen efectos en cadena provocados por las inundaciones, como las pérdidas de productividad laboral y de capital (Hallegatte & Ghil, 2008).

Un estudio del Banco Mundial (Giot & Perea, 2019) señala que en países latinoamericanos, 4 de cada 10 habitantes podrían situarse en condición de pobreza, en caso de ocurrir un desastre. Esto convierte a la gestión de riesgos de desastres en una importante estrategia para avanzar hacia una sociedad más igualitaria. Al mismo tiempo, la urbanización desordenada da lugar a una mayor exposición de las personas y los activos, en particular a las poblaciones desatendidas y con menores capacidades adaptativas (Hemmati, Ellingwood, & Mahmoud, 2020). Por lo tanto, las medidas de adaptación y mitigación deben desarrollarse de forma proactiva (Gasper, Blohm, & Ruth, 2011; Haer, Husby, Botzen, & Aerts, 2020; Hemmati *et al.*, 2020; Hemmati,

Kornhuber, & Kruczkiewicz, 2022; Padilla, Dryhurst, Hosseinpour, & Kruczkiewicz, 2021), específicamente para cada entorno urbano, efectivas en cuanto a la flexibilidad a través del tiempo y conforme a la variación de las condiciones climáticas (Hemmati *et al.*, 2022).

El Área Metropolitana de la Ciudad de México ocupa el quinto puesto en la clasificación de las megaciudades (ONU, 2018), con 21.6 millones de habitantes. Como en otros países de América Latina, en México predomina el modelo de dispersión urbana periférica (Sili, 2022; Uribe-Cortez, 2020). En las principales metrópolis del país, como Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, la superficie urbana ha incrementado 4 % hacia la periferia a partir del periodo de 1980 a 2010 (Sedesol, 2012). Con frecuencia, esta urbanización dispersa es propiciada por el bajo costo de la vivienda, y la mayoría de las veces carece de servicios, infraestructura y transporte, lo cual da lugar a nuevas formas de polarización y segregación socio-territorial (UNFPA, 2012; Uribe-Cortez, 2020). Los asentamientos irregulares aumentan la vulnerabilidad a inundaciones y deslizamientos de tierras (Douglas, 2006). Un ejemplo de ello es el lamentable suceso ocurrido al norte de la Ciudad de México en el cerro del Chiquihuite el 10 de septiembre de 2021. El riesgo de la inestabilidad de taludes es mayor en zonas sísmicas y en aquellas áreas expuestas a fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios (Martínez-Yáñez *et al.*, 2009), como se ilustra en la Figura 2. La población ubicada en el cerro del Chiquihuite, en la Sierra de Guadalupe, entre el Estado de México y la Ciudad de México, posee un alto grado de exposición en las laderas, alto grado de vulnerabilidad económica y social, además de carecer de capacidades para la gestión de los riesgos.

VULNERABILIDAD



Asentamiento urbano irregular en las faldas del cerro del Chiquihuite

Alto grado de exposición

=

Mayor riesgo

Alto nivel de vulnerabilidad

=

Mayor riesgo

Pocas capacidades

=

Mayor riesgo

RIESGO



Alud de rocas después de la ocurrencia de un sismo y lluvia intensa

Figura 2. Los asentamientos en las faldas del cerro del Chiquihuite son vulnerables a eventos como el deslizamiento de tierra ocurrido el 10 de septiembre. Fuente: adaptación basada en (UNISDR, 2009) y fotografía cerro del Chiquihuite (Drones Mexico, 2021).

Ciudades sostenibles y resilientes

Entre los esfuerzos más ambiciosos que se han realizado a nivel mundial para reducir los desequilibrios sociales y el deterioro ambiental, está la puesta en marcha de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la Agenda 2030 de la ONU, la cual tiene como finalidad un futuro sostenible para todos (Stankovic, Hasanbeigi, & Neftenov, 2022). En particular, el

Objetivo 11 concierne a las ciudades y comunidades sostenibles. Al optar por una gestión sostenible se dará oportunidad a la prosperidad compartida y la estabilidad social sin perjudicar el medio ambiente (ONU-HABITAT, 2019; Stankovic *et al.*, 2022). La meta del numeral 11.B aborda la mitigación del cambio climático, así como su adaptación y resiliencia ante los desastres, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, a fin de transitar de un enfoque centrado en atender los efectos del desastre a una visión orientada a la reducción sustancial de los riesgos y mejorar la resiliencia ante la influencia del cambio climático.

El proceso de transformación de modelos de gestión tradicional de ciudades en modelos inteligentes es vital para lograr la sostenibilidad de los centros urbanos a mediano y largo plazo. Una ciudad inteligente es aquella que coloca a las personas en el centro del desarrollo, incorpora tecnologías de la información y comunicación (TIC) en la gestión urbana, y usa estos elementos como herramientas para estimular la formación de un gobierno eficiente que incluya procesos de planificación colaborativa y participación ciudadana (Bouskela, Casseb, Bassi, Facchina, & Luca, 2016). Las ciudades inteligentes usan conectividad, sensores distribuidos en el ambiente y sistemas computarizados de gestión inteligente para solucionar problemas inmediatos, organizar escenarios urbanos complejos y crear respuestas innovadoras para atender las necesidades de sus ciudadanos (Biderman, Mentzingen-de-Mendonça, Silva-Mello, Oshiro, & Foditsch, 2022; Stankovic, Hasanbeigi, & Neftenov, 2020).

De acuerdo con lo anterior, el objetivo principal de este trabajo de investigación es proponer el uso de las TIC para abordar la gestión de

riesgos ante precipitaciones extremas en entornos urbanos, a partir de un caso de estudio. El caso de estudio corresponde al deslizamiento del cerro del Chiquihuite ocurrido el 10 de septiembre de 2021, de modo que se establecerá si las precipitaciones extremas que se presentaron en días previos al desgajamiento del cerro tuvieron influencia.

Con el fin de estimar el efecto de las precipitaciones en el área de influencia y en toda la Ciudad de México, se requirieron datos de alta resolución temporal generados por la red de monitoreo de la precipitación del OH-IIUNAM, a partir del uso de las TIC (Pedrozo-Acuña, 2017; Pedrozo-Acuña, Magos-Hernández, Sánchez-Peralta, Amaro-Loza, & Breña-Naranjo, 2017).

Metodología

Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en la Ciudad de México y municipios contiguos del Estado de México, que forman parte del Área Metropolitana del Valle de México. La CDMX se localiza en la zona centro del país, en la región sur oriente de la Cuenca de México, donde originalmente se ubicaba un sistema de cinco lagos (Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco, que cubrían 2 000 km²; actualmente quedan 35 km²) alimentado por 14 ríos perennes y 34 intermitentes. Tiene una elevación media de 2 250 msnm, rodeada de montañas de origen volcánico (Sacmex, 2012; SGRPC, 2020). La temperatura media anual es de 16 °C, mientras que la máxima promedio alcanza 25 °C de marzo a mayo, y la mínima promedio desciende hasta 5 °C en enero. De mayo a octubre se

presenta la temporada de lluvias, donde se promedian 600 mm anuales en la región NE, mientras que en la región SO es de 1 200 mm. La distribución de la precipitación presenta su máxima concentración en verano, entre mayo y septiembre; en otoño se presentan algunas precipitaciones asociadas con los frentes fríos (Conagua, 2022).

Adquisición de datos

El OH-IIUNAM cuenta con 55 estaciones de medición de precipitación, desde su puesta en marcha (2015) se ha convertido en un referente tecnológico para la gestión de los recursos hídricos, principalmente por las alertas de lluvia para los tomadores de decisiones y la población en general (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2017; Pedrozo-Acuña, 2018).

Las primeras ocho estaciones se establecieron en las zonas de mayor exposición a inundaciones, al noroeste: Dos Ríos (Huixquilucan) y Presa Madín (Atizapán de Zaragoza); al oeste: Cuajimalpa, Vista Hermosa; al centro: Prepa 4 y Sacmex; al sur, en II-UNAM en Ciudad Universitaria, y al noreste en Aragón. Las tres primeras estaciones se delimitaron hidrológicamente ubicando las cuencas de respuesta rápida; las cinco estaciones restantes se establecieron conforme se obtuvieron los permisos para su instalación. Posteriormente, con el financiamiento de la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) de la Ciudad de México, se adquirieron 45 estaciones pluviométricas, 29 del tipo disdrómetro láser y 16 del pluviómetro de pesaje. De modo que la red de estaciones de monitoreo de lluvia en tiempo real está

conformada actualmente por 55 estaciones (Pedrozo-Acuña, 2017; Pedrozo-Acuña, 2018).

La distribución espacial de las estaciones del OH-IIUNAM se concentra en la región centro-noroeste de la CDMX, seguida por la región noreste, mientras que la vasta región del sur (Tlalpan, Xochimilco y Milpa Alta) contiene menos estaciones, aunque es importante señalar que se trata de las zonas con menor densidad de población y, en consecuencia, de áreas menos urbanizadas. La red de estaciones del OH-IIUNAM se estableció generando una cuadrícula espaciada a 750 metros en ambas direcciones norte-sur y este-oeste. En la Figura 3, los círculos color azul corresponden a las estaciones que poseen disdrómetros y los círculos rojos a las estaciones con pluviómetros de pesaje.

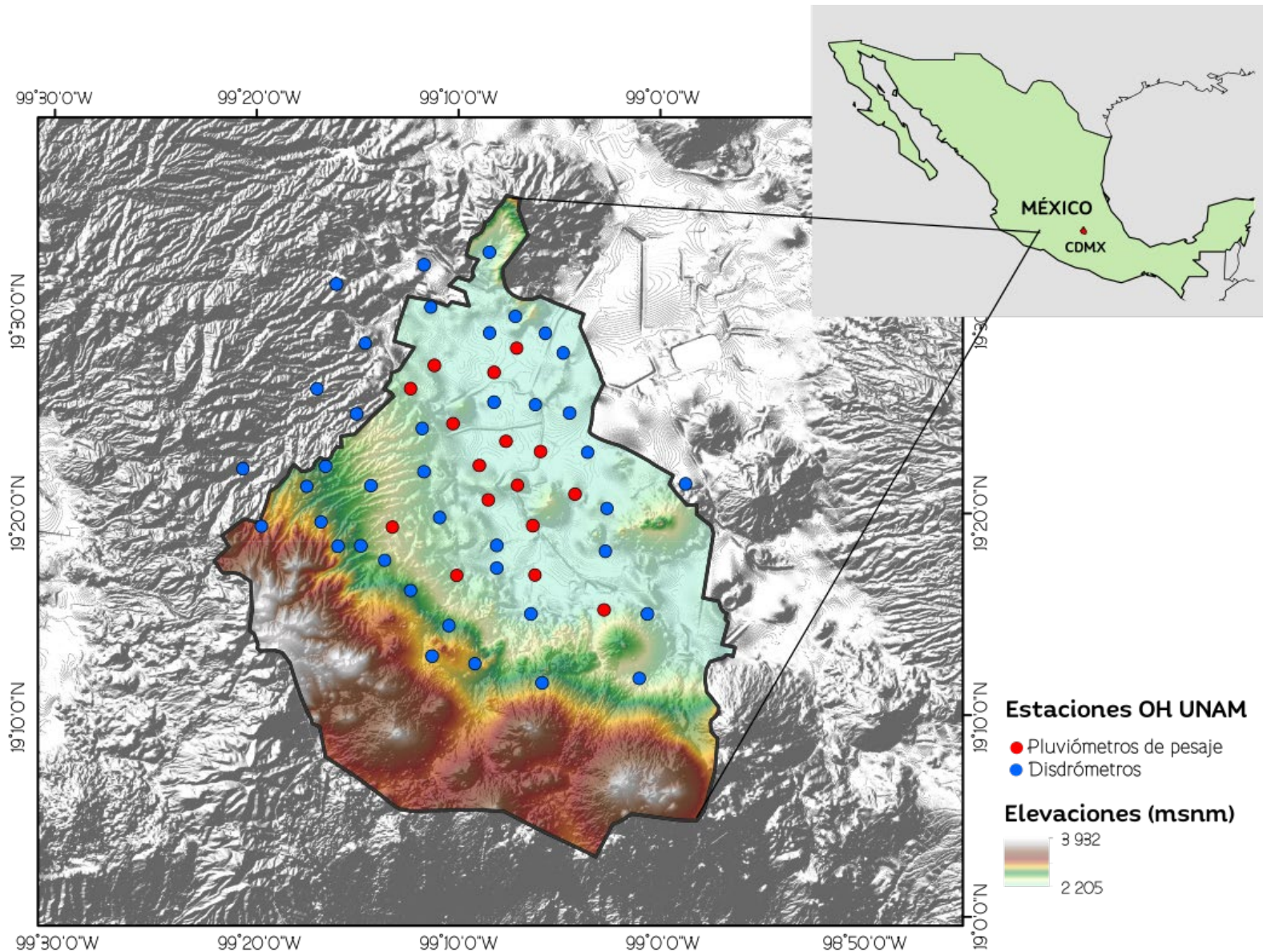


Figura 3. Localización de las estaciones pluviométricas del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (OH-IIUNAM).

Como se muestra en la Figura 4, cada una de las estaciones que forman parte de la red del OH-IIUNAM funcionan de manera autónoma y

operan del mismo modo. Se componen de 1) un disdrómetro óptico láser o un pluviómetro de pesaje; (2) un gabinete que contiene en su interior una batería de plomo (28 amp/h), una microcomputadora Raspberry Pi3 con un dispositivo de banda ancha móvil, un panel solar de 60 watt, que garantiza el suministro interrumpido de energía para el sensor y el sistema de adquisición de datos (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2017).

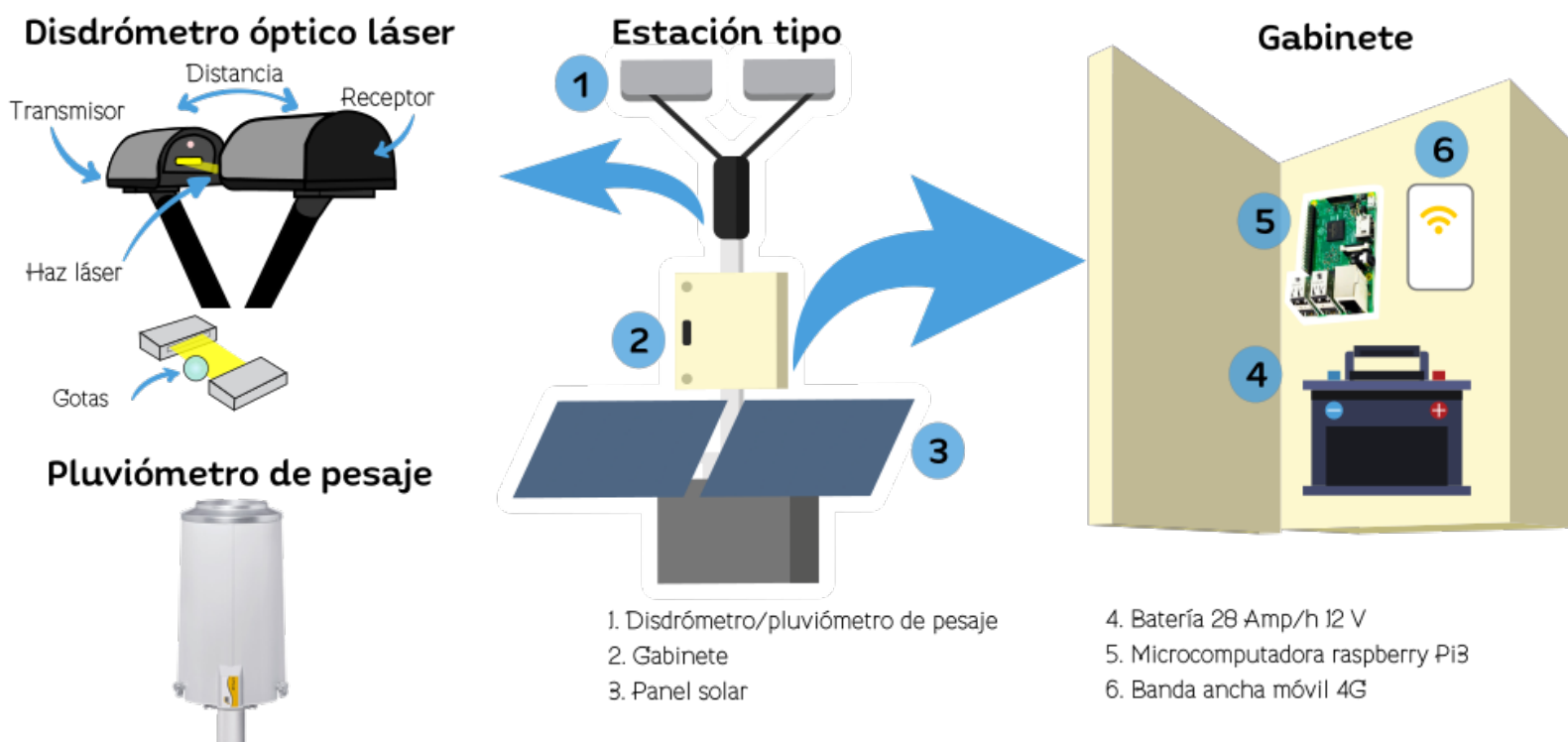


Figura 4. Elementos de las estaciones del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (OH-IIUNAM).

El disdrómetro óptico láser, utilizado en las estaciones del OH-IIUNAM, pertenece a la segunda generación Parsivel manufacturada por OTT. Este tipo de disdrómetro mide la sombra que generan las partículas precipitadas cuando pasan por el haz láser (ver Figura 4); las partículas son subdivididas en 32 clases de diámetros y 32 velocidades (1 024 clases en total). A partir de estas mediciones se estima la cantidad de precipitación, intensidad, condiciones de visibilidad, energía cinética y reflectividad. La superficie de medición de la banda láser es de 54 cm², además es capaz de identificar los tipos de precipitación; para una partícula de precipitación líquida tiene un rango de medición de 0.2 a 5 mm y en partículas sólidas de 0.2 a 25 mm; el rango en la medición de la velocidad de partícula es de 0.2 a 20 m/s y en la intensidad de lluvia es de 0.001 a 1200 mm/h, con un nivel de precisión $\pm 5\%$ (precipitación líquida) y $\pm 20\%$ (sólida) (OTT Hydromet GmbH, 2016).

El pluviómetro de pesaje modelos Pluvio² S es de la misma marca OTT y se ilustra en la parte inferior de la Figura 4. El mecanismo del sensor utiliza una celda de carga de acero inoxidable de alta precisión, cuenta con un sensor para compensar el efecto de temperatura y un seguro mecánico para evitar que la sobrecarga afecte la celda de carga. El sensor de precipitaciones calcula el peso del recipiente colector cada seis segundos, con una resolución de 0.001 mm (valor bruto). En cuanto al rango de adquisición de datos de intensidad, abarca de 0 a 3 000 mm/h, con una capacidad de recolección de hasta 400 mm de altura de precipitación en una superficie colectora de 200 cm² (OTT Hydromet GmbH, 2020).

La Figura 5 muestra la arquitectura del sistema desarrollado para el Observatorio Hidrológico-IIUNAM. Sus principales funciones son la adquisición, transmisión y publicación de datos en tiempo real. La información adquirida por el disdrómetro se almacena en una tarjeta tipo SD (Secure Digital) y la computadora Raspberry Pi3 envía la información a la nube usando la banda ancha móvil a través de la red 4G de telefonía celular. Esta operación se realiza minuto a minuto por medio de programas de cómputo propios, escritos en lenguaje de programación Python, que administran la información (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2017).

ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Hardware y software

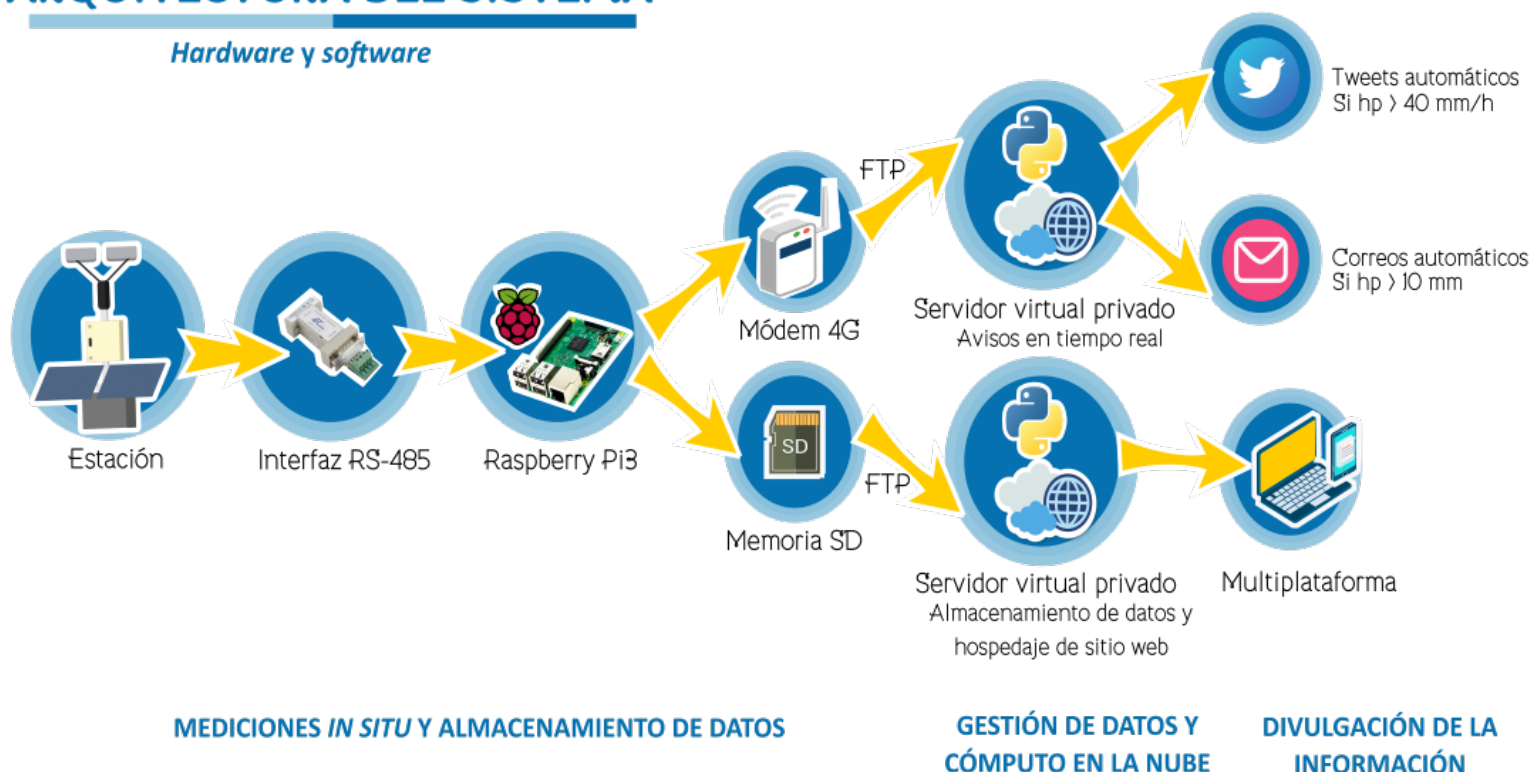


Figura 5. Arquitectura del sistema del Observatorio Hidrológico del Instituto de Ingeniería de la UNAM (OH-IIUNAM).

Caso de estudio: cerro del Chiquihuite

Una de las ventajas adicionales del Observatorio Hidrológico-IIUNAM es que contribuye a generar más conocimiento. En este propósito de aprovechamiento de la información se plantea la elaboración de estudios como el análisis de riesgos de desastres y vulnerabilidad en la Ciudad de

México, precipitaciones extremas, inundaciones, procesos de remoción de masas, y erosión hídrica de los suelos y escasez de agua, por mencionar solo algunos ejemplos, pues las oportunidades de aprovechamiento son enormes. Se pueden reseñar varios estudios y líneas de investigación que han utilizado los datos del Observatorio Hidrológico-IIUNAM (Amaro-Loza Pedrozo-Acuña, Sánchez-Huerta, Sánchez-Vargas, & Vergara-Alcaraz 2022; Arciniega-Esparza, Pedrozo-Acuña, & Breña-Naranjo, 2017; López-López, Pedrozo-Acuña, & Severiano-Covarrubias, 2022; Mocva-Kurek, Elizalde-Bernardo, & Pedrozo-Acuña, 2019; Pedrozo-Acuña *et al.*, 2019; Pedrozo-Acuña *et al.*, 2020; Sánchez-Vargas & Salinas-Estévez, 2021).

Es de particular interés el evento de desgajamiento del cerro del Chiquihuite ocurrido el 10 de septiembre de 2021 por la simultaneidad de las precipitaciones extremas y la ocurrencia de un sismo días antes de la falla, 7 de septiembre, con una magnitud de 7.1 y con epicentro cerca de Acapulco (SSN, 2021). De acuerdo con datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), se reportaron cuatro decesos y alrededor de 205 familias damnificadas debieron trasladarse a albergues por riesgo ante otro deslizamiento de ladera. En el Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Gustavo A. Madero (Sedatu, 2014), donde se ubica el cerro del Chiquihuite, se señalan los riesgos de origen natural debido a su geomorfología. El cerro del Chiquihuite, al ser parte de la Sierra de Guadalupe, cuenta con un sistema montañoso abundante, ocho estratovolcanes asociados con depósitos de caída, avalanchas, lahares, flujos piroclásticos y de lava.

En la revisión de la información meteorológica asociada con la generación de precipitaciones en la Zona Metropolitana del Valle de

México, durante el periodo comprendido del 1 al 11 de septiembre de 2021, se encontró que la tormenta tropical Olaf ocurrió del 7 al 11 de septiembre, sin embargo, su desarrollo sobre el océano Pacífico afectó particularmente a las costas de Jalisco y Colima. Ahora bien, de acuerdo con la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN), el inicio de la temporada de ondas tropicales en 2021 para México comenzó en junio y terminó en noviembre, de forma similar al calendario de ciclones tropicales, excepto en la fecha de inicio (a mediados de mayo). En los comunicados de prensa del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se encontró que la tormenta tropical Olaf (antes de alcanzar esta categoría) interaccionó con la onda tropical número 27 frente a las costas de Jalisco (Conagua & Semarnat, 2021a; Conagua & Semarnat, 2021b; Conagua & Semarnat, 2021c); tal interacción ocasionó tormentas eléctricas, caída de granizo y lluvias de fuertes a moderadas en el noroeste, occidente, centro y sur del país. Por otro lado, la onda tropical número 28 se ubicó al sur de la Península de Yucatán; para el 8 de septiembre avanzó sobre el sureste de la república mexicana, en combinación con un canal de baja presión ubicado en el Golfo de México, y provocó inestabilidad atmosférica, lo cual, a su vez, propició lluvias puntuales intensas en el sur y sureste de México. Como se muestra en la Figura 6, la onda tropical número 27 y probablemente la onda tropical número 28 favorecieron la generación de precipitaciones fuertes en el centro del país, incluida la Ciudad de México.

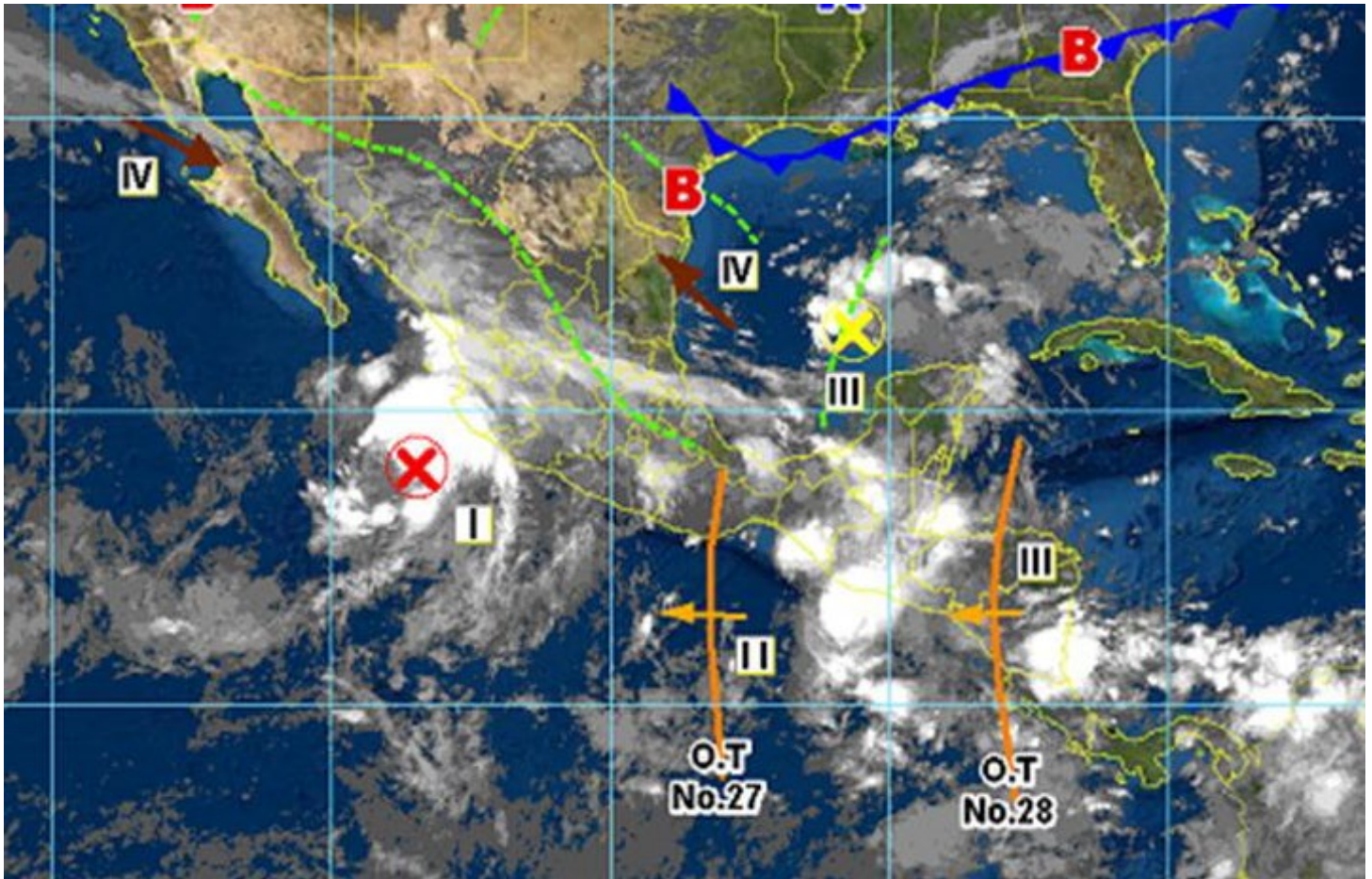


Figura 6. Dos zonas de baja presión con potencial ciclónico y dos ondas tropicales generaron fuertes precipitaciones en el occidente, sur y sureste de México del 6 al 8 de septiembre de 2021.

De acuerdo con el reporte del Servicio Meteorológico Nacional (Conagua & Semarnat, 2021b), se advierte que en la Zona Metropolitana del Valle de México las precipitaciones más significativas ocurrieron entre el 6 y 8 de septiembre. En la Figura 7 se muestra la información del radar meteorológico Cerro de Cathedral, medida el 6 de septiembre de 2021. A nivel nacional, la lluvia máxima acumulada en 24 horas el 8 de septiembre

se obtuvo en la Ciudad de México, en la estación Polanco (48.6 mm), con un valor similar al de la estación OH-Polanco de 35.782 mm.

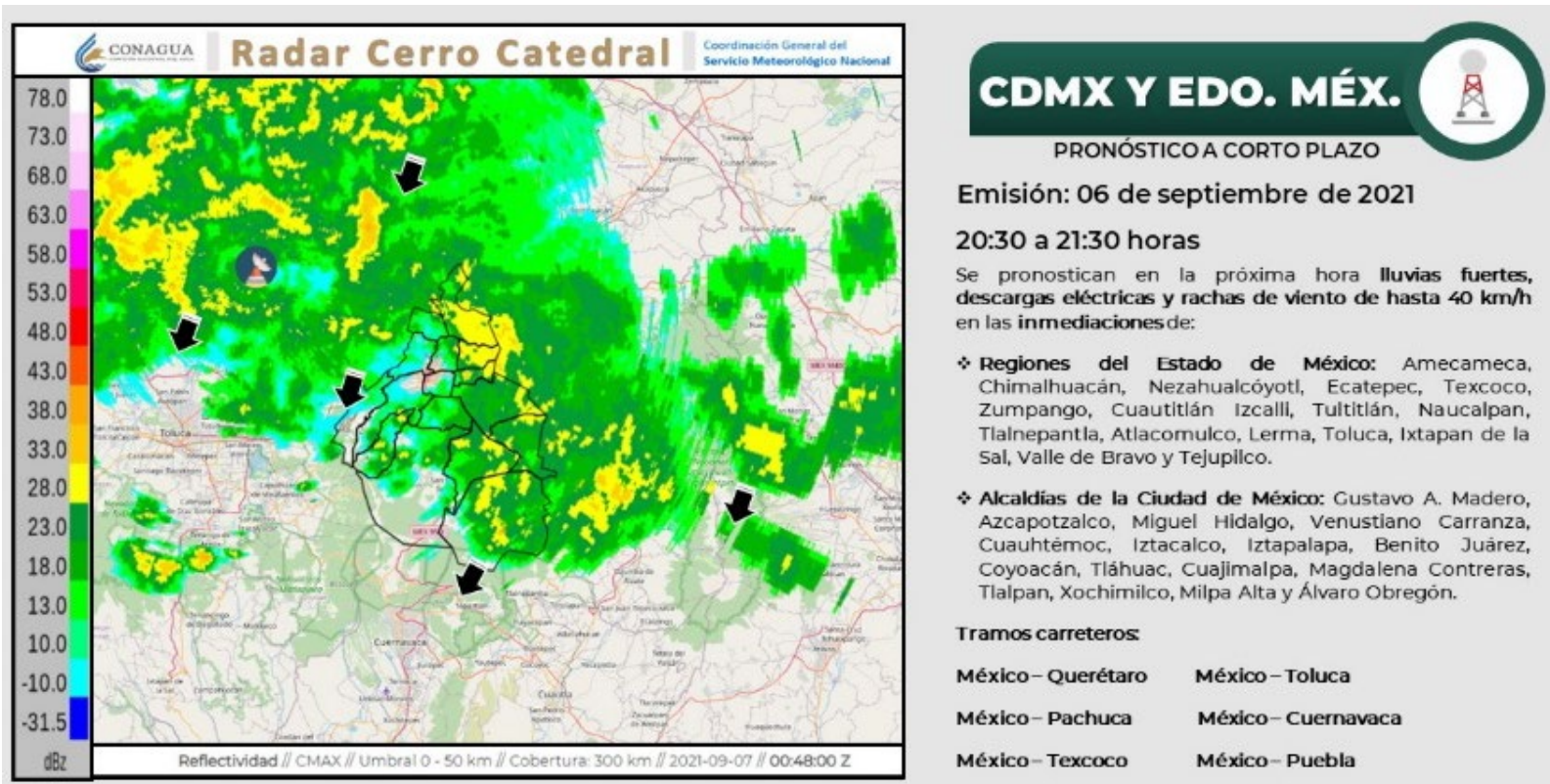


Figura 7. Boletín emitido el 6 de septiembre de 2021 con la información del radar Cerro Catedral (SMN, 2021).

Distribución temporal y referencia de la intensidad de las tormentas

La primera parte del análisis temporal de la precipitación consiste en mostrar un hietograma de intensidad instantánea completo para visualizar la evolución de las tormentas, tal como miden los sensores a

una escala temporal de un minuto. Posteriormente, se definen los eventos de lluvia, cada evento de lluvia contiene una acumulación mínima de altura de precipitación de un milímetro ($h_p = 1 \text{ mm}$). Se consideran eventos individuales o tormentas cuando entre ellos existe un lapso igual o mayor a 60 minutos sin registro de datos de lluvia. La intensidad mínima en un minuto que se especifica es a partir de 0.1 mm/h (Tokay, Petersen, Gatlin, & Wingo, 2013).

Este estudio se ha propuesto evaluar las tormentas comparando la intensidad y precipitación acumulada, agregando los datos en intervalos de 15 minutos; de esta manera se pueden relacionar todas las tormentas que abarcan diferentes duraciones.

La clasificación del tipo de lluvia es muy útil con fines hidrológicos, para analizar situaciones de posible riesgo, como las inundaciones pluviales o urbanas. La duración, intensidad y extensión son las características más importantes para diferenciar entre lluvia convectiva, lluvia estratiforme y lluvia mixta a nivel superficie. En general, las lluvias de tipo convectivo están asociadas con precipitaciones intensas localizadas con extensiones de 3 a 10 km; su duración es corta (minutos a horas) y cuentan con zonas en las que no hay precipitación. Por otra parte, los patrones estratiformes se asocian con eventos hidrometeorológicos, como en este caso las ondas tropicales, de menor intensidad sobre extensas regiones y de amplia duración (horas a días); se plantea como hipótesis que las precipitaciones ocurridas entre el 1 y 11 de septiembre podrían presentar bajas intensidades, pero al final una precipitación acumulada importante. Por último, un tipo de lluvia con características intermedias entre la lluvia convectiva y estratiforme es la

lluvia mixta. Para la clasificación se consideró la duración de los eventos. Debido a las características de formación, para cada uno de los eventos la duración e intensidad son diferentes, tomando como referencia el criterio de Baltas, Panagos y Mimikou (2016). En eventos de tipo estratiforme, el parámetro de duración debe ser mayor de 360 minutos, y para poder ser caracterizado como evento de tipo convectivo debe tener una duración menor a 180 minutos. Por lo que, los eventos de lluvia mixta son aquellos cuya duración está entre 180 y 360 minutos.

Existen diversos criterios para clasificar la intensidad de la precipitación. Las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología establecen las categorías de intensidad (i) como débil, moderada, fuerte o muy fuerte (ver Tabla 1), según la cantidad de precipitación caída en un periodo determinado de tiempo (una hora).

Tabla 1. Criterios para determinar la intensidad i de la precipitación.

Variable	Rango	Intensidad i
Lluvia	$i < 2.5 \text{ mm h}^{-1}$	Débil
	$2.5 \leq i < 10 \text{ mm h}^{-1}$	Moderada
	$10 \leq i < 50 \text{ mm h}^{-1}$	Fuerte
	$i \geq 50 \text{ mm h}^{-1}$	Muy fuerte

Fuente: Organización Mundial de Meteorología (WMO, 2018).

Seguimiento espacial de las tormentas

Para el caso de estudio se utilizó la información de la precipitación registrada entre el 1 y 11 de septiembre de 2021 en 49 estaciones del OH-IIUNAM, porque seis estaciones no registraron precipitación. A fin de completar los datos donde no se cuentan con estaciones, se utiliza una interpolación espacial. Este procedimiento matemático consiste en la estimación de un valor a partir de valores conocidos en puntos vecinos, ubicados al interior de la misma área de estudio. En el análisis espacial de este estudio se aplicó la técnica de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW). La interpolación IDW se realizó con un *software* de sistema de información geográfica de código libre (QGIS) versión 3.26 Buenos Aires. La ponderación se asigna a los puntos de muestreo mediante la utilización de un coeficiente, que controla la influencia de la ponderación que decae mientras la distancia hacia el punto nuevo se incrementa. Mientras más grande es el coeficiente de ponderación, menor es el efecto que los puntos tienen, si están lejos del punto desconocido durante el proceso de interpolación (QGIS, 2024).

Los cálculos que se realizan con la interpolación de distancia inversa ponderada (IDW) se obtienen a partir de la Ecuación (1):

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot z_i \quad (1)$$

Donde:

$\hat{z}_j$ = es el valor estimado para el punto j

n = es el número de puntos usados en la interpolación

z_i = es el valor en el punto i -ésimo

k_{ij} = es el peso asociado con el dato i en el cálculo del nodo j . Los pesos k varían entre 0 y 1 para cada dato, y la suma total de ellos es la unidad

Como se ha mencionado, la resolución temporal de los sensores de precipitación del Observatorio Hidrológico-IIUNAM es de un minuto, sin embargo, para el análisis espacial se realizó un proceso de discretización de la precipitación comprendida en el periodo del 1 al 9 de septiembre de 2021, pues el 10 de septiembre no se registró ninguna precipitación y tampoco al día siguiente. De modo que los datos discretizados se agregaron con un incremento de 2, 5 y 8 días. Para mostrar la precipitación acumulada de los primeros tres días se presenta un mapa del 1 al 3 de septiembre; el segundo mapa abarca del 1 al 6 de septiembre, y el tercero del 1 al 9 de septiembre de 2021, que son las condiciones previas al desgajamiento del cerro del Chiquihuite.

Resultados

Análisis temporal de las tormentas

En la Figura 8 se ilustra la variación temporal de las precipitaciones en el periodo del 1 al 11 de septiembre de 2021, tomando como referencia la estación del Observatorio Hidrológico-Cuautepec, que es la más cercana a la zona del derrumbe, situada a 2.08 km. El hietograma de la intensidad instantánea se muestra en el eje principal (eje vertical del lado izquierdo) y la precipitación acumulada en el eje secundario (eje vertical del lado

derecho). Por conveniencia, las tormentas se enumeraron en orden cronológico, de esta forma la tormenta 1 (t1) y la tormenta 2 (t2) se registraron el 2 de septiembre; la tormenta 3 (t3) ocurrió el 4 de septiembre; la tormenta 4 (t4), el 5 de septiembre; la tormenta 5 (t5), el 6 de septiembre; la tormenta 6 (t6), el 7 de septiembre, y la última tormenta (t7) fue el 8 de septiembre. En la Figura 8 se ha incluido una etiqueta para cada tormenta.

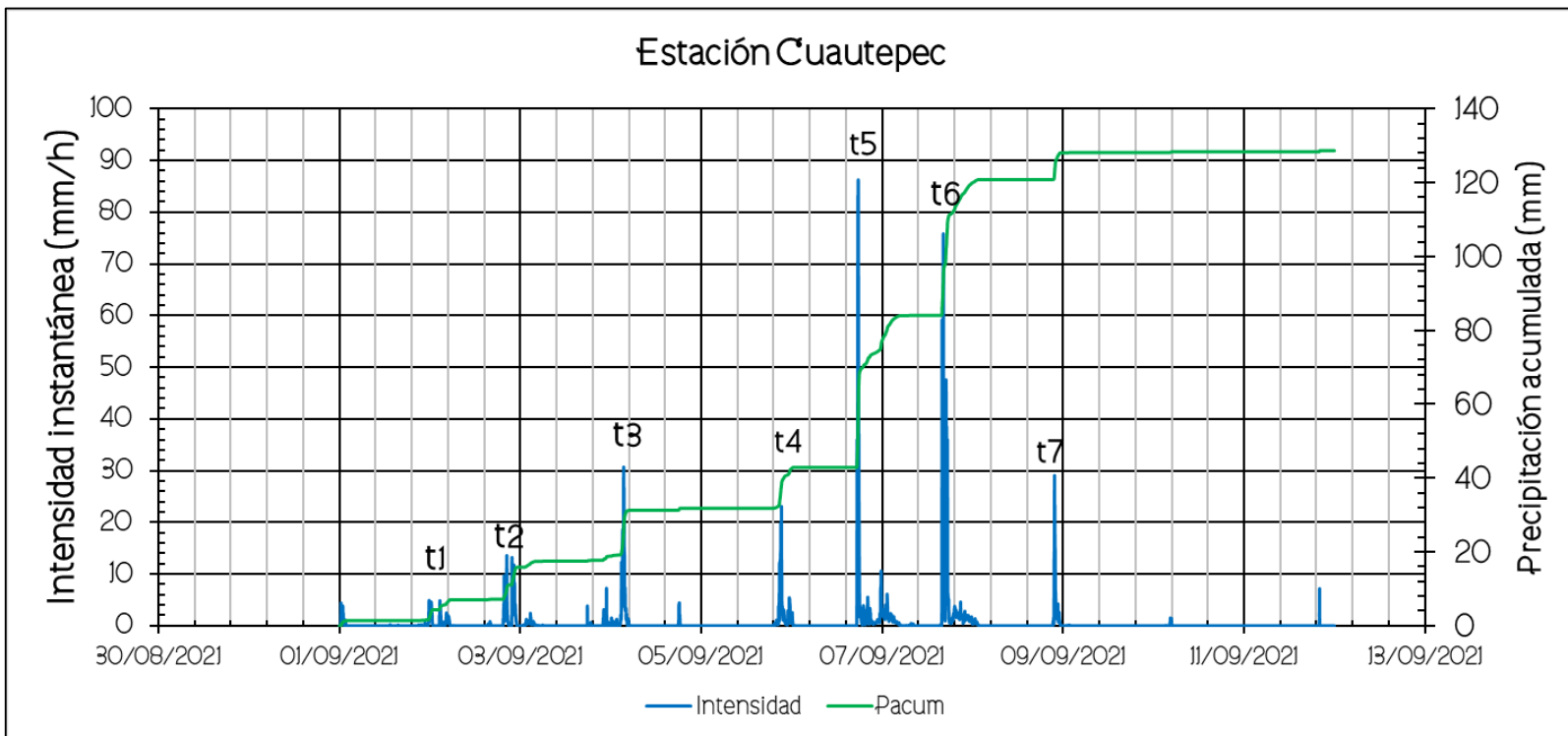


Figura 8. Evolución temporal de las precipitaciones t1 a t7 del 1 al 9 de septiembre de 2021.

Como se puede observar, la tormenta con el valor más alto de intensidad es la tormenta 5 (t5) del 6 de septiembre con 86.147 mm h^{-1} ; la segunda máxima intensidad corresponde a la tormenta t6 del 7 de septiembre con 75.456 mm h^{-1} , y la tercera máxima intensidad se atribuye a la tormenta t3 del 4 de septiembre con 30.598 mm h^{-1} . El Servicio Meteorológico Nacional informó, a partir de los datos del Radar Cerro de Catedral, sobre las condiciones meteorológicas que propiciarían una tormenta en la noche del 6 de septiembre entre las 20:30 y las 21:30 horas en la Zona Metropolitana del Valle de México; en la estación OH-Cuautepec se registró la tormenta t5 entre las 17:16 horas y su término a las 21:23 horas; la tormenta medida *in situ* tiene duración más prolongada, con casi tres horas de diferencia respecto al radar meteorológico (Radar Cerro de Catedral).

Del 1 al 9 de septiembre, la curva masa (línea verde de la Figura 8) se incrementa hasta 128 milímetros; después de la t7, el 9 de septiembre, la curva masa se mantiene casi constante hasta el 11 de septiembre, porque solo ocurrió una pequeña lluvia que no cumple con el criterio para considerarse como evento. Al inicio, entre las tormentas t1 y t2, las aportaciones de precipitación acumulada son de 17 mm; la curva masa entre las tormentas t3 y t4 alcanza 31 milímetros. Es notable que la precipitación acumulada de la curva masa (línea verde) a partir de la tormenta t4 mide 40 mm, pero al término de la t5 se incrementa a 84 mm; al finalizar t6, la curva se incrementa casi hasta 120 mm; finalmente, la contribución de t7 es menor. Los repuntes de la curva masa coinciden con los picos de máxima intensidad de las tormentas t5 y t6.

Posteriormente, entre el 17 y 30 de septiembre se observaron tormentas menos activas. Al último día de septiembre se habían acumulado 174.71 milímetros, es decir, el incremento de los últimos días del mes fue de 46.71 milímetros, pero no se detallan, porque son posteriores a las fechas del desgajamiento del cerro del Chiquihuite y por lo tanto no se consideran de interés en el caso de estudio.

En la Figura 9 se presenta la evaluación individual de las siete tormentas t1 a t7: en la gráfica superior (a), la intensidad; y en la gráfica inferior (b), la precipitación acumulada; ambas se comparan respecto a la duración. Puede observarse en la gráfica superior que el pico más alto de intensidad corresponde a la tormenta t5, mientras que la tormenta t6 presenta tres picos de intensidad; el segundo pico es cercano al valor máximo de t5, a la vez que en la gráfica de lluvia acumulada se comprueba que la curva t6 experimenta tres incrementos, y, debido a la duración más prolongada, su acumulación supera al resto de las tormentas. Con base en lo observado, se concluye que la variable que influye de forma más significativa es la duración de los eventos; esto es, si las tormentas t5 y t6 hubieran ocurrido en un tiempo más corto, el escenario hubiera sido aún más catastrófico. Otro ejemplo de la influencia de la duración de los eventos son las tormentas t3 y t7, que presentan umbrales de intensidad máxima comparables; en este caso, la intensidad máxima de t3 fue 30.598 mm h^{-1} y de t7 fue 29.05 mm h^{-1} ; la precipitación de t3 se desarrolla con valores de duración ligeramente superiores (165 minutos) que los de t7 (135 minutos) y, finalmente, en términos de precipitación acumulada, t3 excede la acumulada de t7.

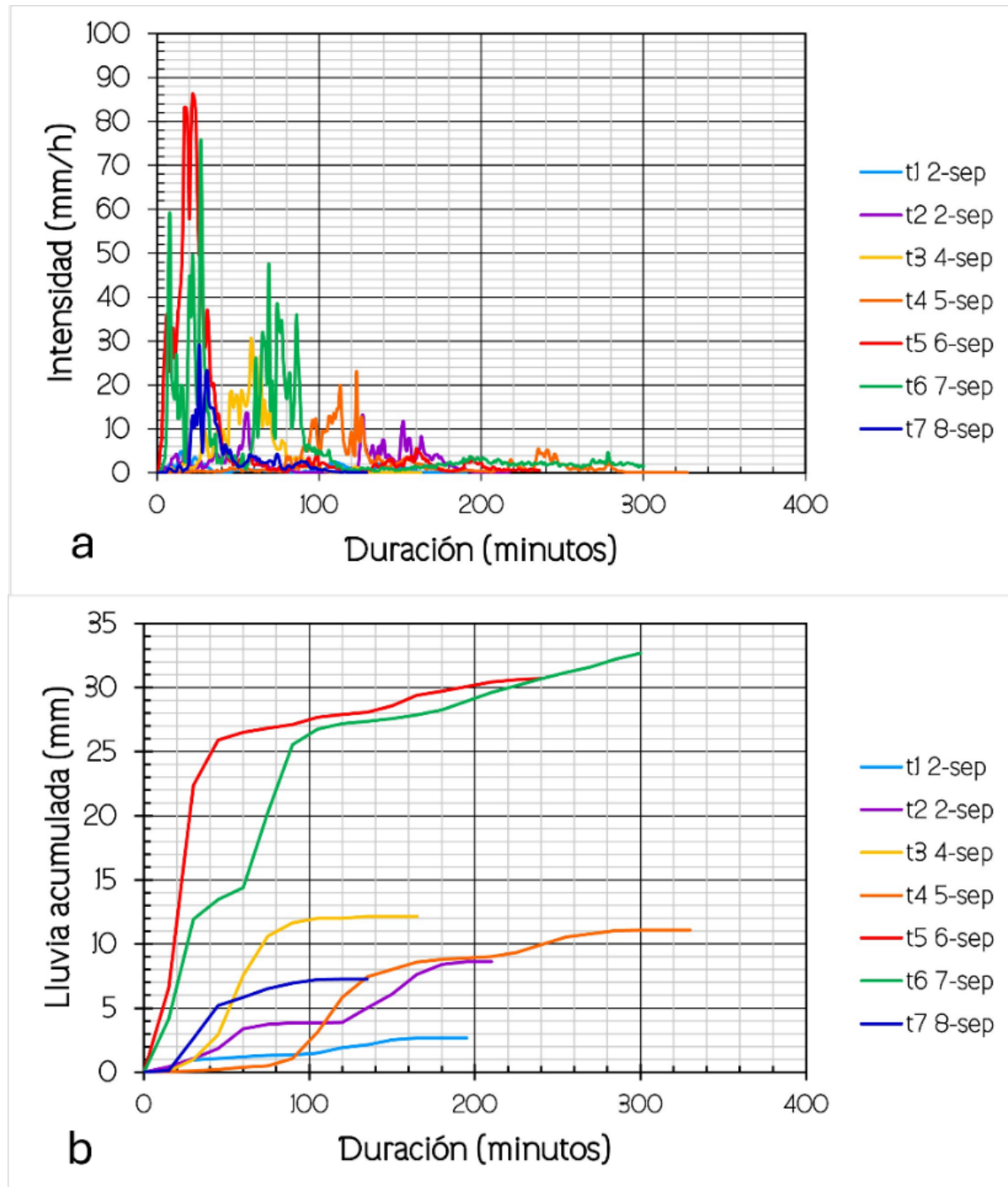


Figura 9. Evaluación de: a) la intensidad y b) la lluvia acumulada, de las tormentas ocurridas del 2 al 8 de septiembre de 2021.

En cuanto a los valores inferiores de intensidad máxima, éstos se registraron en las primeras tormentas t1 (6.36 mm h^{-1}) y t2 (15.48 mm h^{-1}); aunque se desarrollaron en un periodo regular de 195 y 200 minutos, respectivamente, sus aportaciones son bajas (< 10 milímetros).

En relación con los tipos de lluvia caracterizados según la duración de los eventos, se encontró (Tabla 2) que predominan las características de lluvia mixta, excepto las tormentas t3 y t6, que se identificaron como eventos convectivos. A pesar de que se esperaba obtener un tipo de lluvia estratiforme por el origen ciclónico de las precipitaciones, ningún evento excedió la duración de 360 minutos.

Tabla 2. Clasificación del tipo de lluvia.

Número de tormenta	Duración (min)	$I_{\max}$ (mm h^{-1})	Clasificación
t1	195	6.36	Mixto
t2	225	15.48	Mixto
t3	165	30.60	Convectivo
t4	330	23.08	Mixto
t5	240	86.15	Mixto
t6	300	75.46	Mixto
t7	135	29.05	Convectivo

$I_{\max}$ = intensidad máxima instantánea.

Los mismos datos pueden transmitir diferente información. En la Tabla 3 se muestra la categorización de la precipitación a partir de la

intensidad promedio de los eventos. En general, se obtuvo que las tormentas son moderadas, excepto las tormentas t1 y t4, consideradas como débiles; esta clasificación difiere con la evaluación de la intensidad y lluvia acumulada que establece a las tormentas t1, t2 y t7 como las más bajas. Por otro lado, se verificó que la intensidad promedio de t3 es mayor a la de t7, lo cual atiende a que la precipitación acumulada de t3 también es mayor.

Tabla 3. Categorías de intensidad de las tormentas.

Número de tormenta	Fecha	$H_{p_{acum}}$ (mm)	Duración (h)	I_{prom} (mm h ⁻¹)	Categoría
t1	2-sep	2.68	3.25	0.82	Débil
t2	2-sep	8.99	3.5	2.40	Moderada
t3	4-sep	12.15	2.75	4.42	Moderada
t4	5-sep	11.08	5.5	2.01	Débil
t5	6-sep	30.67	4	7.67	Moderada
t6	7-sep	32.68	5	6.54	Moderada
t7	8-sep	7.28	2.25	3.24	Moderada

$H_{p_{acum}}$ = altura de precipitación acumulada.

I_{prom} = intensidad promedio de precipitación.

Análisis espacial de las tormentas

El último resultado se ilustra en la Figura 10, correspondiente a la evolución espacial de las tormentas en la Ciudad de México durante tres secuencias de tiempo, del 1 al 3 de septiembre de 2021 en el primer

mapa; del 1 al 6 de septiembre en el segundo mapa, y del 1 al 9 de septiembre en el tercer mapa. En el recuadro rojo se localiza la zona del derrumbe del cerro del Chiquihuite y en el círculo color rojo se resalta la estación OH-Cuautepec situada a 2.08 km; el resto de las estaciones del OH-IIUNAM se representan en círculos amarillos. Los mapas presentados en la Figura 10 se realizaron a partir de la interpolación que utiliza la distancia inversa ponderada (IDW) para estimar la precipitación en lugares donde no se tienen registros de estaciones pluviométricas. Como se mencionó en la parte de Metodología, se procesó la información de 49 estaciones del OH-IIUNAM.

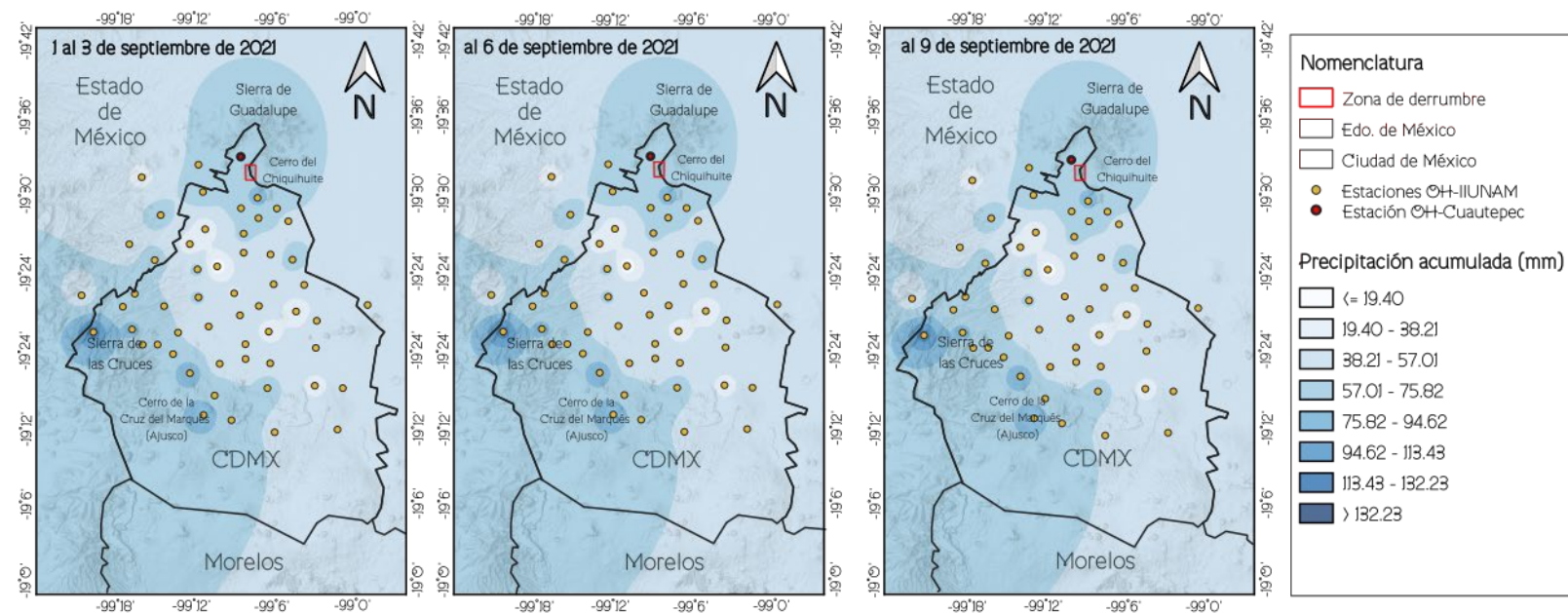


Figura 10. Interpolación espacial de las precipitaciones ocurridas previas al derrumbe en el cerro del Chiquihuite (10 de septiembre de 2021).

De acuerdo con el primer mapa, del 1 al 3 de septiembre, la mayor precipitación se localiza al S-SO de la ciudad (en un rango de 38.21 a 57.01 mm); en una zona al centro de la ciudad se reduce la precipitación y al norte las isoyetas se encuentran debajo de 19.40 milímetros. En el segundo mapa, la precipitación acumulada al 6 de septiembre se intensifica al S-SO y al N de la ciudad; se tiene como resultado una isoyeta cuyo intervalo abarca entre 38.21 y 57.01 mm, la cual se extiende a los municipios de Tlalnepantla, Coacalco y Ecatepec, Estado de México. Finalmente, en el tercer mapa se reproduce el escenario después de ocho días de precipitaciones: al S-SO de la ciudad, los valores ascienden de 75.82 a 96.62 mm y en una pequeña porción la lluvia acumulada excede 132 mm; en el extremo norte de la urbe se refieren valores entre 75.82 y 96.62 mm, sin embargo, las isoyetas con valores más altos corresponden a la zona de derrumbe del cerro del Chiquihuite, de 94.62 a 132 mm; de acuerdo con el análisis temporal, el valor exacto de precipitación acumulada al 9 de septiembre es de 128 milímetros.

Discusión

En relación con el derrumbe del cerro del Chiquihuite, ocurrido el 10 de septiembre de 2021, es un tema del que no se tiene referencia sobre algún estudio publicado en revistas de ciencias de la tierra, ni de gestión de riesgos de desastres u otro campo de investigación. En todo caso, de existir, no han sido difundidos ampliamente. El fin de abordar este caso de estudio es demostrar la utilidad del uso apropiado de las TIC en la gestión de riesgos. En ese sentido, las capacidades tecnológicas de los sensores y la arquitectura del sistema del OH-IIUNAM son perfectamente

adecuados adecuadas para monitorear las precipitaciones bajo condiciones climatológicas extremas. El buen desempeño del OH-IIUNAM ha quedado demostrado, al transmitir y almacenar datos confiables de manera ininterrumpida para la gestión de riesgos por efecto de lluvias intensas. Al mismo tiempo, se ha aprovechado la filosofía de datos de acceso libre para la asimilación, análisis y evaluación de los aspectos hidrológicos que influyeron en el desgajamiento del cerro del Chiquihuite.

El análisis temporal de las precipitaciones se obtuvo a partir de la información de la estación más cercana a la zona del derrumbe, en este caso, la estación OH-Cuautepec. De acuerdo con el criterio adoptado para la definición de eventos de tormenta, se produjeron siete tormentas entre el 1 y 8 de septiembre de 2021; a partir de la secuencia de las tormentas se designó su nomenclatura (de t1 a t7). Al 9 de septiembre, la precipitación acumulada alcanzó 128 milímetros, distribuidos en 26.5 horas de duración. Se identificó que las tormentas más sobresalientes fueron las tormentas t5, que ocurrió el 6 de septiembre, cuya altura de precipitación fue de 30.67 mm, y la tormenta t6, acaecida el 7 de septiembre, cuya altura de precipitación fue de 32.68 mm.

Se reconoce que la caracterización de la lluvia en términos de la duración es limitada, incluso errónea. No resultó la forma más adecuada de clasificarla, dado que el resultado obtenido indica que las tormentas corresponden a lluvia mixta, excepto por dos eventos considerados convectivos. El entendimiento de la meteorología de la precipitación revela que se trata de lluvias de tipo estratiformes, porque provienen de ondas tropicales. Por tal razón, es conveniente corregir e incorporar otros criterios que consideren la intensidad y precipitación acumulada.

La categorización de la precipitación a partir de la intensidad promedio revela que las tormentas son moderadas, excepto las tormentas t1 del 2 de septiembre y t4 del 5 de septiembre, definidas como débiles. Aunque es la primera vez que se utiliza este criterio de la OMM, con base en la experiencia adquirida en el procesamiento de datos del OH-IIUNAM, se han registrado eventos con intensidades superiores que se podrían atribuir a una categoría de intensidad fuerte a muy fuerte. Este criterio difiere con la evaluación de la intensidad y lluvia acumulada, el cual establece que las tormentas t1, t2 y t7 del 8 de septiembre resultaron ser las más bajas.

La segunda sección de resultados consta del análisis espacial de la precipitación, el cual se llevó a cabo mediante el proceso de interpolación de distancia inversa ponderada (IDW). Con esta técnica se crearon tres mapas que permiten visualizar la precipitación acumulada del 1 al 3 de septiembre, del 1 al 6 de septiembre y del 1 al 9 de septiembre, respectivamente, las cuales corresponden a las condiciones finales previas al desgajamiento del cerro del Chiquihuite. En el primer mapa se muestra que la precipitación ocurre principalmente al sur (S) y suroeste (SO); en el segundo, la precipitación se va extendiendo incluso al norte (N) de la ciudad, y en el tercer mapa los valores de precipitación son claramente más altos tanto en el SO como en el norte de la ciudad. Esta valiosa información es concluyente para afirmar que las tormentas ocurridas entre el 1 y el 8 de septiembre de 2021 generaron una precipitación acumulada (según el mapa 3) entre 96.62 y 132 milímetros en la zona del derrumbe del cerro del Chiquihuite. Para comprender la magnitud de este dato, se hace referencia al promedio de precipitación

durante septiembre en la Ciudad de México, que fue de aproximadamente 116 mm; en esa ocasión se superó el promedio mensual en tan solo ocho días.

Conclusiones

El desgajamiento del cerro del Chiquihuite, ocurrido el 10 de septiembre de 2021, se debió a la conjunción de distintos factores de importancia: el sismo del 7 de septiembre y las precipitaciones durante los primeros nueve días de septiembre, aunado a la urbanización en las laderas del cerro, que genera la situación de vulnerabilidad para la población. Una alternativa de gestión integral de riesgos promovida por la OMM recomienda que las administraciones urbanas adopten sistemas de alerta temprana para riesgos múltiples. En ese sentido, la aplicación de tecnología como la del OH-IIUNAM representa una valiosa herramienta para monitorear en tiempo real el movimiento de tierras por efecto de lluvias intensas, además de constituir un área nueva de oportunidad que puede replicarse en lugares con condiciones similares a las aquí evaluadas, como Ecatepec o El Ajusco. Incluso, con la aplicación de modelos predictivos de amenazas, se puede complementar esta herramienta y enviar alertas a la población ante potenciales riesgos. El financiamiento requerido para la instalación, operación y mantenimiento de sistemas de alerta temprana o el monitoreo de variables en tiempo real es menor en comparación con el beneficio en la reducción de pérdidas humanas y daños materiales.

En virtud de las múltiples posibilidades e innumerables ventajas que las TIC ofrecen en la gestión de riesgos, se pueden fusionar, entre otros, la recolección de información, utilizando drones en zonas de difícil acceso por deslizamiento de laderas o inundaciones, tal como lo ha empleado la Organización Internacional para la Migración (OIM) en la captura de imágenes que permiten la cuantificación de daños en viviendas y población desplazada por huracanes. La implementación de sistemas de gestión de riesgos no se puede resolver únicamente con métodos convencionales, resulta conveniente mejorar su desempeño con las técnicas más actualizadas posibles.

Con base en lo aquí expuesto, resulta indispensable la incorporación del uso efectivo de las TIC como parte de las estrategias de la gestión de riesgos. Los centros e institutos de investigación son los actores principales en el proceso de generación y transferencia de tecnologías innovadoras. Por ello, resultan tan importantes las redes colaborativas entre especialistas de diferentes áreas para responder a las necesidades y desafíos actuales.

Agradecimientos

Agradecemos al personal de instrumentación y telemetría del Observatorio Hidrológico de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como el apoyo recibido por parte de la Dirección de Apoyo a la Docencia DGAPA al proyecto PAPIME PE101418.

Referencias

- Amaro-Loza, A., Pedrozo-Acuña, A., Sánchez-Huerta, A., Sánchez-Vargas, C., & Vergara-Alcaraz, E. A. (2022). Evaluación de las mediciones de lluvia en la Ciudad de México utilizando la red de disdrómetros y su comparación con respecto a la red de pluviómetros de balancín. *Ingeniería del Agua*, 26(2), 91-105. DOI: 10.4995/ia.2022.17217
- Arciniega-Esparza, S., Pedrozo-Acuña, A., & Breña-Naranjo, J. A. (2017). *Chaac: A GUI for processing and visualizing optical laser disdrometer*. HydroSenSoft, International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software, January, 5, Madrid, Spain. Recuperado de <https://www.iahr.org/library/infor?pid=19551>
- Baltas, E., Panagos, D., & Mimikou, M. (2016). Statistical analysis of the raindrop size distribution using disdrometer data. *Hydrology*, 3(1), 9. DOI: 10.3390/hydrology3010009
- Biderman, C., Mentzingen-de-Mendonça, M., Silva-Mello, P. A., Oshiro, C. H., & Foditsch, N. (2022). Big data para el desarrollo urbano sostenible. *Наука И Научный Потенциал: Основа Устойчивого Инновационного Развития Общества*, 1(1). DOI: 10.18235/0003634
- Bouskela, M., Casseb, M., Bassi, S., Facchina, C. De, & Luca, M. (2016). *La ruta hacia las smart cities migrando de una gestión tradicional a la ciudad inteligente*. DOI: 10.18235/0012831

- Cole, J. M., & Murphy, B. L. (2014). Rural hazard risk communication and public education: Strategic and tactical best practices. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, 292-304. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2014.10.001
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2022). *Reporte clima en México*. Recuperado de <https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results>
- Conagua & Semarnat, Comisión Nacional del Agua & Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021a). *Comunicado de prensa No. 0701-21*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/comunicados-de-prensa>
- Conagua & Semarnat, Comisión Nacional del Agua & Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021b). *Comunicado de prensa No. 0707-21*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/comunicados-de-prensa>
- Conagua & Semarnat, Comisión Nacional del Agua & Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021c). *Comunicado de prensa No. 0698-21*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/comunicados-de-prensa>
- CRED, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2019). Disasters 2018: Year in Review. *PLoS ONE*, 14(3). Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/65061_credcrunch54.pdf
- Douglas, I. (2006). *The peri-urban interface: Approaches to sustainable natural and human resource use*. DOI: 10.4324/9781849775878

Drones México. (10 de septiembre, 2021). *Cerro del Chiquihuite. La tarde de este viernes se registró un deslizamiento en el cerro del Chiquihuite. El desgajamiento sepultó tres casas y hasta el momento se reportan cuatro personas desaparecidas (fotografía).*

Recuperado de
<https://www.instagram.com/p/CTqZqcADjix/?igsh=YnR2eWQyYXp5dnJq>

Endreny, T. A. (2005). Land use and land cover effects on runoff processes: Urban and suburban development. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. DOI: 10.1002/0470848944.hsa122

Garrocho, C., & Sobrino, J. (2018). Ciudades sostenibles en México. En: *Cambio climático, ciudad y gestión ambiental*. DOI: 10.2307/j.ctv4g1r5m.9

Gasper, R., Blohm, A., & Ruth, M. (2011). Social and economic impacts of climate change on the urban environment. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3), 150-157. DOI: 10.1016/j.cosust.2010.12.009

Giro, P., & Perea, A. K. (2019). *Gestión de riesgo de desastres y adaptación al cambio climático en Centroamérica. Informe hacia una Centroamérica más resiliente*. Washington, DC, EUA: Banco Mundial. Recuperado de
<https://thedocs.worldbank.org/en/doc/951981571084150552-0240022019/render/InformeHaciaunaCentroAmericamasResilientePilaresparalaAccion.pdf>

- Haer, T., Husby, T. G., Botzen, W. J. W., & Aerts, J. C. J. H. (2020). The safe development paradox: An agent-based model for flood risk under climate change in the European Union. *Global Environmental Change*, 60, 102009. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2019.102009
- Hallegatte, S., & Ghil, M. (2008). Natural disasters impacting a macroeconomic model with endogenous dynamics. *Ecological Economics*, 68(1-2), 582-592. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.05.022
- Hemmati, M., Ellingwood, B. R., & Mahmoud, H. N. (2020). The role of urban growth in resilience of communities under flood risk. *Earth's Future*, 8(3). DOI: 10.1029/2019EF001382
- Hemmati, M., Kornhuber, K., & Kruczkiewicz, A. (2022). Enhanced urban adaptation efforts needed to counter rising extreme rainfall risks. *Npj Urban Sustainability*, 2(1), 1-5. DOI: 10.1038/s42949-022-00058-w
- López-López, M. R., Pedrozo-Acuña, A., & Severiano-Covarrubias, M. L. (2022). Evaluation of ECMWF's forecasting system for probabilistic urban flood prediction: A case study in Mexico City. *Journal of Hydroinformatics*, 24(1), 38-55. DOI: 10.2166/hydro.2021.072
- Martínez-Yáñez, M., Cabral-Cano, E., Correa-Mora, F., Díaz-Molina, O., Cifuentes-Nava, G., Hernández-Quintero, E., & Delgado-Granados, H. (2009). Estudio de la ladera occidental del cerro del Chiquihuite, Ciudad de México, mediante SIG y GPS. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 10(2), 99-112.

- Mocva-Kurek, R. K., Elizalde-Bernardo, R. J., & Pedrozo-Acuña, A. (2019). *Evaluation of Z-R relationships for rain events using disdrometer-based data in Mexico City*. American Geophysical Union. American Geophysical Union, Fall Meeting 2019, abstract #A53L-3070. Recuperado de <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFM.A53L3070M/abstract>
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (2021). *United in science 2021*. Recuperado de https://public.wmo.int/en/resources/united_in_science
- ONU, Organización de las Naciones Unidas. (2018). The world's cities in 2018. In: *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision* (p. 34). Recuperado de https://www.flickr.com/photos/thisisin%0Ahttps://www.un.org/en/events/citiesday/assets/pdf/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf
- ONU-HABITAT. (2019). Objetivo 11. Ciudades y comunidades sostenibles. En: *Ciudades sostenibles: por qué son importantes* (pp. 1-2). Recuperado de <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/goal-11-sustainable-cities-and-communities.html>
- OTT Hydromet GmbH. (2020). *Datos técnicos OTT Pluvio² S*. Germany. Recuperado de <https://www.ott.com/es-la/productos/meteorologia-80/ott-pluvio2-s-941/productAction/outputAsPdf/>

- OTT Hydromet GmbH. (2016). *Operating instructions present weather sensor OTT Parsivel 2* (Issue 70). Recuperado de <https://www.ott.com/download/operating-instructions-present-weather-sensor-ott-parsivel2-without-screen-heating/>
- Padilla, L., Dryhurst, S., Hosseinpour, H., & Kruczkiewicz, A. (2021). Multiple hazard uncertainty visualization challenges and paths forward. *Frontiers in Psychology*, 12. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.579207
- Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., Soriano-Monzalvo, J. C., Blanco-Figueroa, J., Magos-Hernández, J., & Sánchez-Peralta, J. A. (2020). *The hydrological observatory of Mexico City (OH-IIUNAM): A unique setup for hydrological research within large urban environments*. EGU General Assembly 2020. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-12742
- Pedrozo-Acuña, A. (2017). SECITI-CDMX. *Informe final. Tercer Informe Agua Inteligente. Implementación del sistema de monitoreo de lluvia en tiempo-real en CDMX*. Ciudad de México. Recuperado de http://data.seciti.cdmx.gob.mx/transparencia/sites/default/files/articulosnuevo/3er_Trim_Informe_Ejecutivo_SECITI_113_2017_3.PDF
- Pedrozo-Acuña, A. (2018). *Primer informe. Agua inteligente, ciudad inteligente: implementación del sistema de monitoreo de lluvia en tiempo real en CDMX*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

- Pedrozo-Acuña, A., Favero Jr., R. J., Amaro-Loza, A., Mocva-Kurek, R. K., Sánchez-Peralta, J. A., Magos-Hernández, J. A., & Blanco-Figueroa, J. (2019). An innovative STEM outreach model (OH-Kids) to foster the next generation of geoscientists, engineers, and technologists. *Geoscience Communication*, 2(2), 187-199. DOI: 10.5194/gc-2-187-2019
- Pedrozo-Acuña, A., Magos-Hernández, J. A., Sánchez-Peralta, J. A., Amaro-Loza, A., & Breña-Naranjo, J. A. (2017). *Real-time and discrete precipitation monitoring in Mexico City: Implementation and application*. HydroSenSoft, International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software, March, 1-7, Madrid, Spain. Recuperado de <https://www.iahr.org/library/infor?pid=19588>
- QGIS. (2024). *Una introducción fácil a GIS 11. Análisis espacial (interpolación)*. Recuperado de https://docs.qgis.org/3.34/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html
- Ren, Z., Zhu, L., Wang, B., & Cheng, S. (2016). Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 8(4), 546-555. DOI: 10.1007/s40333-016-0010-2
- Rodríguez-Camino, E., Picatoste-Ruggeroni, J. R., & Heras-Hernández, F. (2015). Quinto informe de evaluación del IPCC: bases físicas. *Revista Tiempo y Clima*. Recuperado de <https://pub.ame-web.org/index.php/TyC/article/view/281>

- Sacmex. (2012). El gran reto del agua en la Ciudad de México: pasado, presente y prospectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo. En: *Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. Recuperado de http://laopiniondelaciudad.mx/wp-content/uploads/2016/02/ElGranRetodelAgua_enla_CiudadMexico.pdf
- Sánchez-Vargas, C., & Salinas-Estévez, J. L. (2021). Aquappolis: aplicación móvil para la captación de agua de lluvia en la CDMX. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(5), 423-454. DOI: 10.24850/j-tyca-2021-05-10
- Sedatu, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. (2014). *Atlas de riesgos naturales de la delegación Gustavo A. Madero, Distrito Federal, 2014* (Issue 42). México, DF, México: Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.
- Sedesol, Secretaría de Bienestar. (2012). *La expansión de las ciudades 1980-2010*. México, DF, México: Secretaría de Desarrollo Social.
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyrá, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083-16088. DOI: 10.1073/pnas.1211658109
- SGRPC, Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil. (2020). *Ciudad resiliente retrospectiva y proyección de una ciudad vulnerable*. México, DF, México: Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil.

- Sili, M. (2022). Planificación y gestión territorial en América Latina: entre la persistencia de las problemáticas territoriales y los nuevos desafíos de futuro. *Ikara. Revista de Geografías Iberoamericanas*, 1. DOI: 10.18239/Ikara.3037
- Solecki, W., & Marcotullio, P. J. (2013). Climate change and urban biodiversity vulnerability. In: *Urbanization, biodiversity and ecosystem services: Challenges and opportunities* (pp. 485-504). Springer Netherlands. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_25
- SSN, Servicio Sismológico Nacional. (2021). *Reporte Especial. Grupo de Trabajo del Servicio Sismológico Nacional, UNAM. Sismo del 7 de septiembre de 2021 (M 7.1)*. Recuperado de http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2021/SSNMX_rep_esp_20210907_Guerrero_M71.pdf
- Stankovic, M., Hasanbeigi, A., & Neftenov, N. (2020). Uso de tecnologías de la 4RI en agua y saneamiento en América Latina y el Caribe. En: *El agua y saneamiento en América Latina y el Caribe*. Recuperado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Uso-de-tecnologias-de-la-4RI-en-agua-y-saneamiento-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>
- Stankovic, M., Hasanbeigi, A., & Neftenov, N. (2022). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2022*. Recuperado de https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022_Spanish.pdf

- Steenge, A. E., & Bočkarjova, M. (2007). Thinking about imbalances in post-catastrophe economies: An input-output based proposition. *Economic Systems Research*, 19(2), 205-223. DOI: 10.1080/09535310701330308
- Tokay, A., Petersen, W. A., Gatlin, P., & Wingo, M. (2013). Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(8), 1672-1690. DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00163.1
- UNFPA, Fondo de Población de las Naciones Unidas. (2012). *Vínculos entre las dinámicas demográficas, los procesos de urbanización y los riesgos de desastres: una visión regional de América Latina*. New York, EUA: Fondo de Población de las Naciones Unidas; Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-HABITAT). Recuperado de http://www.preventionweb.net/files/31104_doc18918contenido.pdf
- UNISDR, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. (2009). Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. En: *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres*. Ginebra, Suiza: Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres.
- Uribe-Cortez, J. (2020). Reseña. Ciudades sostenibles en México: una propuesta conceptual y operativa. *Terra: Revista de Desarrollo Local*, 6, 336. DOI: 10.7203/terra.6.16768

Van der Veen, A. (2004). Disasters and economic damage: Macro, meso and micro approaches. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 13(4), 274-279. DOI: 10.1108/09653560410556483

WMO, World Meteorological Organization. (2018). *Guide to Instruments and Methods of Observation*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.