

## Análisis estadístico, sinóptico y termodinámico de las granizadas en el Altiplano Mexicano

### *Statistical, synoptic and thermodynamic analysis of hailstorms in the Altiplano Mexicano*

Boris Isauro Hernández Comi,\* Francisco Javier Sánchez Ruiz,\*\* José Francisco León Cruz\*\*\* y Estefanía Martínez Tavera‡

Recibido: 24/05/2023. Aceptado: 3/08/2023. Publicado: 29/09/2023.

**Resumen.** Este estudio muestra un análisis estadístico, sinóptico y termodinámico de las granizadas en el Altiplano Mexicano (AL-ME), región que concentra una gran cantidad de eventos cada año. Para ello se calculó el ciclo anual de las granizadas y se relacionó con eventos de tormenta y lluvia, y se emplearon bases de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de los observatorios meteorológicos de Puebla, Tlaxcala, Estado de México, Hidalgo y Ciudad de México, durante el periodo de 1981-2017. Además, seleccionando tres eventos de granizo severo y se analizaron a través de imágenes de satélite del canal infrarrojo (IR), cartas sinópticas, sondeos de proximidad y mapas compuestos de variables meteorológicas realizadas con datos de reanálisis ERA5. Los resultados muestran que los eventos de granizo se incrementan en abril y disminuyen en noviembre. Los perfiles verticales generados permitieron identificar las características termodinámicas de estos fenómenos, donde se observaron valores de Energía Potencial Convectiva Dis-

ponible entre 642 J/kg y 2166 J/kg, Inhibición Convectiva de 0 J/kg a -28 J/kg y un buen rendimiento del Índice de Elevación, entre -3 y -7, para la detección de las granizadas. Finalmente, se identificaron patrones sinópticos que favorecieron las granizadas analizadas, como son una alta presión sobre el Golfo de México y una vaguada sobre la región de estudio, mismas que predominaron durante los tres eventos.

**Palabras clave:** granizo, eventos meteorológicos extremos, climatología, sondeo de proximidad, análisis sinóptico.

**Abstract.** This study shows a statistical, synoptic and thermodynamic analysis of hailstorms in the Mexican Altiplano (AL-ME), a region that concentrates a large number of events each year. For this purpose, the annual cycle of hailstorms was calculated and related to storm and rain events, and databases from the National Meteorological Service (SMN)

\* Facultad de Ingeniería Ambiental, Decanato de Ciencias Biológicas, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 17 sur #901, Barrio de Santiago C.P. 72410, Puebla, Pue., México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1314-9672>. Email: [borisisauro.hernandez@upaep.edu.mx](mailto:borisisauro.hernandez@upaep.edu.mx). Autor de correspondencia.

\*\* Facultad de Ingeniería Ambiental, Decanato de Ciencias Biológicas, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 17 sur #901, Barrio de Santiago C.P. 72410, Puebla, Pue., México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6896-5798>. Email: [franciscojavier.sanchez@upaep.mx](mailto:franciscojavier.sanchez@upaep.mx)

\*\*\* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0374-6858>. Email: [jleon@geografia.unam.mx](mailto:jleon@geografia.unam.mx)

‡ Facultad de Ingeniería Ambiental, Decanato de Ciencias Biológicas, Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, 17 sur #901, Barrio de Santiago C.P. 72410, Puebla, Pue., México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0449-037X>. Email: [estefania.martinez@upaep.mx](mailto:estefania.martinez@upaep.mx)

of the meteorological observatories of Puebla, Tlaxcala, State of Mexico, Hidalgo and Mexico City, during the period 1981-2017, were used. In addition, three severe hail events were selected and analyzed through satellite images of the infrared (IR) channel, synoptic charts, proximity soundings and composite maps of meteorological variables made with ERA5 reanalysis data. The results show that hail events increase in April and decrease in November. The vertical profiles generated allowed identifying the thermodynamic characteristics of these phenomena, where values of Available

Convective Potential Energy between 642 J/kg and 2166 J/kg, Convective Inhibition from 0 J/kg to -28 J/kg and a good performance of the Elevation Index, between -3 and -7, were observed for hail detection. Finally, synoptic patterns that favored the analyzed hailstorms were identified, such as high pressure over the Gulf of Mexico and a trough over the study region, which predominated during the three events.

**Keywords:** hail, extreme weather events, climatology, proximity sounding, synoptic analysis.

## INTRODUCCIÓN

El granizo ha sido estudiado en todo mundo por ser un fenómeno meteorológico extremo y puntual que suele causar grandes impactos negativos en las áreas donde se presenta. Se puede definir como la precipitación en forma de conglomerados irregulares de hielo que se forman regularmente en nubes de fuerte actividad convectiva. Comienza con gotas de agua dentro de una nube cumulonimbos, que son arrastradas por corrientes ascendentes dentro de la nube, logrando así producir un enfriamiento cada vez mayor, hasta alcanzar un nivel de congelación y formar el granizo (Banchemo, 2017). Cuando las partículas de granizo son demasiado pesadas para ser sostenidas por las corrientes ascendentes, precipitan hacia el suelo.

El tamaño del granizo varía, alcanzando diámetros de 5 milímetros hasta pedriscos del tamaño de una pelota de golf o mayores, siendo estas últimas las que representan un mayor peligro para la sociedad (Prieto *et al.*, 2021). En ese sentido, este tipo de tormentas ha provocado la pérdida de vidas humanas (Dube y Rao, 2005), así como incontables daños económicos. No obstante, la mayor cantidad de impactos se observan comúnmente sobre regiones rurales (particularmente en el sector agrícola), mientras que en el ámbito urbano la infraestructura hidráulica, alcantarillado, vivienda y red vial, son las más afectadas, además de la industria automotriz (Allen *et al.*, 2017; Allen y Tippett, 2021; Peña-Beltrán y Pabón-Caicedo, 2020; Punge y Kunz, 2016; Schemm *et al.*, 2016). Por ejemplo, la suma de las pérdidas económicas por granizadas en el sector agrícola, urbano y automotriz en Alemania, Bélgica y Francia, ascendieron a 5.1 billones de euros, tan solo en 2013 y 2014

(Punge y Kunz, 2016), mientras que en Estados Unidos de América (EE. UU.) se estima que las pérdidas en daños a propiedad y cultivos son de alrededor de 850 millones de dólares en promedio por año (Gagne *et al.*, 2017).

Para el caso nacional, se estiman pérdidas por tormentas de granizo en millones de pesos al año, principalmente en la industria automotriz. Se calcula que en la ciudad de Puebla, México, se sufrieron pérdidas por 20 millones de dólares por el impacto del granizo a unidades recién creadas durante el año 2017 (Campetella, 2018). Asimismo, el sector agrícola en el mismo estado reportó una pérdida por 266.5 millones de pesos entre 2011 y 2017 (Ruiz, 2018). A nivel nacional, solo en 2008, se estimaron pérdidas de alrededor de 7 mil millones de pesos mismo año (Martínez *et al.*, 2013).

Las tormentas de granizo se registran prácticamente en todo el mundo y están relacionadas con la fuerte actividad convectiva (Baldi *et al.*, 2014; Kunz *et al.*, 2009; Novo y Raga, 2013). Estudios previos han indicado la conexión entre la convección que da origen a las tormentas de granizo y los sistemas frontales (Schemm *et al.*, 2016). Asimismo, se ha explorado la relación de las características temporales y espaciales de la frecuencia del granizo con factores termodinámicos, por ejemplo, altos porcentajes de humedad relativa (HR), bajos valores de inhibición convectiva (CIN, por sus siglas en inglés) e índice de elevación (LI, por sus siglas en inglés), altos valores de energía potencial convectiva disponible (CAPE, por sus siglas en inglés), además de fuerte cizalladura del viento (Beal *et al.*, 2020; Lkhamjav *et al.*, 2017). Otra relación estudiada con anterioridad en el contexto mexicano es la interacción de ciclones tropicales, ondas del este y frentes fríos que potencializan el desarrollo con-

vectivo y favorecen la caída de granizo (León-Cruz *et al.*, 2021).

Actualmente, en México, poco se conoce sobre las características de las tormentas convectivas y las granizadas. Algunos estudios sobre propiedades de este tipo de fenómenos en el centro de México, empleando datos de radar y satélite, han mostrado su distribución espacio-temporal así como algunas de sus características (Jiménez *et al.*, 2012; León-Cruz *et al.*, 2021; Novo y Raga, 2013). La distribución espacial muestra que las tormentas tienden a formarse y moverse hacia el oeste del radar, sobre una banda estrecha de terreno elevado. No obstante, las tormentas con los mayores volúmenes y alturas en sus topes tienden a localizarse hacia el suroeste, sobre terrenos bajos. Cada elemento convectivo se enlazó con el número de descargas eléctricas a tierra producidas en su interior, según fueron detectadas por la World Wide Lightning Location Network (Red Mundial de Localización de Rayos). Recientemente, también se han caracterizado los entornos ambientales asociados con granizo y tormentas eléctricas en el país empleando un enfoque de sondeos de proximidad con datos de reanálisis (León-Cruz *et al.*, 2023).

Estudios anteriores han identificado que, en México, los estados más afectados por granizadas son Puebla, Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y la Ciudad de México (Jiménez *et al.*, 2012), y dado que actualmente no es posible evitar daños considerables por las granizadas (Baldi *et al.*, 2014), estas representan un peligro latente que puede generar (y que genera, de acuerdo a las estadísticas disponibles), pérdidas económicas significativas en diversos sectores. En este sentido, incrementar el conocimiento de estos fenómenos a través del análisis del ciclo anual, la variación estacional y la distribución espacial (Mezher *et al.*, 2012; Santos y Belo-Pereira, 2018; Zhang *et al.*, 2008), resulta de vital importancia para los gestores de riesgos y emergencias.

En este contexto, el objetivo de esta investigación es presentar una climatología actualizada de las granizadas en el Altiplano Mexicano, y examinar, a través de estudios de caso, las principales características de estas tormentas empleando diversas fuentes de datos meteorológicos.

## Zona de estudio

El centro de México es una región caracterizada por una larga faja de terreno alto que se extiende en dirección este-oeste y que cubre gran parte del llamado Altiplano Mexicano (AL-ME) (Novo y Raga, 2013). La zona de estudio comprende el Estado de México, Puebla, Tlaxcala, Hidalgo y la Ciudad de México (CDMX) (Figura 1). Las porciones más altas del área de estudio se encuentran en Puebla, con altitudes de hasta 5610 msnm (volcán Citlaltépetl o Pico de Orizaba); sobre el volcán Popocatepetl, con una altitud de 5465 msnm, y sobre el volcán La Malinche con una altitud de 4461 msnm.

El clima de la región de estudio por estado se representa de la siguiente manera: el 99% del territorio de Tlaxcala, así como el 87% del territorio de CDMX, el 73% del Estado de México y el 35% de Puebla, cuentan con el clima templado-subhúmedo, mientras que Hidalgo presenta el 39% del territorio con clima seco-semiseco y el 33% templado subhúmedo (INEGI, 2021). La zona de estudio también concentra una gran cantidad de población, misma que está expuesta a eventos climáticos severos como las tormentas de granizo. De acuerdo con el último censo nacional de población (INEGI, 2021), esta porción del país concentra 37 millones de habitantes, que representa el 29.5% de la población nacional.

## DATOS Y MÉTODOS

### Base de datos sobre granizo

Las estaciones meteorológicas en superficie han sido utilizadas para diversos análisis de granizadas, en especial para determinar su climatología (p. ej., Beal *et al.*, 2020; Jelić *et al.*, 2020; Peña-Beltrán y Pabón-Caicedo, 2020). Para este estudio se utilizó información de cinco observatorios meteorológicos en superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de México (Figura 1). Aquí, observadores meteorológicos registran la caída de granizo siguiendo las guías que proporciona el SMN a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el *Manual teórico práctico del observador meteorológico de superficie* (CONAGUA, 2010), documento que tiene bases técnicas sugeridas por la Organización

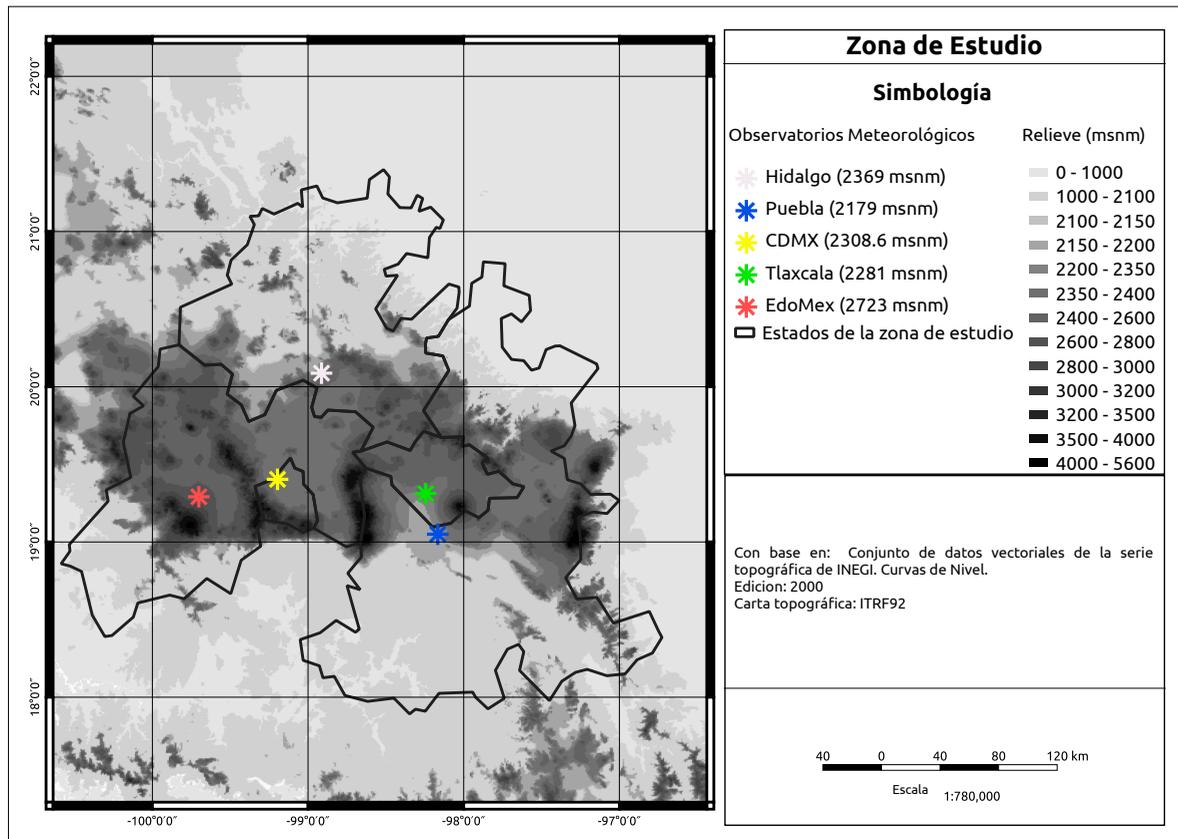


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Se muestra el relieve y la ubicación de observatorios meteorológicos empleados. Fuente: elaboración propia.

Meteorológica Mundial (OMM). La base de datos empleada comprende históricos diarios de caída de granizo, con información a partir del 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 2017. Sobre dichas bases se realizó un análisis estadístico de las variables de precipitación, temperatura y eventos de tormenta, con el fin de corroborar los eventos de granizo (Beal *et al.*, 2020; Santos y Belo-Pereira, 2018).

Dado que el granizo es un fenómeno meteorológico con una alta variabilidad espacio-temporal y que suele asociarse con daños puntuales, en ocasiones no puede ser detectado por los observatorios meteorológicos (Beal *et al.*, 2020). Por tal motivo, a fin de detectar granizadas que tuvieran afectaciones importantes en las ciudades circundantes a los observatorios, se recurrió a información de medios de comunicación digitales, como se ha planteado en otras investigaciones similares (Kahraman *et al.*,

2016). Dicha información documental recolectada sirvió como complemento a los datos que ofrecen los observatorios meteorológicos y brindó más información sobre la severidad de los eventos de granizo.

### Selección de casos de estudio

Además de la información documental recolectada, así como aquella ofrecida por los observatorios meteorológicos, se emplearon reportes del *Diario Oficial de la Federación* (DOF) del Gobierno de México, particularmente las declaratorias de desastre y emergencia por efectos de caída de granizo en la zona de estudio. El objetivo de esta segunda búsqueda fue identificar casos con alto impacto social que luego sirvieran para su investigación a detalle. De la información colectada se seleccionaron tres casos de estudio: 11 de agosto de 2006 (Caso 1), 17 de agosto de 2014 (Caso 2) y 16 de junio de

2016 (Caso 3). La selección de casos de estudio basados en reportes sobre sus afectaciones ayudó a identificar la severidad de las granizadas, elemento que no se contempla por los observadores meteorológicos y que no se plasma en las bases de datos proporcionadas por el SMN.

### Datos de reanálisis

Para el análisis de los casos de estudio se emplearon los datos de reanálisis del Centro Europeo para Previsiones Meteorológicas de Mediano Alcance (ECMWF, por sus siglas en inglés), ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020). El objetivo de la implementación de estos datos fue analizar las condiciones de la atmósfera superior e identificar, mediante compuestos sinópticos y sondeos de proximidad, las condiciones atmosféricas que dieron origen a las granizadas en la región de estudio. Los datos ERA5 han sido ampliamente utilizados en la literatura para analizar granizadas (p. ej., Beal *et al.*, 2020; Jelić *et al.*, 2020; Lkhamjav *et al.*, 2017; Punge *et al.*, 2017; Santos y Belo-Pereira, 2018), cubren el periodo comprendido entre enero de 1959 al presente, y son distribuidos por el Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S, por sus siglas en inglés). ERA5 proporciona estimaciones horarias de un gran número de variables climáticas atmosféricas, terrestres y oceánicas en una cuadrícula de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  y resuelven la atmósfera utilizando 37 niveles de presión (1000 hPa - 1 hPa) desde la superficie hasta una altura aproximada de 80 km (Hersbach *et al.*, 2020).

Para este estudio se seleccionaron las variables de altura geopotencial, humedad relativa, componente zonal (U) y meridional (V) del viento, divergencia y velocidad vertical, para los 37 niveles de presión disponibles. Los datos en los niveles mencionados fueron utilizados a fin de generar un análisis sinóptico en tres niveles mandatorios (250 hPa, 500 hPa, y 850 hPa) para los casos de estudio seleccionados. Además, con los mismos datos de reanálisis de ERA5, se generaron sondeos de proximidad para cada uno de los casos mediante la herramienta Rapid Computation and Visualisation of Convective Parameters from Rawinsonde and NWP Data (Taszarek *et al.*, 2023). Este es un paquete de R, gratuito, que contienen una colección de funciones para el cálculo rápido y la visualización de pará-

metros convectivos utilizados habitualmente en la predicción operativa de tormentas convectivas severas. Es importante mencionar que los sondeos de proximidad se refieren a la selección del punto de malla y hora más cercano al lugar y momento de la tormenta de granizo.

### Tratamiento estadístico

Las bases de datos de los cinco observatorios meteorológicos se integraron en una base única con el objetivo de facilitar su manejo y tratamiento a través del lenguaje de programación Python. Cada observatorio cuenta con un total de 13 515 días de información por cada variable, tomando en cuenta las tres variables utilizadas (día con granizo, día con tormenta y precipitación acumulada diaria), se contempló un total de 40545 datos por observatorio. Con estas bases se calculó el porcentaje de días sin observaciones, y se obtuvo un promedio de 91.5% días con registro. Dado que el porcentaje de días sin registro es menor a un 15% en todos los observatorios y que la literatura previa ha establecido un umbral hasta del 20% (por ejemplo, Mezher *et al.*, 2012) de datos perdidos, se determinó emplear todos ellos.

Durante el periodo de estudio se cuantificaron 584 eventos de granizo en los cinco observatorios. El mayor porcentaje de eventos se registró en el observatorio meteorológico de Estado de México y en Tlaxcala con 1.4%, le siguieron CDMX con 0.8%, Puebla con 0.6% e Hidalgo con 0.4% (Tabla 2). Los resultados obtenidos fueron utilizados para el cálculo de los ciclos anual y estacional del granizo en la zona de estudio. Además del granizo se calculó el ciclo anual de eventos de tormenta y lluvia a fin de analizar la variabilidad espacio-temporal y la relación entre variables.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Ciclo anual del granizo

La estación cálida es una característica de la máxima frecuencia del granizo, que se muestra entre mayo y agosto para el hemisferio norte y entre octubre y marzo para el hemisferio sur (Zhou *et al.*, 2021). Para la zona de estudio los resultados

Tabla 1. Porcentaje de datos perdidos por observatorio.

Observatorio	Registros potenciales	Días sin dato	Datos perdidos (%)
CDMX	40 545	2348	5.8
Puebla	40 545	5227	12.9
Edo. de México	40 545	317	0.8
Tlaxcala	40 545	4064	10.0
Hidalgo	40 545	5369	13.2
Total	202 725	17 325	8.5

Tabla 2. Eventos de granizo segregados por observatorio meteorológico.

Observatorio	Días con registro	Días con granizo	% de días con granizo
CDMX	12 370	101	0.8
Puebla	11 697	77	0.6
Edo. de Méx.	13 397	182	1.3
Tlaxcala	12 121	172	1.4
Hidalgo	11 716	52	0.4

muestran el periodo más activo de las tormentas de granizo entre mayo y agosto (Figura 2), relacionándose con la etapa cálida y húmeda que se presenta durante primavera y verano en México, al igual que en otros países como China, Argentina, Australia y Mongolia (Lkhamjav *et al.*, 2017;

Mezher *et al.*, 2012; Schuster *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2008).

La etapa cálida y húmeda en el país es un indicativo del calentamiento superficial que puede generar convección y convergencia, procesos que están asociados con el transporte de humedad,

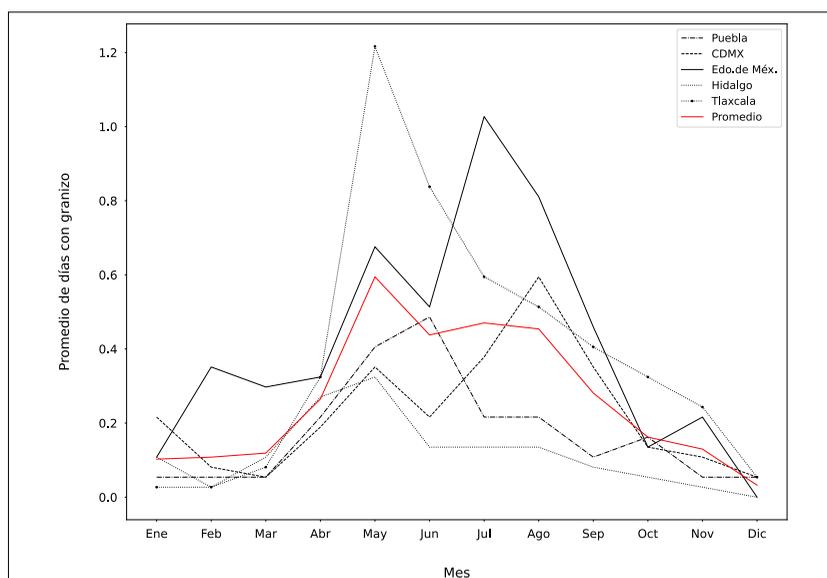


Figura 2. Promedio mensual de días con granizo para los cinco observatorios analizados (1981-2017). Fuente: elaboración propia.

y que pueden originar tormentas eléctricas con posibilidad de desarrollar granizo (Novo y Raga, 2013; Prieto *et al.*, 2021). Además, fenómenos de mesoescala y escala sinóptica como los ciclones tropicales, ondas del este y frentes fríos, también se han relacionado como detonadores de tormentas eléctricas que generan granizo, siendo los sistemas frontales los que más comúnmente suelen generar este tipo de fenómenos (León-Cruz *et al.*, 2021).

Los estados de Tlaxcala e Hidalgo muestran el punto máximo de eventos de granizo en mayo, Puebla en junio, Estado de México en julio y CDMX en agosto (Figura 2). Estas diferencias pueden explicarse por la ubicación geográfica de los observatorios meteorológicos. En primer lugar, los flujos de humedad del golfo de México predominan al inicio de la temporada en la zona de estudio y después se agregan los flujos de humedad del océano Pacífico (a fines del verano), que, junto con las características del terreno parecen modular la actividad de convección profunda de la zona de estudio (Figura 3). De lo anterior, también se puede explicar el aumento de eventos de granizo en Puebla, Hidalgo y Tlaxcala que corresponden a la estación de primavera y donde la ubicación de estos observatorios es más cercana a la vertiente del golfo de México y los flujos de humedad llegan en mayor proporción antes que a la CDMX y Edo. de México (León-Cruz *et al.*, 2021; Novo y Raga, 2013).

La mayor frecuencia de eventos de granizo se identifica en los observatorios de CDMX y Estado de México; este último registró el mayor número de eventos de granizo (Tabla 2) y también es el observatorio ubicado a mayor altitud. La altitud de los observatorios puede relacionarse con la localización de la isoterma de 0 °C, que influye en el nivel de congelación y la probabilidad de formación de granizo, y es consistente con lo mostrado en estudios previos (Beal *et al.*, 2020; Lkhamjav *et al.*, 2017; Mezher *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2021).

### Ciclo anual de eventos de tormenta y lluvia

Las tormentas eléctricas son fenómenos atmosféricos que regularmente originan lluvias intensas y granizadas (Jiménez *et al.*, 2012; Prieto *et al.*, 2021; Santos y Belo-Pereira, 2018). La Figura 4

muestra el ciclo anual de eventos de granizo, lluvia y tormenta eléctrica. Los resultados muestran la relación que guardan estos fenómenos y esta relación puede asociarse con la temporada cálida y húmeda en la región.

Hidalgo muestra el punto máximo de la documentación de tormentas en abril, mientras que Puebla y Tlaxcala en junio, Estado de México en julio y CDMX en agosto. Los cinco observatorios meteorológicos coinciden en diciembre como el mes de menor frecuencia de eventos de tormenta (Figura 4). En general se observa un aumento en la frecuencia de las tormentas en mayo, coincidiendo con Prieto *et al.* (2021).

El ciclo anual de la precipitación (Figura 4) para Puebla y Tlaxcala muestra su pico máximo en junio y otro máximo en agosto con un mínimo relativo en julio. Hidalgo muestra esta misma característica en julio y septiembre, y un mínimo relativo en agosto, mientras que, las estaciones de CDMX y Edo. de México no muestran este comportamiento. De igual forma, se observa aumento de la precipitación entre abril y mayo, disminuye entre octubre y noviembre como lo registró Méndez *et al.* (2008), estas características de aumento y disminución son coincidentes con las variables granizo y tormenta.

## ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO

### Caso 1 (granizada del 11-08-2006)

De acuerdo con el DOF,<sup>1</sup> el 2 de septiembre de 2006 se publicó la declaratoria de contingencia climatológica por daños provocados por la granizada que afectó en el municipio de Terrenate, Tlaxcala con fecha 11 de agosto de 2006, coincidiendo con el registro de caída de granizo en el observatorio meteorológico de Tlaxcala. También, con fecha 7 de septiembre de 2006, se publicó en el DOF<sup>2</sup> otra declaratoria de contingencia climatológica por daños provocados por la granizada que afectó en el municipio de Tepetitlán, Hidalgo, en igual fecha de

<sup>1</sup> Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4931061yfecha=12/09/2006#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4931061yfecha=12/09/2006#gsc.tab=0)

<sup>2</sup> Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4930350yfecha=07/09/2006#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4930350yfecha=07/09/2006#gsc.tab=0)

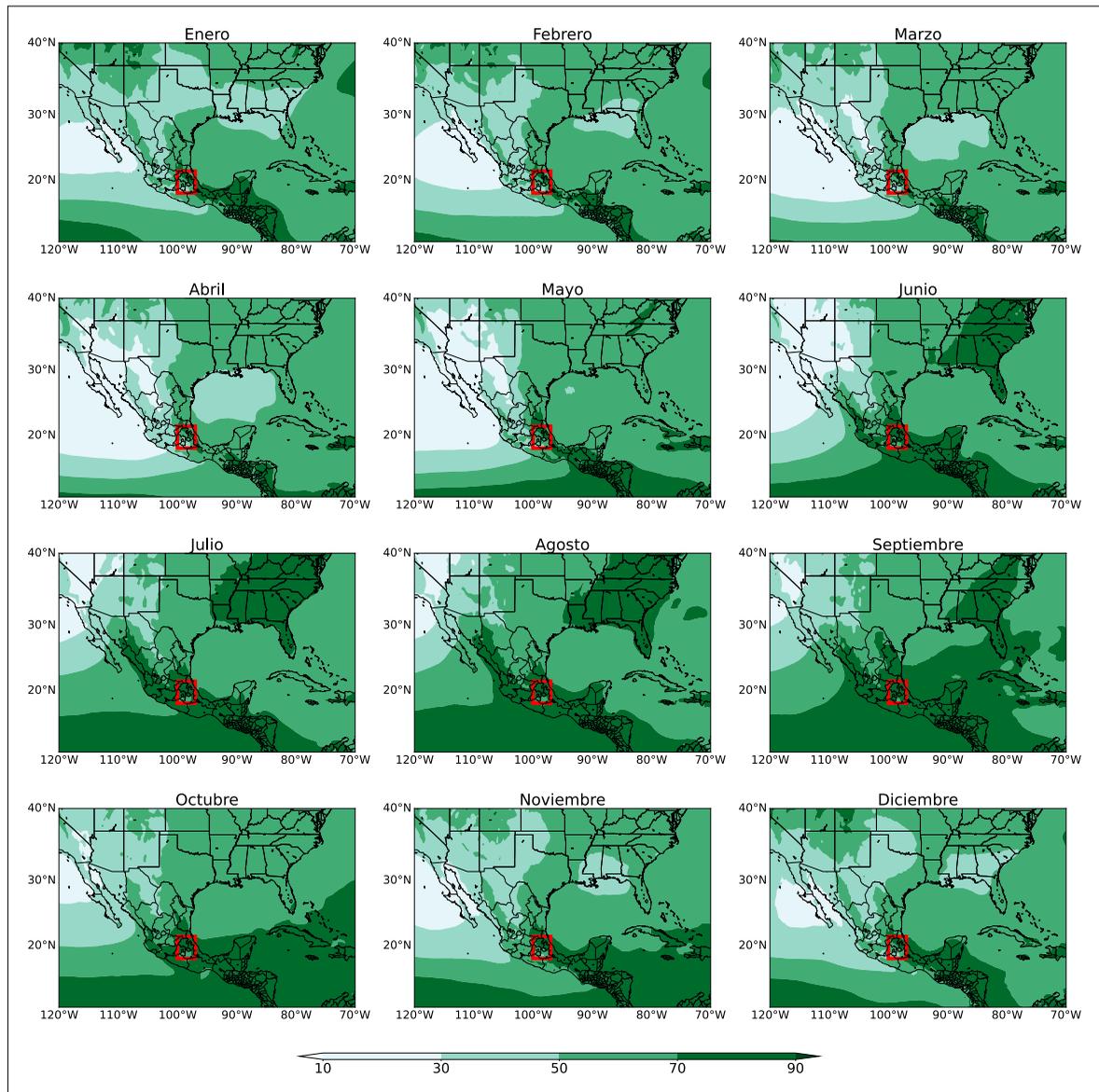


Figura 3. Promedio mensual (1981-2017) de humedad relativa (%) basado en datos de ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020). El recuadro rojo indica la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

afectación, aunque esta granizada no fue registrada por el observatorio meteorológico de ese estado.

La imagen interpretada de sistemas meteorológicos del SMN (Figura 5), muestra una vaguada que se extendió desde el centro-este de EE. UU. hasta el centro de México e interaccionó con la onda tropical núm. 24. Esta configuración favoreció el desarrollo de tormentas convectivas en la región de

estudio y es similar a lo previamente reportado en la literatura (León-Cruz *et al.*, 2021).

La imagen de satélite IR4 del GOES (Figura 6) muestra los toques de nube que son coincidentes a la localización de las granizadas registradas en Hidalgo y Tlaxcala. En este sentido y de acuerdo con los datos proporcionados se estiman nubes profundas con toques alrededor de 12 km.

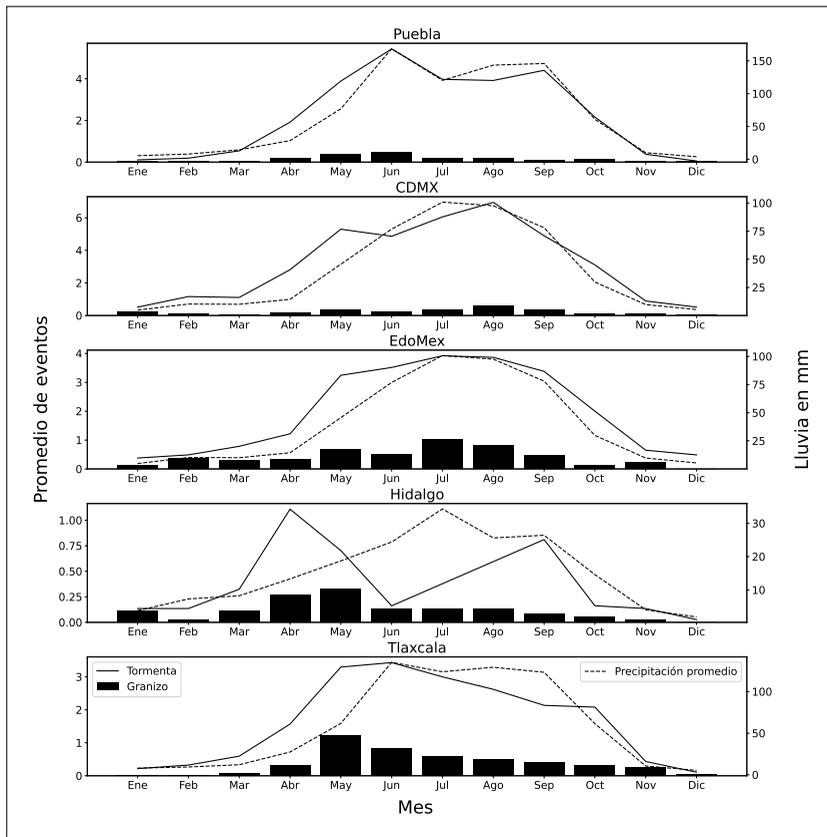


Figura 4. Ciclo anual de la precipitación (línea entrecortada), eventos tormenta (línea continua) y granizo (barras negras). Fuente: elaboración propia.

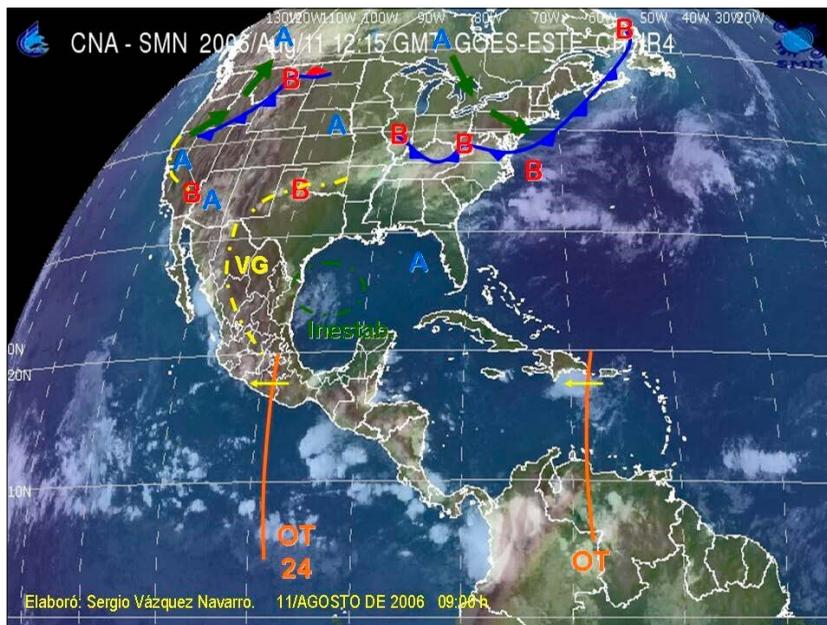


Figura 5. Imagen interpretada de sistemas meteorológicos que afectan al país para el día 11 de agosto de 2006 a las 09:00 horas. Fuente: producto proporcionado por el SMN.

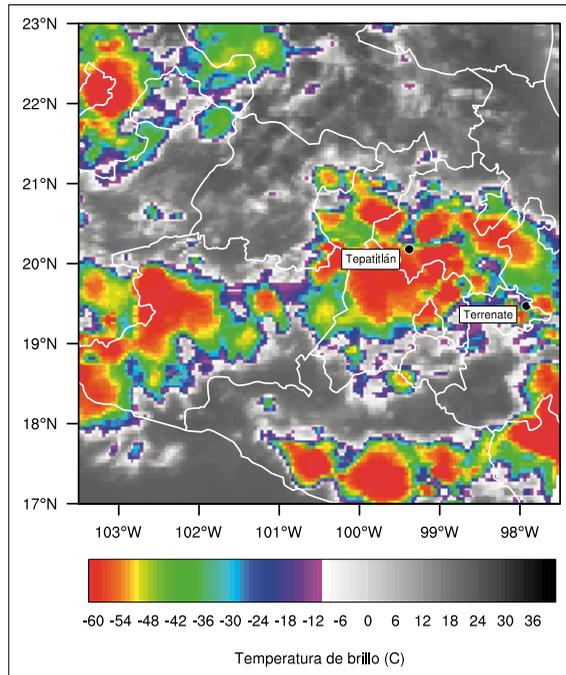


Figura 6. Imagen de satélite GOES canal infrarrojo (IR4) (Knapp y Wilkins, 2018), para el día 11 de agosto de 2006 a las 23:00 UTC (18:00 hora local). Fuente: elaboración propia.

El sondeo de proximidad (material suplementario) muestra valores de CAPE de 642 J/kg, CIN de -2 J/kg, LI de -3, nivel de condensación por ascenso (LCL, por sus siglas en inglés) de 515 m, nivel de convección libre (LFC, por sus siglas en inglés) de 565 m, humedad relativa (HR) de 80% en niveles de superficie a 2 km y de 68% de 2 km a 5 km de altura, además con temperatura en superficie de 15.8 °C y en 500 hPa de -6.0 °C, mientras que el nivel de la isoterma de 0 °C se observó en 2485 m. La cizalladura del viento desde niveles bajos hasta niveles altos se muestra débil, principalmente de superficie a 6 km donde se observa de 3.1 m/s, mientras que el nivel de equilibrio (EL, por sus siglas en inglés) se observó en 9650 m. De lo anterior, se identifica una atmósfera inestable que se asocia a la configuración sinóptica de la onda tropical núm. 24 y el canal de baja presión sobre la zona de estudio, que originó el ambiente favorable para la convección profunda.

El análisis en 850 hPa de los campos de HR, geopotencial y viento, muestran una circulación

anticiclónica sobre el Golfo de México, que origina la entrada de flujos de humedad en la región de estudio, configuración similar que estudios previos sobre tormentas intensas en México han señalado (León-Cruz *et al.*, 2021; Novo y Raga, 2013). Además, se observa el paso de una onda tropical y una baja geopotencial (Figura 7a), característica que coincide con el análisis del SMN (Figura 5). La velocidad vertical en 500 hPa se acopla con la divergencia en 250 hPa para el estado de Tlaxcala (Figura 7b), complementando la presencia de la inestabilidad observada por el sondeo de proximidad y lo mostrado en la imagen de satélite (Figura 6).

### Caso 2 (granizada del 17-08-2014)

Este evento se registró en la base de datos del observatorio meteorológico de CDMX y coincidió con la declaratoria de desastre por ocurrencia de lluvia severa y granizo en la delegación Miguel Hidalgo, publicada en el DOF<sup>3</sup> el 27 de agosto de 2014 y la de fecha 17 de agosto de 2014. Asimismo, se emitió declaratoria como zona de desastre al municipio de Naucalpan de Juárez del Estado de México, con misma fecha de publicación en el DOF<sup>4</sup> y ocurrencia del evento, sin embargo, la base de datos del observatorio meteorológico de esa entidad no tiene registro de caída de granizo.

La imagen interpretada de sistemas meteorológicos del SMN (Figura 8) muestra una vaguada que se extiende desde el noroeste hasta el centro del país. También se observa el dominio de una alta presión y su dorsal que se extiende cerca del litoral del Golfo de México, lo que originó la entrada de flujos de humedad hacia el centro del país. La imagen de satélite IR4 del GOES (Figura 9) muestra un núcleo convectivo bien definido, representado por toques de nubes con temperaturas de brillo sobre -60 °C, que se pueden asociar con alturas de entre 12 km y 13 km. El núcleo de la tormenta identificado por el satélite es coincidente con los lugares aproximados donde se registró la caída de granizo.

<sup>3</sup> Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5357803&yfecha=27/08/2014#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357803&yfecha=27/08/2014#gsc.tab=0)

<sup>4</sup> Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5357804&yfecha=27/08/2014#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357804&yfecha=27/08/2014#gsc.tab=0)

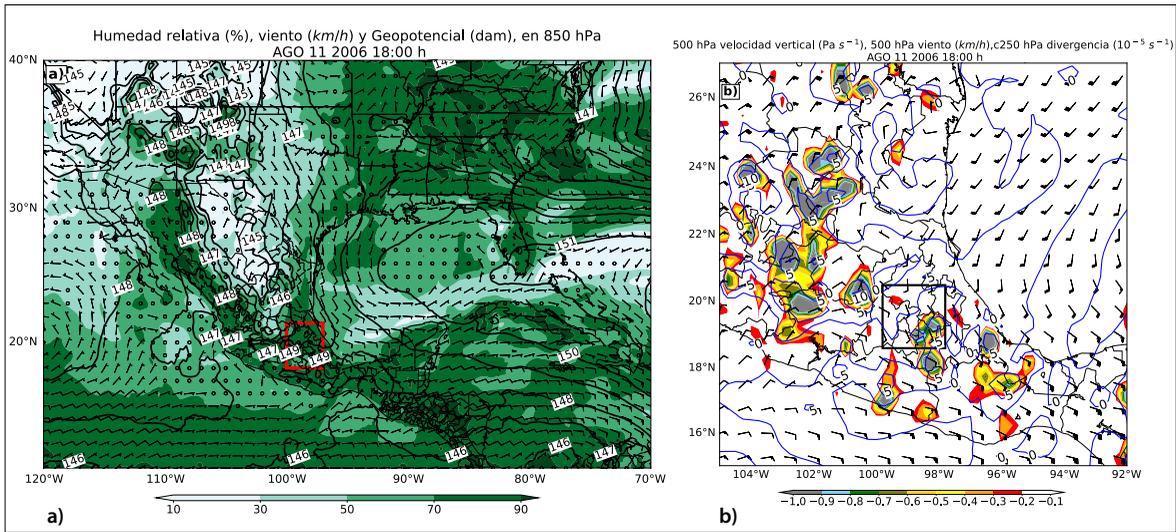


Figura 7. a) Humedad relativa (%) con el campo vectorial del viento (km/h), y altura geopotencial representada con línea negra continua y etiquetada cada 1 decámetro, todos en 850 hPa. b) Velocidad Vertical en Pa/s, campo vectorial del viento (km/h); ambos en 500 hPa, divergencia (10<sup>-5</sup>/s) línea azul continua en 250 hPa y la zona aproximada de ocurrencia del evento en recuadro en rojo. Fuente: elaboración propia.

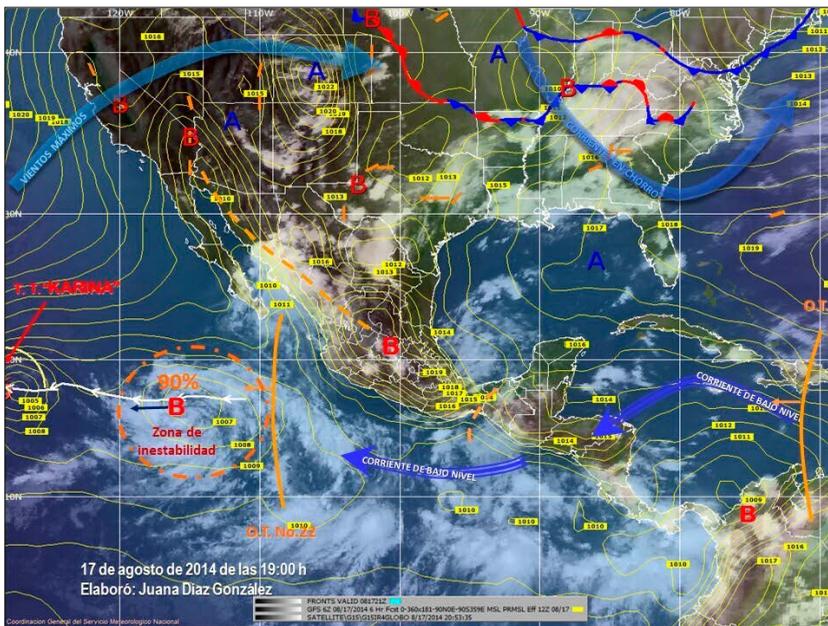


Figura 8. Imagen interpretada de sistemas meteorológicos que afectan al país para el día 17 de agosto de 2014 a las 19:00 horas. Fuente: producto proporcionado por el SMN.

El sondeo de proximidad (material suplementario) arrojó valores de CAPE de 2166 J/kg, CIN de 0 J/kg, LI de -7, y HR con valores de 71% en niveles de superficie a 2 km y de 66% de 2 km a 5 km, LCL de 550 m y LFC también de 550 m, además temperatura en superficie de 16.8 °C y

en 500 hPa de -7.5 °C, mientras que la altura de la isoterma de 0 °C se observó en 1890 m. La cizalladura del viento en niveles altos (8 km), asociada a la corriente en chorro, se observa de 11.3 m/s, favoreciendo a que el nivel de equilibrio sea de 11 630 m. Lo anterior es indicativo de una

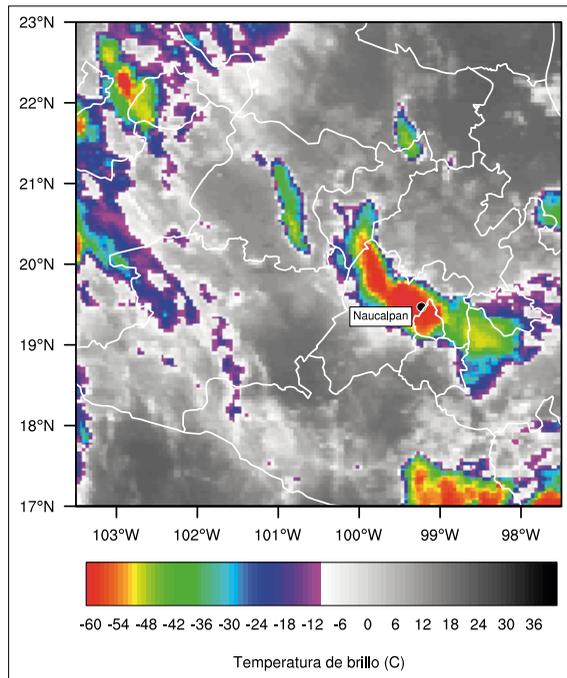


Figura 9. Imagen de satélite GOES canal infrarrojo (IR4) (Knapp y Wilkins, 2018) para el día 18 de agosto de 2014 a las 03:00 UTC (22:00 hora local del día 17 de agosto de 2014). Fuente: elaboración propia.

atmósfera muy inestable con probabilidad de desarrollo convectivo. Es importante mencionar que este sondeo muestra un valor de 0.2 para el Parámetro de Granizo Significativo (SHIP, por sus siglas en inglés), que si bien no se encuentra dentro de los umbrales para la determinación de granizo severo (mismo que varía de 1 a 2), si es indicativo de la posibilidad de formación.

Los campos sinópticos de las variables HR, viento y geopotencial en 850 hPa (Figura 10a), muestran una alta geopotencial sobre el Océano Atlántico y su dorsal se extiende hasta el norte del Golfo de México, esta alta genera un movimiento anticiclónico que favorece la penetración de flujos de humedad en el AL-ME. Del mismo modo, se observa una baja geopotencial extendida desde el norte hasta el centro del país, este mismo sistema que se observa en la imagen interpretada del SMN (Figura 8), y que se asocia a una vaguada.

Asimismo, la velocidad vertical en 500 hPa coincide con la divergencia en 250 hPa (Figura 10b) y los flujos del viento en el litoral del Golfo de México se mantienen de la misma dirección en 850 hPa y 250 hPa (Figura 10b). El acoplamiento de diversos componentes dinámicos de la atmósfera, confirman que esta se encontraba

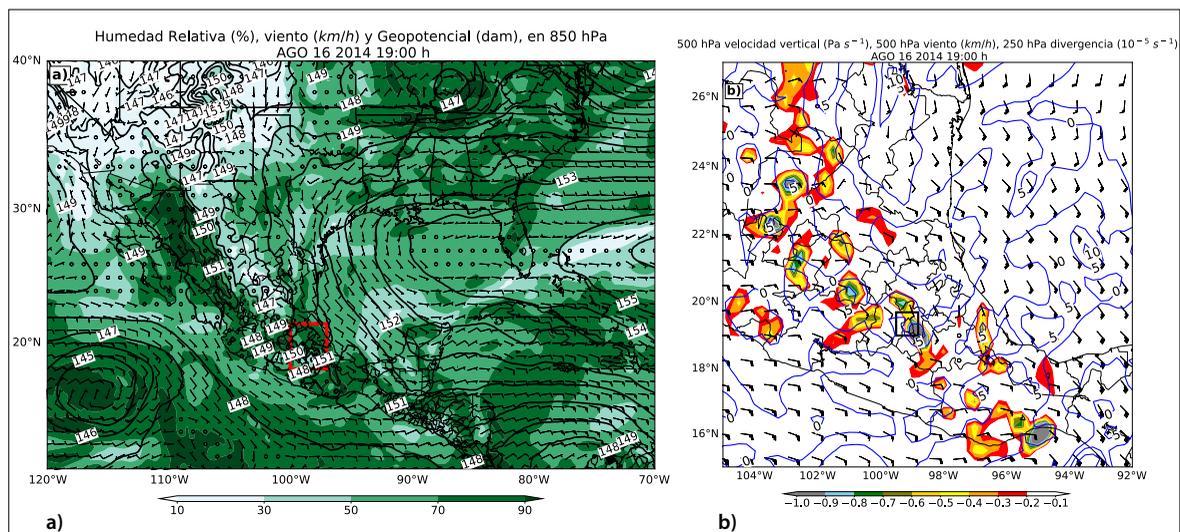


Figura 10. a) Humedad relativa (%) con el campo vectorial del viento (km/h), y altura geopotencial representada con línea negra continua y etiquetada cada 1 decámetro, todos en 850 hPa. b) Velocidad Vertical en Pa/s, campo vectorial del viento (km/h); ambos en 500 hPa, y divergencia (10<sup>-5</sup>/s) línea azul continua en 250 hPa. Fuente: elaboración propia.

húmeda e inestable, lo que favoreció el desarrollo de tormentas convectivas y el reforzamiento para la caída de granizo.

### Caso 3 (granizada del 16-06-2016)

Esta granizada se registró en la base de datos de los observatorios de Puebla y Tlaxcala, y aunque para estos eventos no hubo declaratoria de emergencia en el DOF, la prensa digital<sup>5</sup> confirmó la severidad con que afectó la caída de granizo en la ciudad de Puebla, Tlaxcala y CDMX, donde se observó reducción de visibilidad al conducir, y encharcamientos en avenidas principales debido al taponamiento de la red hidráulica. La imagen interpretada de sistemas meteorológicos del SMN (Figura 11), muestra una vaguada que se extendió desde la mesa del norte hasta el centro de la República Mexicana, además una zona de inestabilidad con 60% de probabilidad de evolucionar a ciclón tropical cerca de las costas de Jalisco y Colima. La circulación asociada a la zona de inestabilidad y la vaguada, generaron condiciones propicias para la advección de humedad

del océano Pacífico, necesaria para la formación de tormentas hacia el centro del país.

La imagen de satélite IR del GOES (Figura 12), muestra para la hora cercana a la formación de la granizada, topes de nube con temperatura alrededor de los  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , representativas de convección profunda y alturas de desarrollo de nubosidad entre 12 km y 13 km. Es importante notar que las zonas con mayor representación de convección profunda coinciden, al igual que en los casos anteriores, con los lugares aproximados donde se registró la caída de granizo.

En el sondeo de proximidad (material suplementario) se obtuvo un CAPE de  $1338\text{ J/kg}$ , CIN de  $-28\text{ J/kg}$ , LI de  $-5$ , HR de 71% de superficie a 2 km y de 57% de 2 a 5 km, temperatura en superficie de  $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  y en 500 hPa de  $-6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que la isoterma de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  se observa en 2852 m y niveles de LCL y LFC de 865 m y 1445 m respectivamente. Asimismo, se observó fuerte cizalladura en niveles altos (8 km) de 11.3 m/s, ayudando a alcanzar el nivel de equilibrio en 11800 m. Al igual que los casos anteriores, los índices de inestabilidad empleados muestran el potencial de convección para la zona de estudio. En este sondeo también se obtuvo un valor de 0.1 para el SHIP, y al igual que el caso

<sup>5</sup> Disponible en: <https://www.elsoldemexico.com.mx/metropoli/Lluvia-y-granizo-provocan-caos-vial-en-7-delegaciones-Puebla-y-Quer%C3%A9taro-178892.html>.

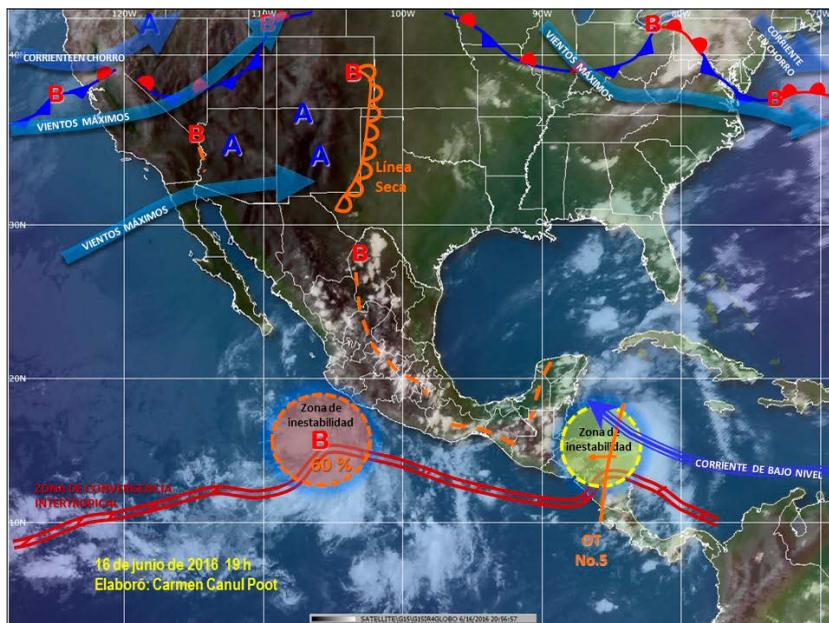


Figura 11. Imagen interpretada de sistemas meteorológicos que afectan al país para el día 16 de junio de 2016 a las 19:00 horas. Fuente: producto proporcionado por el SMN.

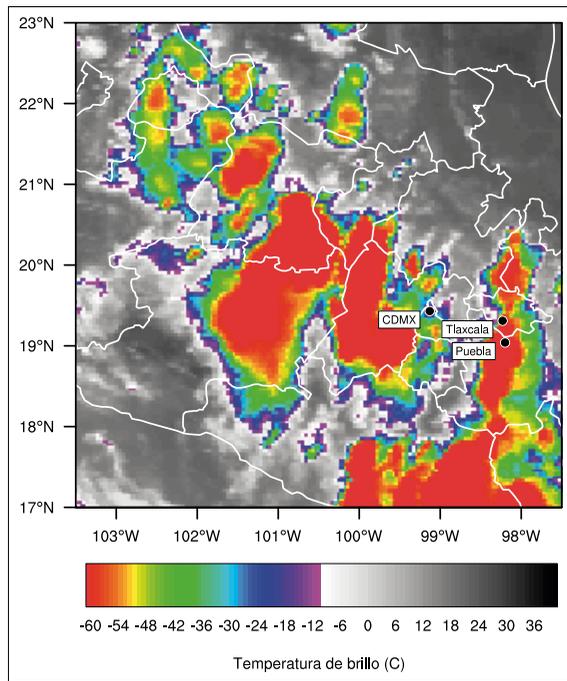


Figura 12. Imagen de satélite GOES canal infrarrojo (IR4) (Knapp y Wilkins, 2018), para el día 17 de junio de 2016 las 00:00 UTC (19:00 hora local del día 16 de junio de 2016). Fuente: elaboración propia.

2, no es un valor que se encuentra dentro de los umbrales para la determinación de granizo severo, sin embargo, si es indicativo de la posibilidad de formación de este.

Los campos sinópticos de las variables HR, viento y geopotencial en 850 hPa muestran un canal de baja geopotencial desde el norte hasta el centro del país. Adicionalmente, se observa una alta geopotencial sobre el mar Caribe y su dorsal se extiende hasta el norte del golfo de México, generando una circulación anticiclónica que permite la penetración de los flujos de humedad provenientes del gofo de México hacia gran parte del centro y oriente de la República Mexicana (Figura 13a), coincidiendo con configuraciones sinópticas previamente establecidas en la literatura (León-Cruz *et al.*, 2021; Novo y Raga, 2013).

Esta configuración es similar a los casos 1 y 2, con la diferencia que se observa una baja geopotencial asociada a una zona de inestabilidad en superficie con el 60% de evolucionar a ciclón tropical que complementa el aporte de flujos de humedad del océano Pacífico. Esto coincide con León-Cruz *et al.* (2021), donde se menciona que los ciclones tropicales y ondas del este pueden influir la convección profunda en la región de estudio. Por otra parte,

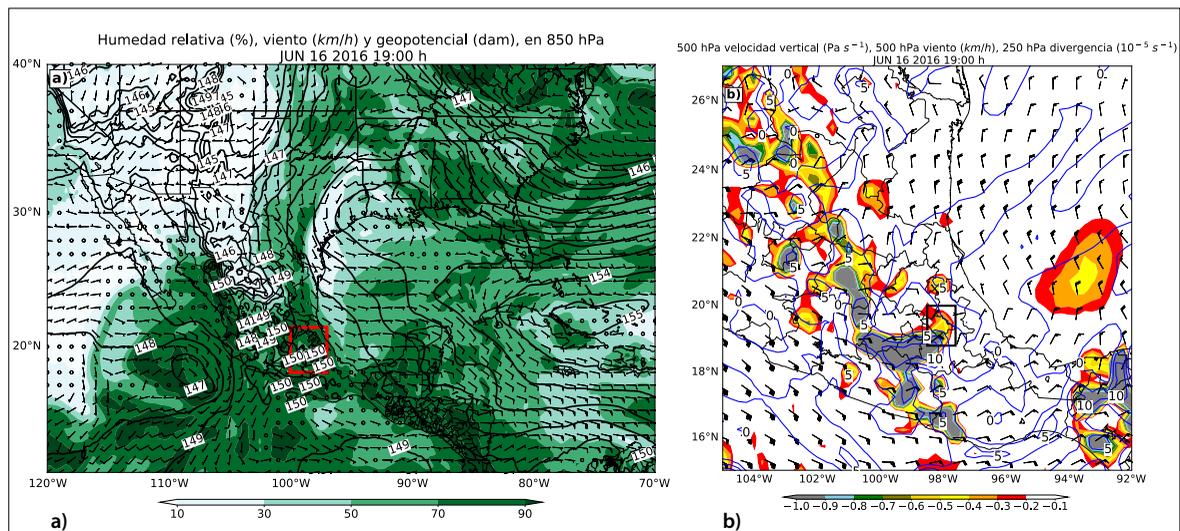


Figura 13. a) Humedad relativa (%) con el campo vectorial del viento (km/h), y altura geopotencial representada con línea negra continua y etiquetada cada 1 decámetro, todos en 850 hPa. b) Velocidad Vertical en Pa/s, campo vectorial del viento (km/h); ambos en 500 hPa, y divergencia (10<sup>-5</sup>/s) línea azul continua en 250 hPa. Fuente: elaboración propia.

la velocidad vertical en 500 hPa y la divergencia en 250 hPa (Figura 13b) muestran valores altos en las zonas donde se registró la caída de granizo para el día y hora de análisis. El acoplamiento de estas variables determina fuerte inestabilidad en niveles medios y altos de la atmósfera, originando el desarrollo de tormentas y la caída de granizo en los lugares de registro.

### Entornos característicos de las granizadas

La inestabilidad es un proceso por el cual un sistema (en este caso una parcela de aire), se aparta de su estado de equilibrio, y puede ser caracterizada por índices con valores numéricos: índices de inestabilidad (Banchemo, 2017).

La Tabla 3 resume los resultados de los índices de inestabilidad para los tres casos analizados y calculados a partir de los sondeos. En este sentido, los valores de CAPE encontrados oscilan entre 642 J/kg y 2166 J/kg, esto sugiere que no son necesarios registros de CAPE sustancialmente altos (por ejemplo, aquellos empleados en zonas de latitudes medias) para que una parcela de aire se vuelva inestable en el área de estudio. De acuerdo a algunos autores, lo anterior descrito, se clasifica como potencial convectivo débil y moderado respectivamente (Banchemo, 2017). El valor de LI en los tres casos se observó de -3, -5 y -7, estos corresponden a una atmósfera con inestabilidad marginal, moderadamente inestable y muy inestable respectivamente

(Banchemo, 2017). Los registros obtenidos podrían interpretarse como potencial de tormentas moderadas, probabilidad de tormentas fuertes y posibles tornados. Finalmente, el CIN con valores mayores a -75 J/kg mantiene potencial para la generación de tormentas (Gensini y Ashley, 2021).

Los índices de inestabilidad son indicativos del potencial de una parcela de aire para elevarse, sin embargo, otro elemento necesario es la humedad. En este sentido, en los tres eventos se observó una atmósfera húmeda en niveles de superficie con valores entre 71% y 80% y en niveles medios (500 hPa) se encontraron valores entre 57% y 68% (Tabla 3). Esta humedad es necesaria para el desarrollo y formación de tormentas convectivas y, por ende, el incremento de la probabilidad de formación de granizo.

El nivel de congelación entre más cercano a la superficie se encuentre, mayor es la probabilidad de la formación de granizo. Lo anterior, debido a que la temperatura desciende bajo cero en niveles más cercanos a la superficie favoreciendo la formación de granizo rápidamente (Banchemo, 2017). En el caso 1 el nivel de superficie se encuentra a 2427 msnm y la isoterma de 0 °C se ubica en 4912, es decir, a 2485 metros sobre el nivel del terreno. Siguiendo este ejemplo, para el caso dos y tres la isoterma 0 °C se localizaron a 1890 y 2825 metros sobre el nivel del terreno, respectivamente. Asimismo, se observa que la temperatura en 500 hPa en

Tabla 3. Variables e índices de inestabilidad observados en los sondeos de proximidad para los casos analizados.

Indicis y variables	Caso 1	Caso 2	Caso 3
MUCAPE (J/kg)	642	2166	1338
LI	-3	-7	-5
CIN (J/kg)	-2	0	-28
LCL (m)	515	500	865
LFC (m)	565	550	1445
EL (m)	9650	11 630	11 805
HR <sub>500hPa</sub> (%)	68	66	57
HR <sub>sf</sub> (%)	80	71	71
Temperatura <sub>500hPa</sub> (°C)	-6.0	-7.5	-6.3
Nivel de congelación (Isoterma 0 °C)	2485 m	1890 m	2825 m

el caso 2 es de  $-7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , un ambiente más frío (de superficie a niveles medios) a diferencia del caso 1 y el caso 3, donde la temperatura registrada es de  $-6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

Finalmente, las diferencias entre el nivel de convección libre (LFC) y el nivel de equilibrio (sumado a la altura sobre el nivel del mar en el que se documentaron las granizadas) para los casos analizados varía, para el caso 1 es de 6708 metros; para el caso 2 es de 8516 metros y de 8716 metros para el caso tres. La diferencia entre estos niveles es comúnmente empleada para estimar el desarrollo vertical de la convección. En este sentido, se puede observar cómo los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos evidenciados en los productos de satélite. El desarrollo de tormentas convectivas profundas, en los tres casos es superior a los 6000 metros, coincidente con literatura previa para regiones altas del trópico (Díaz Esteban, 2020).

## CONCLUSIONES

El Altiplano Mexicano es una zona orográfica compleja donde año con año se presentan diversas manifestaciones de tiempo severo. Asimismo, concentra una gran población expuesta a peligros convectivos como son tormentas eléctricas, fuertes precipitaciones y caída de granizo. En México existe escasa investigación acerca de las granizadas y con la finalidad de mejorar el conocimiento de este fenómeno, así como su pronóstico, detección y la relación con otros sistemas de mesoescala asociados, son necesarios más estudios. En este contexto, el presente trabajo se centró en un análisis estadístico del granizo en el AL-ME. A partir de datos de cinco observatorios meteorológicos, se realizó un análisis de ciclo anual del granizo. Se encontró que los eventos de granizo, tormenta eléctrica y lluvia aumentan durante la etapa humedad en la región para los cinco observatorios analizados. Asimismo, que la mayor actividad es entre abril y octubre, y los puntos máximos de cada estación se observaron entre mayo, junio, julio y agosto.

Los observatorios de Puebla, Hidalgo y Tlaxcala mostraron un patrón similar en el análisis del ciclo anual del granizo, donde la mayor frecuencia de las

granizadas está relacionada a la cercanía con el Golfo de México, debido a que los flujos de humedad son predominantes. Está documentado en estudios previos que el forzamiento orográfico ayuda para que ocurran las granizadas con mayor frecuencia y que este forzamiento se observa en zonas ubicadas en partes altas. La zona de estudio ostenta los puntos más altos de la República Mexicana, especialmente la zona de la Faja Volcánica Transmexicana y es la zona con mayor índice de peligro por tormentas de granizo del país, por lo tanto, es posible que el forzamiento orográfico ayude para que ocurran las granizadas con mayor frecuencia.

Por otro lado, se seleccionaron tres eventos significativos de granizadas y con ayuda de los datos de reanálisis de ERA5, se realizaron compuestos de variables meteorológicas y sondeos de proximidad para cada uno de ellos. En la escala sinóptica se identificó que un sistema de alta presión sobre el Caribe fue predominante en nivel de superficie, mismo que mantuvo una circulación anticiclónica que favoreció la advección de humedad desde el golfo de México hacia la región de estudio. Además, predominó la existencia de una vaguada en superficie sobre el centro del país, misma que apoyó la convergencia y aunado a la inestabilidad existente, propició las condiciones necesarias para la formación de convección profunda en el AL-ME.

El análisis de los sondeos de proximidad mostró que no son necesarios altos valores de CAPE (superiores a los  $2500\text{ J/kg}$ ) para el desarrollo de tormentas y la caída de granizo en la región. Por otra parte, se identificaron condiciones de débil cizalladura del viento en niveles bajos y medios (de 850 a 500 hPa). Lo anterior se refuerza con la subsidencia de niveles altos provocada por la fuerte cizalladura del viento en 250 hPa y con niveles cercanos a la superficie de la isoterma de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Futuros estudios deberán centrarse en el análisis del granizo a nivel nacional, a fin de determinar patrones espaciotemporales. Asimismo, se requiere una mayor cantidad de estudios de caso que permitan determinar las condiciones ambientales necesarias para la formación de granizo. Esto puede realizarse a través de datos de reanálisis, como se abordó en la presente investigación, o bien a través de simulaciones numéricas, radiosondeos reales o

productos satelitales y de radar. El incremento del conocimiento sobre las granizadas en México es de vital importancia para los meteorólogos pronosticadores y tomadores de decisiones, y sigue siendo un reto para la meteorología operativa del país.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT IA101722), UNAM.

## REFERENCIAS

- Allen, J. T., y Tippett, M. K. (2021). The Characteristics of United States Hail Reports: 1955–2014. *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 10(3), 1–31. <https://doi.org/10.55599/ejssm.v10i3.60>
- Allen, J. T., Tippett, M. K., Kaheil, Y., Sobel, A. H., Lepore, C., Nong, S., y Muehlbauer, A. (2017). An extreme value model for U.S. hail size. *Monthly Weather Review*, 145(11), 4501–4519. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0119.1>
- Baldi, M., Ciardini, V., Dalu, J. D., De Filippis, T., Maracchi, G., y Dalu, G. (2014). Hail occurrence in Italy: Towards a national database and climatology. *Atmospheric Research*, 138, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.012>
- Banchero, S. (2017). *Evaluación de la capacidad de predicción de granizo de índices atmosféricos* [Tesis de Maestría, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales]. [https://www.researchgate.net/publication/320353261\\_Evaluacion\\_de\\_la\\_capacidad\\_de\\_prediccion\\_de\\_granizo\\_de\\_indices\\_atmosfericos](https://www.researchgate.net/publication/320353261_Evaluacion_de_la_capacidad_de_prediccion_de_granizo_de_indices_atmosfericos)
- Beal, A., Hallak, R., Martins, L. D., Martins, J. A., Biz, G., Rudke, A. P., y Tarley, C. R. T. (2020). Climatology of hail in the triple border Paraná, Santa Catarina (Brazil) and Argentina. *Atmospheric Research*, 234, 104747. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104747>
- Competella, E. (2018, November 11). *Cañones antigranizo: cuando nadie tiene razón*. <https://www.meteored.com.ar/noticias/actualidad/canones-antigranizo-cuando-nadie-tiene-razon.html>
- CONAGUA. (2010). *Manual Teórico Práctico del Observador Meteorológico de Superficie*. 278.
- Díaz Esteban, Y. (2020). *Transición de los cúmulos de los alisios a nubes de convección profunda* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera]. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3584740>
- Dube, R. K., y Rao, G. S. P. (2005). Extreme Weather Events over India in the last 100 years. *J. Ind. Geophys. Union*, 9(3), 173–187. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.583.2822yrep=replytype=pdf>
- Gagne, D. J., McGovern, A., Haupt, S. E., Sobash, R. A., Williams, J. K., y Xue, M. (2017). Storm-based probabilistic hail forecasting with machine learning applied to convection-allowing ensembles. *Weather and Forecasting*, 32(5), 1819–1840. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0010.1>
- Gensini, V. A., y Ashley, W. S. (2021). Climatology of Potentially Severe Convective Environments from the North American Regional Reanalysis. *E-Journal of Severe Storms Meteorology*, 6(8), 1–40. <https://doi.org/10.55599/ejssm.v6i8.35>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], s.f. (2021). <https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/territorio/clima.aspx>
- Jelić, D., Megyeri, O. A., Malečić, B., Belušić Vozila, A., Strelec Mahović, N., y Telišman Prtenjak, M. (2020). Hail Climatology Along the Northeastern Adriatic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(23). <https://doi.org/10.1029/2020JD032749>
- Jiménez, M., Baeza, C., Matías, L., y Eslava, H. (2012). *Mapas de Índices de Riesgo a escala Municipal por Fenómenos Hidrometeorológicos*. <http://www.atlas-nacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Methodologias/Hidrometeorologico.pdf>
- Kahraman, A., Tilev-Tanriover, Ş., Kadioglu, M., Schultz, D. M., y Markowski, P. M. (2016). Severe Hail Climatology of Turkey. *Monthly Weather Review*, 144(1), 337–346. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0337.1>
- Knapp, K. R., y Wilkins, S. L. (2018). Gridded Satellite (GridSat) GOES and CONUS data. *Earth System Science Data*, 10(3), 1417–1425. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1417-2018>
- Kunz, M., Sander, J., y Kottmeier, C. (2009). Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *International Journal of Climate*

- tology, 29(15), 2283–2297. <https://doi.org/10.1002/joc.1865>
- León-Cruz, J. F., Henken, C. C., Carbajal, N., y Fischer, J. (2021). Spatio-temporal distribution of deep convection observed along the trans-mexican volcanic belt. *Remote Sensing*, 13(6), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs13061215>
- León-Cruz, J. F., Caetano, E., Cortés-Ramos, J., Dominguez, C., y Méndez-Pérez, J. M. (2023). Thunderstorm and hailstorm environments in Mexico. *International Journal of Climatology*, n/a(n/a), 1–17. <https://doi.org/10.1002/joc.8093>
- Lkhamjav, J., Jin, H.-G., Lee, H., y Baik, J.-J. (2017). A hail climatology in Mongolia. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 53(4), 501–509. <https://doi.org/10.1007/s13143-017-0052-1>
- Martínez, R., Rojo, G., Ramírez, B., y Juárez, J. (2013). *Estudios y Propuestas Para el Medio Rural* (p. 205).
- Méndez, J., De Jesús, J., y González, V. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas*, 65(900), 38-55.
- Mezher, R. N., Doyle, M., y Barros, V. (2012). Climatology of hail in Argentina. *Atmospheric Research*, 114–115, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.05.020>
- Novo, S., y Raga, G. B. (2013). The properties of convective storms in central Mexico: A radar and lightning approach. *Atmósfera*, 26(4), 461–472. [http://trmm-fc.gsfc.nasa.gov/trmm\\_gv/](http://trmm-fc.gsfc.nasa.gov/trmm_gv/)
- Peña-Beltrán, Z. Y., y Pabón-Caicedo, J. D. (2020). Climatology of hailstorms in colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 259–282. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.75438>
- Prieto, R., Avendaño, A., Matías, L. G., y Eslava, H. (2021). *Fascículo de tormentas severas*. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/189-FASCCULOTORMENTASSEVERAS.PDF>
- Punge, H. J., Bedka, K. M., Kunz, M., y Reinbold, A. (2017). Hail frequency estimation across Europe based on a combination of overshooting top detections and the ERA-INTERIM reanalysis. *Atmospheric Research*, 198(June), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.07.025>
- Punge, H. J., y Kunz, M. (2016). Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, 176–177, 159–184. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.012>
- Ruiz, L. (2018, March). *Daña granizo cultivos de frutas y hortalizas en Puebla*. <https://www.e-consulta.com/nota/2018-03-22/sociedad/dana-granizo-cultivos-de-frutas-y-hortalizas-en-puebla>
- Santos, J. A., y Belo-Pereira, M. (2018). A comprehensive analysis of hail events in Portugal: Climatology and consistency with atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 39(1), 188–205. <https://doi.org/10.1002/joc.5794>
- Schemm, S., Nisi, L., Martinov, A., Leuenberger, D., y Martius, O. (2016). On the link between cold fronts and hail in Switzerland. *Atmospheric Science Letters*, 17(5), 315–325. <https://doi.org/10.1002/asl.660>
- Schuster, S. S., Blong, R. J., y Speer, M. S. (2005). A hail climatology of the greater Sydney area and New South Wales, Australia. *International Journal of Climatology*, 25(12), 1633–1650. <https://doi.org/10.1002/joc.1199>
- Taszarek, M., Czernecki, B., y Szuster, P. (2023). *thundeR - a rawinsonde package for processing convective parameters and visualizing atmospheric profiles*. <https://doi.org/10.5194/ecss2023-28>
- Zhang, C., Zhang, Q., y Wang, Y. (2008). Climatology of Hail in China: 1961–2005. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(3), 795–804. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1603.1>
- Zhou, Z., Zhang, Q., Allen, J. T., Ni, X., y Ng, C. (2021). How Many Types of Severe Hailstorm Environments Are There Globally? *Geophysical Research Letters*, 48(23), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2021GL095485>