



Caracterización de tormentas severas usando imágenes satelitales GOES-16 y procesamiento en paralelo

Jimena Ortiz Villalva

Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra,
Ciudad de México, México.
ORCID: 0009-0007-8028-3192

Erika Danaé López Espinoza

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático,
Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0003-2387-0335

Dulce Rosario Herrera Moro

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático,
Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0002-7889-154X

Jorge Zavala Hidalgo

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático,
Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0002-2737-434X

Juan Manuel De Santiago Rodríguez

Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra,
Ciudad de México, México.
ORCID: 0009-0002-2460-774X

Recepción: 26 de febrero de 2026.

Aceptación: 17 de abril de 2026.

Mayo 2026 • número de revista 15 • DOI: 10.22201/dgtic.26832968e.2026.15.146

Caracterización de tormentas severas usando imágenes satelitales GOES-16 y procesamiento en paralelo

Resumen

Las tormentas severas asociadas a convección profunda representan un riesgo importante en regiones urbanas como la Ciudad de México por su potencial para generar lluvia intensa, granizo y actividad eléctrica, fenómenos vinculados a inundaciones y daños urbanos. Este trabajo desarrolla un flujo computacional para la caracterización de tormentas severas a partir de observaciones del satélite GOES-16, integrando variables térmicas y eléctricas de los sensores *Advanced Baseline Imager* (ABI) y *Geostationary Lightning Mapper* (GLM). El análisis se aplicó a 169 eventos de tormenta severa ocurridos entre 2020 y 2023, utilizando esquemas de procesamiento en paralelo en infraestructura de cómputo de alto rendimiento. La metodología se basa en la estimación de la temperatura de brillo del tope de nube y la actividad eléctrica de las tormentas severas, con el fin de identificar los umbrales del ciclo de vida convectivo. Los umbrales estimados son: -33°C , asociado al inicio de la actividad eléctrica, y -55°C , vinculado con la transición hacia la fase madura de desarrollo. Asimismo, se implementó una adaptación regional de la composición RGB, desarrollada previamente para latitudes medias, permitiendo mejorar la identificación de la convección profunda para la Ciudad de México. Los productos resultantes operan actualmente para el monitoreo de tormentas severas en tiempo casi real.

Palabras Clave: tormentas severas, procesamiento paralelo, imágenes GOES-16, ciclo de vida convectivo, convección profunda.

Characterization of Severe Storms Using GOES-16 Satellite Imagery and Parallel Processing

Abstract

Severe storms associated with deep convection pose a significant hazard in urban regions such as Mexico City due to their potential to produce intense rainfall, hail, and electrical activity, phenomena linked to flooding and urban damage. This study develops a computational workflow for the characterization of severe storms using observations from the GOES-16 satellite, integrating thermal and electrical variables from the Advanced Baseline Imager (ABI) and the Geostationary Lightning Mapper (GLM). The analysis was applied to 169 severe storm events that occurred between 2020 and 2023, employing parallel processing schemes within a high-performance computing infrastructure.

The methodology is based on the estimation of cloud-top brightness temperature and storm electrical activity to identify thresholds associated with the convective life cycle. An estimated threshold of -33 °C is associated with the onset of electrical activity, while a threshold of -55 °C is linked to the transition toward the mature development phase. Additionally, a regional adaptation of an RGB composite originally developed for midlatitudes was implemented, improving the identification of deep convection under local atmospheric conditions for Mexico City. The resulting products are currently operating for near-real-time monitoring of severe storms.

Keywords: *severe storms, parallel processing, GOES-16 imagery, convective life cycle, deep convection.*

Introducción

Las tormentas severas asociadas a convección profunda representan un riesgo significativo en regiones urbanas densamente pobladas debido a su potencial para producir precipitación intensa, granizo, rachas de viento y elevada actividad eléctrica [1]-[5]. En la Ciudad de México (CDMX), este riesgo se ve amplificado por la alta concentración de la población e

infraestructura, así como por la limitada capacidad de infiltración del suelo urbano, lo que favorece inundaciones recurrentes durante la temporada de lluvias.

El seguimiento de la convección profunda se ha beneficiado del uso de satélites geoestacionarios, que proporcionan observaciones continuas con alta resolución temporal [10]. En particular, el satélite GOES-16 incorpora el sensor ABI, que permite caracterizar propiedades térmicas y espectrales de las nubes, y el GLM, que observa la actividad eléctrica total asociada a sistemas convectivos [11] y [14]. La temperatura de brillo en el infrarrojo, especialmente en torno a $10.3 \mu\text{m}$, se ha utilizado ampliamente como indicador de la altura del tope de nube y de la intensidad de las corrientes ascendentes [4], [5], mientras que la actividad eléctrica refleja los procesos microfísicos y dinámicos internos.

Diversos estudios han mostrado que incrementos abruptos en la tasa de descargas eléctricas, conocidos como lightning jumps, pueden preceder a la intensificación convectiva y a la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos severos [12], [13]. Sin embargo, muchos de los criterios operativos y umbrales reportados han sido desarrollados para latitudes medias, por lo que su aplicación en regiones tropicales y subtropicales no es óptima y resulta necesario estimarlos para estas regiones [15].

El análisis conjunto de variables térmicas y eléctricas, a partir de los sensores ABI y GLM, ofrece una vía para caracterizar de forma más completa el ciclo de vida convectivo de las tormentas severas. No obstante, la alta resolución temporal y espacial de los productos satelitales generan grandes volúmenes de datos para ser procesados cuando se analizan múltiples eventos, imponiendo retos computacionales para un procesamiento sistemático.

En este trabajo, se desarrolló e implementó un flujo computacional para la caracterización de tormentas severas a partir de datos ABI y GLM del satélite GOES-16. Se caracterizaron 169 eventos ocurridos en la región centro-oriental de México, con énfasis en los que afectaron a la CDMX. El análisis se centró en la estimación de umbrales regionales térmicos y eléctricos, asociados a distintas etapas del ciclo de vida convectivo de las tormentas severas; éste destacó el papel del procesamiento en paralelo como la herramienta para la reproducibilidad, el escalamiento y el análisis. Todo lo anterior tuvo el objetivo de tener una herramienta operativa y un visualizador, en tiempo casi real, del desarrollo y ciclo de vida de las tormentas severas.

Desarrollo

Zona de estudio

La zona de estudio comprende la Ciudad de México y sus alrededores, definida por un dominio geográfico rectangular entre 18.24° y 20.66° N de latitud, así como 100.19° y 97.58° O de longitud. Este dominio, en adelante denominado CDMX, cubre una superficie aproximada de 73,170 km² y permite capturar tanto los sistemas convectivos que se desarrollan sobre la ciudad, como aquellos que la afectan desde regiones circundantes.

Base de datos y selección de eventos

Se analizaron 169 eventos de tormenta severa ocurridos entre 2020 y 2023. Se emplearon datos satelitales GOES-16 de los sensores ABI y GLM en formato NetCDF, obtenidos del repositorio de Datos Abiertos en el *bucket* S3 de Amazon Web Services (AWS) [16].

Del sensor ABI, se utilizó el producto Cloud and Moisture Imagery (CMI), considerando ocho bandas (B02, B05, B07, B08, B10, B11, B13 y B15) seleccionadas por su relevancia para el análisis de la convección profunda y la construcción de composiciones RGB [11]. Del sensor GLM, se emplearon los productos de eventos, grupos y destellos para caracterizar la evolución de la actividad eléctrica [14].

Flujo computacional y procesamiento en paralelo

La combinación de múltiples bandas ABI con una alta frecuencia temporal de GLM implicó el manejo de un volumen de datos del orden de 10⁶ archivos para el conjunto de eventos de tormenta severa analizados. Para abordar este reto, se implementó, en el clúster Ometeotl del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático de la UNAM, un flujo automatizado de descarga, reproyección, recorte y generación de productos (imágenes RGB).

Los archivos con datos ABI se proyectaron desde la proyección geoestacionaria nativa a una grilla regular en coordenadas geográficas y, posteriormente, se recortaron al dominio de la CDMX.

Para la descarga de datos, se ejecutaron cuatro trabajos de descarga en el administrador de trabajos Slurm. No se ejecutaron más trabajos de descarga para evitar la saturación del ancho de banda.

La proyección de la imagen se realizó con la función `ImageContainerNeares` de la biblioteca especializada en el manejo de datos geoespaciales y satelitales `Pyresample`, la cual dividió la imagen en bloques e hizo que se procesarán de forma independiente y paralela. Para reproyectar y recortar cada banda al dominio CDMX, se utilizaron 20 núcleos de un nodo de procesamiento del clúster Omteotl. Los datos reproyectados y recortados se almacenaron en un archivo en formato NetCDF.

La generación de los productos satelitales se hizo con un programa que originalmente era serial, el cual leía las imágenes reproyectadas con sus diferentes bandas para cada hora de cada evento de estudio. Considerando que la generación de una imagen RGB es independiente de la otra, se utilizó la biblioteca `Multiprocessing` de Python, con la cual se refactorizó el programa serial para generar de manera independiente y paralela cada imagen RGB horaria haciendo uso de un núcleo del nodo de procesamiento. Con ello, se obtuvo un programa en paralelo que redujo el tiempo de procesamiento en aproximadamente un 88.6%, aprovechando los 44 núcleos del nodo asignado. La paralelización fue esencial porque, dependiendo del caso de estudio, se podían procesar hasta 2,880 imágenes y los eventos de tormenta severa analizados fueron 169 casos.

Integración térmica y eléctrica

El análisis se basó en la temperatura de brillo del tope de nube obtenida a partir de la banda 13 (10.3 μm) del sensor ABI, utilizada como referencia térmica principal. Para cada imagen infrarroja se identificaron las descargas eléctricas registradas por el sensor GLM dentro del dominio CDMX y se asoció a cada descarga la temperatura de brillo correspondiente. Esta integración permitió construir series temporales y distribuciones estadísticas que describen la relación entre el enfriamiento del tope de nube y la evolución de la actividad eléctrica [12]-[15].

A partir de este análisis conjunto, se identificaron umbrales regionales térmicos asociados a la convección profunda. En particular, se observó un umbral cercano a -33°C ,

asociado al inicio de la actividad eléctrica, y un segundo umbral alrededor de -55°C , vinculado con un incremento marcado en dicha actividad y con la transición hacia la fase madura de la tormenta severa.

Productos satelitales y caracterización convectiva

Con base en los umbrales térmicos identificados, se desarrolló un producto combinado ABI-GLM, en el que la temperatura de brillo del tope de nube se representa de manera continua y la actividad eléctrica se superpone espacialmente. Este producto permite seguir la evolución espacio-temporal de los sistemas convectivos e identificar transiciones entre las fases de desarrollo, madurez y disipación de la tormenta severa.

De manera complementaria, se implementaron composiciones RGB orientadas a la caracterización de la convección. La RGB de convección diurna se utilizó para clasificar la intensidad convectiva, mientras que la RGB de fase de nubes fue ajustada regionalmente para adecuarla a las condiciones atmosféricas y radiativas de la región centro-oriental de México, siguiendo criterios similares a los reportados en la literatura [11] y [15]. Este ajuste permitió mejorar la identificación de nubes profundas con topes de hielo de manera más consistente y reproducible para contextos operativos regionales.

Para el análisis nocturno, se empleó la composición RGB de la microfísica nocturna, lo que permitió extender el seguimiento del ciclo convectivo a periodos sin información visible. Además, la evolución temporal de la actividad eléctrica se analizó mediante el cálculo de tasas de cambio en el número de descargas, permitiendo identificar incrementos abruptos asociados a procesos de intensificación convectiva.

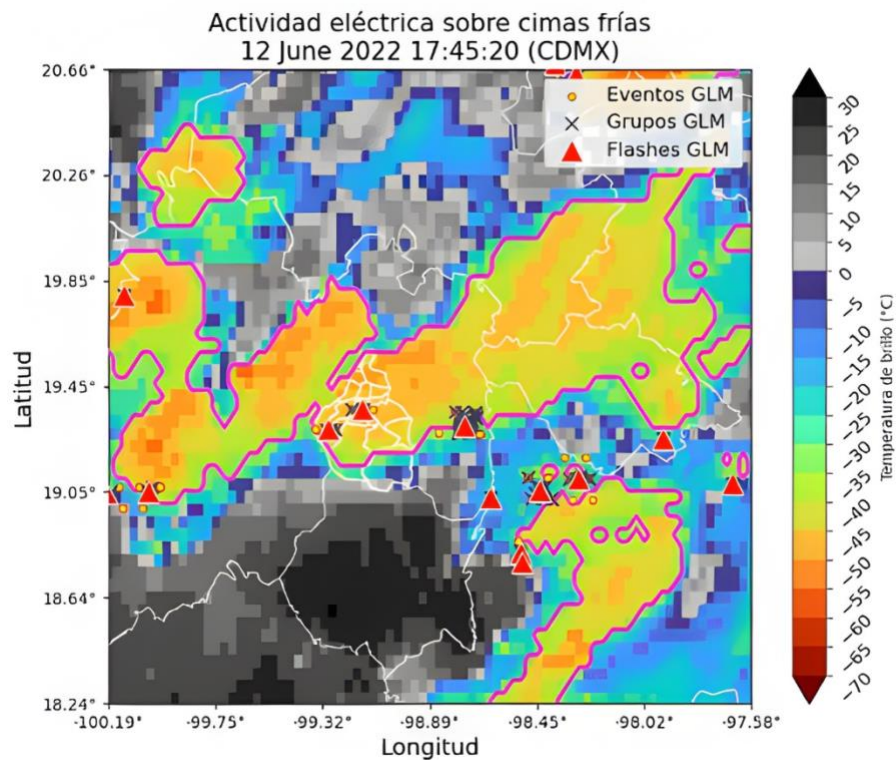


Fig.1. Temperatura de brillo del tope de nube (banda 13 del ABI) y actividad eléctrica del GLM durante la tormenta del 12 de junio de 2022 a las 17:45:20 h (hora local), poco antes de su punto más intenso. La escala muestra la temperatura (°C); los contornos en magenta indican la isoterma de -33°C . Los símbolos señalan los eventos, grupos y flashes detectados dentro del área de estudio.

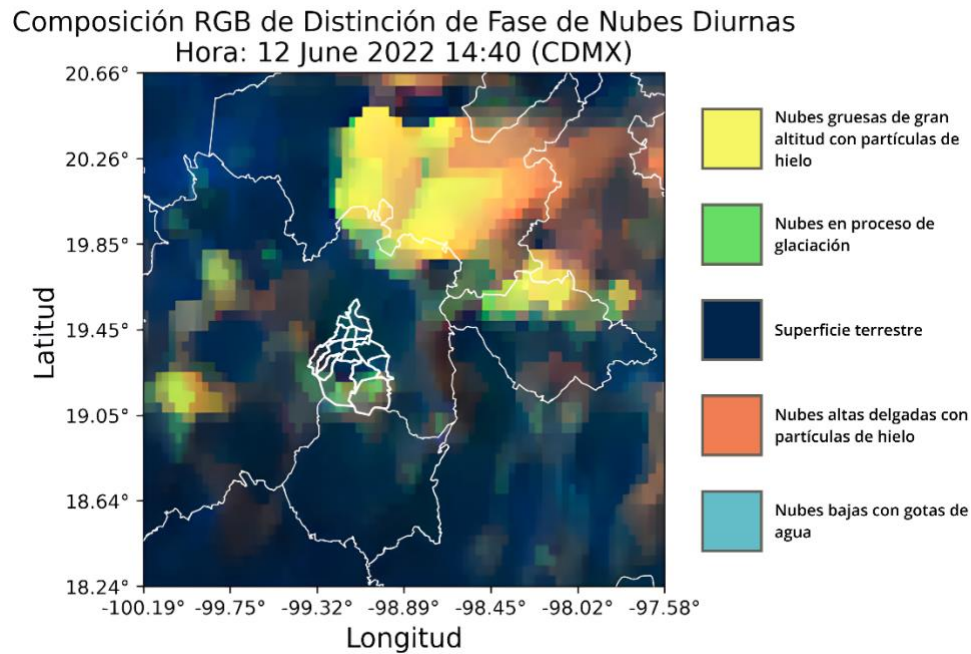


Fig. 2. Composición RGB de convección diurna, versión ajustada para el Valle de México, correspondiente al 12 de junio de 2022. Los colores permiten distinguir la fase de las cimas nubosas a partir de umbrales definidos para esta región.

Umbrales regionales operativos del ciclo de vida convectivo

El análisis integrado permitió definir tres rangos térmicos representativos del ciclo de vida convectivo de las tormentas severas. La etapa de desarrollo se asoció a temperaturas de tope de nube cercanas a -33°C , coincidiendo con el inicio de la actividad eléctrica. La transición hacia la fase madura se observó alrededor de -55°C , acompañada por un incremento abrupto en la actividad eléctrica y por señales espectrales consistentes con convección profunda. Finalmente, temperaturas cercanas o inferiores a -70°C se asociaron al inicio de la disipación, caracterizada por una disminución rápida de la actividad eléctrica. En la Tabla 1, se muestran los diferentes umbrales regionales estimados para diferentes variables que describen cada una de las etapas del ciclo de vida convectivo de las tormentas severas en la Ciudad de México.

I. Tabla

Características estimadas del ciclo de vida convectivo de las tormentas severas desarrolladas en la Ciudad de México para el periodo de 2020 a 2023

Etapa del ciclo de vida	Variable	Fuente	Rango numérico	Criterio de clasificación	Interpretación física
Desarrollo	Temperatura de tope de nube (Tb)	ABI Banda 13	$Tb \leq -33^{\circ}\text{C}$	Umbral térmico	El tope de la nube comienza a enfriarse, indicando crecimiento vertical inicial
	Green (G) normalizado	RGB Convección	0.27-0.45	Convección débil	Señal RGB asociada a nubes un poco profundas
	ΔT (G)	RGB Convección	-43 a -31$^{\circ}\text{C}$		Diferencias térmicas pequeñas, típicas de etapas iniciales
	Red (R) normalizado	RGB Convección	.74 - 0.85		Estructura térmica poco contrastada en la cima
	ΔT (R)	RGB Convección	-5 a -1$^{\circ}\text{C}$		Señal térmica débil asociada al inicio del desarrollo
Madurez	Temperatura de tope de nube (Tb)	ABI Banda 13	$-55^{\circ}\text{C} < Tb \leq -33^{\circ}\text{C}$	Umbral térmico	El tope alcanza temperaturas muy frías, asociadas a la máxima altura.
	Green (G) normalizado	RGB Convección	0.47 - 0.63	Convección moderada	Señal RGB intensa, asociada a convección activa

Etapa del ciclo de vida	Variable	Fuente	Rango numérico	Criterio de clasificación	Interpretación física
	ΔT (G)	RGB Convección	-30 a -19°C		Incremento del contraste térmico en la cima
	Red (R) normalizado	RGB Convección	0.74 - 0.87		Núcleo convectivo bien definido
	ΔT (R)	RGB Convección	-5 a 0°C		Mayor contraste térmico respecto al desarrollo.
	Green (G) normalizado	RGB Convección	0.64 - 0.90	Convección fuerte	Señal RGB muy intensa, asociada a nubes profundas
	ΔT (G)	RGB Convección	-18 a -2°C		Grandes diferencias térmicas, indicativas de convección profunda
	Red (R) normalizado	RGB Convección	0.76 - 0.89		Núcleo convectivo muy bien definido
	ΔT (R)	RGB Convección	-5 a +1°C		Máximo contraste térmico observado
Disipación	Temperatura de tope de nube (Tb)	ABI Banda 13	Tb \leq -70°C	Umbral térmico	Persisten topes fríos, pero la nube deja de intensificarse
	Green (G) normalizado	RGB Convección	0.27 - 0.45	Convección débil	Señal RGB débil asociada a nubes remanentes

Etapa del ciclo de vida	Variable	Fuente	Rango numérico	Criterio de clasificación	Interpretación física
	ΔT (G)	RGB Convección	-43 a 31°C		Reducción del contraste térmico respecto a la fase madura
	Red (R) normalizado	RGB Convección	0.74 - 0.85		Estructura térmica menos definida
	ΔT (R)	RGB Convección	-5 a -1°C		Señal térmica residual durante la disipación

Conclusiones

Este trabajo presentó una caracterización de nubes convectivas profundas asociadas a tormentas severas en la Ciudad de México a partir de imágenes satelitales del GOES-16, integrando variables térmicas y eléctricas derivadas de los sensores ABI y GLM. Al revisar la evolución de los casos se observó que los criterios definidos para latitudes medias no pueden aplicarse tal cual en la Ciudad de México. Las condiciones atmosféricas no son las mismas y eso se refleja en los valores de temperatura. Las recetas RGB desarrolladas para latitudes medias consideran toques de nube más fríos que los que normalmente se registran en nuestra región. Aquí los valores suelen ser más cálidos, y esa diferencia modifica los umbrales con los que se interpretan las distintas etapas de la tormenta.

Por ello fue necesario ajustar las recetas y trabajar con valores acordes a la región. El análisis permitió identificar temperaturas que se repiten a lo largo de los casos estudiados. En varios eventos, valores cercanos a -33 °C coinciden con el inicio de la actividad eléctrica. Alrededor de -55 °C se observa el paso hacia la fase madura, momento en el que los incrementos de actividad eléctrica son más notorios. Al integrar estos valores con productos combinados ABI-GLM y con composiciones RGB adaptadas a la región, se obtiene una base práctica para el seguimiento de la convección profunda en la Ciudad de México.

Los resultados de esta investigación se pueden consultar en el sitio <https://pronosticos.atmosfera.unam.mx/operativo/index.php/sevstorm>

Agradecimiento

Esta investigación ha sido apoyada por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI) de la Ciudad de México bajo el proyecto “Sistema piloto de alertamientos hidrometeorológicos para la Ciudad de México” - SECTEI/145/2024. Asimismo, contó con el apoyo de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), mediante la beca otorgada para la realización de estudios de maestría, registrada con CVU No. 1343182. Estos apoyos hicieron posible dedicar tiempo, atención y continuidad al desarrollo de este trabajo.

Referencias

- [1] H. R. Byers and R. R. Braham, *The Thunderstorm*. Washington, DC, USA: U.S. Government Printing Office, 1949.
- [2] C. A. Doswell III, “Severe convective storms—An overview,” in *Severe Convective Storms*, Meteorological Monographs, vol. 28, no. 50. Boston, MA, USA: American Meteorological Society, 2001, pp. 1–26.
- [3] J. M. Wallace and P. V. Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, 2nd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2006, doi: 10.1016/C2009-0-00034-8.
- [4] W. R. Cotton, G. H. Bryan, and S. C. van den Heever, “Cumulonimbus clouds and severe convective storms,” in *Storm and Cloud Dynamics*, Int. Geophys., vol. 99, pp. 315–454, 2011, doi: 10.1016/S0074-6142(10)09914-6.
- [5] R. A. Houze Jr., “Cumulonimbus and severe storms,” in *Cloud Dynamics*, 2nd ed., Int. Geophys., vol. 104. Oxford, U.K.: Academic Press, 2014, pp. 187–236, doi: 10.1016/B978-0-12-374266-7.00008-1.

- [6] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Censo de Población y Vivienda 2020*. Mexico City, Mexico, 2020. [Online]. Disponible: <http://www.inegi.org.mx>
- [7] Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), Consejo Nacional de Población (CONAPO), and Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015*. Mexico City, Mexico, 2018. [Online]. Disponible: <https://www.gob.mx/sedatu>
- [8] Y. Chen and A. M. Bilton, "Water stress, peri-urbanization, and community-based water systems: A reflective commentary on the metropolitan area of Mexico City," *Frontiers in Sustainable Cities*, vol. 4, p. 790633, 2022, doi: 10.3389/frsc.2022.790633.
- [9] J. M. Montero-Martínez and M. Andrade-Velázquez, "Effects of urbanization on extreme climate indices in the Valley of Mexico Basin," *Atmosphere*, vol. 13, no. 5, p. 785, 2022, doi: 10.3390/atmos13050785.
- [10] S. Q. Kidder and T. H. Vonder Haar, *Satellite Meteorology: An Introduction*. San Diego, CA, USA: Academic Press, 1995.
- [11] T. J. Schmit *et al.*, "A closer look at the ABI on the GOES-R series," *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 98, no. 4, pp. 681–698, Apr. 2017, doi: 10.1175/BAMS-D-15-00230.1.
- [12] E. R. Williams *et al.*, "The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms," *Atmospheric Research*, vol. 51, no. 3–4, pp. 245–265, 1999.
- [13] C. J. Schultz, W. A. Petersen, and L. D. Carey, "Lightning and severe weather: A comparison between total and cloud-to-ground lightning trends," *Weather and Forecasting*, vol. 26, no. 5, pp. 744–755, Oct. 2011, doi: 10.1175/WAF-D-10-05026.1.
- [14] S. J. Goodman *et al.*, "The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM)," *Atmospheric Research*, vol. 125–126, pp. 34–49, 2013, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.01.006.
- [15] K. C. Thiel, K. M. Calhoun, A. E. Reinhart, and D. R. MacGorman, "GLM and ABI characteristics of severe and convective storms," *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, vol. 125, no. 17, p. e2020JD032858, 2020, doi: 10.1029/2020JD032858.

- [16] National Oceanic and Atmospheric Administration, "GOES-16 Data on AWS," Amazon Web Services S3 Open Data Repository. [Online]. Available: <https://noaa-goes16.s3.amazonaws.com/index.html>