

Caracterización de los rayos, en la proximidad del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de México (2018 - 2023)



<https://cu-id.com/2377/v31n3e03>

Characterization of Lightning in the Vicinity of Benito Juárez International Airport, Mexico (2018-2023)

✉Lemay Entenza Tilman^{1*}, ✉José Francisco León-Cruz², ✉Naxhelli Ruiz Rivera³, ✉Uriel de Jesús Mendoza Castillo⁴

¹Posgrado de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. México.

²Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. México. E-mail: jleon@geografia.unam.mx

³Departamento de Geografía Social, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. México. E-mail: nruiz@geografia.unam.mx

⁴Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. México. E-mail: urielmendozacastillo@gmail.com

RESUMEN: La vulnerabilidad del espacio aéreo de la Ciudad de México, ante la actividad eléctrica de los rayos, está aumentando debido a la mayor frecuencia e intensidad de las tormentas convectivas. Los rayos representan un riesgo significativo para la seguridad de la población y las actividades económicas. Entre sus impactos se encuentran los cortes de energía, que afectan la confiabilidad y el rendimiento de las instalaciones aeroportuarias si no están adecuadamente protegidas. En este estudio se generó una caracterización de los rayos en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México, para el periodo 2018-2023, evaluando su distribución espacial y temporal. Lo anterior permitió establecer las bases para el monitoreo en las fases de vuelo de proximidad al aeródromo. Para ello, se empleó la representación cartográfica para dos fases de vuelo y la instalación aeroportuaria utilizando el método no paramétrico de "Kernel Density Estimation". La caracterización generada, en relación con la proximidad espacial, permitió analizar las características de esta amenaza y vincularlas a sus consecuencias directas e indirectas. Los resultados muestran que la actividad eléctrica varía según el espacio geográfico de las fases de vuelo de proximidad, por lo que el contexto operacional no es similar y requiere de un monitoreo, atendiendo a uno de los requisitos operacionales de la Organización Internacional de la Aviación Civil.

Palabras clave: aeródromo, ciudad de México, peligro, rayos tormentas eléctricas, vulnerabilidad.

ABSTRACT: The vulnerability of Mexico City's airspace to lightning activity is increasing due to the higher frequency and intensity of convective storms. Lightning represents a significant risk to the safety of the population and economic activities. Among its impacts are power outages, which affect the reliability and performance of airport facilities if they are not adequately protected. In this study, a characterization of lightning activity at Mexico City International Airport (Benito Juárez International Airport) was carried out for the period 2018-2023, evaluating its spatial and temporal distribution. This provided the basis for monitoring during flight phases in proximity to the aerodrome. To this end, cartographic representation was used for two flight phases and the airport facility, employing the non-parametric "Kernel Density Estimation" method. The generated characterization, in relation to spatial proximity, allowed for the analysis of the characteristics of this threat and its direct and indirect consequences. The results show that lightning activity varies according to the geographic area of the proximity flight phases, indicating that the operational context is not the same and requires monitoring, in compliance with one of the operational requirements of the International Civil Aviation Organization (ICAO).

Keywords: aerodromes, hazard, thunderstorms, lightning, Mexico City, vulnerability.

*Autor para la correspondencia: Lemay Entenza Tilman, e-mail: lemay081976@gmail.com

Recibido: 12/12/2024

Aceptado: 06/08/2025

Conflictos de interés: Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Contribución de autoría: Lemay Entenza Tilman: Conceptualización, Análisis Formal, Investigación, Visualización, Redacción - Borrador Original, Redacción - Revisión y Edición. José Francisco León-Cruz: Redacción - Borrador Original, Análisis Formal. Naxhelli Ruiz Rivera: Redacción - Borrador Original, Análisis Formal. Uriel de Jesús Mendoza Castillo: Curación de Datos, Visualización, Análisis Formal.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El presente estudio aborda el problema de la insuficiente comprensión de la distribución espacio-temporal de los rayos en las áreas de proximidad del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM), un aspecto crítico para la seguridad operativa y la infraestructura aeronáutica. Aunque se ha documentado ampliamente la relación entre actividad eléctrica y precipitación, numerosos estudios ([Batlan, 1965](#); [Mac Gorman y Rust, 1998](#); entre otros) evidencian que no siempre existe una correlación directa entre ambos fenómenos, lo que complica la gestión de riesgos.

El estado del arte revela que los rayos han sido analizados desde diversas perspectivas: su relación con la precipitación, su impacto en la aviación ([Solazzo et al., 2020](#)), su distribución espacial ([Maduranga & Edirisinghe, 2021](#)) y su estacionalidad climática ([Núñez et al., 2019](#)). También se ha abordado su amenaza a la infraestructura urbana y aeroportuaria ([Graves et al., 2019](#); [Betz et al., 2009](#)). Sin embargo, en México y particularmente en el AICM, existen vacíos de conocimiento sobre este tipo de fenómenos, a pesar de su creciente relevancia y del papel que juega la urbanización como factor modificador del clima ([Larena, 2022](#)). No obstante, este tipo de fenómenos meteorológicos ha cobrado especial relevancia en el país, e investigaciones recientes se han enfocado también en el mapeo del riesgo asociado combinando tanto factores naturales como sociales ([Jaramillo & Domínguez, 2024](#)).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar la amenaza que representan los rayos para el espacio aéreo de proximidad al AICM, mediante el análisis de datos meteorológicos aeronáuticos y observaciones del satélite GOES-16.

La carencia de datos detallados sobre la distribución espacio-temporal de los rayos en las áreas de proximidad al AICM limita la capacidad de implementar estrategias efectivas de mitigación y protección. Dada la relevancia de este tipo de eventos para la seguridad operativa y la infraestructura aeronáutica, se requiere un enfoque que permita caracterizar esta amenaza y mejorar las medidas preventivas.

En este contexto, el propósito de este estudio fue el análisis de la distribución espacial y temporal de los rayos que ocurren en el espacio geográfico de las fases de vuelo próximo al AICM a través de los datos proporcionados por las observaciones meteorológicas aeronáuticas y el satélite GOES-16. El estudio permitió tener un monitoreo y vigilancia para las áreas de proximidad y observar los elementos aeronáuticos del espacio aéreo de proximidad. Los hallazgos del estudio podrían favorecer la generación de mejores estrategias de mitigación de los posibles impactos a través de una protección adecuada contra rayos, mientras se mantienen operaciones confiables y seguras.

El alcance incluyó el monitoreo detallado de estos eventos para generar evidencia que fortalezca las estrategias de mitigación de riesgos. Los resultados pretenden contribuir a una mejor protección contra descargas eléctricas, al tiempo que se preservan condiciones operativas seguras y confiables en el entorno aeroportuario.

MATERIALES Y MÉTODOS

La delimitación geográfica de este estudio se basó en el planteamiento de [Entenza et al. \(2024\)](#), con la diferencia de que abarcó tres áreas anidadas de diferentes escalas cartográficas asociadas a las distintas fases de vuelo, como se ilustra en la [Figura 1](#). La primera área correspondió al límite de observación de los fenómenos meteorológicos en el aeropuerto y su vecindad, estipulado entre 8 y 10 millas náuticas de radio desde la ubicación geográfica del aeropuerto, conforme a lo establecido en el Manual Meteorológico del Observador (MMO, 2019). La segunda área se enfocó en los tramos de aproximación final, mientras que la tercera comprendió el área de la instalación del aeropuerto.

Otros elementos cartográficos como las rutas de llegadas y de salidas y los procedimientos de aterrizajes - despegues fueron representados para la caracterización; ya que se consideran elementos esenciales para la seguridad del vuelo en todas las fases, pero especialmente durante la aproximación y la aproximación final.

La delimitación propuesta de las áreas de estudio permitió una interpretación de elementos fundamentales en los estudios de la geografía cuantitativa, asegurando la representatividad y pertinencia de la información empleada, así como de las estrategias de representación cartográfica para caracterizar la densidad de rayos. En este sentido, se representaron los mapas de densidad por tormentas eléctricas a escalas cartográficas de 1:20 000, 1:100 000 y 1:150 000, dado que muestran los límites geográficos y elementos de la cartografía aeronáutica en las cartas aéreas, que, por su importancia, en el contexto que se analiza, no han sido representadas.

Para la escala cartográfica a escala 1:20 000, se tomó en cuenta el área del AICM, localizado en los 19°26'09.4860" N y 099°04'24.2145" O entre pistas 05L/23R y 05R/23L, a una distancia de 6.3 km al centro histórico de la Ciudad de México y con una elevación de 2224 msnm (7297 pies) ([AIP, 2021](#)). Las escalas cartográficas de 1:175 000 y 1:200 000 vinculan la fase de vuelo de aproximación final y un límite geográfico. Por otra parte, dadas las características de estas zonas es posible referir geográficamente algunos elementos expuestos del plano de aeródromo, cartas y sistema montañoso que desde el noreste y en dirección hacia el sureste, sur, suroeste y oeste,

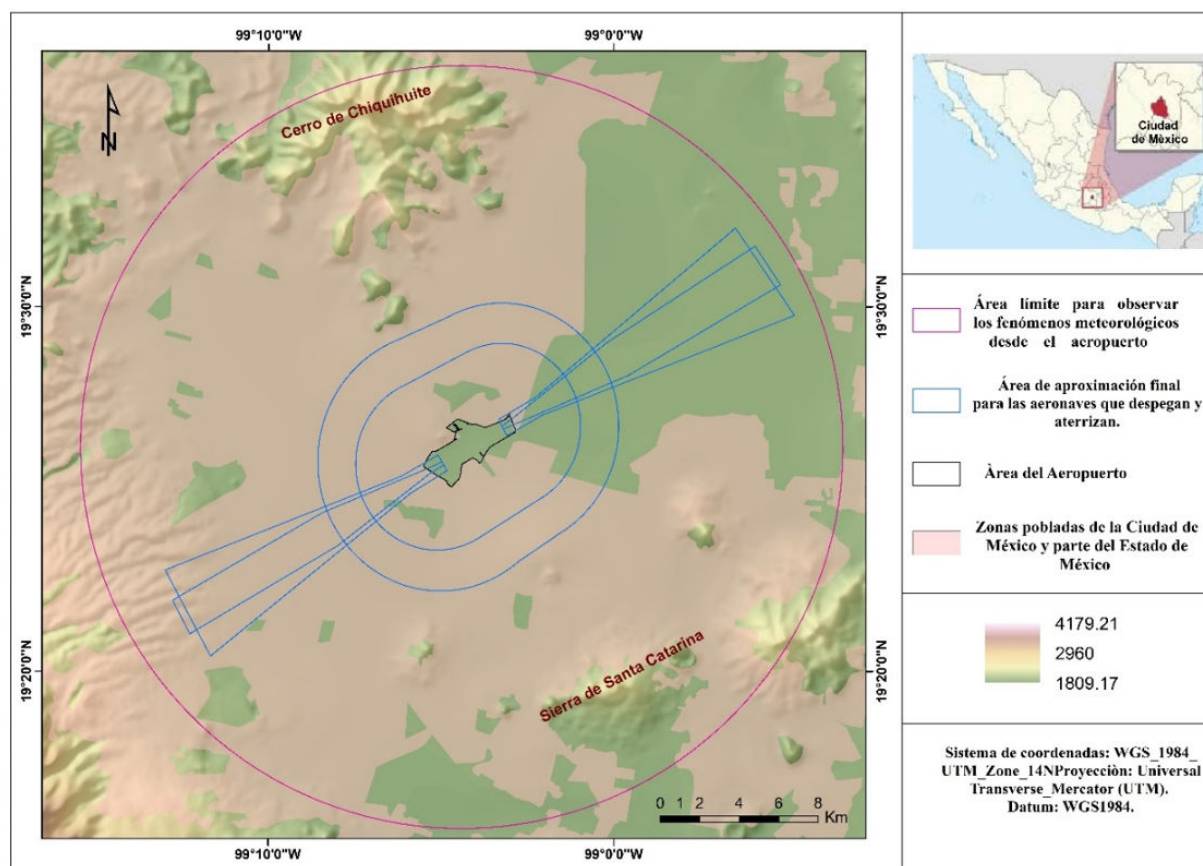


Figura 1. Áreas de estudio

donde se presentan alturas que oscilan entre los 1500 a 5900 msnm, aproximadamente; además, cubre una parte del área urbana de la Ciudad de México (CDMX) y el Estado de México (EDOMEX) (Fig. 1).

Para la caracterización de los rayos, se desarrolló una metodología que consta de cuatro etapas: procesamiento de los datos para identificar los días con tormenta eléctrica; extracción de los rayos georreferenciados para las áreas de estudio; aplicación del método de kernel para el conjunto de datos de rayos y análisis de resultados con base en la estadística descriptiva y las representaciones cartográficas de los mapas de densidad.

La propuesta de las áreas para caracterizar los rayos en diferentes fases de vuelo define las escalas cartográficas y geográficas con relación a los elementos y enfoque de la Geografía Cuantitativa y la Geografía de los Riesgos. Lo anterior, dado que el primero utiliza métodos numéricos y modelos matemáticos para estudiar patrones y procesos geográficos a diferentes escalas, lo cual es fundamental para la caracterización de esta amenaza; y el segundo, caracteriza la frecuencia y la intensidad de los rayos en diferentes áreas, crucial para evaluar y mitigar los riesgos asociados.

Para esta investigación se utilizaron los datos del *Meteorological Aerodrome Report* (METAR) y el *Special Report of Meteorological Conditions* (SPECI), de la estación MMMX

(correspondiente al AICM), obtenidos del sitio electrónico de la [Universidad del Estado de Iowa para el periodo 2018-2023](https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml) (<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>, consultado 10 de enero 2024).

El METAR es un reporte meteorológico emitido de forma horaria en un aeródromo y se emplea por el personal técnico aeronáutico para observar y emitir las condiciones meteorológicas dentro del aeropuerto (y su vecindad), con el fin de garantizar la seguridad en las operaciones aéreas. El SPECI se difunde en cualquier momento siempre y cuando cumplan con los requisitos emitido por el Anexo 3 del Convenio de Aviación Civil Internacional (OACI, 2016). Aquí, se identifican las observaciones meteorológicas aeronáuticas, tal como se especifica en el MMO (2019).

Para este estudio, los datos cubren 6 años (enero de 2018 a diciembre de 2023). Si bien no se considera información climatológica, como lo menciona Montealegre (2009), en el caso de los estudios climáticos en la aviación, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), en el Anexo 3, plantea que se deben utilizar series de datos meteorológicos de, al menos, 5 años (OACI, 2013).

Los datos se integraron en tablas en el programa Excel y se realizó una selección de los códigos meteorológicos aeronáuticos que describen los días con tormentas eléctricas,

como lo indica Kepski & Kubicki (2022). El objetivo final de este proceso fue generar una base de datos de los días con tormentas eléctricas en las áreas de proximidad para las fases de vuelo, próximas al AICM, y triangular los datos con las imágenes de satélite del *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES-16); y finalmente, utilizar la cartografía aeronáutica y segregar la actividad eléctrica por fases de vuelo.

Del conteo de las observaciones meteorológicas aeronáuticas se contempló la cantidad de rayos total registrados, por cada observación en cada zona, a través de los datos georreferenciados por el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) de la Universidad Nacional Autónoma de México. Empleando datos del *Lightning Research at the Global Hydrometeorology Resource Center Distributed Active Archive Center* (GHRC DAAC) del *Geostationary Lightning Mapper* (GLM, por sus siglas en inglés) montado sobre el satélite GOES-16. Esto permitió elaborar tres mapas de distribución espacial de la densidad de rayos para las áreas de proximidad del AICM en el periodo 2018 - 2023.

Los datos del GLM proporcionaron una medida cuantitativa de la calidad de las observaciones *in situ* (es decir, de los METAR y SPECI), lo que permitió la comparación con la fuente de información primaria (Entenza et al., 2024). Además, sirvió para validar las observaciones de la estación meteorológica del aeropuerto.

Las imágenes generadas posibilitan un análisis detallado de las amenazas asociadas con los rayos, ya que se notifican como los puntos centrales de los píxeles del GLM. La detención de los rayos se realiza con los eventos dado que, según Goodman et al. (2012), es la unidad más básica y no tiene ningún tipo de algoritmo de análisis; además, permite realizar un análisis de su distribución espacial. En este sentido se analizaron los recuentos de relámpagos para cada área a fin de examinar los patrones mensuales y diarios de actividad de relámpagos para cada área de estudio.

Para el análisis de densidad, se utilizó el método de *Kernel Density Estimation* (KDE), que, de acuerdo con Amat (2021), permite estimar la función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria a partir de un número finito de observaciones. El método de KDE permite validar y visualizar el patrón espacial de la densidad de rayos. Esta metodología ha sido utilizada previamente por He et al. (2021) para un estudio en los aeropuertos del territorio de los Estados Unidos de América (EE. UU.). La densidad de Kernel se aplica comúnmente para evaluar patrones puntuales en el espacio y estimar estadísticamente una superficie de densidad continua (Bolstad, 2016). Este método calcula, por interpolación, la densidad de los rayos que posteriormente fue transformado a rayos por km²).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre el 2018 y el 2023 en el espacio geográfico de la distancia límite para observar los fenómenos en la vecindad del aeropuerto, se produjeron un total 4,805 rayos. Para el área de aproximación fueron 1,594 y para el área del aeropuerto 319. El análisis de la actividad eléctrica arrojó como resultado que el año de mayor actividad fue el año 2023 con 1,571 total de rayos para el área límite de observación de los fenómenos meteorológicos. El año 2018 es el más significativo para el área de aproximación final con 427 total de rayos, mientras que para el área del AICM es de 137 en el año 2020 (Figura 2).

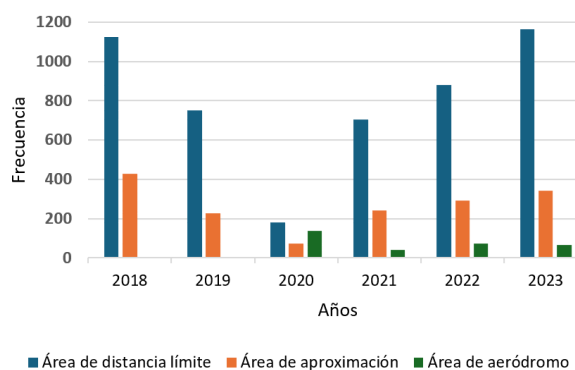


Figura 2. Distribución anual del total de rayos georreferenciados en las áreas de estudio durante el periodo de 2018 a 2023

En el periodo de estudio (2018 - 2023), el año 2023 registró la mayor cantidad de reportes de rayos en el AICM. Aunque no se establece una relación directa con la precipitación, se sostiene la hipótesis defendida por Jarayanet (1995) donde la precipitación es la que provoca un aumento de la carga local en la base de la nube. No todos los años presentan la misma cantidad de eventos atmosféricos, por ejemplo, se observó una reducción de reportes en el año 2020.

El mes con mayor número de eventos para el área que comprende la distancia límite para observar los fenómenos en la vecindad del aeropuerto, la aproximación final y el área del aeropuerto es agosto, con 17%, y el menor es número se registra en el mes invernal de diciembre con un 0.3%. Los meses de febrero y diciembre, para la aproximación final no reportan estos eventos. Para el área del aeropuerto comprende los meses desde enero hasta marzo y diciembre. La distribución general de los rayos en las zonas de estudio tiene su máximo durante la fase de transición de primavera-verano (en mayo) y otro pico de actividad en a la transición verano-otoño (en agosto) (Figura 3).

La cantidad total de rayos aumenta durante los meses de verano, con un pico notable en agosto. En estos meses, la suma de las frecuencias en todas las áreas alcanza casi los 1200 rayos en agosto

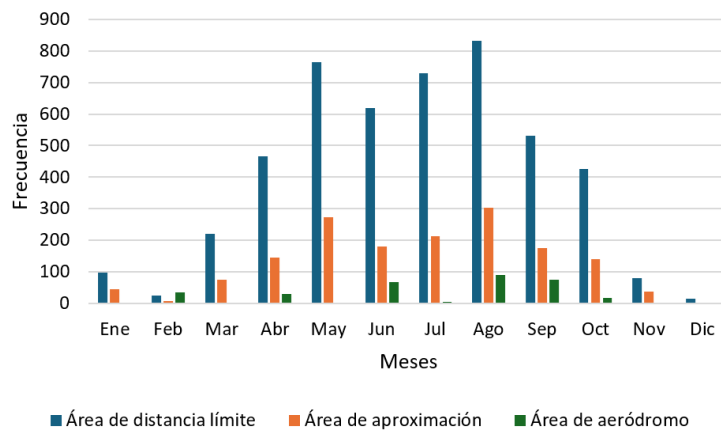


Figura 3. Distribución mensual de la cantidad de rayos en las áreas de proximidad durante el periodo de 2018 a 2023. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa (<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>, consultado 10 de enero 2024). Observaciones georreferenciadas del Geostationary Lightning Mapper (GLM) por el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT).

y alrededor de 1100 rayos en julio. Lo anterior coincide con la temporada de lluvias en la CDMX, cuando las tormentas eléctricas son más frecuentes (Jáuregui, 2000). La mayoría de los rayos durante estos meses se registran en el área de distancia límite, seguida por el área de aproximación final.

En contraste, los meses de diciembre, enero y febrero, presentan las frecuencias más bajas de rayos, con cifras reducidas que apenas alcanzan los 50 rayos totales. Esto sugiere una clara estacionalidad en la ocurrencia de rayos, correlacionándose con la estación seca del año. Durante estos meses, la mayoría de los rayos se concentran en el área de aproximación final, aunque la frecuencia sigue siendo baja.

La estacionalidad de estos reportes es similar con los resultados de (Entenza et al., 2024) para las fuertes tormentas eléctricas en el periodo 1990 - 2022. Los mayores reportes coinciden con horarios de mayores operaciones aéreas de aterrizaje y despegue según lo publicado en el año 2023 en el Diario Oficial de la Federación; no obstante, existen diferencias para el aeropuerto y la aproximación final en cantidad y en horarios.

Las horas con más frecuencia de actividad eléctrica para las tres áreas de estudio, como muestra la Figura 4, es entre la 22:00 y las 01:00 UTC (16:00 a 19:00 hora local) con un 75% de representatividad, disminuyendo desde 20:00-21:00 y 02:00-03:00 (14:00 -15:00 y 20:00 y 21:00 hora local) con el 25% aproximadamente. Desde las 04:00 y las 19:00 UTC (22:00 y 13:00 hora local) se reportan el 2% para el área límite de observación y la aproximación final. Estas mismas áreas a las 05:00 hasta las 07:00 UTC y 09:00,11:00, 18:00 UTC (23:00 hasta las 01:00 hora local y 03:00, 05:00, 12:00 hora local) reportan no más que el 1%. En otros horarios no se ha registrado actividad eléctrica.

La mayor actividad de rayos ocurre durante las horas vespertinas y al anochecer. La mayor parte de los rayos se concentra en el área de distancia límite con una frecuencia alta, seguida por el área de aproximación final. Esto podría indicar que, durante estas horas, las tormentas eléctricas tienden a desarrollarse y afectar principalmente las zonas periféricas del aeropuerto; además de ser un área más grande. La actividad de rayos disminuye drásticamente, con frecuencias que rara vez superan los 200 rayos en total en horas de la madrugada y en la mañana. Esto puede relacionarse con la climatología local, donde las tormentas eléctricas son menos comunes durante el día (06:00 a 17:00 hora local), posiblemente por la falta de radiación solar que inicie la formación de tormentas por convección.

Distribución espacial de la densidad de rayos

La estimación de la función de densidad de probabilidad de los rayos se representa en la Figura 5 con una escala de colores con una combinación analógica. Los procedimientos de aterrizaje y despegue se superponen con las zonas donde se reportan valores altos y bajos de densidad de rayos. La superposición de estas rutas de vuelo con áreas de alta densidad de rayos permite una evaluación más detallada de los riesgos potenciales en las diferentes fases de vuelo.

Esta variación en el área analizada muestra que las zonas con mayores reportes de densidad de rayos (entre 94 y 161 rayos/km²) se localizan hacia el sur, este, y sureste del aeropuerto mientras que los valores de densidad más bajos se localizan hacia la parte exterior del dominio mayor. La distribución espacial de la densidad de rayos muestra la mayor concentración en el centro del área delimitada, coincidiendo también con las zonas de mayor altitud y urbanización.

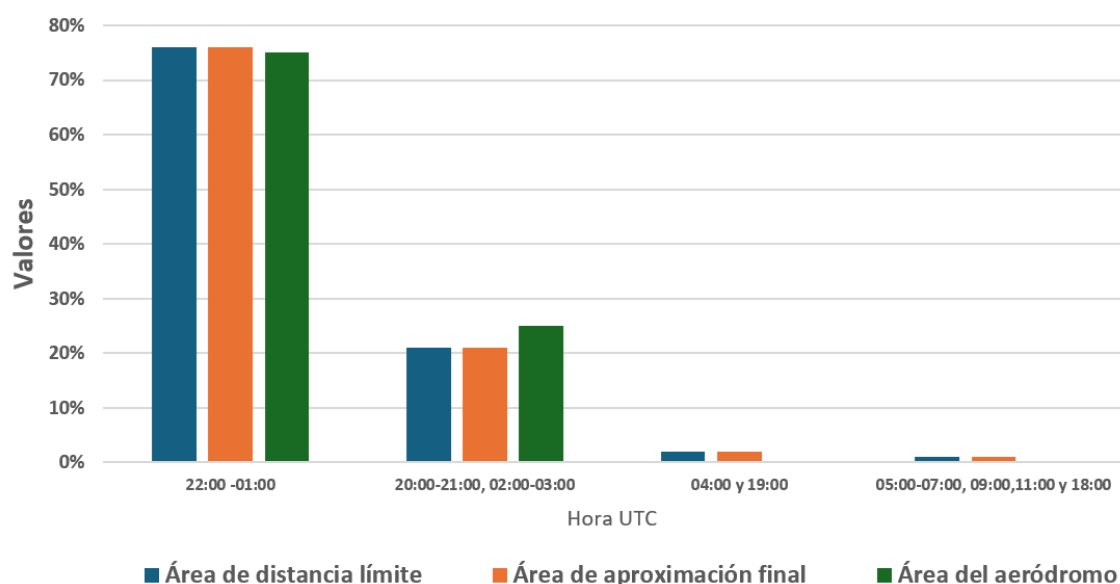


Figura 4. Distribución horaria de la cantidad de rayos en las áreas de proximidad durante el periodo de 2018 a 2023. Fuente: Elaboración propia sobre la información de las observaciones meteorológicas aeronáuticas del aeropuerto obtenidas del sitio electrónico de la Universidad de Iowa (<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>, consultado 10 de enero 2024). Observaciones georreferenciadas del Geostationary Lightning Mapper (GLM) por el Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT).

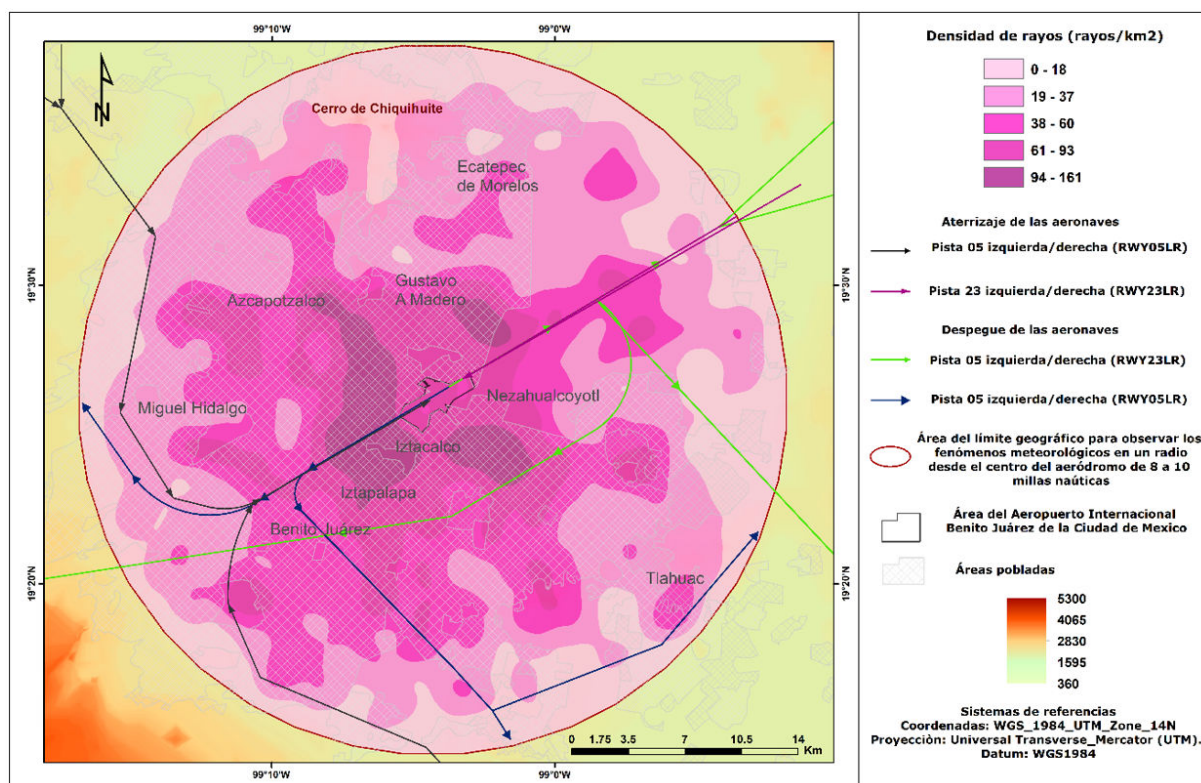


Figura 5. Distribución espacial de la densidad de rayos en el periodo 2018 - 2023 para el área límite de observación (8-10 millas náuticas) de los fenómenos meteorológicos peligroso para la aviación del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México.

Para los elementos de representación cartográfica, en el contexto aeronáutico, como los procedimientos de despegue y aterrizaje para las pistas 05 y 23 del AICM indican que las aeronaves que operan en estas rutas se encuentran en áreas de alta densidad de rayos. Esto es especialmente relevante para los despegues hacia el sureste y los aterrizajes desde el noreste. Por tanto, la presencia de rayos en estas zonas puede representar un riesgo potencial para las operaciones aéreas, ya que pueden afectar tanto la navegación como los sistemas electrónicos de las aeronaves.

El mapa anterior también resalta algunas alcaldías de la CDMX como la Gustavo Madero y Venustiano Carranza, que se encuentran dentro del área de mayor estimación de la función de densidad de probabilidad de rayos, con una concentración notable de alrededor de 161 rayos/km². Estas zonas urbanas densamente pobladas están particularmente expuestas a las tormentas eléctricas, lo que subraya la necesidad de sistemas de protección contra rayos tanto para la infraestructura como para la población civil. Tales valores de mayor densidad de rayos pueden estar relacionados con la topografía y el clima local, elementos que son discutidos más adelante.

El área de distancia límite es la que recibe la mayor cantidad de rayos durante la mayor parte del año, especialmente de abril a octubre. Esto se asocia con que esta área cubre un rango más amplio, incluyendo zonas periféricas donde las tormentas eléctricas pueden ser más comunes.

La distribución espacial de la densidad de rayos para la fase de vuelo de aproximación final del AICM (Figura 6), proporciona información crucial sobre la incidencia de rayos y su impacto para las operaciones de vuelo. Sitúa el área,

en el contexto urbano mostrando zonas clave como las alcaldías Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztapalapa, Azcapotzalco y Benito Juárez. Este mapa muestra una marcada heterogeneidad en la distribución espacial de la densidad de rayos. Las áreas con mayores densidades están ubicadas principalmente al este y sureste del aeropuerto. Las rutas de aproximación finales, que son cruciales para la seguridad de los vuelos, se ven significativamente afectadas por áreas de alta densidad de rayos (261 rayos/km²), lo que aumenta el riesgo de incidentes relacionados con rayos durante estas fases críticas del vuelo.

Las superficies de aproximación de precisión y de ascenso se encuentran dentro de las zonas de alta densidad de rayos (Figura 6), lo que sugiere una mayor exposición de la infraestructura urbana y la población a los fenómenos meteorológicos severos. La ubicación geográfica de estas áreas en relación con las rutas de aproximación y despegue del aeropuerto ofrece una visión integral de los desafíos que enfrenta el aeropuerto en términos de seguridad y resalta la necesidad de una planificación urbana que tenga en cuenta los riesgos asociados con la actividad eléctrica.

Muestra una alta frecuencia de rayos principalmente en los meses de mayo, junio, julio y agosto, con picos notables en junio y agosto. Este comportamiento sugiere que las trayectorias de aproximación final de las aeronaves, que están directamente expuestas al cielo abierto, son más susceptibles a la actividad eléctrica durante la temporada de lluvias.

En el área de estudio del aeropuerto, como muestra la Figura 7, se identificaron áreas de mayor concentración que impactan en la cabecera de la pista 23LR, en la terminal No. 1 y un lateral de la calle de rodaje, donde se desplazan los aviones.

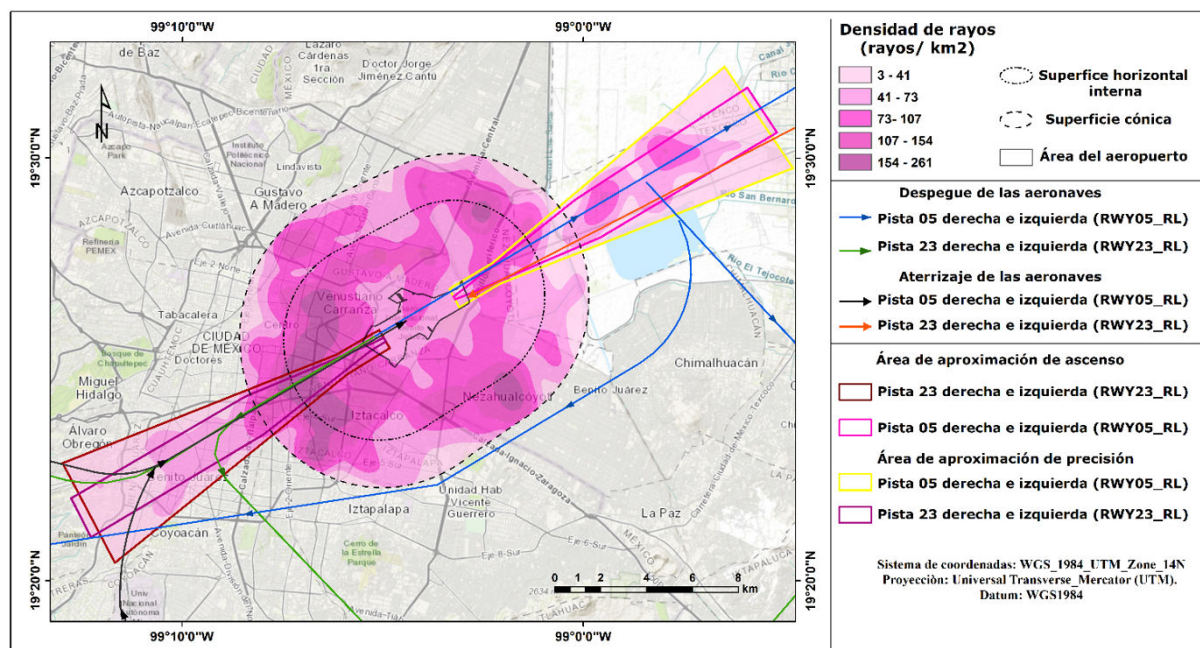


Figura 6. Distribución espacial de la densidad de rayos en el periodo 2018 - 2023 para la fase de vuelo de aproximación final del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México.

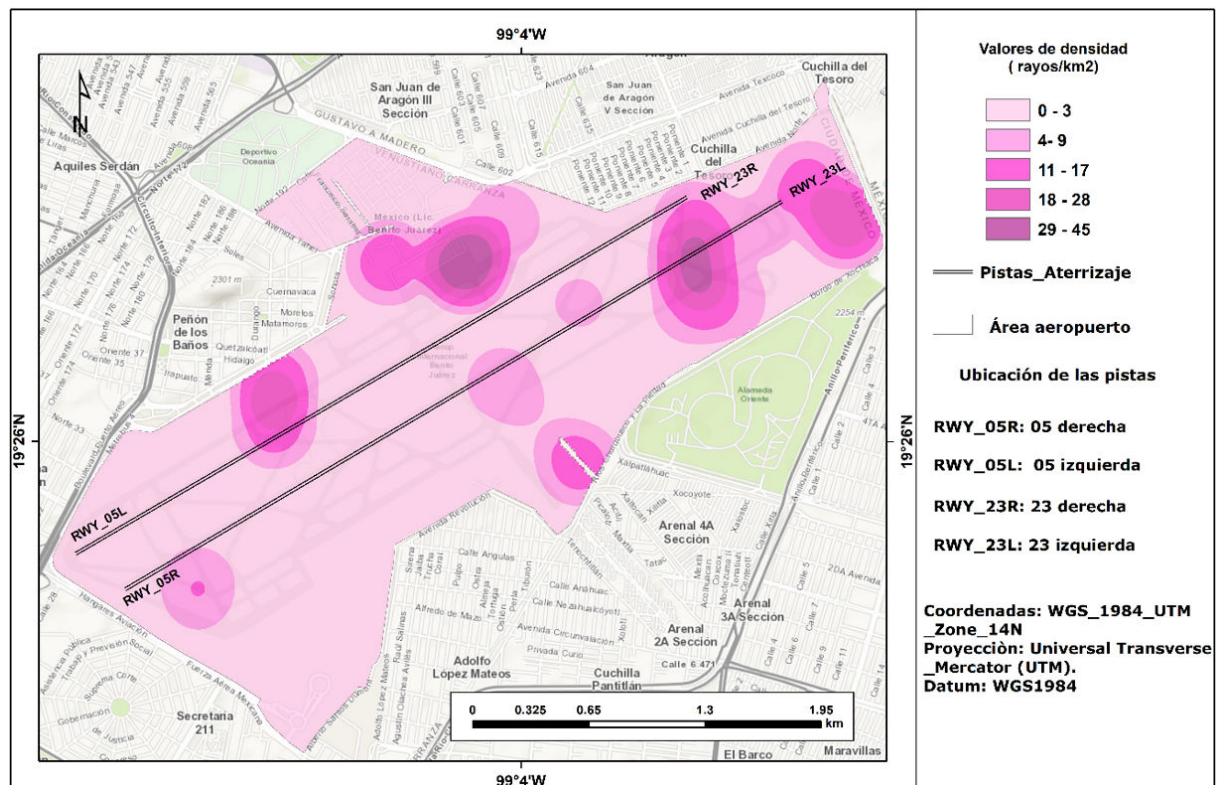


Figura 7. Distribución espacial de la densidad de rayos en el periodo 2018 - 2023 para el área del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México.

Aquí se observan otras áreas donde los reportes de actividad de rayos y de menor valor. La densidad de rayos en estas áreas parece estar más dispersa en comparación con las zonas de las pistas. Las áreas de mayor densidad de rayos coinciden con las pistas RWY23L y RWY23R, al ser las cabeceras de las pistas principales, presentan un mayor riesgo debido a la alta densidad de rayos (hasta 45 rayos/km²), lo implica la necesidad de protocolos adicionales de seguridad y monitoreo meteorológico constante. Las pistas RWY05L y RWY05R no muestran alta densidad de rayos.

Finalmente, el área del aeropuerto, aunque presenta frecuencias más bajas en comparación con las otras dos áreas, con valores estimados de densidad de rayos entre kilómetros cuadrados de 287. Dicho comportamiento se concentra especialmente en los meses de alta actividad como junio, julio y agosto. Resultados similares han sido observados en otros aeródromos del mundo (He *et al.*, 2021).

Finalmente las áreas de estudio se caracterizan por estar ubicadas en una zona donde las lluvias son abundantes por el levantamiento orográfico, aumentando el máximo del parteaguas de las montañas al oeste, sur y sureste (Jauregui, 2000) lo que permite la formación de tormentas que se distribuyen de manera más o menos uniforme. Por otro lado, y de acuerdo con Steiger *et al.*, (2002) la influencia de concentración de contaminantes en el aire puede actuar como núcleos de condensación,

facilitando el aumento de los rayos. Lo anterior puede ser especialmente importante para la Ciudad de México, la más densamente poblada a nivel nacional, según los datos del Instituto Nacional de Estadística (INEGI) en el censo poblacional del año 2020, y con altas concentraciones de contaminantes presentes en la atmósfera (Jauregui, 1995).

Las variaciones observadas de la distribución de rayos en áreas específicas es el resultado de una combinación de factores geográficos, físicos y meteorológicos debido a la naturaleza aleatoria y caótica de las tormentas eléctricas que crean condiciones homogéneas para la formación y descarga de rayos; además, de las condiciones la procedencia de las masas de aire.

Desde un punto de vista meteorológico, la alta densidad de rayos en ciertas áreas de estudio también puede estar influenciada por patrones climáticos locales, como la formación de tormentas convectivas. La Ciudad de México, al estar situada en una altiplanicie, con pocos cambios en las elevaciones (Jauregui, 2000) experimenta, un área determinada, alta frecuencia de tormentas eléctricas, especialmente durante la temporada de lluvias. Este fenómeno meteorológico puede explicar la concentración de rayos en las áreas mencionadas.

La configuración de la cuenca, junto con los patrones de viento, humedad, y la actividad humana, contribuyen a una distribución relativamente uniforme de la actividad eléctrica en áreas más altas

(Jauregui, 2000). No obstante, hay que considerar que el área está rodeada por montañas, las cuales influyen en los patrones de viento y la formación de tormentas, lo que favorece a la formación de estos fenómenos sobre la cuenca con una distribución uniforme de la humedad.

La interrelación entre estos elementos destaca la importancia de la gestión del tráfico aéreo y la planificación operativa en el aeropuerto. Los controladores aéreos y las aerolíneas deben estar al tanto de las condiciones meteorológicas actuales y previstas, incluyendo la actividad de rayos, para tomar decisiones informadas sobre las rutas de vuelo y los procedimientos operativos. Esto es especialmente crítico durante las fases de aproximación y ascenso, donde la exposición a los rayos es mayor debido a la altitud y las condiciones atmosféricas.

Las medidas de seguridad en el aeropuerto, como los sistemas de protección contra rayos y los procedimientos de emergencia, deben estar continuamente actualizadas. Los sistemas de detección de rayos y las alertas tempranas pueden proporcionar información vital para la toma de decisiones en tiempo real, reduciendo el riesgo de incidentes durante las operaciones de vuelo. Además, es esencial que los pilotos y el personal de tierra estén capacitados para manejar situaciones de emergencia relacionadas con rayos.

CONCLUSIONES

La actividad eléctrica presenta una estacionalidad y variación espacial en las áreas de estudio. Las áreas de alta densidad de rayos, particularmente en las fases de aproximación final y despegue hacia el sureste del AICM, representan un riesgo significativo para la seguridad aérea.

Las rutas de vuelo para las pistas (RWY23L y RWY23R) se encuentran con zonas de alta incidencia de rayos, lo que aumenta el potencial de afectaciones en la navegación y sistemas electrónicos de las aeronaves.

La alta densidad de rayos en áreas urbanas y densamente pobladas, como las alcaldías Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza, refleja la interacción entre la actividad eléctrica y factores antropogénicos como la urbanización intensiva y las altas concentraciones de contaminantes atmosféricos que pudieran actuar como núcleos de condensación, favoreciendo la formación de tormentas eléctricas y aumentando la exposición de la infraestructura y la población a este tipo de fenómenos meteorológicos.

Los resultados resaltan la necesidad de implementar estrategias de mitigación que combinen sistemas de protección contra rayos en la infraestructura aeroportuaria y zonas urbanas,

así como capacitaciones específicas para pilotos y personal de tierra. La gestión del tráfico aéreo debe incorporar el análisis de la actividad eléctrica priorizando la seguridad de las operaciones durante las fases críticas de vuelo, como y la aproximación final.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio tuvo el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) No. de beca: 1156496. Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT) del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por el suministro de datos satelitales y el procesamiento de información que fue esencial para este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Battan, J.L., (1965). Some Factors Governing Precipitation and Lightning from Convective Clouds. *J. Atmos. Sci.*, 22, pp. 79-84.
- Betz, H. D., Schumann, U., & Laroche, P. (2009). Lightning: Principles, instruments and applications: Review of modern lightning research. *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*, 1-641. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0>
- Entenza-Tilman, L., León-Cruz, J.F., Ruiz-Rivera, N. (2024). Análisis de las fuertes tormentas eléctricas en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México y su vecindad (1990-2022). *Tlamati Sabiduría*, 18, 54-68.
- Goodman, S., Nesdis, N., Koshak, W., & Blakeslee, R. (2012). *GLM Lightning Cluster-Filter Algorithm*. 0-72. <http://www.star.nesdis.noaa.gov/goesr/docs/ATBD/LCFA.pdf>
- Graves, C. M., He, Y., Lindbergh, S., & Rakas, J. (2019). Characterizing lightning-strike hazard to airport facilities: A case study of Baltimore Washington international airport. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, ICNS, 2019-April*, 1-9. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2019.8735304>
- Hatakeyama, H., 1958. The distribution of the sudden change of electric field on the earth's surface due to lightning discharge. In *Recent Advances in Atmospheric Electricity*, L.G. Smith, ed., Pergamon, New York, pp. 289-298.
- He, Y., Lindbergh, S., Graves, C., & Rakas, J. (2021). Airport Exposure to Lightning Strike Hazard in the Contiguous United States. *Risk Analysis*, 41(8), 1323-1344. <https://doi.org/10.1111/risa.13630>
- Jaramillo, A., and C. Dominguez, 2024: Mapping Lightning Risk in Mexico: Integrating Natural Hazard and Social Vulnerability. *Wea. Climate Soc.*, 16, 563-574, <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-23-0151.1>

- Jarayathe E.R., C.P. Saunders, 1984. The "rain gush", lightning and the lower positive charge center in thunderstorms. *J. Geophys. Res.* Vol 89, No. D7, 11816-11818.
- Jarayathe E.R., 1998. Possible Laboratory evidence for multipole electric charge structures in thunderstorms. *Journal of Geophysical Research.* Vol 103, Nº D21, 1871-1878.
- Jáuregui Ostos, Ernesto. (1995). Algunas alteraciones de largo periodo del clima de la Ciudad de México debidas a la urbanización: Revisión y perspectivas. *Investigaciones geográficas*, (31), 09-44. Recuperado en 04 de octubre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0188-46111995000200001&lng=es&tln_g=es.
- Jauregui, O. E (2000). El clima de la Ciudad de México. Primera Edición. Junio 2000. Instituto de Geografía. Plaza y Valdez S.A de C.V. ISBN UNAM 968-36-8171-9.Ç
- Kuettner, J., 1950. The Electrical and Meteorological Conditions inside Thunderstorms. *J. Meteor.*, 7, pp. 322-332.
- Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (LANOT). (2018). Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://www.lanot.unam.mx/>
- Larena, I. (2022). Dinámica espacio-temporal de la isla de calor urbana en la Ciudad de México. *Urbe. Arquitectura, Ciudad y Territorio*, 15, 3-18. <https://doi.org/10.29393/ur15-1deil10001>
- León-Cruz, J.F., Caetano, E., Cortés-Ramos, J., Domínguez, C., Méndez-Pérez, J.M. (2023). Thunderstorm and hailstorm environments in Mexico. *International Journal of Climatology*, 43, 4379-4395. <https://doi.org/10.1002/joc.8093>
- Maduranga, D., & Edirisinghe, M. (2021). Climatology of Lightning Activities over Bandaranaike International Airport in Sri Lanka. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16(6), 1027-1038. <https://doi.org/10.18280/ijstdp.160604>
- Moore P.K., R.E. Orville, 1990. Lightning characteristics in lake-effect thunderstorms. *Monthly Weather Review*. 118(9), 1767-1782.
- Nicora, M. G., Bali, J. L., Conicet, C., Vasquez, P. M., Elia, R. D., Conicet, C., & Acquesta, A. (2017). *AeroRayos First Tool for Risk Assessment by Electric Activity at Airports in Argentina*. October, 141-144.
- NOAA-NASA. (2018). Geostationary Lightning Mapper : Definitions and Detection Methods Quick Guide Geostationary Lightning Mapper : Definitions and Detection Methods Quick Guide.
- International Civil Aviation Organization ICAO. (2009). Annex 4 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical charts. International standards and recommended practices. (International Civil Aviation Organization ICAO (ed.); No. 57.). Published separately in English, Arabic, Chinese, French, Russian and Spanish, by the International Civil Aviation Organization 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7.
- Organización Mundial de la Aviación Civil (OACI, 2016) Anexo 3: Servicio meteorológico para la navegación aérea internacional. Decimonovena edición. Núm. de pedido: AN 3. ISBN 978-92-9249-992-1
- Secretaría de Gobernación (SEGOB) (2023). Resolución por la que se declara la saturación del Aeropuerto Internacional "Benito Juárez" de la Ciudad de México DOF: 31/08/2023. Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes.- Agencia Federal de Aviación Civil.- Dirección General.- 4.1.2157.- Expediente: DEC/AICM/2023/AFAC. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5700389&fecha=31/08/2023#gsc.tab=0. consultado 23 de agosto.
- Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) (2019). Manual del Meteorólogo observador. Dirección de Meteorología y Telecomunicaciones Aeronáuticas. Vigencia: junio de 2013. Actualización: septiembre del 2016.
- Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano, 2021. Manual de Publicación de Información Aeronáutica (AIP). AD 2-1 MMMX 25-MAR-2021
- Solazzo, E., Tournigand, P. Y., Barindelli, S., Guglieri, V., Realini, E., Nisi, L., & Biondi, R. (2020). Understanding Severe Weather Events at Airport Spatial Scale. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1, 5372-5375. <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9323598>
- Steiger, S. M., R. E. Orville y G. Huffines, 2002. Cloud-to-ground lightning characteristics over Houston, Texas: 1989-2000, *J. Geophys. Res.*, 107(D11), <https://doi.org/10.1029/2001JD001142>.
- Universidad del Estado de Iowa <https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml>. consultado 10 de enero 2024
- Vidal-Zepeda, R. (2007). Amenazas climáticas, Nuevo Atlas Nacional de México. Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM. Instituto de Geografía - UNAM
- Weber, M., Williams, E., Wolfson, M., & Goodman, S. (2013). *An Assessment of the Operational Utility. February 1998*.
- World Meteorological Organization (WMO), (2014). Guide to meteorological systems for observation and distribution of information for aeronautical meteorological services. ISBN 978-92-63-30731-6 http://www.wmo.int/pages/prog/lsp/meteoterm_wmo_es.html.