ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/381426602

Evaluación del Índice Gálvez-Davison para tormentas eléctricas en el centro de México

Article · June 2024

CITATIONS
0

READS
78

3 authors, including:

José Francisco León-Cruz
National Autonomous University of Mexico
37 PUBLICATIONS **124** CITATIONS
SEE PROFILE

Jorge Cortés-Ramos
Center for Scientific Research and Higher Education at Ensenada
28 PUBLICATIONS **188** CITATIONS
SEE PROFILE

All content following this page was uploaded by José Francisco León-Cruz on 14 June 2024.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

Tlamati Sabiduría

Evaluación del Índice Gálvez-Davison para tormentas eléctricas en el centro de México

José Francisco León-Cruz[1*]
Jorge Cortés-Ramos[2]
Christian Adrián Álvarez-Báez[3]

[1]*Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica, 04510, Ciudad de México, CDMX, México.*
[2] *CONACYT-Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Unidad La Paz. C. Miraflores 334, Bella Vista, 23050, La Paz, Baja California Sur, México.*
[3]*Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Camino a la Presa de San José 2055, Lomas 4ta Sección, 78216, San Luis Potosí, SLP, México.*

**Autor de correspondencia*
jleon@geografia.unam.mx

Resumen

El pronóstico de tormentas severas y peligros convectivos asociados como granizadas y tormentas eléctricas es de vital importancia para la gestión integral del riesgo de desastre. Tales pronósticos suelen realizarse a través del cálculo de índices de inestabilidad y severidad del tiempo meteorológico. El índice K, el índice de elevación, el índice total de totales o la combinación de parámetros meteorológicos como la energía potencial convectiva disponible y la cizalladura del viento, son algunos de los más utilizados a nivel mundial. No obstante, muchos de estos índices, al ser generados en latitudes medias, principalmente en Estados Unidos y Europa, suelen no ser tan efectivos en regiones tropicales y subtropicales. En este sentido, se han generado índices alternativos que pretenden representar las características de la atmósfera superior en dichas regiones; por ejemplo, el Índice Gálvez-Davison (GDI). El GDI es un índice termodinámico que busca mejorar las predicciones de convección profunda en regiones tropicales. Esta herramienta de

Información del Artículo

Cómo citar el artículo:

León-Cruz, J.F., Cortés-Ramos, J., Álvarez-Báez, C.A. (2024). Evaluación del Índice Gálvez-Davison para tormentas eléctricas en el centro de México. *Tlamati Sabiduría*, 18, 42-53.

Editores Invitados: Dra. Rosalva Pérez-Gutiérrez, Dr. Oscar Frausto-Martínez, Dr. Julio Cesar Morales-Hernández.

© 2024 Universidad Autónoma de Guerrero

diagnóstico considera la humedad en la tropósfera media y baja, así como los efectos estabilizadores de las inversiones de los vientos alisios. En este contexto, la presente investigación evalúa la efectividad del GDI en un amplio set de observaciones de días con tormenta eléctrica en el centro del país. Dichas evaluaciones se realizan empleando valores de sesgo predefinidos por el índice a través de radiosondeos de proximidad generados con datos de reanálisis de ERA5. Asimismo, se integra un análisis estacional y se discuten las implicaciones del uso del GDI en el pronóstico de tiempo severo en México.

Palabras clave: Tormentas eléctricas, Índices termodinámicos, Peligros meteorológicos, Sondeos de proximidad.

Abstract

Forecasting severe storms and associated convective hazards such as hailstorms and thunderstorms is crucial for integrated disaster risk management. Such forecasts are usually made by calculating weather instability and severity indices. The K-index, the lifted index, the total totals index, or the combination of meteorological parameters such as convective available potential energy and wind shear are some of the most widely used worldwide. However, many of these indices, since they are generated in mid-latitudes (e.g., the United States and Europe), tend to be less effective in tropical and subtropical regions. In this sense, alternative indices have been generated to represent the characteristics of the upper atmosphere in these regions; for example, the Galvez-Davison Index (GDI). The GDI is a thermodynamic index that seeks to improve predictions of deep convection in tropical areas. This diagnostic tool considers humidity in the middle and lower troposphere and the stabilizing effects of trade wind inversions. In this context, the present investigation evaluates the effectiveness of the GDI in a comprehensive set of observations of thunderstorm days in central Mexico. These evaluations are performed using threshold values predefined by the index through proximity radiosondes generated with ERA5 reanalysis data. Also, a seasonal analysis is integrated, and the implications of using GDI in severe weather forecasting in Mexico are discussed.

Keywords: Thunderstorms, Thermodynamic indices, Convective hazards, Proximity soundings.

Introducción

Las tormentas severas y los peligros convectivos asociados como la actividad eléctrica, granizo y los tornados son consideradas amenazas naturales potencialmente desastrosas. Dado que este tipo de fenómenos naturales son de rápido desarrollo y difíciles de monitorear, suelen dejar afectaciones importantes en los lugares donde se presentan. De acuerdo con la literatura previa, en Europa este tipo de tormentas se asocian con pérdidas económicas de entre 5 – 8 billones de euros cada año (Dotzek *et al.*, 2009). En los Estados Unidos (EE. UU.), los desastres asociados a las tormentas severas reportan pérdidas por 134.8 y 153.2 billones de dólares en los dos años más recientes, 2021 y 2022 (NCEI, 2023). Por otro lado, en México, de acuerdo con datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2023), se estima que las tormentas severas y peligros convectivos diversos han provocado la emisión de 10596 declaratorias de emergencia (aproximadamente el 30% del total), desastre o contingencia climatológica en el periodo 2000 – 2022.

Debido al potencial de peligrosidad asociado con este tipo de fenómenos, se han realizado diversos esfuerzos con el fin de generar pronósticos certeros que permitan identificar, de manera efectiva, regiones y periodos donde la convección profunda pueda desarrollarse. En este sentido, existen diferentes aproximaciones para estimar el peligro de formación de una tormenta, algunas basadas en observaciones in situ y otras en los llamados reanálisis atmosféricos. Por ejemplo, estudios previos empleando radiosondeos se han conducido en Europa y EE.

UU., con el objetivo de identificar las condiciones ambientales asociadas a la convección profunda y fenómenos como tormentas eléctricas y granizo (e.g. Taszarek *et al.*, 2017; Craven y Brooks, 2004). Otros trabajos más recientes han empleado datos del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF, por sus siglas en inglés) para generar sondeos de proximidad de diversos peligros meteorológicos a nivel mundial (e.g. Gensini *et al.*, 2021; Taszarek *et al.*, 2020).

En los estudios mencionados se hace alusión constantemente a las condiciones de inestabilidad y cizalladura del viento, necesarias para la formación de tormentas severas. Sin embargo, más allá de estos parámetros, desde la década de los 50's se han desarrollado una gran variedad de índices enfocados en evaluar el potencial de formación de tormentas. La mayoría de estos índices buscan evaluar el grado de inestabilidad de la atmósfera en un momento y lugar determinados, a través de los perfiles verticales de humedad y temperatura. Los mencionados índices son ampliamente utilizados por la meteorología operativa en el pronóstico de la convección. Aquí se pueden mencionar, por ejemplo, el Lifted-Index (LI, por sus siglas en inglés) (Galway, 1956), que resulta de la diferencia de temperatura entre el entorno y una parcela de aire elevada adiabáticamente a una altura de presión dada, usualmente los 500 hPa. También está el K-Index (KI, por sus siglas en inglés) (George 1960), que estima el potencial de tormentas eléctricas a través de la temperatura del aire y del punto de rocío a 850, 700, y 500 hPa; así como el Total of Totals Index (TTI, por sus siglas en inglés) (Miller, 1967), que es la suma de otros dos índices; el Cross Totals que es la temperatura del punto de rocío a 850 hPa menos la temperatura a 500 hPa, y el Vertical Totals definido como la temperatura a 850 hPa menos temperatura a 500 hPa.

Más recientemente, algunos autores han optado por el uso de covariables para estimar el potencial de desarrollo de manifestaciones del tiempo severo como las tormentas eléctricas. La mayoría de estos índices compuestos consideran la cizalladura del viento (usualmente mencionada como SHEAR) y la energía potencial convectiva disponible (CAPE, por sus siglas en inglés), e implementan valores de sesgo determinados. Por ejemplo, Brooks *et al.* (2003) proponen un valor de sesgo de 8.36 resultado de:

$$2.86 \times \log(SHEAR\ 0-6\ km)\ + 1.79 \times \log(CAPE)$$

Por otro lado, Gensini y Ashley (2011) utilizan un valor de sesgo de 20,000 resultado $SHEAR \times MUCAPE$; siempre y cuando la inhibición convectiva (CIN, por sus siglas en inglés) sea superior a -75 J Kg^{-1}. Más recientemente, Taszarek *et al.* (2017) presentaron el WMAXSHEAR, que es resultado de:

$$\sqrt{2MUCAPE} \times SHEAR\ 0-6\ km$$

y proponen valores de sesgo entre 1000 y 500 $m^2\ s^{-2}$.

Es importante notar que todos estos índices fueron desarrollados en regiones de latitudes medias, principalmente en EE. UU. y Europa, por lo que algunas investigaciones han informado de su bajo rendimiento sobre regiones tropicales y subtropicales (León-Cruz *et al.*, 2022; Gálvez, 2016; Uma y Das, 2019). En este contexto, se crea el índice termodinámico Gálvez-Davison (GDI, por sus siglas en inglés), que busca mejorar las previsiones de convección tropical, particularmente en regímenes de vientos alisios (Gálvez, 2016). Dicho índice considera la humedad y temperatura en diferentes capas de la atmósfera, con adaptaciones del tipo de convección esperada en zonas tropicales.

En México, existen muy pocos estudios que evalúen la efectividad de índices termodinámicos o covariables para cualquier manifestación del tiempo severo, a pesar de que, por su localización geográfica y condiciones de terreno, es sabido que los índices más comunes pueden presentar errores significativos. En este contexto, la presente investigación expone una evaluación del Índice Gálvez-Davison para un conjunto de datos de tormentas eléctricas en el periodo 1990 – 2018 en el centro de México. Lo anterior se realizó usando perfiles atmosféricos generados a partir de datos de reanálisis de ERA5. Los resultados de la investigación buscan mejorar las previsiones del tiempo severo en una de las zonas más densamente pobladas de México y el mundo, donde gran cantidad de tormentas eléctricas son documentadas cada año.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio seleccionada se localiza en el centro de México, entre las coordenadas 99.7°O – 98.0°O y 18.7°N – 19.6°N, y comprende parte de los estados de Puebla, Tlaxcala, México y Morelos, así como la Ciudad de México (Fig. 1). Aquí se localizan cinco observatorios meteorológicos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) etiquetados como CDMX (ID 9048), Tlaxcala de Xicohténcatl (ID 29031), Puebla (ID 21065), Cuernavaca (ID 17067) y Toluca de Lerdo (ID 15126). Estudios previos han identificado esta porción del territorio mexicano como una de las regiones donde se registran una gran cantidad de tormentas eléctricas cada año (Vidal-Zepeda, 2007).

El área de estudio se localiza dentro del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), caracterizado por complejos de valles y montañas importantes entre los que se destacan el complejo volcánico Iztaccíhuatl – Popocatépetl, la Sierra de Ajusco-Chichinauhtzin, el valle de México y el valle de Toluca. La compleja configuración orográfica de la zona se ha mencionado previamente como un mecanismo detonador de la convección profunda forzada por el terreno (León-Cruz *et al.*, 2021). De acuerdo con una climatología previa (Zhu y Lettenmier, 2007; Muñoz-Arriola *et al.*, 2009), el régimen de precipitación de esta porción de México se caracteriza por un periodo húmedo entre junio y septiembre, con medias mensuales de alrededor de 160 mm/mes, un periodo de estiaje entre octubre y abril, así como un periodo de transición-húmedo durante mayo.

Además de las características ambientales mencionadas, esta porción del país ostenta una gran cantidad de población. De acuerdo con el último censo nacional de población (INEGI, 2021), de las 10 ciudades más pobladas de México, cuatro se encuentran en el área de estudio: Ciudad de México, Ecatepec de Morelos (Edo. de México), Heroica Puebla de Zaragoza (Puebla) y Nezahualcóyotl (Edo. de México). Tomando en consideración sólo estas cuatro ciudades, se estiman alrededor de 13.4 millones de habitantes, situación que genera un alto grado de exposición ante fenómenos naturales, incluidas las tormentas eléctricas.

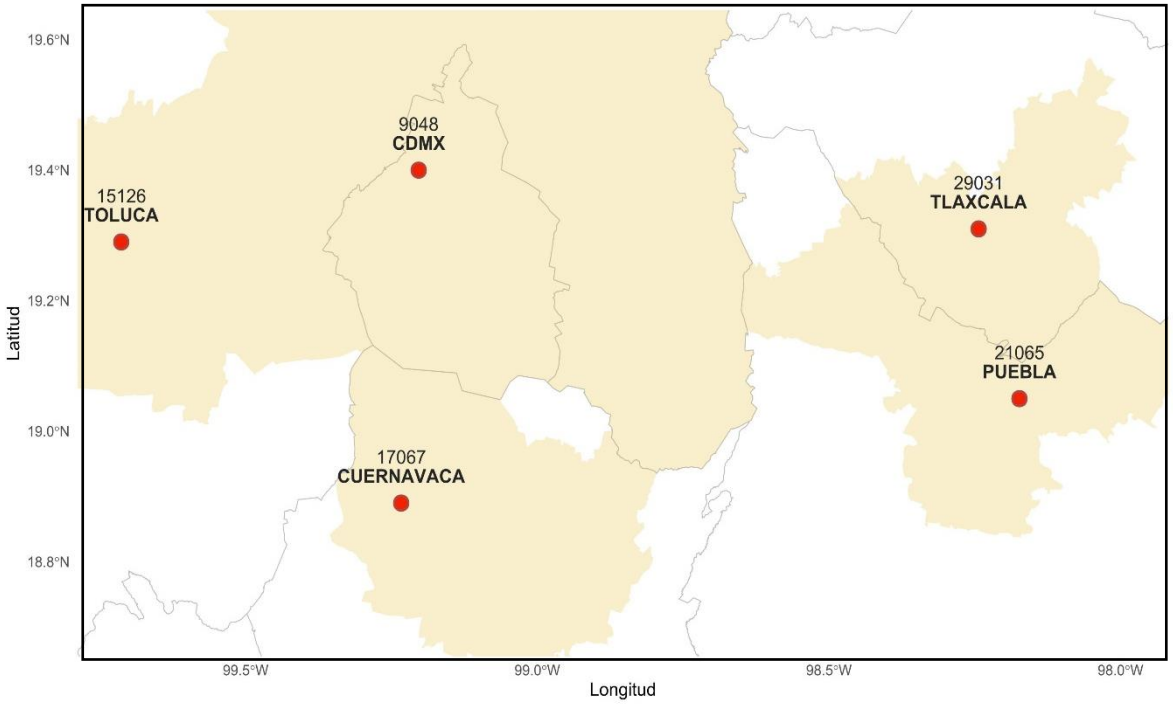

Figura 1. Mapa del área de estudio. El área sombreada señala las zonas urbanas, mientras que los números indican el ID de cada estación.

Base de datos de tormentas eléctricas

La base de datos de tormentas eléctricas del área de estudio fue provista por el SMN a través de los cinco observatorios meteorológicos seleccionados (Fig. 1). Los datos suministrados tienen una frecuencia de actualización diaria y están en formato binario donde 1 señala un día con tormenta eléctrica y 0 un día sin tormenta eléctrica. La base de datos se construyó con base en información provista por los observadores meteorológicos de cada uno de los sitios, quienes siguen las pautas establecidas por el manual del observador meteorológico del SMN. Desafortunadamente, esta base de datos no contempla información relevante como la severidad del evento o la hora de ocurrencia.

Para el estudio se seleccionó el periodo de 1990-2018. Los datos, en formato CSV, fueron integrados al programa R Project for Statistical Computing (R Core Team, 2020) para su procesamiento. Posteriormente, se extrajeron las fechas en que se registraron tormentas eléctricas en cada uno de los observatorios, generando estadísticos descriptivos y bases de datos independientes con las fechas de tormentas eléctricas en cada uno de los observatorios seleccionados. Dicha manipulación de datos se realizó a través de las paqueterías "dplyr" (Wickham *et al.*, 2023a) y "tidyr" (Wickham *et al.*, 2023b).

Sondeos de proximidad

Las bases de datos creadas en el paso anterior fueron utilizadas para la generación de los sondeos de proximidad. Para cada fecha contenida en dichas bases de datos se descargaron los datos de altura geopotencial, temperatura y humedad relativa de 27 niveles de presión (1000 – 100 hPa) del reanálisis de ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020) del ECMWF. Estudios previos han demostrado la capacidad de los datos de reanálisis de ERA5 para la determinación de entornos convectivos potencialmente severos en diversas partes del mundo (e.g. Gensini *et al.*, 2021; Taszarek *et al.*, 2020).

Posteriormente, empleando el lenguaje de interpretación de NCAR Command Language (NCL), se generaron perfiles atmosféricos en el punto de malla más cercano a cada estación de muestreo (es decir, sondeos de proximidad) a las 0000 UTC, 0600 UTC, 1200 UTC y 1800 UTC de cada día con reporte de tormenta. Empleando la paquetería "thunder" (Czernecki *et al.*, 2023) se calculó el CAPE más inestable de cada día con tormenta eléctrica. Finalmente, los perfiles fueron depurados a través de la selección del sondeo más inestable en función de los valores de CAPE calculados, con lo que se asegura la representación del entorno más inestable para cada día con tormenta eléctrica.

Índice Gálvez-Davison

El Índice Gálvez-Davison (GDI) es un índice termodinámico desarrollado para mejorar las previsiones de convección tropical, particularmente en regímenes de vientos alisios (Ec. 1). Este índice funciona como una herramienta de diagnóstico que tiene en cuenta la humedad de la troposfera baja y media, enfatizando los efectos estabilizadores de las dorsales de la troposfera media y los efectos estabilizadores y secantes de las inversiones de los vientos alisios (Gálvez, 2016). La interpretación del GDI se basa en cuanto mayor sea el valor obtenido, mayor será el potencial de convección profunda. En la Tabla 1 se muestra la correspondencia entre los valores del GDI y el tipo de convección esperada.

Ecuación 1. Índice Gálvez-Davison (GDI):

$$GDI = CBI + MWI + II + TC$$

Donde CBI es el Column Buoyancy Index (o índice de flotabilidad de la columna) que indica la disponibilidad de calor y humedad en la atmósfera; el MWI representa el Mid-Tropospheric Warming Index (o índice de calentamiento de la troposfera media) que considera la estabilización o desestabilización asociada a crestas o vaguadas en la troposfera media; el II señala al Inversion Index (o índice de inversión) que integra procesos de inhibición de la convección, y el TC que es una Topographic Correction (o corrección topográfica) opcional. Para esta investigación, se desarrolló un código propio en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2020) que permitió el cómputo del GDI a partir de los perfiles atmosféricos generados en la etapa anterior.

GDI	Tipo de convección esperada
> 45	Potencial para tormentas eléctricas de dispersas a generalizadas con lluvias torrenciales.
35 a 45	Potencial para tormentas eléctricas dispersas, algunas de ellas capaces de producir lluvias torrenciales.
25 a 35	Potencial para tormentas eléctricas o convección superficial dispersa con tormentas eléctricas aisladas.
15 a 25	Potencial para algunas tormentas eléctricas aisladas, pero mayormente convección superficial.
05 a 15	Potencial para convección superficial. Tormentas eléctricas muy aisladas y de corta duración son posibles.
-20 a 05	Potencial para convección aislada y superficial. Fuerte inversión por subsidencia es probable.
< -20	Fuerte inversión de subsidencia: cualquier tipo de convección debería ser muy superficial, aislada y produciría acumulaciones en traza.

Tabla 1. Valores de sesgo para el Índice Gálvez-Davison. *Los colores de fondo son alusivos al tipo de convección esperada (Gálvez, 2016).

Resultados

Distribución temporal de tormentas eléctricas

En el periodo 1990 – 2018 se contabilizaron un total de 3,413 días con tormenta eléctrica en la zona de estudio, lo que representa un promedio de 117 días al año (alrededor de 24 por observatorio meteorológico). El observatorio de Toluca ostenta el mayor número de días con actividad con un total de 826, seguido por Puebla (822), Cuernavaca (635), Tlaxcala (568), y CDMX (562). Este total de días está distribuido durante todo el año, aunque se pueden observar características estacionales.

La Figura 2 muestra el ciclo anual de los días con tormenta eléctrica por observatorio. Para el caso de Toluca se puede observar una distribución normal, con el periodo activo iniciando durante mayo y culminando en octubre, y el pico de actividad durante julio. En Tlaxcala, el comienzo de la actividad de tormentas eléctricas se da durante mayo y se mantiene relativamente constante hasta julio, luego tiende a disminuir hacia finales de octubre. Para el caso de Puebla, se observan dos periodos de máxima actividad durante junio y septiembre, separados por dos mínimos relativos en julio y agosto, mientras que, para Cuernavaca, la actividad parece retrasarse (con respecto a los casos anteriores), comenzando en junio y terminando en septiembre. Finalmente,

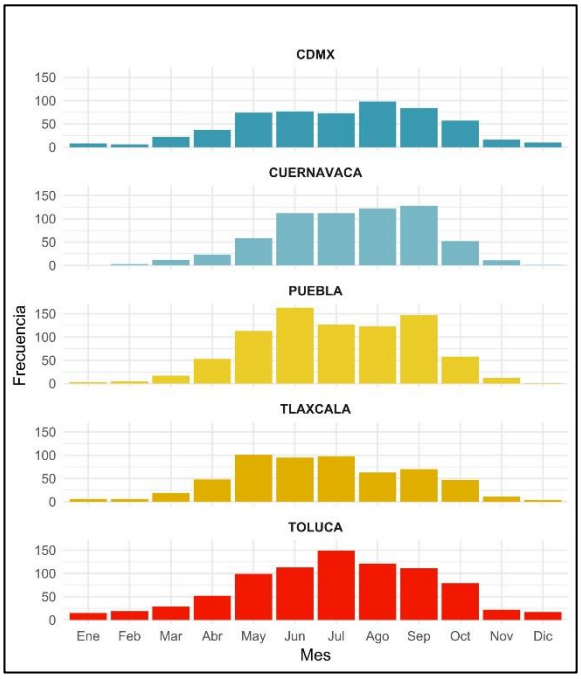

Figura 2. Ciclo anual del número de días con tormenta eléctrica por observatorio meteorológico en el periodo 1990-2018.

para la CDMX, el máximo de actividad se observa durante agosto, dando inicio en mayo. En términos generales la actividad de tormentas eléctricas en el centro de México inicia a finales de la primavera, en mayo; tiene su máxima actividad durante el verano e inicio del otoño, entre junio y septiembre, y es mínima durante los meses invernales hasta la primavera, de noviembre hasta abril (Fig. 2). La distribución de las tormentas eléctricas es coincidente con el régimen de precipitación en la zona, así como con estudios previos que han analizado este tipo de eventos extremos (Vidal-Zepeda, 2007; León-Cruz *et al.*, 2023).

Evaluación del Índice Gálvez-Davison

Para los 3,413 eventos de tormenta eléctrica documentados se generaron los perfiles atmosféricos correspondientes, y, posteriormente, se calculó el GDI para cada caso. La mediana de todos los valores calculados de GDI fue de 30.1, mientras que el primer y tercer cuartil corresponden a 17.9 y 42.9, respectivamente. Los resultados del GDI para cada uno de estos eventos, se segregó por observatorio (Fig. 3a) y mes de documentación (Fig. 3b), con el objetivo de verificar la capacidad de dicho índice termodinámico de capturar los entornos de inestabilidad asociados con las tormentas eléctricas.

Analizando los valores de GDI por observatorio (Fig. 3a), se puede observar que ninguna de las medianas se ubica por debajo de 20. La mediana más alta registrada fue en el observatorio de Cuernavaca con un valor de 47.7, seguido por Puebla (37.8), CDMX (25.7), y finalmente los observatorios de Toluca y Tlaxcala con 21.5 y 20.4, respectivamente. El primer y tercer cuartil más bajos de todos los observatorios se distribuye desde 9.23 (Tlaxcala) hasta 32.5 (Toluca); ambos observatorios muestran una distribución de datos muy similar. Con base en el primer y tercer cuartil de los valores calculados, a nivel de observatorio se puede identificar a Cuernavaca como el lugar donde el GDI mostró un mejor rendimiento, siendo que el 50% de los datos están distribuidos entre 38.8 y 55.3, los cuales son representativos de los dos niveles superiores de potencial de tormentas, según el GDI (Tabla 1). Le siguen el observatorio de Puebla con valores de 24.6 (primer cuartil) y 46.6 (tercer cuartil), y el de Ciudad de México con valores de 16.6 (primer cuartil) y 33.2 (tercer cuartil).

Segregando los resultados del GDI por mes de ocurrencia (sin diferenciar el observatorio del que provienen), se puede observar que las medianas más altas se localizan sobre los meses de verano y otoño, desde junio hasta octubre (Fig. 3b). En este sentido, la mediana más alta se identificó en el mes de septiembre, con un valor de 38.7, le sigue agosto con 34.3, y octubre con 31.9. Los meses con las medianas de GDI más bajas observadas son diciembre con 6.54, seguido de enero y febrero con medianas de 14.5 y 14.7, respectivamente. Para los meses de primavera se obtuvieron medianas con valores intermedios de GDI, entre 14.0 (marzo) y 20.8 (mayo).

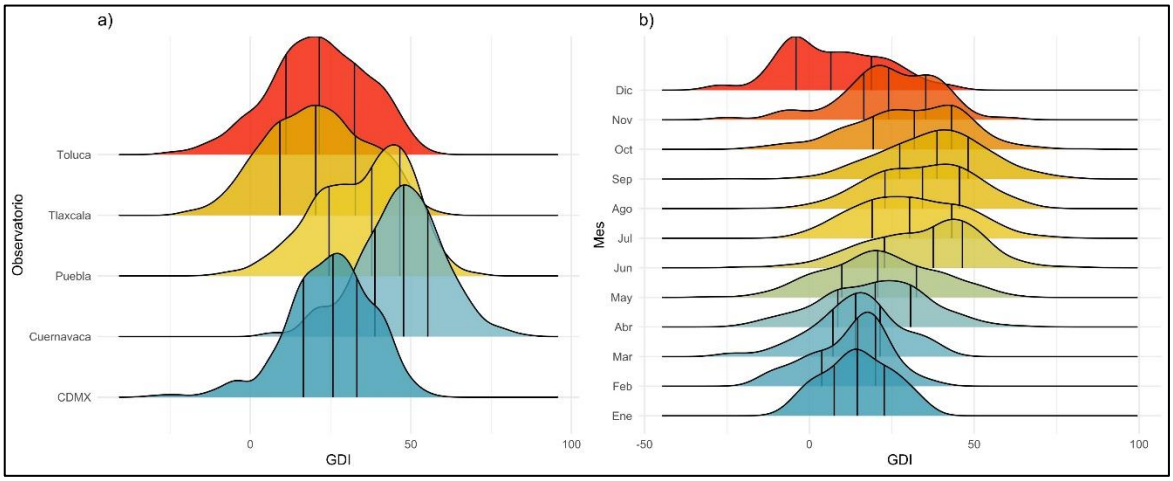

Figura 3. Gráfico ridgelines de la distribución de los valores de GDI para las tormentas eléctricas documentadas por (a) observatorio y (b) mes de ocurrencia. Las líneas verticales indican el primer, segundo y tercer cuartil.

Interesantemente, el único caso donde el primer cuartil se localiza por debajo de 0, que puede interpretarse como potencial de inversiones que limitan la convección, es para las tormentas eléctricas documentadas durante diciembre. El resto de los valores del primer cuartil oscilan desde 3.8 (febrero) hasta 27.4 (septiembre). Para el caso del tercer cuartil, nuevamente durante el invierno, particularmente en diciembre, se observan los valores de GDI menores (18.9), mientras que los máximos se localizan nuevamente en el mes septiembre (48.1). Tomando en consideración la distribución del 50% de los valores de GDI para las tormentas eléctricas, es durante el verano y otoño cuando este índice tiene un mejor rendimiento, específicamente desde junio hasta el mes de octubre. Aquí, los rangos del primer y tercer cuartil van de los 22.8 al 46.4 en junio, hasta 27.4 a 48.1 en septiembre. Cabe recordar que valores por encima de 25 se pueden considerar como potencial de formación de tormentas (Tabla 1).

Una vez analizada la distribución de frecuencias por observatorio y mes, se procedió a generar un conteo de perfiles donde el índice se integraba a cada uno de los siete niveles del GDI inicialmente mencionados en la Tabla 1. La Figura 4 muestra el número de casos de tormentas eléctricas, reclasificadas según los siete niveles del GDI, para cada uno de los observatorios y para cada uno de los meses agrupados de manera trimestral. Los resultados sirven para indicar en dónde y en qué periodos del año, el GDI genera mejores predicciones de formación de tormentas eléctricas.

Para el observatorio de la CDMX, en los pocos eventos de tormenta eléctrica registrados en los meses de invierno, alrededor del 35% obtuvo valores de GDI superiores a 25. Durante la primavera este porcentaje se eleva, y en verano, cuando la máxima frecuencia de tormentas eléctricas es visible, el 57% de los eventos sobrepasa el valor de 25. En otoño, este porcentaje se incrementa hasta cerca del 60%. Sólo unos pocos casos de tormentas eléctricas en la CDMX superan el umbral de 45. Un comportamiento similar se observa en Toluca. En este observatorio sólo un pequeño porcentaje de eventos supera el umbral de 45 en los valores de GDI, alrededor del 5% y 8% para primavera y otoño. Sin embargo, más de la mitad de los eventos ostenta un valor superior a 25, siendo alrededor del 48%, 75% y 80% de los casos en primavera, verano y otoño, respectivamente. Para el observatorio de Tlaxcala, se continúa la tendencia ya mencionada. Es importante notar que en este observatorio registró el mayor número de eventos de tormenta eléctrica con valores entre -20 y 5 de GDI, que indicaría un bajo potencial de tormentas eléctricas. En este mismo sitio, sólo durante el otoño se muestra un porcentaje superior al 50% de eventos con valores de GDI superiores a 25.

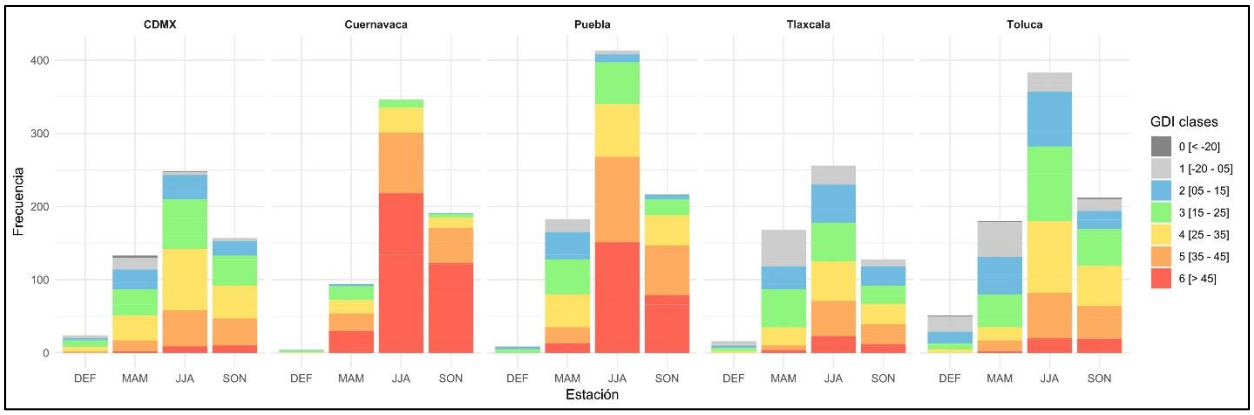

Figura 4. Frecuencia estacional de los eventos de tormenta eléctrica reclasificados en función de los valores de sesgo predefinidos para el GDI (Tabla 1). Las clases 4, 5 y 6 (GDI > 25), pueden considerarse con potencial de formación de tormentas eléctricas de aisladas a generalizadas.

Los resultados de GDI para el observatorio de Puebla muestran un mejor rendimiento con respecto de los analizados previamente. Aquí, en primavera cerca del 44% de los eventos supera el umbral de 25. Para el verano, este porcentaje se eleva hasta cerca del 84% donde más del 37% de los eventos llegan incluso a superar el umbral de 45. En otoño, aunque el número de tormentas decrece, el porcentaje de los casos donde el GDI se mantiene por encima de 25 incrementa nuevamente hasta cerca del 87%. También en otoño, cerca del 37% de los casos exhibe valores superiores a 45.

Resulta claro que el observatorio de Cuernavaca es el lugar donde el índice GDI tiene un mejor rendimiento, reafirmando lo mostrado en la Figura 3. Aquí, por encima del 90% de los eventos de tormenta eléctrica registrados para verano y otoño superan el umbral de 25. En primavera este porcentaje disminuye alrededor del 75%, pero sigue siendo significativo. Otra característica importante de este sitio es que más del 63% de los eventos de tormenta eléctrica registrados sobre verano y otoño superan el umbral de 45 en los valores de GDI. Igual que en los casos anteriores, es durante el invierno cuando el rendimiento de este índice termodinámico decae significativamente, a la par que el número de tormentas registradas también decrece dramáticamente.

Discusión

El índice Gálvez-Davison es un índice termodinámico que busca mejorar la previsión de la convección profunda y el potencial de desarrollo de tormentas eléctricas en regiones tropicales. Los resultados de esta investigación indican que, para el centro de México, este índice tiene un rendimiento sobresaliente, principalmente durante los meses de verano y otoño. Coincidentemente, es durante este periodo cuando mayor cantidad de tormentas eléctricas se registran en el territorio nacional, lo cual sugiere su uso para la predicción meteorológica del tiempo severo.

Ahora bien, algunas de las relaciones entre este índice y los cambios estacionales también son claros. Durante el verano y otoño, diversos fenómenos tropicales tienen lugar en el territorio nacional; por ejemplo, el paso de las ondas del este y los ciclones tropicales. Estudios previos han evidenciado cómo estos sistemas son cruciales para la distribución de lluvia a nivel nacional (Domínguez y Magaña, 2018; Domínguez *et al.*, 2020). Si bien es cierto que este trabajo se centra en la formación de tormentas eléctricas, que, no necesariamente están relacionadas con el paso de ciclones tropicales, trabajos previos han identificado a estos sistemas como mecanismos que promueven la advección de humedad hacia el centro de México, la cual es necesaria para la formación de las tormentas convectivas locales (León-Cruz *et al.*, 2021). Esto lleva a que los resultados derivados de la presente investigación muestren el uso potencial del GDI para entornos tropicales, sobre todo aquellos relacionados con el periodo de actividad ciclónica en México.

Durante la primavera se observa un comportamiento irregular del índice GDI para capturar las condiciones favorables de tormentas eléctricas. Si bien es cierto que no es el periodo del año donde más eventos se documentan (exceptuando mayo), estos marcan el inicio del temporal húmedo en el país. En este periodo, además de cambios en los patrones de viento que favorecen la entrada de humedad a regiones continentales, se observa el paso de sistemas frontales (Lagerquist *et al.*, 2020). La interacción entre sistemas frontales y flujos húmedos ha sido mencionada como una hipótesis en el incremento de tormentas severas aisladas durante la primavera (Carbajal *et al.*, 2019). En este sentido, los resultados arrojados por la presente investigación sugieren que el GDI no es capaz de representar, de manera eficiente, dichas relaciones. Lo anterior puede atribuirse a las masas de aire seco que impulsan los frentes fríos, mismas que al ser capturadas por el índice de inversión, genera un decremento de los valores finales del GDI.

Es importante notar que la orografía prevalente en la zona puede actuar como un mecanismo estático de forzamiento de las tormentas eléctricas. Es decir, que la humedad prevalente al encontrarse con regiones montañosas del centro de México comienza su ascenso hasta el nivel de convección libre, favoreciendo así la formación de convección profunda y húmeda. El mecanismo de forzamiento por montañas es un tema que ha sido previamente mencionado en la región de estudio (Brito-Castillo *et al.*, 2022), incluso se ha

sugerido como detonador de otro tipo de peligros convectivos como los tornados (Carbajal *et al.*, 2019). En este sentido, la corrección topográfica integrada en el cálculo del GDI ayuda a representar de manera aceptable este tipo de mecanismos de forzamiento por el terreno, característica que es ignorada por otro tipo de índices típicos de latitudes medias (por ejemplo, WMAXSHEAR, LI, KI).

Continuando con este tema, se pudo observar cómo en los observatorios de CDMX, Toluca y Tlaxcala, el rendimiento del GDI decae con respecto de lo encontrado en los observatorios de Puebla y Cuernavaca. A partir de los resultados se puede decir que los peores rendimientos del GDI se dan sobre los observatorios de CDMX que se encuentra a 2,308 mnsm y Toluca, localizado a 2,726 mnsm, seguido de Tlaxcala a 2,230 msnm. En cambio, los observatorios de Cuernavaca y Puebla que se localizan a 1635 msnm y 2190 msnm, son los sitios donde el rendimiento del GDI incrementa (mucho más evidente para el caso de Cuernavaca). Los resultados encontrados en este estudio sugieren una relación entre la altura y rendimiento del GDI. Estudios previos en la región del Monzón (Pineda-Martínez *et al.*, 2020) mostraron que el índice GDI es capaz de capturar condiciones de tormentas severas, resaltando la Sierra Madre Occidental y la planicie costera del Océano Pacífico, donde existen también cambios significativos de altura del terreno. En este sentido, se sugiere que futuros estudios se centren en comparar los resultados aquí obtenidos para casos de tormentas eléctricas en zonas bajas; principalmente sobre las planicies costeras del territorio nacional, a fin de verificar la relación entre la altura y la capacidad del GDI para identificar entornos potenciales de desarrollo de tormentas.

Conclusiones

En esta investigación se evaluó la capacidad del índice termodinámico Gálvez-Davison (GDI) para detectar el potencial de desarrollo de tormentas eléctricas en el centro de México durante el periodo 1990 – 2018. Para ello, se empleó un conjunto de datos de 3,413 días con tormenta eléctrica que se obtuvieron a través de cinco observatorios meteorológicos del SMN; mientras que los perfiles atmosféricos se generaron a través de los datos de reanálisis ERA5.

Los resultados de la investigación muestran que el GDI tiene una mayor capacidad para representar el potencial de formación de tormentas eléctricas durante el verano y otoño, y reduce su potencial para la primavera y el invierno. Lo anterior es particularmente problemático para las tormentas de finales de primavera, donde, según la climatología actual, existe un incremento en la frecuencia de este tipo de amenazas naturales. Lo anterior puede atribuirse a la incapacidad del GDI para representar adecuadamente la interacción entre frentes fríos y flujos húmedos. No obstante, dicho índice tiene un rendimiento sobresaliente durante los periodos en los cuales un mayor número de tormentas eléctricas se registran en el centro del país, es decir, verano y otoño.

Por otro lado, existen variaciones espaciales del rendimiento del GDI. Los resultados obtenidos indican que, hacia el sur y este de la zona de estudio, particularmente en Cuernavaca, el GDI tiene un rendimiento sobresaliente, donde más del 60% de los casos documentados en verano y otoño superaron el umbral de 45 en los valores de GDI. Por otro lado, los peores rendimientos se observaron en CDMX, Toluca y Tlaxcala. En este sentido, se puede hipotetizar sobre una relación inversa entre la altitud y el rendimiento de este índice. Esto requiere ser corroborado en futuras investigaciones en el resto del país.

Los resultados de la presente investigación pueden ser empleados para mejorar los sistemas de pronóstico de tormentas eléctricas en el país. En este sentido, sugiere generar adaptaciones y mejoras de este índice, a fin de mejorar su rendimiento en zonas de mayor altitud y durante la estación de primavera, y dichas adaptaciones podrían estar enfocadas particularmente en la corrección por terreno. Es importante notar que las limitaciones encontradas en la base de datos del SMN, donde no se reporta la severidad de la tormenta ni la hora de ocurrencia, así como los sesgos intrínsecos de los reanálisis como ERA5 podrían afectar los valores del GDI calculados. Asimismo, es necesario mencionar que los modelos globales y regionales a partir de los cuales se generan los pronósticos del tiempo poseen diferencias con los datos de reanálisis, principalmente en lo relacionado con los procesos

de validación. En este sentido, instancias como el SMN generan productos con el GDI a partir de salidas del Weather Research and Forecasting (WRF, por sus siglas en inglés) model y el Global Forecast System (GFS, por sus siglas en inglés), pero no muestran procesos de validación del mismo. Por tanto, investigaciones como la que aquí se desarrolló son de particular interés para mejorar los pronósticos del tiempo severo, y, por ende, la gestión integral de los riesgos ante este tipo de eventos meteorológicos extremos en el país.

Agradecimientos

Esta investigación fue apoyada por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT – IA101722), UNAM. Agradecemos también a José Manuel Gálvez por la valiosa información proporcionada durante la generación del código en el lenguaje R para el cómputo del GDI.

Referencias

Brito-Castillo, L., Farfán, L.M., Antemate-Velasco, G.J. (2022). Effect of the Trans-Volcanic Axis on meridional propagation of summer precipitation in western Mexico. International Journal of Climatology, 42, 9304-9318.

Brooks, H.E., Lee, J.W., Craven, J.P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. Atmospheric Research, 67-68, 73-94.

Carbajal, N., León-Cruz, J.F., Pineda-Martínez, L.F., Tuxpan-Vargas, J., Gaviño-Rodríguez, J.H. (2019). Occurrence of anticyclonic tornadoes in a topographically complex region of Mexico. Advances in Meteorology, 2019, 2763153.

Craven, J.P., Brooks, H.E. (2004). Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. National Weather Digest, 28, 13-24.

Czernecki, B., Taszarek, M., Szuster, P. (2023). thundeR: Computation and Visualisation of Atmospheric Convective Parameters. R package version 1.1.1 https://bczernecki.github.io/thundeR/.

Dominguez, C., Magaña, V. (2018). The role of tropical cyclones in precipitation over the tropical and subtropical North America. Frontiers in Earth Science, 6, 19.

Dominguez, C., Done, J.M., Bruyère, C.L. (2020). Easterly wave contributions to seasonal rainfall over the tropical Americas in observations and a regional climate model. Climate Dynamics, 54, 191-209.

Dotzek, N., Groenemeijer, P., Feuerstein, B., Holzer, A.M. (2009). Overview of ESSL's severe convective storms research using the European Severe Weather Database ESWD. Atmospheric research, 93, 575-586.

Gálvez, J.M. (2016). The Gálvez-Davison index for tropical convection. Retrieved February, 27, 2018.

Galway, J.G. (1956). The lifted index as a predictor of latent instability. Bulletin of the American Meteorological Society, 37, 528-529.

Gensini, V.A., Ashley, W.S. (2011). Climatology of potentially severe convective environments from the North American Regional Reanalysis. E-Journal of Severe Storms Meteorology, 6, 1-40.

Gensini, V.A., Converse, C., Ashley, W.S., Taszarek, M. (2021). Machine learning classification of significant tornadoes and hail in the United States using ERA5 proximity soundings. Weather and Forecasting, 36, 2143-2160.

George, J.J. (1960). Weather forecasting for Aeronautics.-New York and London: Academic Press, 673p.

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., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Lupu, E., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146, 1999-2049.

INEGI (2021). Censo Población y Vivienda 2020. Censos y Conteos de Población y Vivienda. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html.

CENAPRED (2023). Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2023. Centro Nacional de Prevención de Desastres. http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/.

Lagerquist, R., Allen, J.T., McGovern, A. (2020). Climatology and variability of warm and cold fronts over North America from 1979 to 2018. Journal of Climate, 33, 6531-6554.

León-Cruz, J.F., Carbajal-Henken, C., Carbajal, N., Fischer, J. (2021). Spatio-temporal distribution of deep convection observed along the trans-Mexican volcanic belt. Remote Sensing, 13, 1215.

León-Cruz, J.F., Pineda-Martínez, L.F., Carbajal, N. (2022). Tornado climatology and potentially severe convective environments in Mexico. Climate Research, 87, 147-165.

León-Cruz, J.F., Caetano, E., Cortés-Ramos, J., Dominguez, C., Méndez-Pérez, J.M. (2023). Thunderstorm and hailstorm environments in Mexico. International Journal of Climatology, 43, 4379-4395.

Miller, R.C. (1967). Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Military Weather Warning Center. Tech. Rept. 200(R), Headquarters, Air Weather Service, USAF, 94 pp.

Muñoz-Arriola, F., Avissar, R., Zhu, C., Lettenmaier, D.P. (2009). Sensitivity of the water resources of Rio Yaqui Basin, Mexico, to agriculture extensification under multiscale climate conditions. Water resources research, 45.

NCEI (2023). U.S. Billion-Dollar Weather and Climate Disasters. National Centers for Environmental Information https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/

Pineda-Martínez, L.F., León-Cruz, J.F., Carbajal, N. (2020). Analysis of severe storms and tornado formation in the northern region of Mexico. Revista bio ciencias, 7.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

Taszarek, M., Brooks, H.E., Czernecki, B. (2017). Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. Monthly Weather Review, 145, 1511-1528.

Taszarek, M., Allen, J.T., Púčik, T., Hoogewind, K.A., Brooks, H.E. (2020). Severe convective storms across Europe and the United States. Part II: ERA5 environments associated with lightning, large hail, severe wind, and tornadoes. Journal of Climate, 33, 10263-10286.

Uma, K.N., Das, S.K. (2019). Do the stability indices indicate the formation of deep convection? Meteorology and Atmospheric Physics, 131, 1-10.

Vidal-Zepeda, R. (2007). Amenazas climáticas, Nuevo Atlas Nacional de México. Ciudad de México: Instituto de Geografía, UNAM. Instituto de Geografía - UNAM

Wickham, H., Romain, F., Henry, L., Müller, K.,Vaughan D. (2023a). Dplyr: A Grammar of Data Manipulation. https://cran.r-project.org/package=dplyr.

Wickham, H., Vaughan, D., Girlich, M., Ushey, K., Posit, P.B.C. (2023b). Tidyr: Tidy Messy Data. https://cran.r-project.org/package=tidyr.

Zhu, C., Lettenmaier, D. P. (2007). Long-term climate and derived surface hydrology and energy flux data for Mexico: 1925–2004. Journal of Climate, 20, 1936-1946.

View publication stats