



Analysis of severe storms and tornado formation in the northern region of Mexico

Análisis de tormentas severas y formación de tornados en la región norte de México

Pineda-Martínez, L. F.¹, León-Cruz, J.F.², Carbajal, N.².

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, UACS, Zacatecas, México. (<http://sociales.uaz.edu.mx/>).

²Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, División de Geociencias Aplicadas. S.L.P. México.

En este trabajo se presenta un análisis de lluvia extrema y tendencias de estas para la región norte de México.

Cite this paper/Como citar este artículo: 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, e885. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e885>



ABSTRACT

This work presents an analysis of extreme rainfall and its trends for the northern region of Mexico. Based on one-day and five-day maximum rainfall events, the sites with the highest incidence of severe storms can be estimated and related to a tornadoes database. The northern and northwestern regions of Mexico are characterized by their high influence of monsoon summer rains, this generates days with heavy rains as storms with more than 20 mm/day. However, the report of tornadoes in that region is relatively low with respect to the central and southeastern zones of the country. Applying the indexes of the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) for climatic stations of the National Meteorological

RESUMEN

Basado en eventos de lluvia máxima a 1-día y 5-días se puede estimar los sitios de mayor incidencia de tormentas severas, y relacionar con la base de datos de tornados. La región del norte y noroeste de México se caracteriza por tener una alta influencia de las lluvias monzónicas de verano, esto genera días con fuertes lluvias en forma de tormentas mayores a los 20 mm/día. No obstante, el reporte de tornados en esa región es relativamente baja con respecto a la zona centro y sureste del país. Aplicando los índices del Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) para estaciones climáticas del Servicio Meteorológico Nacional, distribuidas de manera homogénea en el norte de México, se calcularon los índices para días con precipitación intensa RX1day, RX5day, R95P y SDII. Adicionalmente se realizó un análisis de la variación espaciotemporal de zonas de inestabilidad a partir los índices K y Gálvez-Davison. El objetivo principal es asociar eventos de lluvia extrema con actividad tornádica, y en su caso, observar condiciones favorables para el desarrollo de tornados en

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: December 02nd 2019.

Accepted/Aceptado: April 15th 2020.

Available on line/Publicado: April 20th 2020.

*Corresponding Author:

Luis F. Pineda-Martínez. Universidad Autónoma de Zacatecas, Planta Baja, Edificio de Posgrados II Av. Preparatoria s/n Campus Universitario II Fracc. Progreso Zacatecas, Zac., México. C.P. 98000. Phone: +52(492) 925 6690 ext. 2850. E-mail: lpineda@uaz.edu.mx

Service, homogeneously distributed in northern Mexico, the indexes were calculated for days with intense precipitation RX1day, RX5day, R95P and SDII. Additionally, an analysis of the spatial-temporal variation of instability zones is performed based on K and Gálvez-Davison indexes. The main objective was to associate events of extreme rain with tornadic activity, and where appropriate, observe favorable conditions for the development of tornadoes in that region, and in this way, obtain conjectures if this 'gap' in the information is mostly associated to the lack of reports.

KEY WORDS

Severe Storms, Tornadoes, Northwest Mexico, Detection Indexes, Instability Indexes.

Introduction

Recently, events of meteorological and climatic extreme conditions have an important relevance due to the danger associated to them (Kunkel, 2003). Severe storms are a manifestation of extreme meteorological phenomenon since they affect certain sites with high risk rates (Kunkel *et al.*, 1999; Ruby Leung & Qian, 2009). There is an analysis on the social and economic impact of extreme rainfalls that cause damages to infrastructures and affect people in general.

Since the beginning of this century, an increase in the trends of some extreme meteorological phenomena has been observed (Peterson *et al.*, 2007), associated to maximum and minimum temperatures (Zhou *et al.*, 2009), effects of precipitation such as impacts of tropical cyclone (Farfán *et al.*, 2013), floods (Pineda-Martínez *et al.*, 2014) and to tornados, to a lesser extent (León-Cruz *et al.*, 2019). Although the impact of climate changes according to temperature variations and their trends associated to the increase of greenhouse gases (GHG) has been globally studied, precipitation is less associated to these changes due to its more heterogeneous behavior (Easterling *et al.*, 2000; Kumar *et al.*, 2013). This is mainly due to the fact that rainfall represents a parameter with an annual behavior less predictable than temperature, since it is related to global and regional circulation factors and local effects that make it more difficult to analyze. Heterogeneous

esa región, y de esta manera, obtener conjeturas si éste 'gap' en la información esta mayormente asociado a la falta de reportes.

PALABRAS CLAVE

Tormentas severas, Tornados, Noroeste de México, Índices de detección, Índices de inestabilidad.

Introducción

Los eventos de condiciones extremas meteorológicas y climáticas tienen una importante relevancia actualmente, debido al peligro asociado a ellos (Kunkel, 2003). Las tormentas severas son una manifestación de meteorológica extrema, debido a que afecta sitios puntuales con altas tasas de peligro (Kunkel *et al.*, 1999; Ruby Leung & Qian, 2009). Existe un análisis sobre el impacto social y económico de las lluvias extremas que generan daños a infraestructuras y en general afectaciones en las personas.

Desde el inicio de este siglo se ha observado un incremento en las tendencias de algunos de los fenómenos extremos meteorológicos (Peterson *et al.*, 2007), asociados a temperaturas máximas y mínimas (Zhou *et al.*, 2009), a efectos de precipitación como el impacto de ciclones tropicales (Farfán *et al.*, 2013), inundaciones (Pineda-Martínez *et al.*, 2014) y en menor grado tornados (León-Cruz, *et al.*, 2019). Si bien a nivel global se ha estudiado el impacto de los cambios del clima en función de las variaciones de la temperatura y sus tendencias asociadas al incremento de Gases de Efecto Invernadero (GHG), la precipitación es menos asociada a estos cambios debido a su comportamiento más heterogéneo (Easterling *et al.*, 2000; Kumar *et al.*, 2013). Esto debido principalmente a que la lluvia representa un parámetro con un comportamiento anual menos predecible que la temperatura, ya que se relaciona a factores de circulación global, regional y efectos locales, que la hacen más difícil en su análisis. La distribución espacialmente heterogénea de eventos de lluvia y particularmente de las tormentas hace más complicado tener una red de monitoreo de redes pluviométricas que ayuden al estudio del comportamiento de la precipitación a escalas regionales y locales. No obstante, actualmente existen diversas fuentes de datos capaces de subsanar estas deficiencias de las observaciones, por ejemplo, la

spatial distribution of rainfall events and particularly of storms make it more complicated to have a monitoring of pluviometric networks that support the study of precipitation behavior at regional and local scales.

Nonetheless, nowadays there are diverse data sources capable of solving these deficiencies of observations, for instance, satellite information (Behrangi *et al.*, 2009) and global models of re-analysis (Almazroui, 2016; Bekvsky & Karoly, 2007). Therefore, a greater temporal scale is required for the analysis of temperature and precipitation trends in order to establish behaviors based on these trends for longer periods of time.

Nevertheless, precipitation trends have been observed at global level, which show how maximum rainfalls in one-day and five-day are more frequent, in addition to marked regional patterns (Easterling *et al.*, 2000). In the tropics, a decrease of high-impact tropical cyclones is observed in the Atlantic and an increase of storms and tropical cyclones in the Pacific (Cárdenas *et al.*, 2016; Farfán *et al.*, 2013; Meehl *et al.*, 2009).

In North America, extreme precipitations trends have been studied, particularly in the monsoon region (Adams & Comrie, 1997; Cavazos & Rivas, 2004; Magaña *et al.*, 2003). Some authors showed how there was a trend to increase precipitation in summer for periods prior to 1970 (Dominguez *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2013). Precipitation increases are also associated with an increase and intensification of tropical cyclones (Curtis, 2008; Torres-Alavez *et al.*, 2014). Some of the trends have been associated with climatic indices such as the Pacific Decadal Oscillation (PDO), in the 1970-2000 period (Groisman *et al.*, 1999; Grumm & Hart, 2001; Pavia *et al.*, 2006).

In the northern region of Mexico, precipitation is mainly seasonal, with a maximum during the summer months, from June to September, and it has been related to the intensification phase of the monsoon of Mexico (Adams & Comrie, 1997; Higgins, Chen *et al.*, 1999). The impact of convective moisture transport of the eastern region of the Pacific toward the continent is known (Torres-Alavez *et al.*, 2014; Vega-Camarena *et al.*, 2018), which generates convection zones in the Sierra Madre Occidental. Convective storms are common in this region, which can be associated to an instability process due to the large moisture flux (Bhattacharya &

información satelital (Behrangi *et al.*, 2009). Por otro lado, se requiere de una mayor escala temporal para los análisis de las tendencias de temperatura y precipitación para establecer comportamientos basados de esas tendencias por periodos más largos de tiempo.

Aun así, se han observado tendencias de las precipitaciones a nivel global, donde se muestra como las lluvias máximas en 1 y 5 días son más frecuentes, además de marcados patrones regionales (Easterling *et al.*, 2000). En los trópicos se observa una disminución de ciclones tropicales de alto impacto en el Atlántico y un aumento de tormentas y ciclones tropicales en el Pacífico (Cárdenas *et al.*, 2016; Farfán *et al.*, 2013; Meehl *et al.*, 2009).

En Norteamérica, se han estudiado las tendencias de las precipitaciones extremas, particularmente en la región del monzón (Adams & Comrie, 1997; Cavazos & Rivas, 2004; Magaña *et al.*, 2003). Algunos autores mostraron cómo para periodos previos a 1970, existía una tendencia a incrementar la precipitación de verano (Dominguez *et al.*, 2008; Kumar *et al.*, 2013). Los incrementos de precipitación se asocian también a una aumento e intensificación de ciclones tropicales (Curtis, 2008; Torres-Alavez *et al.*, 2014). Algunas de las tendencias han sido asociadas a índices climáticos como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), en el periodo de 1970-2000 (Groisman *et al.*, 1999; Grumm & Hart, 2001; Pavia *et al.*, 2006).

En el norte de México la precipitación es principalmente estacional, con un máximo en los meses de verano, de junio a septiembre, y se ha relacionado a la fase de intensificación del monzón de México (Adams & Comrie, 1997; Higgins *et al.*, 1999). Se sabe del impacto del transporte convectivo de humedad de la región oriental del Pacífico hacia el continente (Torres-Alavez *et al.*, 2014; Vega-Camarena *et al.*, 2018) lo que genera zonas de convección en la zona de la Sierra Madre Occidental. Las tormentas convectivas son comunes en esta región, las cuales se pueden asociar con proceso de inestabilidad debido a los grandes flujos de humedad (Bhattacharya & Chiang, 2014; Dominguez & Kumar, 2008). Por otro lado, las tormentas y tiempo severo tienen un alto potencial de peligro en la formación de tornados, y de generar tormentas eléctricas en la mayor parte del norte y noroeste de México; que es una de las más activas en cuanto a sistemas convectivos de mesoescala (MCS) (Valdés-Manzanilla, 2015; Vega-Camarena *et al.*, 2018). Debido a este gran potencial de tormentas, en este trabajo planteamos la hipótesis sobre la falta de reportes

Chiang, 2014; Dominguez & Kumar, 2008). On the other hand, storms and severe weather have a high potential risk in the formation of tornadoes, and in generating electric storms in the larger part of northern and northwestern Mexico; which is one of the most active in terms of Mesoscale Convective Systems (MCS) (Valdés-Manzanilla, 2015; Vega-Camarena *et al.*, 2018). Because of this great potential of storms, the hypothesis on the lack of reports on tornadoes in Mexico was proposed in this work, for that region in particular, it results from the low population density and the low access to Internet connection. And particularly, the objective of analyzing extreme precipitations and severe storms was proposed, based on detection and instability indexes.

Material and Methods

Area of study

The area of study selected was in northern and northwestern Mexico (Figure 1), in the region influenced by the North American monsoon (Adams & Comrie, 1997). This region is characterized for presenting seasonal precipitation precisely associated to the intensifying summer months of the monsoon. It is worth noting that, despite presenting conditions of maximum

de tornados en México, para esa región en particular, lo cual, es derivada de la baja densidad poblacional y de acceso a redes de internet. Y en particular, planteamos el objetivo de analizar las precipitaciones extremas y tormentas severas, basados en índices de detección y de inestabilidad.

Material y Métodos

Área de estudio

Seleccionamos un área de estudio al norte y noroeste de México (Figura 1), en la región de influencia del monzón de Norteamérica (Adams & Comrie, 1997). Esta región se caracteriza por presentar una precipitación estacional asociada precisamente a los meses de verano de intensificación del monzón. Es de llamar la atención, que a pesar de tener las condiciones de picos máximos de lluvia tipo convectiva y ser una zona topográficamente compleja de la Sierra Madre Occidental (SMO), existe poca información sobre tormentas severas y más aún, pocos o casi nulo reporte de tornados. León-Cruz *et al.*, (2019) muestran una base de datos de reportes de tornados en México, donde se observa la región del monzón como una de las regiones con menor cantidad de informes.

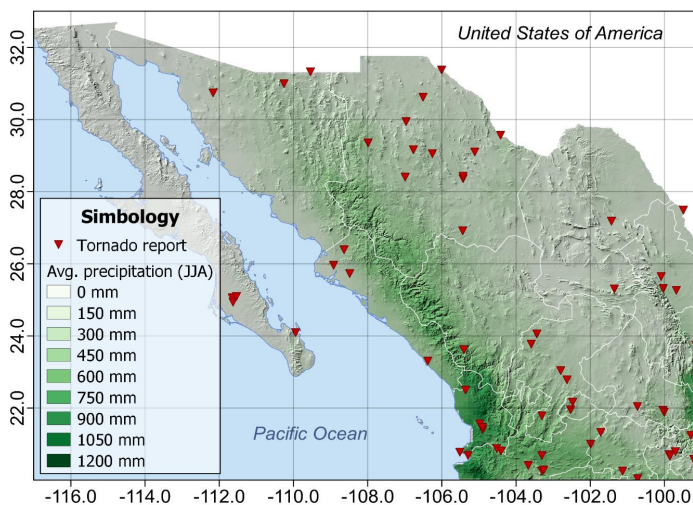


Figure 1. Location map of the study area. The average precipitation data for summer months, June, July, and August (JJA) is shown. Tornado reports for the same period are also indicated.

Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. Se muestra los datos de precipitación media para los meses de verano de Junio, Julio y Agosto (JJA). También se indican los reportes de tornado para el mismo periodo.

peaks of convective rainfall and being a topographically complex zone of the Sierra Madre Occidental (SMO), there are few data about severe storms and what is more, few or almost no reports of tornadoes. León-Cruz *et al.*, (2019) showed a database of tornado reports in Mexico, where the monsoon region is observed as one of the regions with the least amount of reports.

León-Cruz (2019) showed the relation between population density and tornado reports of in Mexico, thus delimiting the central region of the country, where around 40 % of tornadoes activity in the country has been documented. By means of environmental parameters it is possible to identify regions of the country with a high instability potential but low reports density. In northern and northeastern Mexico, it is clear that a few or no reports about the core of the monsoon region have been registered (Figure 1). Proportionally to the center of the country, population density is lower in this region. In this sense, the distribution of tornadoes reports is in accordance to population density and to the access to technological sources. From this observation, the current study aimed to analyze, by means of data of surface observations and products of re-analysis, the space-time distribution of extreme events, its trends and its relation with the ones of instability potential.

Climatic data and detection indexes

In order to study the cases of extreme rainfall from climatic data, conventional stations of CONAGUA in charge of the Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2018) were selected, for the region of northwestern Mexico. Various selection criteria of these stations were considered. The selected stations had to have at least thirty years of data and gaps no longer than a year in the series between 1950 and 2015, to fulfill the conditions of homogeneity, which was realized through *Rclimdex* libraries; thereby 72 stations were selected for this study. From the data from the selected stations, extreme precipitation indexes were calculated based on detection indices from the Experts Team in Climate Change and Detection Indices (ETCCDI). The indices used were those of maximum precipitation in one-day (RX1day), maximum precipitation in five-day (RX5day), simple daily intensity index (SDII), and very humid days (R95P) (Zhang *et al.*, 2004). Linear trends were also calculated for each one of the indexes.

ERA5 re-analysis and instability indexes

Data from the atmospheric ERA5 re-analysis

León-Cruz (2019), muestra la relación entre densidad de población y reportes de tornados en México, demarcando así la región central del país, donde se han documentado alrededor del 40 % de la actividad de tornados del país. Por medio de parámetros ambientales logra identificar regiones del país de alto potencial de inestabilidad, pero baja densidad de reportes. En el norte y noreste de México resulta claro una escasa o nula cantidad de reportes sobre el núcleo de la región del Moztón (Figura 1). En proporción al centro del país la densidad de población en esta región es menor. En este sentido, la distribución de los reportes de tornados está en función de la densidad de población y el acceso a los recursos tecnológicos. A partir de dicha observación, el presente estudio se plantea analizar, a través de datos de observaciones en superficie y productos de reanálisis, la distribución espaciotemporal de eventos extremos, sus tendencias y su relación con los el potencial de inestabilidad.

Datos climáticos e índices de detección

Para estudiar los casos de lluvia extrema a partir de datos climáticos, fueron seleccionadas las estaciones convencionales de la CONAGUA a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2018), para la región del noroeste de México. Se consideraron varios criterios de selección de estas estaciones. Las estaciones seleccionadas debían tener por lo menos 30 años de datos y con huecos no mayores a un año en las series entre 1950 y 2015, cumplir con las condiciones de homogeneidad, el cual fue realizado mediante las librerías *Rclimdex*; así fueron seleccionadas 72 estaciones usadas en este estudio. A partir de los datos de las estaciones seleccionadas se calcularon los índices de precipitación extrema a partir de los índices de detección del Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI). Los índices usados fueron los de Precipitación máxima en un día (RX1day), Precipitación máxima en 5 días (RX5day), índice simple de intensidad diaria (SDII), y Días muy húmedos (R95P) (Zhang *et al.*, 2004). También se calcularon las tendencias lineales para cada uno de los índices.

Reanálisis ERA5 e índices de inestabilidad

Para los ambientes de inestabilidad se utilizaron datos del reanálisis atmosférico ERA5 (Hersbach *et al.*, 2019). Este conjunto de datos abarca el periodo de 1979 a la actualidad, es desarrollado por el Copernicus Climate Change Service (C3S), y sustituyó recientemente al

were used for the instability environments (Hersbach *et al.*, 2019). This group of data comprises the period from 1979 to present time, it was developed by Copernicus Climate Change Service (C3S), and recently replaced the ERA-Interim re-analysis (Berrisford *et al.*, 2011). ERA5 provides estimations every hour (maximum temporal resolution) with a great amount of climate-atmospheric, terrestrial and oceanic variables. Re-analysis comprises the totality of the terrestrial surface in a quadrant of 30 km and divides the atmosphere in 137 vertical levels, from the surface to 80 km in height. For the present study, the monthly means of 40 years (1979-2017) of temperature and relative humidity variables at 500-hPa, 700-hPa, 850-hPa and 950-hPa were used.

Instability conditions in the atmosphere can be analyzed from different perspectives. One of the most common ways is from the construction of indexes. These indexes are designed by using simple equations based on the content of humidity and temperature of the air lots at different levels of the atmosphere. For this research work, K index (KI) (George, 2014) and Gálvez-Davison index (GDI) (Galvez & Davison, 2015) were selected. Even though it is true that these indexes are commonly used for operative forecast, its calculation and analysis from the climatic perspective results useful for the identification of temporal patterns and for the localization of potential zones for the development of storms. The description and interpretation of each index were exposed in the corresponding section of results.

Results and Discussion

Detection indices

The value of detection indexes showed periods according to precipitation intensity. These periods resulted clearer when anomalies were observed (Figure 2). The simple daily intensity index of rainfall (SDII) is an indicator of total annual rainfall divided by the humid days, in other words, those in which precipitation is greater than 1 mm (Figure 2a). SDII gives a general idea of the most intense rainfall periods. For SDII, a very humid period was observed from 1950 to 1970, a less intense precipitation period from 1970 to 1999. That period coincided as well with a decrease in global temperature associated to natural forces like volcanic eruptions (Brown *et al.*, 2008). The most recent period

reanálisis de ERA-Interim (Berrisford *et al.*, 2011). ERA5 proporciona estimaciones cada hora (máxima resolución temporal) de gran cantidad de variables climáticas, atmosféricas, terrestres y oceánicas. El reanálisis cubre la totalidad de la superficie terrestre en una cuadrícula de 30km y divide la atmósfera en 137 niveles verticales, desde la superficie hasta los 80 km de altura. Para el presente estudio se utilizaron los promedios mensuales de 40 años (1979-2017) de las variables de temperatura y humedad relativa a 500-hPa, 700-hPa, 850-hPa y 950-hPa.

Las condiciones de inestabilidad en la atmósfera pueden ser analizadas desde diferentes perspectivas. Una de las maneras más comunes es a partir de la construcción de índices. Estos se diseñan utilizando ecuaciones simples basadas en el contenido de humedad y temperatura de las parcelas de aire a diferentes niveles de la atmósfera. Para la presente investigación, fueron seleccionados el índice K (KI) (George, 2014) y el Gálvez-Davison (GDI) (Galvez & Davison, 2015). Si bien es cierto que éstos suelen utilizarse para el pronóstico operativo, su cálculo y análisis desde la perspectiva climática, resulta útil para la identificación de patrones temporales y la localización de zonas potenciales para el desarrollo de tormentas. La descripción e interpretación de cada índice se expone en la sección de resultados correspondiente.

Resultados y Discusión

Índices de detección

Los valores de los índices de detección muestran periodos en función a la intensidad de la precipitación. Estos periodos resultan más claros cuando observamos las anomalías de los índices (Figura 2). El índice simple de intensidad diaria de lluvia (SDII) es un indicador de la lluvia total anual dividida entre los días húmedos, es decir aquellos donde la precipitación es mayor a 1 mm (Figura 2a). El SDII da una idea general de los periodos de lluvia más intensa. Para SDII se observa un periodo muy húmedo de 1950 a 1970, un periodo de menor intensidad de precipitación de 1970 a 1999. Ese periodo también coincide con una disminución de la temperatura global asociado a forzantes naturales como erupciones volcánicas (Brown *et al.*, 2008). En el periodo más reciente a partir del año 2000, se observa un aumento de las precipitaciones, en este caso de los

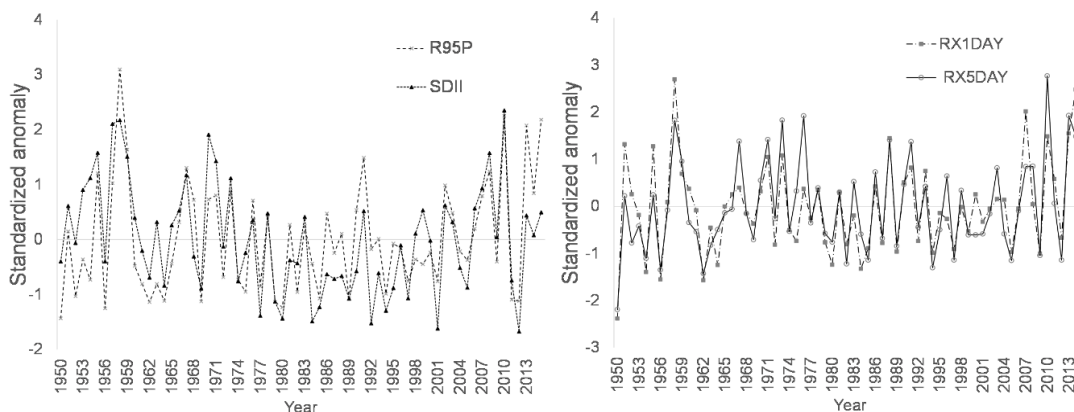


Figure 2. Standardized anomaly of the detection indexes calculated on the average of the 72 climatic stations for a) SDII and R95P b) Rx1day, Rx5day.

Figura 2. Anomalía estandarizada de los índices de detección calculados sobre el promedio de las 72 estaciones climáticas para a) SDII y R95P b) Rx1day, Rx5day.

starting from the year 2000, an increase in precipitations was observed, in this case of intense rainfall events in one-day and 5-day (RX1day and RX5day) (Figure 2b). This has been reported for the southern region of the United States of America and northwestern Mexico (Castro *et al.*, 2001; Cavazos *et al.*, 2008; Cerezo-Mota *et al.*, 2016). The behavior in these patterns of increasing rainfalls has been associated to effects caused by El Niño Southern Oscillation (ENSO) and quality phases of PDO for the region (Pavia *et al.*, 2006). From 1994, an increase in strong precipitation was observed in regions of the Sierra Madre Occidental (García-Péz & Cruz-Medina, 2009).

In the most recent period 1999-2015 the trends of rainfalls events were more frequent. These tendencies have been associated to a greater increase in sea surface temperature (SST), causing a greater quantity of vertical moisture flux which generated an increase in convective events (Valdéz-Manzanilla, 2015). These increases have not been uniform in the entire area, although significant increases in temperature were identified in the region (Cavazos *et al.*, 2019); precipitation patterns presented the most heterogeneous patterns, perhaps more associated to topographic effects. Precipitation showed a negative trend in the whole region of northwestern Mexico (Figure 3), in agreement with other

eventos de lluvia intensa en 1 día y 5 días (RX1day y RX5day) (Figura 2b). Esto se ha reportado para la región de sur de USA y el noroeste de México (Castro *et al.*, 2001; Cavazos *et al.*, 2008; Cerezo-Mota *et al.*, 2016). El comportamiento en estos patrones de aumento de lluvias se ha asociado a efectos de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y fases cálidas de PDO para la región (Pavia *et al.*, 2006). Se observó un aumento a partir de 1994 de precipitación fuerte en regiones de la sierra madre occidental (García-Péz & Cruz-Medina, 2009).

En el periodo más reciente de 1999-2015 las tendencias de eventos de lluvias fueron más frecuentes. Estas tendencias han sido asociadas a un mayor aumento en la temperatura superficial del mar (SST), causando mayor cantidad de flujos verticales de humedad lo que genera un incremento en eventos convectivos (Valdéz-Manzanilla, 2015). Estos incrementos no han sido uniformes en toda el área, si bien se identificaron aumentos significativos de las temperaturas en la región (Cavazos *et al.*, 2019); los patrones de precipitación presentan patrones más heterogéneos, quizá más asociados a efectos topográficos. La precipitación muestra una tendencia negativa en toda la región del noroeste de México (Figura 3), lo cual es consistente con otros estudios; con una anomalía negativa y un

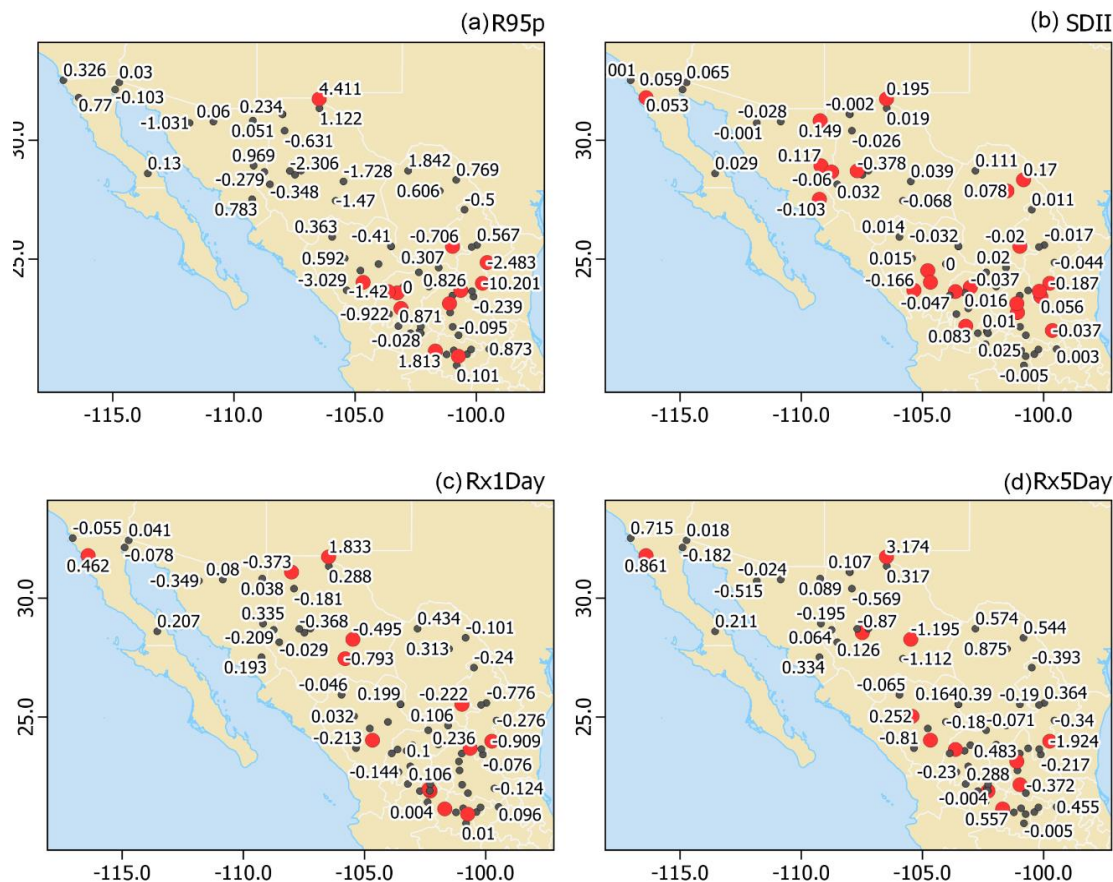


Figura 3. Tendencias lineales de los índices calculados para las estaciones climáticas para: a) R95P, b) SDII, c) Rx1Day y d) Rx5Day. Los puntos marcados con rojo indican un valor estadísticamente significativo al 5 %.

Figure 3. Linear trends of the indices calculated for the climatic stations for: a) R95P, b) SDII, c) Rx1Day and d) Rx5Day. Red points indicate a statistically significant value at 5 %.

studies; with a negative anomaly and a decrease of -32 mm/decade, in the last 30 years (Cavazos *et al.*, 2019).

The increase in intense precipitation in one-day and 5-day showed a negative trend in the region of the SMO, in the larger part of northwestern Mexico, although it is interesting to observe that these trends are positive towards the eastern slope of the SMO in the states of Durango and Chihuahua (Figures 3c and 3d). This indicates a negative anomaly in the core zone of the monsoon, but with an increase in other regions towards the north and northeast.

decremento de -32 mm/década, en los últimos 30 años (Cavazos *et al.*, 2019).

El aumento de la precipitación intensa en 1 y 5 días muestra una tendencia negativa en la región de la SMO, en la mayor parte del noroeste de México. Aunque es interesante observar que estas tendencias son positivas hacia la vertiente este de la SMO en los estados de Durango y Chihuahua (Figuras 3c y 3d). Esto indica una anomalía negativa en la zona núcleo del monzón, pero con un aumento en otras regiones hacia el norte y noreste.

Instability indexes

K index

Instability K index defines the differences in temperature and dew point temperature at different levels of the atmosphere, particularly between 850 hPa and 500 hPa. Values of K lower than 20 indicate a low probability of storm formation, between 20-25 isolated events, from 26 to 30 very disperse electric storms, from 31 to 35 disperse events and greater than 35 intense storms.

During summer, maximum activities of K index were presented in Figure 4. These were aligned over the SMO and coincided with the topographic characteristics. In turn, this potential of instability was associated to humid flows of the Pacific. These

Índices de inestabilidad

Índice K

El índice de inestabilidad K, define las diferencias de temperatura y temperatura de punto de rocío a diferentes niveles de la atmósfera, particularmente entre los 850 hPa y los 500 hPa. Los valores de K menores a 20 indican baja probabilidad de formación de tormentas, entre 20 a 25 eventos aislados, de 26 a 30 tormentas eléctricas muy dispersas, de 31 a 35 eventos dispersos y de mayores a 35 tormentas intensas.

En la Figura 4, se observa que durante el verano se presentan los máximos de actividad del índice K. Estos se alinean sobre la SMO y coinciden con las características topográficas. A su vez, dicho potencial de inestabilidad está asociado a flujos húmedos del Océano Pacífico.

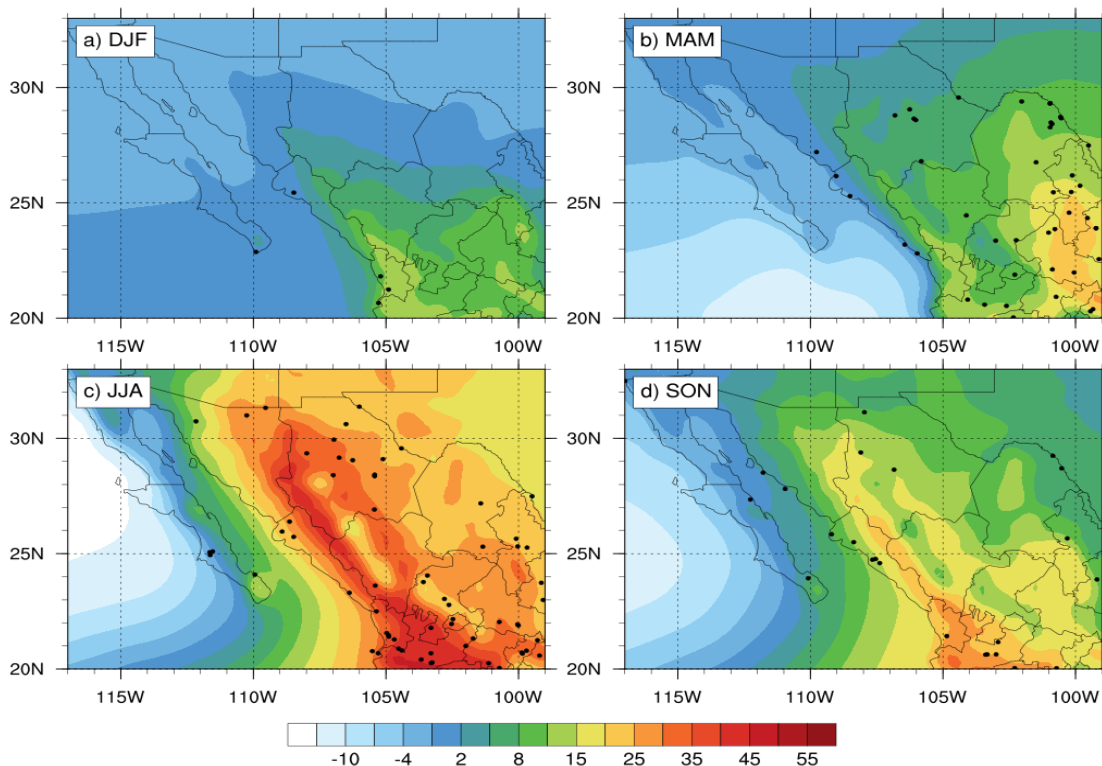


Figure 4. Seasonal variation (a) December, January, February (DEF), (b) March, April, May (MAM), (c) June, July, August (JJA), and (d) September, October, November (SON) of the K Index (KI). The black dots show the recorded tornadic activity for the same period time.

Figura 4. Variación estacional (a) Diciembre, Enero, Febrero (DEF), (b) Marzo, Abril, Mayo (MAM), (c) Junio, Julio, Agosto (JJA) y (d) Septiembre, Octubre, Noviembre (SON), del Índice K (KI). Los puntos en negro muestran la actividad tornádica registrada para el mismo periodo.

conditions generated an increase in vertical flows and were related to the generation of convective storms. Results shown coincided well with what was expected by the conditions of the monsoon of North America and coincided with previous researches (Cerezo-Mota *et al.*, 2016; Cortez Vazquez, 1999; Douglas *et al.*, 1993; Higgins *et al.*, 1999).

Galvez-Davison index

Another one of the most used indexes nowadays is Galvez-Davison index (GDI) (Figure 5). It was developed with the purpose of improving forecasting of the convection in the tropics. It seeks to highlight the important processes regulating convection in trade winds regimes, as well as improving the detailing of the favorable areas for convection obtained with the K index (Galvez & Davison, 2015). This index considers temperatures and mixing ratios at different levels of the

Tales condiciones generan un aumento en los flujos verticales y se relacionan con la generación de tormentas convectivas. Los resultados mostrados coinciden de buena manera con lo esperado por las condiciones del monzón de Norteamérica y coincide con investigaciones previas (Cerezo-Mota *et al.*, 2016; Cortez Vazquez, 1999; Douglas *et al.*, 1993; Higgins *et al.*, 1999).

Índice Gálvez-Davison

Otro de los índices más utilizados en la actualidad es el Gálvez-Davison (GDI) (Figura 5). Este se desarrolló con el objetivo de mejorar el pronóstico de la convección en los trópicos. Busca resaltar los procesos importantes que regulan la convección en regímenes de vientos alisios, así como mejorar el detalle de las áreas favorables para convección obtenidas del Índice K (Galvez & Davison, 2015). Este índice considera las temperaturas y razones de mezcla en diferentes niveles de la atmósfera. Para el

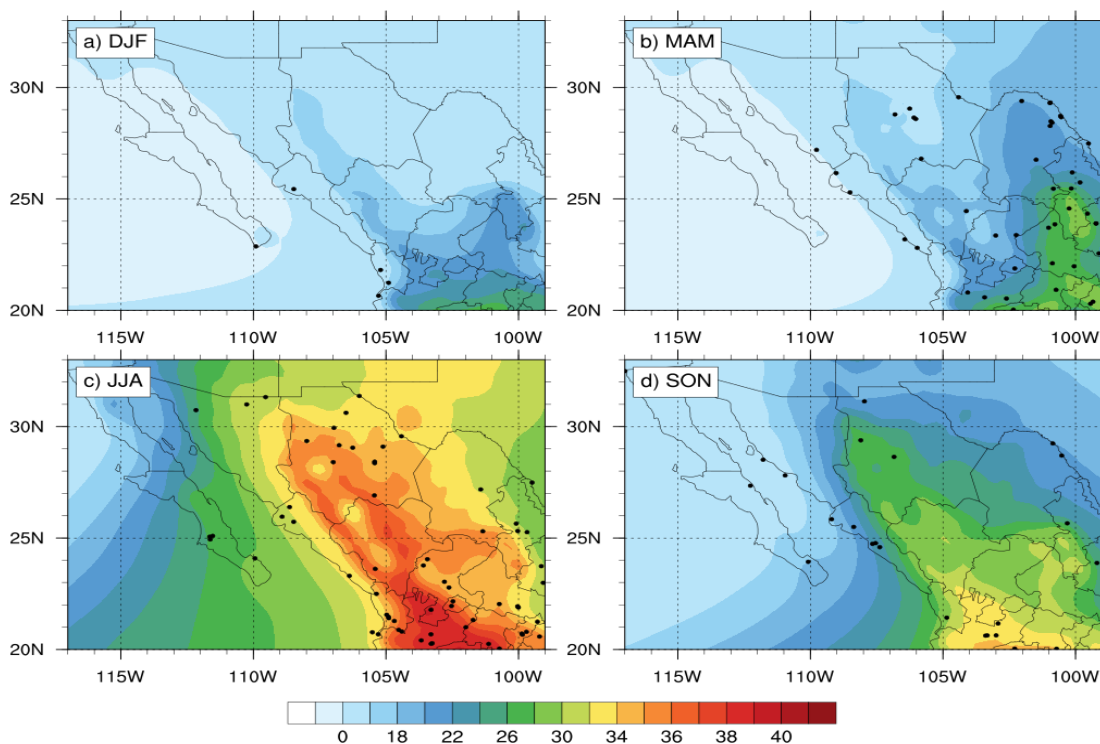


Figure 5. Seasonal variation (a) December, January, February (DEF), (b) March, April, May (MAM), (c) June, July, August (JJA), and (d) September, October, November (SON) of the Gálvez-Davison Index (GDI). The black dots show the recorded tornadic activity for the same period time.

Figura 5. Variación estacional (a) Diciembre, Enero, Febrero (DEF), (b) Marzo, Abril, Mayo (MAM), (c) Junio, Julio, Agosto (JJA) y (d) Septiembre, Octubre, Noviembre (SON), del Índice GDI. Los puntos en negro muestran la actividad tornádica registrada para el mismo periodo.

atmosphere. For the analysis of the potential of formation of isolated storms and disperse deep convection it is associated to values between 25 to 35, from 35 to 45 it increases the potential of storms capable of producing strong precipitations and values higher than 45 are significant indicators of generalized storms.

From the analysis of both instability indexes, it could be seen how the region of the SMO has a high potential for generating intense storms, just as registered in observed data. The highest values were registered also during the summer months JJA (Figure 4c and 5c), which coincided with the period of intensification of the monsoon. Due to the dynamics of the summer monsoon rains, high instabilities generated by the vertical high moisture flux (Englehart & Douglas, 2001). The values of both indexes (K and GDI), have been used for the estimation of instabilities in the atmosphere which is a promotor of tornadogenesis. From figures 4 and 5, a greater correspondence of the number of tornado reports with high values in the indexes during summer can be observed.

Intensification mechanisms of precipitation in summer

The studied region has a high influence of the monsoon (Douglas *et al.*, 1993; Cerezo-Mota *et al.*, 2016). The effect of the increase of SST in May generated the beginning of the displacement of the atmospheric circulation at medium levels in a flow of the west in the northern part of the Gulf of California, to a change in an opposite sense in June. This generated a major moisture transport towards the continent causing the beginning of the development of monsoon close to the middle of June. This mechanism has been described as an effect because of the displacement of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) towards the northern hemisphere, causing a cyclonic circulation at low levels of the atmosphere which gives rise to vertical moisture flux in an increase of convective processes (Douglas *et al.*, 1993; Cortez Vazquez, 1999). This convective activity in the Eastern Pacific coasts of Mexico as well as the Gulf of California, increases the amount of precipitation from June to September, with a greater incidence at the base of the Sierra Madre Occidental and decreasing towards the region of the Mexican Plateau (Englehart & Douglas, 2001; Vega-Camarena *et al.*, 2018).

análisis del potencial de formación de tormentas aisladas y convección profunda dispersa se asocia a valores entre 25 a 35, de 35 a 45 aumenta el potencial de tormentas capaces de producir fuertes precipitaciones y valores superiores a 45 son indicadores significativos de tormentas generalizadas.

Del análisis de ambos índices de inestabilidad podemos ver como la región de la SMO tiene un alto potencial en la generación de tormentas intensas, tal como se registra en los datos observados. Los valores más altos se registran también durante los meses de verano JJA (Figura 4c y 5c), que coincide con el periodo de intensificación del monzón. Debido a la dinámica del verano de las lluvias monzónicas, generan altas inestabilidades por el alto flujo vertical de humedad (Englehart & Douglas, 2001).

Los valores de ambos índices (K y GDI), han sido usados para la estimación de inestabilidades en la atmosfera lo cual es un promotor de la tornadogénesis. De las figuras 4 y 5, se observa una mayor correspondencia del número de casos de reportes de tornados con valores altos en los índices durante el verano.

Mecanismos de intensificación de la precipitación de verano

Como ya se mencionó, esta región tiene una alta influencia del monzón (Douglas *et al.*, 1993; Cerezo-Mota *et al.*, 2016). El efecto del aumento en SST en mayo, generan el inicio del desplazamiento de la circulación atmosférica en niveles medios en un flujo del oeste en el norte del Golfo de California, a un cambio en sentido contrario en el mes de Junio. Esto genera un mayor transporte de humedad hacia el continente causando el inicio del desarrollo del Mozón cerca de la mitad del mes junio. Este mecanismo ha sido descrito como un efecto por el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) hacia el hemisferio norte, causando una circulación ciclónica en niveles bajos de la atmósfera que da lugar a flujos verticales de humedad en un aumento de procesos convectivos (Douglas *et al.*, 1993; Cortez Vazquez, 1999). Esta actividad convectiva en las costas del Pacífico Oriental en las costas de México así como el Golfo de California, aumenta la cantidad de precipitación en los meses de Junio a Septiembre, con mayor incidencia al pie de la Sierra Madre Occidental y disminuyendo hacia la región del Altiplano mexicano (Englehart & Douglas, 2001; Vega-Camarena *et al.*, 2018).

The major transport of vertical moisture by convection generates an increase in rainfalls (Douglas *et al.*, 1993; Jana *et al.*, 2018). Once this mechanism is established, it is also forced by a marked difference in surface temperature of the ocean and the continent (Torres-Alavez *et al.*, 2014; Turrent & Cavazos, 2009). This land-sea thermal contrast causes moisture to be transported by advection towards the north and northeast in the Gulf of California towards to continent (Englehart & Douglas, 2001). This is one of the main mechanisms described as the effect of the monsoon in the regional precipitation of the Eastern Pacific of Mexican coasts. As well, it is known that this mechanism is affected by climatic indexes such as the Pacific Decadal Oscillation (PDO) (Pavia *et al.*, 2006) and of El Niño South Oscillation (ENSO) (Magaña *et al.*, 2003). The study region receives close to 70 % of rainfalls from June to September (Douglas *et al.*, 1993), hence their importance in the management of hydric resources, risk prevention of floods and potentially severe weather. The region is also very productive of Mesoscale Convective Systems (MCS), these dynamics provide large moisture flux at middle and low levels of the atmosphere (Valdés-Manzanilla, 2014; Vega-Camarena *et al.*, 2018). Nevertheless, the dynamics generate lower quantity of storms, and tornadoes, as observed in Figures 4 and 5. Finally, instability conditions decrease in September and October.

Conclusions

There is a high potential for generation of storms in the northwestern region of Mexico, due to a high flow of humidity in the summer months. These moisture flows are associated to the intensification of the monsoon, which in turn is driven by the displacement of ITCZ. A large part of these moisture flows are forced by a land-sea thermal contrast but highly canalized by topography as well. The values from the detection indexes associated to intense to extreme rainfall, R95P, RX1day and RX5day, showed a positive trend in the last decade. These trends are associated to an increase in sea surface temperature (SST). The spatial distribution of these trends was positive in the region of the SMO and with a negative anomaly in the core zone of the monsoon, but with an increase towards the northern and northeastern part of Mexico. Just like of the region of the Trans-Mexican volcanic Belt, topography plays an

El mayor transporte de humedad vertical por convección genera un aumento en las lluvias (Douglas *et al.*, 1993; Jana *et al.*, 2018). Una vez establecido este mecanismo también es forzado por una diferencia marcada en las temperaturas superficial del océano y el continente (Torres-Alavez *et al.*, 2014; Turrent & Cavazos, 2009). Este contraste térmico causa que la humedad sea transportada por advección hacia el norte y noreste en del Golfo de California hacia el continente (Englehart & Douglas, 2001). Este es el uno de los mecanismos principales descritos como el efecto del monzón en la precipitación de región del Pacífico Oriental de costas mexicanas. También se sabe que este mecanismo es afectado por índices climáticos como la oscilación de las fases Decadales del Pacífico (PDO) (Pavia *et al.*, 2006) y de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) (Magaña *et al.*, 2003). La región de estudio recibe cerca del 70 % de las lluvias en los meses de junio a septiembre (Douglas *et al.*, 1993), de ahí su importancia en el manejo de recursos hídricos, la prevención de riesgo a inundaciones y potencial de tiempo severo en la región. Por otro lado, la región es muy productiva de Sistemas Convectivos Mesoescala (MCS) (Valdés-Manzanilla, 2015), y ciclones tropicales con mayor intensidad al final del verano para la región del Pacífico oriental (Farfán *et al.*, 2013; Martínez-Sánchez & Cavazos, 2014; Vega-Camarena *et al.*, 2018). Sin embargo, la dinámica genera una menor cantidad de tormentas y tornados, como se observa en las Figuras 4 y 5. Finalmente, las condiciones de inestabilidad disminuyen en septiembre y octubre.

Conclusiones

Existe un alto potencial de generación tormentas en la región noroeste de México, debido a un alto flujo de humedad en los meses de verano. Estos flujos de humedad se asocian a la intensificación del monzón, que a su vez es impulsado por el desplazamiento de la ITCZ. Gran parte de estos flujos de humedad son forzados por un contraste térmico océano-continente, pero también altamente canalizados por la topografía. Los valores de los índices de detección asociados a lluvia intensa a extrema, R95P, RX1day y RX5day, mostraron una tendencia positiva en la última década. Estas tendencias son asociadas a un aumento en la temperatura superficial del mar (SST). La distribución espacial de estas tendencias fue positivas en la región de la SMO y con una anomalía negativa en la zona núcleo del monzón, pero con un aumento hacia el norte y noreste de México. Al igual que la región del Faja Volcánica Transmexicana, la topografía juega un papel

important role in the intensification of convection zones that generate severe storms and eventually tornadoes. The lack of operational monitoring of severe weather in Mexico makes it difficult to identify storms cores with the purpose of generating a better climatology of these types of events. Severe storms and events of tornadoes have been scarcely studied in Mexico. Severe storms associated to convective processes in Mexico have a highly topographic component. The configuration of topography in Mexico determines greatly the regions of high potential of development of severe electric storms and tornadoes. In these sense, more knowledge is required about the environmental conditions under which these phenomena are developed to generate better forecasting tools.

importante en la intensificación de zonas de convección que generan tormentas severas y eventualmente tornados. La falta de un monitoreo operacional de tiempo severo en México hace difícil identificar núcleos de tormentas con el objetivo de generar una mejor climatología de este tipo de eventos. Las tormentas severas y eventos de tornados han sido escasamente estudiados en México. Las tormentas severas asociadas a procesos convectivos en México tienen un componente altamente topográfico. La configuración de la topografía de México determina en gran medida las regiones de alto potencial de desarrollo de tormentas severas eléctricas y tornados. En este sentido, se requiere de mayor conocimiento de las condiciones ambientales sobre las cuales estos fenómenos se desarrollan para generar mejores herramientas de pronóstico.

References

- Adams, D. K. & Comrie, A. C. (1997). The North American Monsoon. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(10): 2197–2213. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2197:TNAM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2197:TNAM>2.0.CO;2)
- Almazroui, M. (2016). RegCM4 in climate simulation over CORDEX-MENA/Arab domain: Selection of suitable domain, convection and land-surface schemes. *International Journal of Climatology*, 36(1): 236–251. <https://doi.org/10.1002/joc.4340>
- Behrangi, A., Hsu, K. L., Imam, B., Sorooshian, S., Huffman, G. J. and Kuligowski, R. J. (2009). PERSIANN-MSA: A precipitation estimation method from satellite-based multispectral analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 10(6), 1414–1429. <https://doi.org/10.1175/2009JHM1139.1>
- Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M. and Simmons, A. (2011). *The ERA-Interim archive, version 2.0*.
- Bhattacharya, T. & Chiang, J. C. H. (2014). Spatial variability and mechanisms underlying El Niño-induced droughts in Mexico. *Climate Dynamics*, 43(12): 3309–3326. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2106-8>
- Brown, S. J., Caesar, J. and Ferro, C. A. T. (2008). Global changes in extreme daily temperature since 1950. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113(5): 1–11. <https://doi.org/10.1029/2006JD008091>
- Bukovsky, M. S. & Karoly, D. J. (2007). A brief evaluation of precipitation from the North American regional reanalysis. *Journal of Hydrometeorology*, 8(4): 837–846. <https://doi.org/10.1175/JHM595.1>
- Cárdenas, O. L., Campos, M. N., Sevilla, P. M., Guerrero, R. R., Ocampo, H. A. G. and Moreno, M. N. H. (2016). Estimating trends and return periods of daily extreme precipitation associated with tropical cyclones in the core North American monsoon. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(6): 2283–2292. <https://doi.org/10.15244/pjoes/64161>
- Castro, C. L., McKee, T. B. and Pielke, R. A. (2001). The relationship of the North American Monsoon to tropical and North Pacific Sea surface temperatures as revealed by observational analyses. *Journal of Climate*, 14(24): 4449–4473. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<4449:TROTNA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4449:TROTNA>2.0.CO;2)
- Cavazos, T., Luna-Niño, R., Cerezo-Mota, R., Fuentes-Franco, R., Méndez, M., Pineda Martínez, L. F. and Valenzuela, E. (2019). Climatic trends and regional climate models intercomparison over the CORDEX-CAM (Central America, Caribbean, and Mexico) domain. *International Journal of Climatology*, (August), 40(3): 1396–1420. <https://doi.org/10.1002/joc.6276>
- Cavazos, T. & Rivas, D. (2004). Variability of extreme precipitation events in Tijuana, Mexico. *Climate Research*, 25(3): 229–243. <https://doi.org/10.3354/cr025229>
- Cavazos, T., Turrent, C. and Lettenmaier, D. P. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones

- in the core of the North American monsoon. *Geophysical Research Letters*, 35(21): 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL035832>
- Cerezo-Mota, R., Cavazos, T., Arritt, R., Torres-Alavez, A., Sieck, K., Nikulin, G., Moufouma Okia W. and Salinas-Prieto, J. A. (2016). CORDEX-NA: Factors inducing dry/wet years on the North American Monsoon region. *International Journal of Climatology*, 36(2): 824–836. <https://doi.org/10.1002/joc.4385>
- Cortez Vázquez, M. (1999). Marcha anual de la actividad convectiva en México. *Atmósfera*, 12(2). <https://www.revis-tascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/28132>
- Curtis, S. (2008). The Atlantic multidecadal oscillation and extreme daily precipitation over the US and Mexico during the hurricane season. *Climate Dynamics*, 30(4): 343–351. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0295-0>
- Dominguez, F. & Kumar, P. (2008). Precipitation recycling variability and ecoclimatological stability - A study using NARR Data. Part I: Central U.S. plains ecoregion. *Journal of Climate*, 21(20): 5165–5186. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI1756.1>
- Dominguez, F., Kumar, P. and Vivoni, E. R. (2008). Precipitation recycling variability and ecoclimatological stability - A study using NARR data. Part II: North American monsoon region. *Journal of Climate*, 21(20): 5187–5203. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI1760.1>
- Douglas, M. W., Maddox, R. A., Howard, K. and Reyes, S. (1993). The Mexican monsoon. *Journal of Climate*, Vol. 6: 1665–1677. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1665:TMM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1665:TMM>2.0.CO;2)
- Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., Kunkel, K. E. and Ambenje, P. (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3): 417–425. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2000\)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2)
- Engelhart, P. J. & Douglas, A. V. (2001). The role of Eastern North Pacific tropical storms in the rainfall climatology of Western Mexico. *International Journal of Climatology*, 21(11): 1357–1370. <https://doi.org/10.1002/joc.637>
- Farfán, L. M., Alfaro, E. J. and Cavazos, T. (2013). Characteristics of tropical cyclones making landfall on the Pacific coast of Mexico: 1970-2010. *Atmosfera*, 26(2): 163–182. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71070-1](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71070-1)
- Galvez, J. M. & Davison, M. (2015). *The Gálvez-Davison Index for Tropical Convection*. 1–23. Retrieved from http://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/GDI_Manuscript_V20150910.pdf
- García-Pérez, F. & Cruz-Medina, I. R. (2009). Variabilidad de la precipitación pluvial en la Región Pacífico Norte de México. *Agrociencia*, 43(1): 1–9. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952009000100001
- George, J. J. (2014). *Weather forecasting for aeronautics*. Academic press.
- Groisman, P. Y., Karl, T. R., Easterling, D. R., Knight, R. W., Jamason, P. F., Hennessy, K. J., Suppiah R., Page C.H., Wibig J., Fortuniak K., Razuvaev V. N., Douglas A., Forland E. and Zhai, P. M. (1999). Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change. *Climatic Change*, 42: 243–283. <https://doi.org/10.1023/A:1005432803188>
- Grumm, R. H. & Hart, R. (2001). Standardized anomalies applied to significant cold season weather events: Preliminary findings. *Weather and Forecasting*, 16(6): 736–754. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2001\)016<0736:SAATSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2001)016<0736:SAATSC>2.0.CO;2)
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Horányi, A., Muñoz, J., Nicolas, J., Schepers R., Simmons A., Soci C. and Dee, D. (2019). *Global reanalysis : goodbye Global reanalysis : goodbye ERA-Interim , hello*. (159). <https://doi.org/10.21957/vf291hehd7>
- Higgins, R. W., Chen, Y. and Douglas, A. V. (1999). Interannual variability of the North American warm season precipitation regime. *Journal of Climate*, 12(2–3): 653–680. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<0653:ivotna>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<0653:ivotna>2.0.co;2)
- Jana, S., Rajagopalan, B., Alexander, M. A. and Ray, A. J. (2018). Understanding the Dominant Sources and Tracks of Moisture for Summer Rainfall in the Southwest United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(10): 4850–4870. <https://doi.org/10.1029/2017JD027652>
- Kumar, S., Merwade, V., Kinter, J. L. and Niyogi, D. (2013). Evaluation of temperature and precipitation trends and long-term persistence in CMIP5 twentieth-century climate simulations. *Journal of Climate*, 26(12): 4168–4185. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00259.1>

- Kunkel, K. E. (2003). North American trends in extreme precipitation. *Natural Hazards*, 29(2): 291–305. <https://doi.org/10.1023/A:1023694115864>
- Kunkel, K. E., Andsager, K. and Easterling, D. R. (1999). Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada. *Journal of Climate*, 12(8 PART 2): 2515–2527. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2515:lttiep>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2515:lttiep>2.0.co;2)
- León-Cruz, J. F. (2019). " Climatología y meteorología de tornados en México ." (Tesis de Doctorado) IPICYT. San Luis Potosí, S. L. P. Méx. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/5004> [Last Checken 1th November 2019]
- León-Cruz, J. F., Carbajal, N. and Pineda-Martínez, L. F. (2019). The role of complex terrain in the generation of tornadoes in the west of Mexico. *Natural Hazards*, 97(1): 335–353. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03647-8>
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L. and Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3): 313–330. <https://www.redalyc.org/pdf/568/56842304.pdf>
- Martínez-Sánchez, J. N. & Cavazos, T. (2014). Eastern Tropical Pacific hurricane variability and landfalls on Mexican coasts. *Climate Research*, 58(3): 221–234. <https://doi.org/10.3354/cr01192>
- Meehl, G. A., Tebaldi, C., Walton, G., Easterling, D. and McDaniel, L. (2009). Relative increase of record high maximum temperatures compared to record low minimum temperatures in the U.S. *Geophysical Research Letters*, 36(23): 1–5. <https://doi.org/10.1029/2009GL040736>
- Pavia, E. G., Graef, F. and Reyes, J. (2006). PDO–ENSO effects in the climate of Mexico. *Journal of Climate*, 19(24): 6433–6438. <https://doi.org/10.1175/JCLI4045.1>
- Peterson, T. C., Zhang, X., India, M. B. and Aguirre, J. L. V. (2007). Changes in North American extremes derived from daily weather data. *87th AMS Annual Meeting*, 113: 1–9. <https://doi.org/10.1029/2007JD009453>
- Pineda-Martínez, L. F., García, O. D. and Hotchkiss, R. H. (2014). Implications of maximum daily precipitation on streamflow of a watershed: a case study in Zacatecas, Mexico. *International Journal of River Basin Management*, 12(4): 411–418. <https://doi.org/10.1080/15715124.2014.945459>
- Ruby Leung, L., & Qian, Y. (2009). Atmospheric rivers induced heavy precipitation and flooding in the western U.S. simulated by the WRF regional climate model. *Geophysical Research Letters*, 36(3): 1–6. <https://doi.org/10.1029/2008GL036445>
- Torres-Alavez, A., Cavazos, T. and Turrent, C. (2014). Land-sea thermal contrast and intensity of the North American monsoon under climate change conditions. *Journal of Climate*, 27(12): 4566–4580. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00557.1>
- Turrent, C. & Cavazos, T. (2009). Role of the land-sea thermal contrast in the interannual modulation of the North American Monsoon. *Geophysical Research Letters*, 36(2): 1–5. <https://doi.org/10.1029/2008GL036299>
- Valdés-Manzanilla, A. (2015). Mesoscale convective systems in NW Mexico during the strong ENSO events of 1997–1999. *Atmosfera*, 28(2): 143–148. <https://doi.org/10.20937/atm.2015.28.02.06>
- Vega-Camarena, J. P., Brito-Castillo, L., Farfán, L. M., Gochis, D. J., Pineda-Martínez, L. F. and Díaz, S. C. (2018). Ocean–atmosphere conditions related to severe and persistent droughts in the Mexican Altiplano. *International Journal of Climatology*, 38(2): 853–866 <https://doi.org/10.1002/joc.5215>
- Zhang, X. & Yang, F. (2004). *RClimDex (1.0) User Manual*. 1–23. http://ensembles-eu.metoffice.com/C3S-DR/pages/workshop_tools/RClimDexUserManual.pdf
- Zhou, L., Dai, A., Dai, Y., Vose, R. S., Zou, C. Z., Tian, Y. and Chen, H. (2009). Spatial dependence of diurnal temperature range trends on precipitation from 1950 to 2004. *Climate Dynamics*, 32(2–3): 429–440. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0387-5>