

Eventos extremos de precipitación en Colima, México (1981-2018)

Extreme precipitation events in Colima, Mexico (1981-2018)

José Francisco León-Cruz,* Antonio Luna Díaz-Peón** y Hugo Ignacio Rodríguez-García***

Recibido: 02/12/2021. Aprobado: 24/02/2022. Publicado: 22/03/2022

Resumen. Se presenta una caracterización de los eventos extremos de precipitación en el estado de Colima, México, para el periodo 1981-2018. Con base en el análisis de estaciones climatológicas y la aplicación de una metodología basada en picos sobre el umbral de los días húmedos, se definieron criterios para la identificación de un evento extremo que representara las variaciones locales de las lluvias intensas. Asimismo, y haciendo uso de la base de datos de mejores trayectorias de ciclones tropicales de la NOAA, se determinó la influencia de estos fenómenos en la generación de los eventos extremos. Los resultados muestran diferencias significativas en cuanto a la distribución espaciotemporal de estos fenómenos en Colima. Por un lado, los eventos más severos se localizan al sur del estado mientras que su mayor frecuencia se localiza hacia el norte. Los meses de generación de los eventos asociados a ciclones tropicales tienen su máximo en septiembre, mientras que aquellos que no lo están son más frecuentes durante agosto. Existen diferencias significativas respecto a la precipitación acumulada de los eventos asociados y no a ciclones tropicales, donde los primeros pueden duplicar los acumulados de precipitación para algunas regiones del estado. La identificación de los patrones espaciotemporales de los eventos extremos de precipitación y sus variaciones interanuales, son el primer paso para la caracterización del riesgo ante dichos fenómenos

en Colima y pueden ser utilizados para la generación de políticas públicas enfocadas en la reducción del riesgo de desastre ante tales amenazas hidrometeorológicas.

Palabras clave: eventos extremos de precipitación, ciclones tropicales, riesgos hidrometeorológicos, Colima.

Abstract. A characterization of extreme precipitation events in the state of Colima, Mexico, for the period 1981-2018 is presented. Based on the analysis of climatological stations and the application of a methodology based on peaks above the threshold of wet days, criteria were defined for the identification of an extreme event that would represent the local variations of intense rains. Likewise, and using the NOAA database of best tropical cyclone tracks, the influence of these phenomena on the generation of extreme events was determined. The results show significant differences in terms of the spatio-temporal distribution of these phenomena in Colima. On the one hand, the most severe events are located in the south of the state, while their highest frequency is located in the north. The months of generation of events associated with tropical cyclones have their maximum in September, while those that are not are more frequent during August. There are significant differences with respect

* Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, C.U., Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0374-6858>. Email: jleon@igg.unam.mx, franciscoleoncruz@gmail.com

** Centro de Investigación Atmosférica y Ecológica, A.C. Calle Constitución 5, Col. Centro, Banderilla, Ver. C.P. 91030 y Facultad de Biología, Universidad Veracruzana (UV). Circuito Aguirre Beltrán S/N, Col. Zona Universitaria. C.P. 91000, Xalapa, Veracruz, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8076-2544>. Email: anluna@uv.mx

*** Licenciatura en Protección Civil y Gestión de Riesgos, Colegio de Ciencias y Humanidades, Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM). Plantel Cuauhtepc, Avenida de la Corona 320, Col. Loma de la Palma, Alcaldía Gustavo A. Madero, Ciudad de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6019-6859>. Email: hugo.rodriguez@uacm.edu.mx, hrodriguez382@gmail.com

to the accumulated precipitation of the associated events and not to tropical cyclones, where the former can double the accumulated precipitation for some regions of the state. The identification of the spatio-temporal patterns of extreme precipitation events and their inter-annual variations, are the first step for the characterization of the risk before these phenomena in Colima and can be used for the generation of public policies focused on the reduction of the risk of disaster before such hydrometeorological hazards.

Keywords: extreme precipitation events, tropical cyclones, hydrometeorological risks, Colima.

INTRODUCCIÓN

El régimen pluviométrico es uno de los elementos determinantes para el clima de una región. Comprender la variabilidad de la precipitación derivada del impacto del cambio climático resulta indispensable para una completa explicación de la respuesta del ciclo hidrológico y, por supuesto, de sus posibles impactos (Pendergrass *et al.*, 2017; Rasmusson y Arkin, 1993). Estudios recientes han documentado cambios en los patrones de la precipitación y en sus extremos (Bocheva *et al.*, 2009; Cavazos y Rivas, 2004; Kunkel *et al.*, 2003). El análisis de los eventos extremos de precipitación (EEP) es importante debido a los impactos sociales y económicos que se les asocian, tanto los directos (por ejemplo, inundaciones) como los indirectos (por ejemplo, deslizamientos).

A nivel mundial se ha documentado un incremento en el número de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos como tormentas e inundaciones (Hoeppe, 2016). Estadísticamente, cerca del 80% de los desastres en el mundo son asociados a este tipo de fenómenos (Hoeppe, 2016; Shen y Hwang, 2019), lo que los posiciona como amenazas naturales con potencial de desencadenar desastres. En México, los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos son también los más recurrentes y a los que se asocian la mayor parte de las pérdidas económicas (Zúñiga y Villoria, 2018). De acuerdo con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), para el periodo comprendido entre 2000 y 2020, el 90% del total las declaratorias de emergencia, desastre y contingencia climatológica se relacionaron con

fenómenos hidrometeorológicos, mientras que el 56% de dichas declaratorias se asoció específicamente a eventos de lluvia, inundaciones y ciclones tropicales (CENAPRED, 2021).

Si bien existen estudios sobre la variabilidad de los eventos extremos de precipitación a nivel global y nacional (Chinita *et al.*, 2021; Kunkel *et al.*, 2003; Zúñiga y Magaña, 2018), este tipo de investigaciones se orientan comúnmente a escalas regionales (Agel *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017; Pérez-Morga *et al.*, 2013; Ruiz-Alvarez *et al.*, 2020). Las condiciones locales del terreno, aunado a las características del clima, así como los forzamientos sinópticos y de mesoescala particulares de cada región, son algunos de los elementos comúnmente utilizados para explicar la variabilidad de los eventos extremos. En este sentido, el conocimiento de las características de EEP en una región particular es de vital importancia para la gestión integral de riesgos y prevención de desastres asociados a lluvias intensas.

En México, los EEP han sido considerablemente estudiados. Magaña *et al.* (2003) señalan la orografía y los vientos del este como determinantes en la intensidad de los eventos extremos en la cuenca de México; también se ha identificado el rol de los ciclones tropicales y las ondas del este en la generación de EEP en regiones localizadas a lo largo del Golfo de México y el océano Pacífico (Herrera *et al.*, 2018; Ochoa *et al.*, 2014; Pérez-Morga *et al.*, 2013). Otras investigaciones se han enfocado en el análisis de los impactos relacionados con fenómenos como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y el monzón de Norteamérica en la variabilidad de los eventos extremos de lluvia en el país (Cavazos *et al.*, 2008; Cavazos y Rivas, 2004). Recientemente, procesos meteorológicos como la convección profunda y húmeda también han sido asociados con la generación de EEP (Farfán *et al.*, 2021; León-Cruz *et al.*, 2021). Es importante mencionar que, en una buena parte de estas investigaciones, las regiones costeras de México cobran particular relevancia.

Debido a su localización geográfica, el estado de Colima está expuesto a una gran variedad de amenazas naturales entre las que se destacan los ciclones tropicales y las lluvias intensas (Lozoya

y de la Parra Arellano, 2015; Patiño-Barragán *et al.*, 2009). Sin embargo, poco se conoce sobre la distribución espaciotemporal y la génesis de estos fenómenos. En este contexto, la presente investigación tiene por objetivo caracterizar los eventos extremos de precipitación en el estado de Colima, México para el periodo 1981-2018. Con este fin, se realizó un análisis de series de tiempo de las estaciones climatológicas disponibles en el estado, el cálculo de los umbrales de precipitación para la determinación de eventos extremos y la cuantificación de la contribución de los ciclones tropicales a este tipo de fenómenos.

La estructura del artículo se muestra a continuación: en la sección 2 se describe brevemente el área de estudio; la sección 3 detalla las fuentes de datos y la metodología empleada para su análisis; en la sección 4 se plasman los resultados y se discuten los mismos; y finalmente, la sección 5 expone las conclusiones.

ÁREA DE ESTUDIO

El estado de Colima se ubica en la porción occidental de México, entre los 18°41' y 19°31' de latitud norte y los 103°29' y 104°41' de longitud

oeste (Figura 1). Posee una extensión territorial de alrededor de 5600 km² y colinda con los estados de Michoacán de Ocampo y Jalisco. Posee una amplia línea de costa con el océano Pacífico de más de 150 km y una pendiente pronunciada que se eleva desde dicho océano hasta los 3800 msnm en la porción sur del volcán de Colima. Cuenta con un clima predominantemente cálido subhúmedo (86%), seco y semiseco (12.5%) y templado subhúmedo (1.5%) y una temperatura media anual de 25 °C con lluvias en verano (INEGI, 2021). Se identifican también tres subregiones desde un punto de vista espacial: zona norte (Comala y Cuauhtémoc), zona centro (Minatitlán, Villa de Álvarez, Coquimatlán, Colima y Ixtlahuacán) y zona sur (Manzanillo, Armería y Tecomán). El estado cuenta con 731 391 habitantes y 226 853 viviendas, de acuerdo con el último Censo Nacional de Población y Vivienda.

DATOS Y MÉTODOS

Selección de estaciones climatológicas

En la primera etapa del estudio se obtuvieron los datos de un total de 37 estaciones climatológicas ubicadas dentro de los límites del estado (SMN, 2021). Los datos corresponden a la precipitación

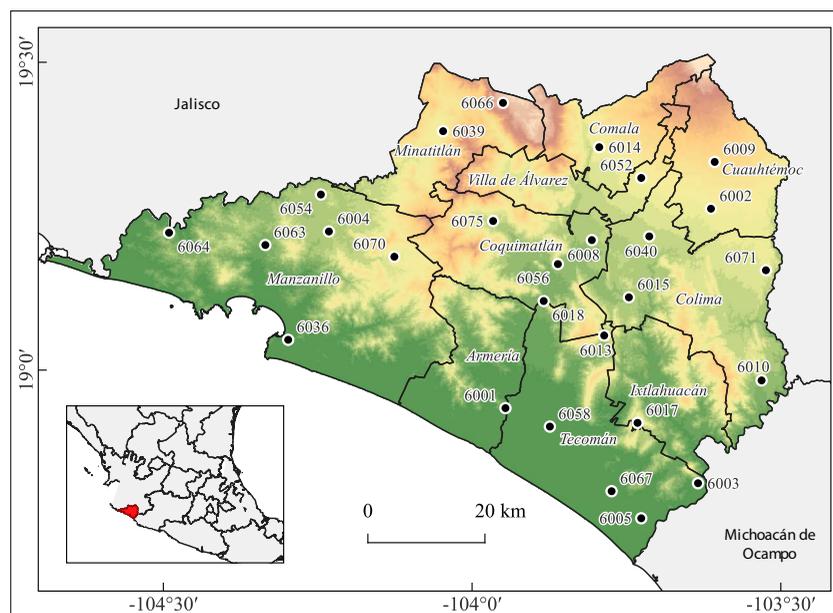


Figura 1. Localización del área de estudio. Los marcadores señalan las estaciones climatológicas seleccionadas y su correspondiente identificador (ID). Fuente: elaboración propia.

acumulada diaria en milímetros (mm/día). Las 37 estaciones fueron colocadas en series de tiempo continuas que cubrían el periodo del 1 de enero de 1981 al 30 de junio de 2018. Posteriormente, las series de tiempo fueron sujetas a procesos de control de calidad. Se realizó una verificación de la persistencia de las series y se determinó el porcentaje de datos perdidos, con lo que se concluyó emplear solo aquellas estaciones con menos del 20% de los datos faltantes. También se realizó un chequeo de la consistencia espacial de los datos diarios a fin de detectar errores de medición, contrastando los valores de precipitación con las estaciones vecinas. De las 37 estaciones climatológicas iniciales, 27 cumplieron con los criterios de homogeneidad establecidos (Tabla 1) y las 10 restantes fueron descartadas.

Determinación de eventos extremos

No existe un criterio único para la determinación de un EEP. Algunos estudios utilizan los productos del Grupo de Expertos en Detección e Índices de

Cambio Climático (ETCCDI) a fin de analizar su distribución espaciotemporal y sus tendencias empleando datos de estaciones climatológicas o reanálisis (Pineda-Martínez *et al.*, 2020; Trambly *et al.*, 2013; Yin y Sun, 2018). Otras investigaciones optan por el uso de percentiles como técnica para la definición de tales eventos (Agel *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017; Pérez-Morga *et al.*, 2013; Zúñiga y Magaña, 2018). También se pueden mencionar aquellos enfoques basados en el cálculo de periodos de retorno de lluvias intensas (Gutiérrez Lozano *et al.*, 2011; Kunkel *et al.*, 2003). Es importante señalar que cada uno de estos enfoques presenta sus propias ventajas y limitaciones.

Para el presente estudio se optó por utilizar un enfoque basado en picos sobre el umbral de la precipitación diaria. El umbral seleccionado fue el percentil 99th de los días húmedos; es decir, cuando la precipitación diaria registrada por la estación fuera diferente a cero (Agel *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017). El uso de días húmedos permitió ge-

Tabla 1. Estaciones climatológicas utilizadas en el estudio. Las filas sombreadas indican las estaciones descartadas.

ID	% Datos perdidos	Pctl 99th (mm/día)	Pctl 99th* (mm/día)	Max. prec.* (mm/día)	x prec.* (mm/día)	σ prec.* (mm/día)
6001	5.28	52.86	125.34	371.00	13.87	26.36
6002	4.16	50.00	84.11	237.00	15.95	18.90
6003	2.28	52.00	97.33	357.50	14.40	23.06
6004	12.11	54.97	99.96	357.00	18.38	24.81
6005	5.83	50.00	121.36	330.00	15.78	25.83
6006	31.72	48.05	87.30	309.30	12.50	19.55
6007	29.40	50.00	90.09	326.80	15.80	22.08
6008	0.61	42.39	89.38	374.40	12.27	19.52
6009	10.93	52.01	85.65	258.00	14.33	19.20
6010	1.45	38.31	86.43	231.00	14.03	17.38
6013	5.54	46.00	111.76	320.00	14.38	23.09
6014	2.99	47.53	87.40	336.50	11.77	19.07
6015	18.93	27.50	67.00	340.00	11.50	18.09
6017	0.74	50.42	93.98	400.10	12.69	22.23
6018	15.35	63.20	134.63	280.00	15.95	27.09
6030	58.61	60.00	184.40	415.00	21.79	31.28
6036	4.45	50.00	95.52	303.00	17.39	23.31

Tabla 1. Continúa.

ID	% Datos perdidos	Pctl 99th (mm/día)	Pctl 99th* (mm/día)	Max. prec.* (mm/día)	x prec.* (mm/día)	σ prec.* (mm/día)
6039	8.55	60.00	106.88	404.50	20.55	24.23
6040	0.99	41.50	80.28	313.60	11.54	18.06
6042	23.23	43.72	92.50	342.00	15.38	22.83
6043	20.62	40.00	80.00	300.00	12.70	16.64
6052	2.01	43.48	86.00	268.60	14.12	18.42
6054	0.10	50.24	88.33	321.00	12.91	20.08
6056	5.66	44.00	99.64	255.50	14.53	21.51
6058	2.77	51.00	118.00	302.00	15.70	26.20
6059	35.38	40.00	111.34	280.00	13.60	24.00
6062	61.97	65.00	93.28	242.00	20.92	23.05
6063	15.52	40.00	89.00	289.00	16.49	19.09
6064	12.92	61.00	142.00	382.00	20.38	30.86
6066	18.17	40.00	80.00	314.00	12.08	18.60
6067	13.17	52.12	105.38	320.00	14.43	24.16
6069	29.38	54.29	147.56	400.00	20.16	30.73
6070	13.52	58.46	100.29	355.00	16.27	25.33
6071	9.65	43.40	74.39	193.80	13.66	15.85
6073	37.35	45.00	85.54	253.00	13.51	18.43
6074	63.32	69.00	131.50	305.50	18.35	29.77
6075	11.82	50.15	109.25	360.20	16.78	24.12

* Valor calculado en función de los días húmedos (precipitación diaria > 0 mm).

nerar umbrales significativamente mayores (Tabla 1), facilitando la identificación de los eventos más severos. Asimismo, en la técnica de picos sobre el umbral, los datos faltantes no representan un problema tan crítico como en otras metodologías y permite la selección de umbrales por estación, lo que ayuda a reflejar las variaciones regionales y locales de estos eventos (Agel *et al.*, 2015). Este proceso metodológico permitió la producción de una base de datos que concentra las fechas de los EEP históricos.

Trayectorias de ciclones tropicales

Los ciclones tropicales (CT) juegan un papel fundamental en el régimen pluviométrico y el ba-

lance hídrico a nivel mundial (Khouakhi *et al.*, 2017). Para el caso de México se estima que la contribución de los CT a la precipitación media anual oscila entre el 10%-50%, con una mayor influencia sobre las regiones costeras del golfo de California, el golfo de México y el océano Pacífico (Agustín Breña-Naranjo *et al.*, 2015; Dominguez y Magaña, 2018). Asimismo, se ha reportado que alrededor de la mitad de los EEP en el país se relacionan con ciclones tropicales, principalmente sobre la cuenca del Pacífico Oriental, el Caribe y el golfo de México (Dominguez *et al.*, 2021).

Con el objetivo de identificar el origen de los eventos extremos de precipitación en el estado de Colima, se utilizaron los datos del Archivo Inter-

nacional de Mejores Trayectorias para la Gestión del Clima (IBTrACS, por sus siglas en inglés) (Knapp *et al.*, 2010, 2018). Dicho conjunto de datos proporciona la localización e intensidad de los ciclones tropicales a nivel mundial, desde 1842 hasta el presente, en intervalos de hasta tres horas. Para este análisis se utilizó el conjunto de datos IBTrACS v4, disponible de manera gratuita a través del servidor del National Centers for Environmental Information (NCEI).¹

Como primer paso, se filtró el conjunto de datos utilizando como criterios de exclusión el periodo del 1 enero de 1981 al 30 de junio 2018. Posteriormente se seleccionaron aquellas trayectorias que presentaban una categorización de depresión tropical o superior en la Escala Saffir-Simpson. Después se trazó un área de influencia de 500 km sobre el área estatal del estado. Empleando herramientas de superposición vectorial se extrajeron todas aquellas trayectorias que se encontraron dentro del área de influencia establecida. Con este proceso se infiere que las precipitaciones asociadas al ciclón tropical se concentran alrededor de los 500 km desde el centro del sistema. Dicho umbral (500 km) ha sido ampliamente utilizado (Cavazos *et al.*, 2008; Dominguez y Magaña, 2018; Khouakhi *et al.*, 2017). Los criterios mencionados permitieron la creación de una segunda base de datos que pudo ser contrastada con aquella que contenía los EEP.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características generales de la precipitación

De acuerdo con la climatología generada, el periodo húmedo en Colima se concentra en verano durante los meses de julio, agosto y septiembre, con acumulados mensuales entre los 180-213 mm en promedio (Figura 2). Los meses de junio y octubre se identifican como períodos de transición húmedos con acumulados de alrededor de 90-100 mm mensuales. De noviembre a marzo la temporada de secas se instaura en el estado con una clara demarcación sobre los meses de marzo y abril. También

se observan algunas diferencias con respecto a la distribución estacional de la precipitación a nivel nacional (Figura 2). La más evidente tiene que ver con acumulados mensuales mayores al promedio nacional. Estudios previos han identificado a la costa del Pacífico como una de las regiones más húmedas del territorio (Magaña *et al.*, 1999). La colindancia con el océano Pacífico (disponibilidad de humedad) y la compleja orografía del territorio (procesos de convección forzada) son dos elementos que ayudan a explicar en buena medida dicho comportamiento.

Pese a la limitada extensión territorial del estado se pueden observar diferencias significativas en la distribución de la precipitación por regiones (Figura 1 y Figura 2). La región norte prevalece como la más húmeda durante prácticamente todo el año. Lo anterior puede relacionarse con las características orográficas y uso de suelo, que permite la convección forzada y genera procesos de retroalimentación. Las diferencias observadas en un mismo mes entre la región norte con respecto a la centro y sur pueden ser de alrededor de 50 mm. Durante junio y julio la región centro prevalece con acumulados mayores con respecto a la región sur. En agosto el centro y sur tienden a igualarse, y posteriormente, en septiembre y octubre la región sur se alza con los mayores acumulados mensuales con respecto a la región centro. La transición observada del centro hacia sur puede relacionarse con el paso de ciclones tropicales y su mayor influencia sobre la costa en este mismo periodo.

De acuerdo con el análisis realizado con la base de datos IBTrACS, la influencia de los ciclones tropicales sobre el estado de Colima muestra una clara tendencia de aparición en los meses húmedos de agosto, septiembre y octubre. Para el periodo de análisis se contabilizaron un total de 112 ciclones tropicales y 593 días de influencia de estos sobre el territorio. Del total de días con alguna influencia sobre el estado de Colima, el 32% corresponde a depresiones tropicales y el 42% a tormentas tropicales. Para el caso de huracanes se obtuvieron distribuciones del 11%, 6%, 4%, 4% y 1% para las categorías 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente.

Empleando los datos obtenidos de las estaciones climatológicas (Tabla 1) y el método de interpo-

¹ Conjunto de datos IBTrACS: <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php?name=ib-v4-access>

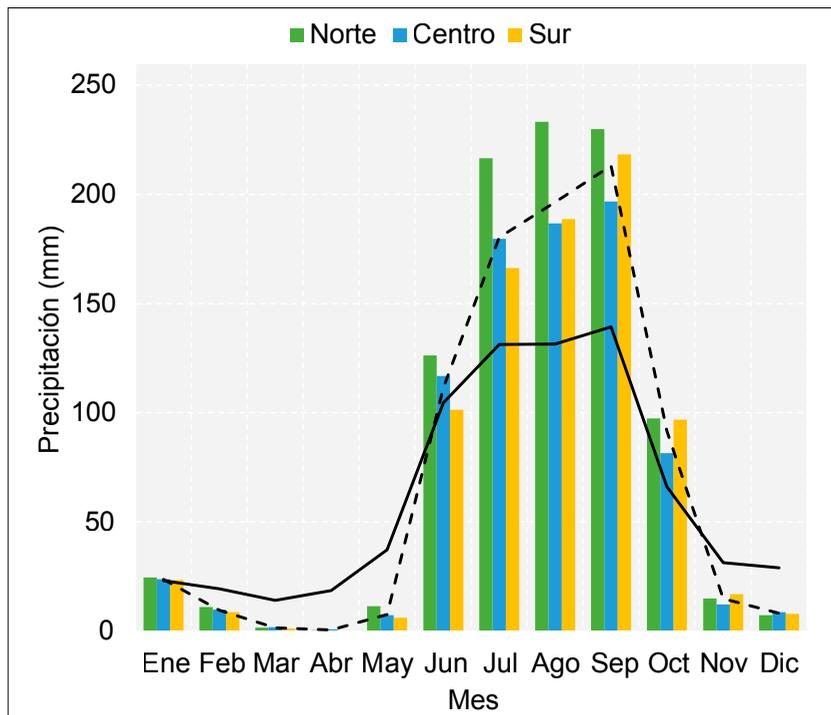


Figura 2. Precipitación media mensual en el estado de Colima (línea punteada) y subregiones (barras en tonos rojos) para el periodo 1981-2018. La línea continua representa la media mensual nacional.

lación de la distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés) se obtuvo la distribución espacial de la precipitación media anual y el percentil 99th de los días húmedos (Figura 3). Una de las principales características observadas tiene que

ver con la relación existente con los acumulados mayores y las regiones orográficas complejas. Los acumulados anuales máximos superan los 1300 mm y se localizan en el municipio de Minatitlán. Resalta también el sureste del municipio de Coli-

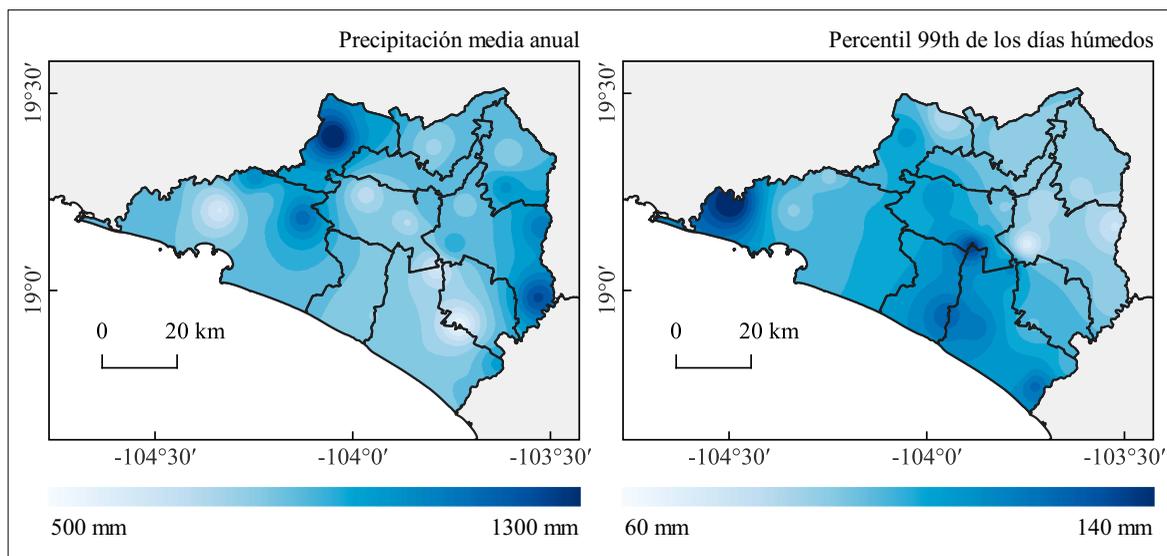


Figura 3. Precipitación media anual y percentil 99th de los días húmedos en el estado de Colima (1981-2018).

ma y el norte de Manzanillo. Los municipios de Comala y Cuauhtémoc también muestran valores que oscilan entre los 800-1000 mm anuales. La relación observada entre los máximos de precipitación y las regiones orográficas complejas ha sido previamente documentada en la zona empleando datos de precipitación en mallas regulares (León-Cruz *et al.*, 2021).

El percentil 99th de los días húmedos permite conocer la precipitación mínima requerida para que, de acuerdo con la definición de EEP propuesta, un evento pueda considerarse como extremo. En este sentido, sobre el municipio de Manzanillo, así como la región colindante de Armería, Tecomán y el sur de Coquimatlán, los umbrales más altos oscilan alrededor de los 110 mm y los 140 mm al día. Existe también una clara división entre la región centro y sur del estado con respecto a la región noreste, donde pueden encontrarse los umbrales más bajos. Los municipios de Colima, Villa de Álvarez, Comala y Cuauhtémoc muestran valores desde los 67 mm y hasta los 90 mm para el percentil 99th de los días húmedos.

Es importante notar que las diferencias encontradas sobre el percentil 99th de la precipitación pueden duplicarse de un municipio a otro. Este resultado indica una fuerte variabilidad espacial de la severidad de los eventos de lluvia en el estado, y, por ende, una gran variedad de escenarios de peligro relacionados a los EEP. Mientras que en una región una lluvia con acumulados de 70 mm al día puede considerarse como muy severa, para otra zona a menos de 50 km de distancia, un evento similar puede clasificarse como normal. La identificación de los umbrales de precipitación de un evento extremo a través de estaciones climatológicas permite identificar estas variaciones locales y plantear escenarios distintos para cada municipio, e incluso a nivel de localidad.

Eventos extremos de precipitación (EEP)

Derivado del análisis de las estaciones climatológicas y la propuesta de identificación de EEP, se contabilizaron un total de 605 eventos en el estado de Colima para el periodo 1981-2018. Dicha cifra considera a los eventos identificados en las estaciones como sistemas independientes. Luego

del trabajo de homogeneización y agrupamiento de eventos por fecha y cercanía, el número de EEP se redujo a 267. De este total, 188 eventos (70%) fueron registrados por una sola estación, 57 eventos por dos a cinco estaciones (21%), 13 eventos (5%) por entre seis y diez estaciones, y 10 eventos (4%) por más de diez estaciones.

Los resultados de identificación de eventos extremos por estación indican que estos fenómenos no son particularmente cohesivos desde el punto de vista espacial. Dicho comportamiento ha sido reportado anteriormente (Agel *et al.*, 2015) y se atribuye a la naturaleza misma de los fenómenos donde comúnmente se presentan como lluvias puntuales. Los eventos identificados en más de cinco estaciones están representados por aquellos generados por sistemas de gran extensión, como pueden ser los ciclones tropicales, de los cuales se hablará más adelante, o bien con sistemas convectivos de mesoescala que han sido identificados previamente en la zona (Ríos-García, 2016).

Distribución temporal de los EEP

La variación anual de los EEP se muestra en la Figura 4. Los resultados encontrados indican picos de actividad en los años 1992, 1998, 2003 y 2014. El mayor número de registros identificado fue en 1998 con 18 eventos. Las variaciones interanuales no muestran una tendencia de ocurrencia de eventos favorecida por alguna fase en particular del Niño Oscilación del Sur (ENOS), patrón climático ampliamente relacionado con la precipitación en México (Bravo Cabrera *et al.*, 2018; Magaña *et al.*, 2003; Pavia *et al.*, 2006). En este sentido, se requiere mayor investigación sobre la influencia de las diferentes oscilaciones climáticas sobre la zona de estudio, así como su posible impacto en la generación de EEP. La detección de los cambios en los patrones de precipitación y sus extremos es de vital importancia para la identificación de los posibles impactos del calentamiento global.

Diferenciando los EEP entre aquellos asociados (sí-CT en adelante) y no asociados (no-CT en adelante) a ciclones tropicales se pueden observar diferencias claras. En primer lugar, los EEP no-CT superan en frecuencia a los EEP sí-CT en práctica-

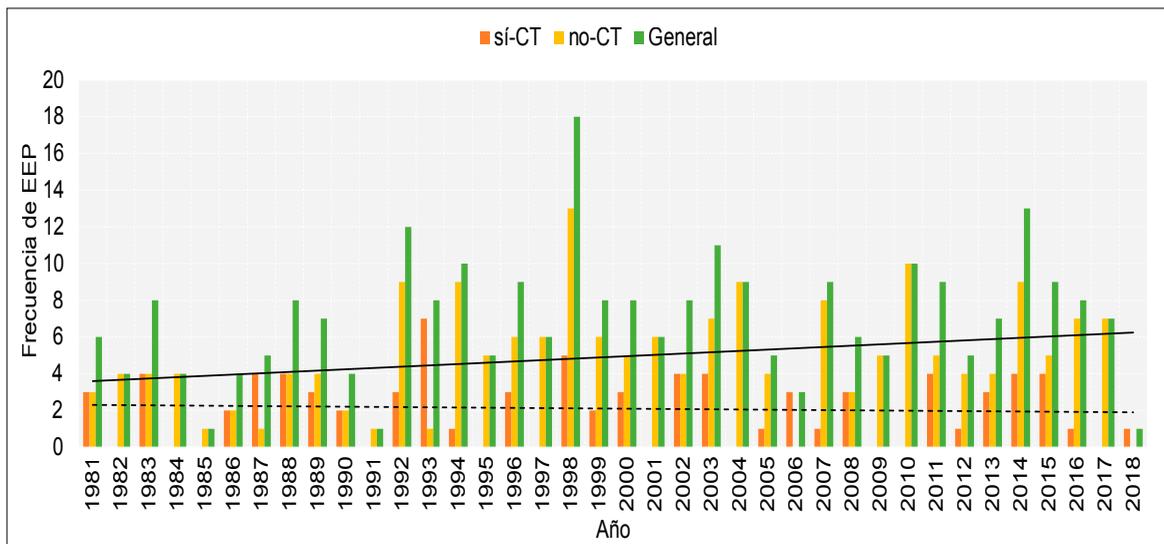


Figura 4. Variación anual de eventos extremos de precipitación (EEP) en el estado de Colima para el periodo 1981-2018. La línea continua se trazó en función de los EEP no-CT y la línea punteada empleando la frecuencia de los EEP sí-CT.

mente todo el periodo analizado. Lo anterior puede explicarse a partir del hecho de que las condiciones necesarias para la generación de una tormenta local son mucho más frecuentes que la formación de un ciclón tropical con efectos sobre el estado. En este sentido, puede mencionarse el rol de los patrones de advección de humedad desde el océano Pacífico y su interacción con la orografía compleja de la zona, elementos que han sido señalados como determinantes para la formación de eventos de convección profunda y precipitaciones intensas en la región (León-Cruz *et al.*, 2021).

Al analizar las tendencias para los EEP sí-CT y no-CT, se puede observar cómo aquellos clasificados como no-CT poseen una ligera tendencia de incremento, caso contrario con aquellos etiquetados como sí-CT. El incremento de la generación de eventos extremos de lluvia bajo escenarios de cambio climático ha sido ampliamente documentado. En este sentido, es probable que el forzamiento antropogénico termine provocando un aumento global de las precipitaciones extremas, debido principalmente al probable incremento del vapor de agua atmosférico y los entornos de inestabilidad asociados (Kunkel, 2003; Oliveira *et al.*, 2017; Semmler y Jacob, 2004). Para el caso aquí presentado, las tendencias encontradas requieren

ser contrastadas con series de tiempo más extensas que permitan conocer a profundidad los cambios en los patrones de precipitación y sus extremos.

Desde el punto de vista estacional, los EEP tienen mayor recurrencia en los meses húmedos de verano y otoño, desde junio hasta octubre, con el pico de actividad en septiembre (Figura 5). Entre noviembre y mayo la actividad es baja, teniendo su mínimo en los meses secos de marzo y abril. Los eventos categorizados como no-CT comienzan a registrarse en el mes de junio, incrementan gradualmente en julio y alcanzan su máximo en agosto. Durante septiembre y octubre se presenta un decremento paulatino y se mantienen con baja aparición entre noviembre y mayo. Uno de los elementos que cobra mayor relevancia en la formación de este tipo EEP son las ondas del este (Dominguez *et al.*, 2020) y particularmente, la generación de sistemas convectivos de mesoescala en Colima (Ríos-García, 2016). Evidentemente no existe una buena correlación entre la distribución mensual de este tipo de EEP y la curva de influencia de los CT sobre el estado.

Los EEP sí-CT también comienzan a registrarse en junio, pero en una menor proporción que los no-CT. Su documentación incrementa durante

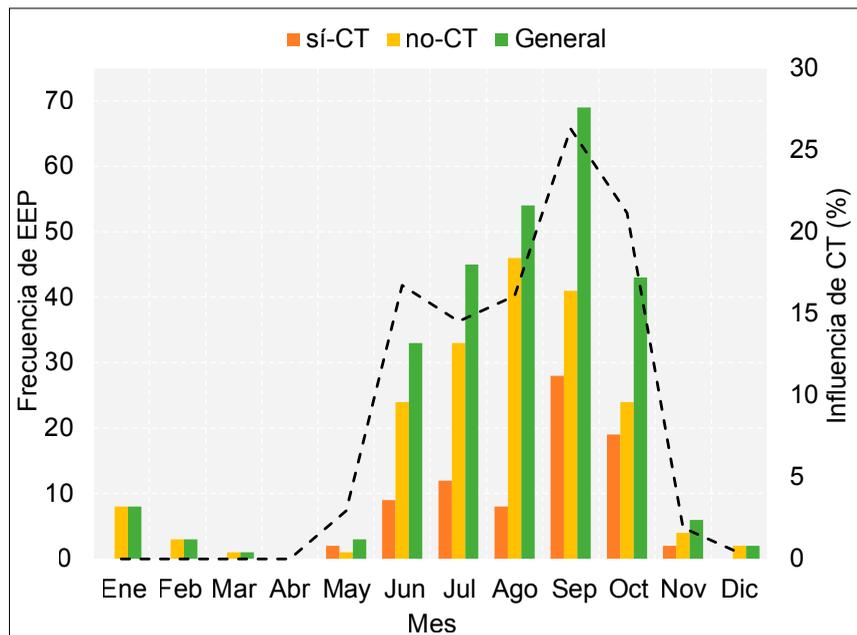


Figura 5. Variación mensual de eventos extremos de precipitación en el estado de Colima para el periodo 1981-2018. La línea punteada representa la influencia de CT (en función del porcentaje de días por mes) sobre Colima.

el mes de julio y decrece en agosto. Dicho decremento puede relacionarse de alguna manera a la influencia de la canícula en esta parte de México (Magaña *et al.*, 1999). Para el mes de septiembre los EEP sí-CT tienden a incrementarse significativamente, alcanzando su máximo de aparición y siendo coincidentes con la curva de influencia de los CT sobre el estado de Colima (Figura 5). En otras palabras, una mayor influencia de CT sobre la zona de estudio induce una mayor probabilidad de generación de un evento extremo. En octubre disminuye gradualmente el número de eventos registrados, y para el periodo entre diciembre y abril estos con valores nulos. Es importante mencionar que para este análisis se consideraron todos aquellos CT con influencia sobre el territorio colimense y no únicamente aquellos que lograron impactar la región continental.

Distribución espacial de los EEP

La Figura 6 muestra la distribución espacial del número total de EEP, así como su desglose por tipo (sí-CT y no-CT), y el promedio de la precipitación asociada. Se puede observar que la frecuencia de EEP en la región norte puede ser del doble en comparación con la región sur del estado (Figura

6, fila superior). En este sentido, el gradiente topográfico y las formas del terreno parecen determinar en buena medida la distribución de los EEP en el estado. También se puede identificar al norte del municipio de Manzanillo con frecuencias superiores a los 30 EEP. Esta zona es coincidente con el cerro La Espumilla, lo que revela nuevamente la importancia de la orografía en la generación de estos eventos a través de procesos de convección profunda y forzada por el terreno.

Por otro lado, resulta interesante que los eventos más intensos son registrados en la zona sur del estado con acumulados superiores a los 180 mm. Los valores promedio de precipitación asociada decrecen hacia el norte, alcanzando su mínimo hacia el este del municipio de Colima donde un EEP promedio presenta acumulados de alrededor de los 100 mm. Si bien dicho valor no es despreciable, se muestra claramente cómo existen diferencias muy marcadas entre las características de los EEP del centro, norte y sur del estado. En resumen, si bien los EEP son más comunes en los municipios del norte, los eventos más extremos se localizan, en términos generales, sobre la porción sur.

Para el caso de los eventos sí-CT (Figura 6, fila intermedia) se puede observar cómo la región sur,

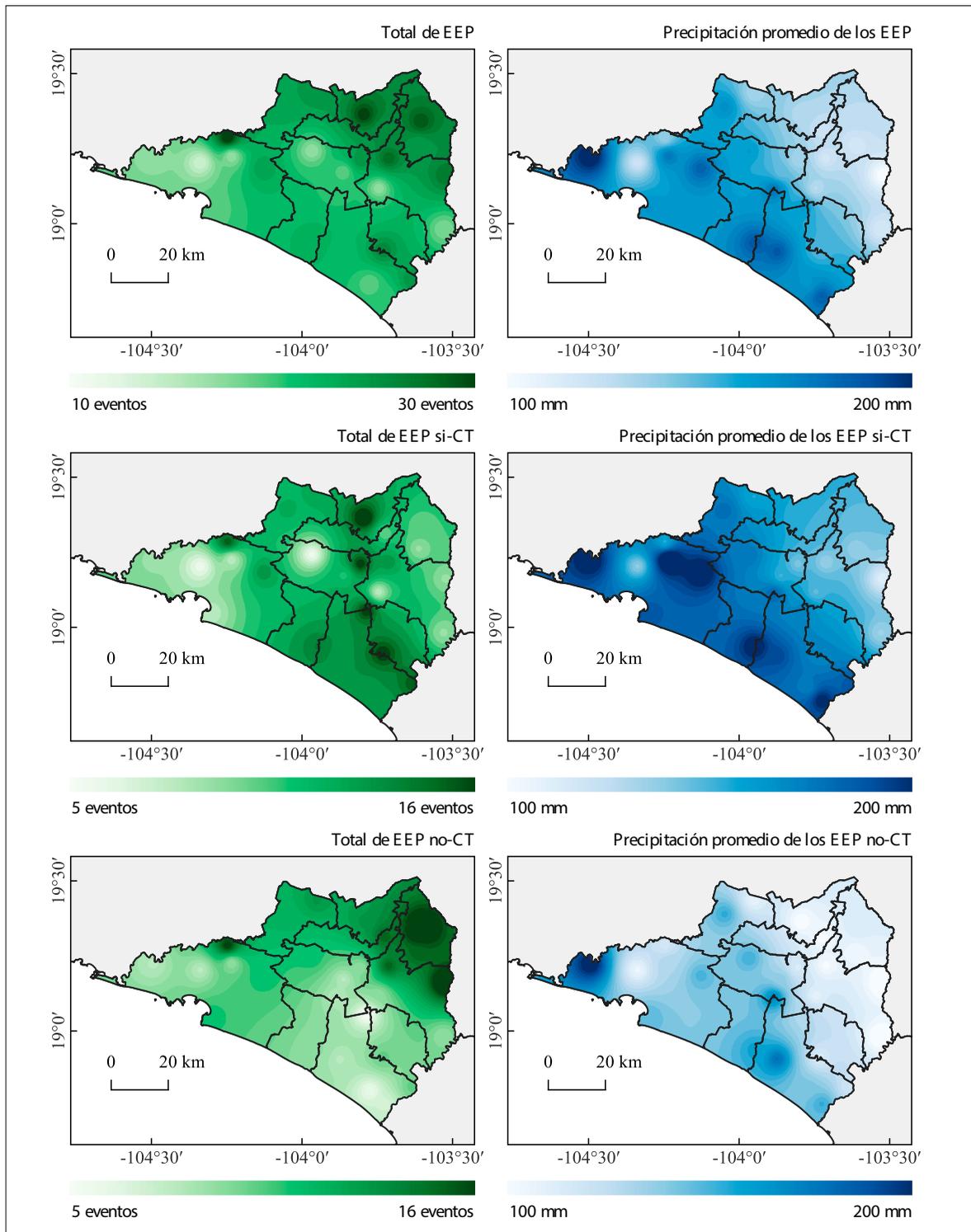


Figura 6. Total de EEP, desglose por tipo de evento (sí-CT y no-CT) y precipitación promedio asociada en el estado de Colima (1981-2018).

principalmente sobre los municipios de Tecomán y Armería, y extendiéndose hacia el norte sobre Coquimatlán, Villa de Álvarez y Comala, muestran las mayores frecuencias en EEP. Al contrario de lo que podría pensarse, el municipio de Manzanillo no ostenta valores significativamente altos. La concentración de un alto número de EEP sí-CT sobre la porción central del territorio estatal se infiere que puede estar relacionada con el transporte de humedad sobre esta zona a través de procesos de canalización de flujos, mismos que serían los detonadores de la precipitación en la zona. Esta situación deberá ser investigada a profundidad para tener mayor certeza sobre dicho comportamiento. Al observar la precipitación promedio de los EEP sí-CT es perceptible que los acumulados mayores (con valores superiores a los 200 mm) se localizan sobre toda la franja costera. En otras palabras, los EEP sí-CT no son tan frecuentes sobre la porción sur del estado (principalmente en Manzanillo), pero los eventos que se documentan suelen ser bastante severos.

Para el caso de los EEP no-CT (Figura 6, fila inferior) la zona noreste se alza como más importante con respecto al número de registros, principalmente sobre los municipios de Cuauhtémoc y Colima. El gradiente altitudinal para este tipo de eventos parece jugar un papel más importante que para el caso de los EEP sí-CT. Investigaciones anteriores han documentado en esta porción norte del estado de Colima la presencia de nubes convectivas profundas (León-Cruz *et al.*, 2019) comúnmente asociadas a eventos extremos. En este sentido, el número total de EEP no-CT se distribuye desde poco más de 18 eventos al noreste y va decreciendo hacia el sur. Las precipitaciones promedio se distribuyen como se ha venido documentando previamente: mayores sobre la línea de costa y menores al norte del estado. Resulta importante señalar que diferencias de alrededor de 100 mm son encontradas entre estas zonas, lo que demuestra la importante variabilidad espacial de estos sistemas.

Características de los EEP

Para complementar la sección anterior, en la Figura 7 se muestran los gráficos de cajas para la precipitación asociada a los EEP, tanto de manera

general como su desglose por tipo, y con particular atención a la temporada húmeda. La línea en medio de la caja representa la mediana y la 'X' la media. El límite inferior de la caja indica el primer cuartil y el límite superior el tercer cuartil. Las líneas por encima de las cajas y alambres (también conocidos como bigotes) indican los valores más lejanos y los puntos por encima de ellos los valores atípicos.

El objetivo de los gráficos de caja fue analizar las características de los EEP en función de su precipitación asociada. Dado que el periodo de secas que comprende de noviembre a mayo no muestra actividad significativa de EEP, se decidió utilizar únicamente los datos del periodo húmedo.

De manera general (Figura 7) se puede observar cómo los EEP sí-CT poseen los acumulados superiores con alrededor de 170 mm en promedio. Los extremos inferior y superior para estos eventos oscilan entre los 70 mm y 340 mm. Los casos considerados como atípicos superan incluso los 400 mm de lluvia diaria y representan los casos más extremos. En este sentido, se puede identificar a la Depresión Tropical y posterior Tormenta Tropical "Greg", que afectó al territorio colimense el 5-6 de septiembre de 1999 (EEP identificado con 400.1 mm) y al Huracán "Jova" (Figura 8), que alcanzó una categorización de 3 en la Escala Saffir-Simpson y afectó el territorio entre el 10-12 de octubre de 2011 (EEP identificado con 404.5 mm). Estos dos eventos extremos representan los históricos acumulados para el estado de Colima y son un ejemplo claro del peligro que representan para la población de la región. Es importante mencionar que para ambos casos fueron emitidas declaratorias de desastre por parte del CENAPRED.²

En los EEP no-CT se identifican, en promedio, acumulados menores con valores cercanos a los 125 mm. Los límites inferior y superior, representados por el primer y tercer cuartil, se ubican alrededor de los 100 mm y 140 mm por evento (Figura 7). El extremo superior muestra valores de alrededor de

² Las declaratorias pueden encontrarse en el *Diario Oficial de la Federación* con las fechas 01/11/1999 y 20/10/2011. Fuente: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4955889&fecha=01/11/1999 y https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5215007&fecha=20/10/2011

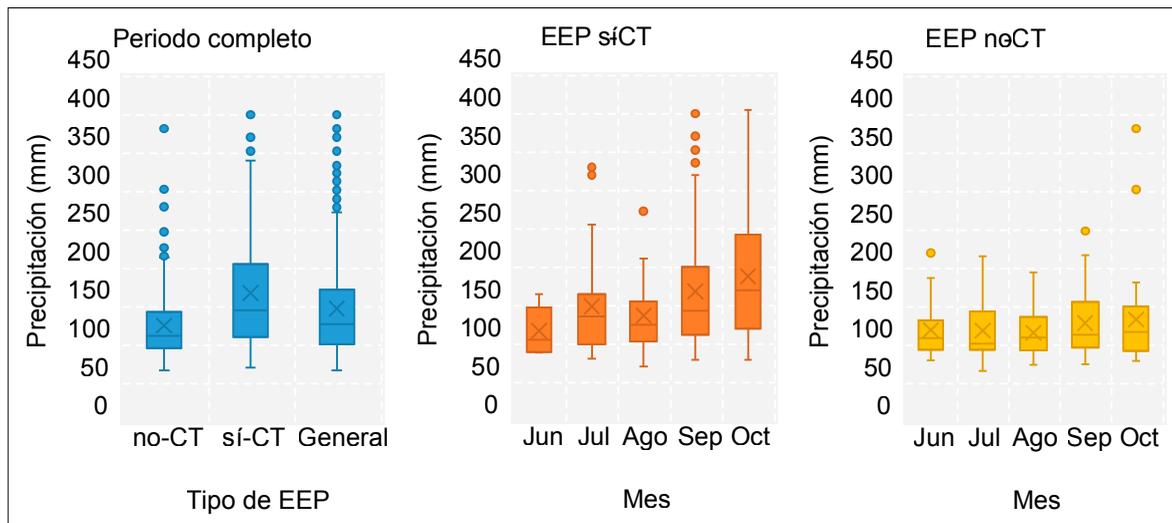


Figura 7. Gráficos de cajas de la precipitación asociada cada tipo de EEP para todo el periodo analizado y tomando especial atención en los meses húmedos.

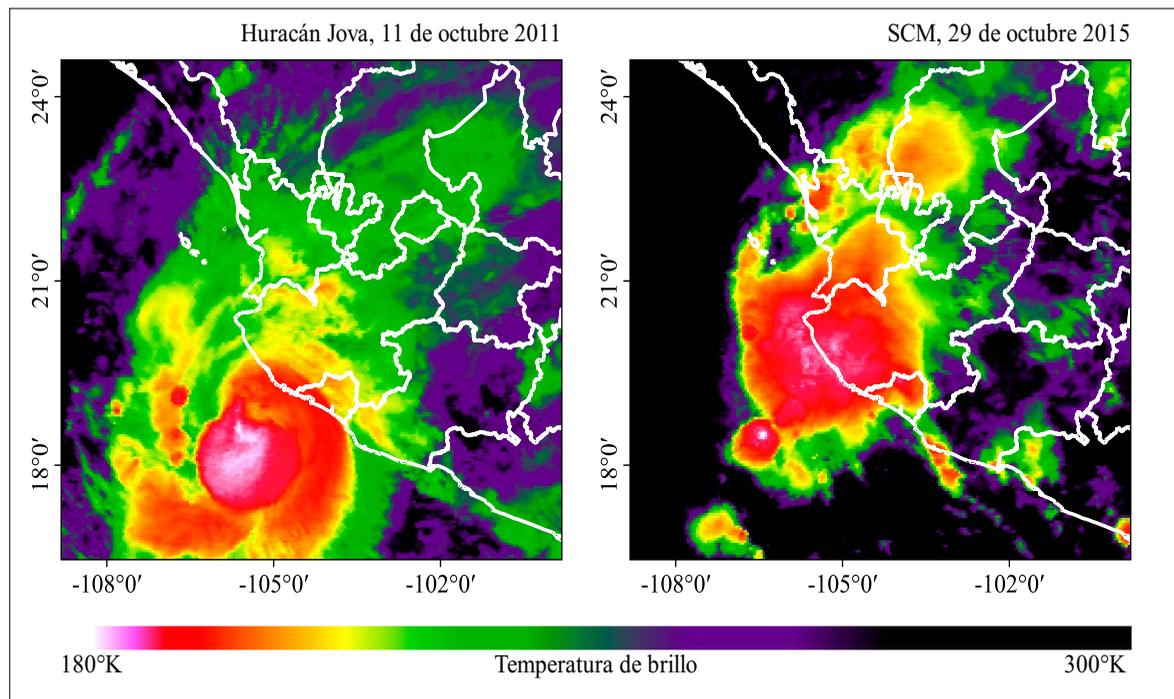


Figura 8. Productos satelitales de GOES-13 (Knapp y Wilkins, 2018) para los casos de Huracán “Jova” y un Sistema Convectivo de Mesoescala.

220 mm, posicionándose muy por debajo de los 340 mm que puede observarse en el extremo de los casos sí-CT. Algunos de los eventos atípicos identificados para los EEP no-CT son: el 29 de

octubre de 2015, con 382 mm acumulados y asociado a un Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM) formado de los remanentes del huracán “Patricia” (Figura 8), y el 26 de noviembre de 1982,

con acumulados de 280 mm (sin información disponible).

Los EEP también muestran diferentes características de acuerdo con el mes en que se originaron. Para el caso de los EEP no-CT (Figura 7) se pueden observar que las diferencias entre los acumulados asociados no varían significativamente de acuerdo con el mes de registro. Las medias oscilan entre los 116 mm (en agosto) y hasta los 133 mm (en octubre). Los límites inferiores tampoco varían significativamente y oscilan alrededor de los 94 mm diarios. Para el límite superior van de los 132 mm (en junio) hasta los 156 mm (en septiembre). Los valores extremos en ningún mes superan los 220 mm y los casos atípicos son mayormente identificados en los meses de septiembre y octubre. Se infiere que durante este periodo la disponibilidad de humedad asociada a, por ejemplo, remanentes de ciclones tropicales o el paso de ondas tropicales por la región son los detonadores principales de actividad.

Evidentemente los EEP no-CT poseen características que los posicionan como eventos menos severos. No obstante, es necesario considerar que, al no contar con protocolos de seguimiento y alertamiento específicos, este tipo de eventos³ pueden representar situaciones de riesgo para la sociedad. De igual forma, los umbrales establecidos para su identificación se encuentran por encima de los 67 mm diarios, que puede considerarse una precipitación muy intensa de acuerdo con clasificaciones propuestas por otros autores (por ejemplo, Zúñiga y Magaña, 2018).

Para el caso de los EEP sí-CT se observa un panorama distinto (Figura 7). De acuerdo con los resultados obtenidos, este tipo de sistemas sí muestran una fuerte variación en cuanto a la precipitación asociada con respecto al mes de registro. Lo eventos más severos se han documentado en septiembre y octubre, siendo coincidente también con el periodo donde se presentan mayor cantidad

de EEP sí-CT. Las medias asociadas con los EEP varían como 117 mm en junio, 149 mm en julio, 137 mm en agosto, 168 mm en septiembre, y hasta 188 mm en octubre. En términos generales se observa una tendencia de incremento en la severidad de los EEP hacia el final de la temporada húmeda, donde los valores extremos pueden superar los 400 mm para el mes de octubre. Los límites inferiores representados por el primer cuartil no varían significativamente y oscilan entre los 90 mm y 120 mm. Por el contrario, los límites superiores muestran una fuerte variación desde los 147 mm (para junio) y hasta los 242 mm (para octubre). Los casos atípicos calculados en función de la variación estacional de la intensidad de los EEP muestran que estos se concentran principalmente en el mes de septiembre.

CONCLUSIONES

El uso de estaciones climatológicas y la metodología de picos sobre el umbral de los días húmedos permitieron determinar las características de los eventos extremos de precipitación en Colima. El uso de umbrales por estación ayudó a identificar las variaciones espaciales de estos fenómenos y su cuantificación en el periodo de 1980-2018. Por otro lado, los datos de las trayectorias de huracanes resultaron útiles para la determinación del origen de los sistemas meteorológicos asociados a estas lluvias intensas.

La variación interanual de los EEP muestra una ligera tendencia de incremento de aquellos no asociados a CT y un decremento de los que sí lo están. No obstante, los resultados encontrados no muestran una señal clara de modos de variabilidad climática como el ENOS. Los EEP en el estado de Colima tienen su máxima aparición entre julio y octubre, y presentan diferencias según la fuente del evento. Aquellos asociados a CT tienen su pico de actividad en septiembre y octubre, mientras que los no asociados a CT siguen una distribución normal entre junio y octubre con su pico de actividad en agosto.

Los EEP asociados a CT poseen características más severas, es decir, con mayores acumulados

³ En el manuscrito titulado "Gestión Integral del Riesgo asociada a Eventos Extremos de Precipitación en Colima, México" (en proceso) se analiza de qué manera la inexistencia de estudios y monitoreo de este tipo de fenómenos constituye un factor significativo en la configuración del riesgo de desastre.

de lluvia y ocurren principalmente en la porción sur del estado. Por otro lado, aquellos eventos no asociados a CT son más recurrentes en la porción centro y norte de Colima, pero son típicamente menos severos. A estos últimos se les ha relacionado principalmente con sistemas convectivos de mesoescala. Los resultados sugieren que la orografía y el gradiente topográfico, así como los flujos de humedad del océano Pacífico son elementos determinantes en la generación de EEP a través de procesos de convección profunda y húmeda forzada por el terreno.

De acuerdo con los meses húmedos, se han encontrado diferencias en las precipitaciones asociadas a los EEP. En primer lugar, los acumulados de aquellos no asociados a CT parecen no variar significativamente, con medias entre 116-133 mm. Por el contrario, los eventos asociados a CT incrementan su severidad (es decir, poseen mayores acumulados) conforme más tardía es su documentación. En este sentido, las medias incrementan desde alrededor de 100 mm hasta cerca de 180 mm. Para ambos casos se han registrado eventos atípicos con acumulados de alrededor de 400 mm.

En la legislación nacional y en los marcos internacionales sobre gestión integral de riesgos (GIR) se establece que el comprender el riesgo es una de las primeras acciones a realizar en materia de prevención de desastres. En ese sentido, el riesgo de desastre asociado a los EEP se configura por la frecuencia de su ocurrencia y los valores de precipitación, la cantidad de población e infraestructura expuesta a estos fenómenos y la vulnerabilidad que se construye a partir de las condiciones sociales, económicas y políticas de las sociedades. Es en este contexto que el presente estudio constituye un paso fundamental para la GIR asociada a los EEP en el estado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las o los revisores anónimos por sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar significativamente el manuscrito.

REFERENCIAS

- Agel, L., Barlow, M., Qian, J.-H., Colby, F., Douglas, E. y Eichler, T. (2015). Climatology of daily precipitation and extreme precipitation events in the northeast United States. *Journal of Hydrometeorology*, 16(6), 2537-2557. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0147.1>
- Agustín Breña-Naranjo, J., Pedrozo-Acuña, A., Pozos-Estrada, O., Jiménez-López, S. A. y López-López, M. R. (2015). The contribution of tropical cyclones to rainfall in Mexico. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 83-84, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.05.011>
- Bocheva, L., Marinova, T., Simeonov, P. y Gospodinov, I. (2009). Variability and trends of extreme precipitation events over Bulgaria (1961-2005). *Atmospheric Research*, 93(1-3), 490-497. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.10.025>
- Bravo Cabrera, J. L., Azpra Romero, E., Rodríguez González, F. J. y Rodríguez López, O. (2018). Effects of ENSO on precipitation in Mexico City. *Investigaciones Geográficas*, 97. <https://doi.org/10.14350/rig.59679>
- Cavazos, T. y 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. y Lettenmaier, D. P. (2008). Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. *Geophysical Research Letters*, 35(21). <https://doi.org/10.1029/2008GL035832>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021). Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2021. Disponible en <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- Chinita, M. J., Richardson, M., Teixeira, J. y Miranda, P. M. A. (2021). Global mean frequency increases of daily and sub-daily heavy precipitation in ERA5. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074035. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0caa>
- Domínguez, C., Jaramillo, A. y Cuéllar, P. (2021). Are the socioeconomic impacts associated with tropical cyclones in Mexico exacerbated by local vulnerability and ENSO conditions? *International Journal of Climatology*, 41(S1), E3307-E3324. <https://doi.org/10.1002/joc.6927>
- Domínguez, C. y Magaña, V. (2018). The Role of Tropical Cyclones in Precipitation Over the Tropical and Subtropical North America. *Frontiers in Earth Science*, 6, 19. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00019>

- Farfán, L. M., Barrett, B. S., Raga, G. B. y Delgado, J. J. (2021). Characteristics of mesoscale convection over northwestern Mexico, the Gulf of California, and Baja California Peninsula. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E1062-E1084. <https://doi.org/10.1002/joc.6752>
- Gutiérrez Lozano, J., Vargas Tristán, V., Romero Rodríguez, M., Plácido de la Cruz, J. M., Aguirre Bortoni, M. de J. y Silva Espinoza, H. T. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones Geográficas*, 76, 20-33. <https://doi.org/10.14350/ig.29871>
- Herrera, E., Magaña, V. y Morett, S. (2018). Relación entre eventos extremos de precipitación con inundaciones. Estudio de caso: Tulancingo, Hidalgo. *Nova scientia*, 10(21), 191-206. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1527>
- Hoeppe, P. (2016). Trends in weather related disasters- Consequences for insurers and society. *Weather and climate extremes*, 11, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.002>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2021). Información por entidad: Colima. Resumen. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/col/default.aspx>
- Khouakhi, A., Villarini, G. y Vecchi, G. A. (2017). Contribution of Tropical Cyclones to Rainfall at the Global Scale. *Journal of Climate*, 30(1), 359-372. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0298.1>
- Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C. y Schreck, C. J. (2018). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4 [Data set]. NOAA National Centers for Environmental Information.
- Knapp, K. R., Kruk, M. C., Levinson, D. H., Diamond, H. J. y Neumann, C. J. (2010). The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS) unifying tropical cyclone data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(3), 363-376. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2755.1>
- Knapp, K. R. y Wilkins, S. L. (2018). Gridded satellite (GridSat) GOES and CONUS data. *Earth System Science Data*, 10(3), 1417-1425. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1417-2018>
- Kunkel, K. E., Easterling, D. R., Redmond, K. y Hubbard, K. (2003). Temporal variations of extreme precipitation events in the United States: 1895-2000. *Geophysical research letters*, 30(17). <https://doi.org/10.1029/2003GL018052>
- León-Cruz, J. F., Carbajal Henken, C., Carbajal, N. y Fischer, J. (2021). Spatio-Temporal Distribution of Deep Convection Observed along the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Remote Sensing*, 13(6), 1215. <https://doi.org/10.3390/rs13061215>
- León-Cruz, J. F., Carbajal, N. y 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>
- Lozoya, R. P. y de la Parra Arellano, M. (2015). Sistematización de la recurrencia de amenazas naturales y desastres en el estado de Colima, México. *Estudios sobre las Culturas Contemporáneas*, 21(II), 143-165.
- Magaña, V., Amador, J. A. y Medina, S. (1999). The Mid-summer Drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Magaña, V., Pérez, J. y Méndez, M. (2003). Diagnosis and prognosis of extreme precipitation events in the Mexico City Basin. *Geofísica Internacional*, 42(2), 247-259. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2003.42.2.269>
- Ochoa, C. A., Conde, A. C., Welsh, C. M., Morales, M. A., Hayden, M. y Nava, M. E. (2014). Eventos extremos de precipitación en Veracruz: Impactos y efectos medioambientales. Serie A; 9. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología.
- Oliveira, P. T. de, e Silva, C. S. y Lima, K. C. (2017). Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 130(1), 77-90. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>
- Pavia, E. G., Graef, F. y 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>
- Patino-Barragán, M., Meyer-Willerer, A. O., Pérez, G., Lezama Cervantes, C. y Lara Chávez, B. (2009). Zona de mayor afectación en el puerto de manzanillo colima México, por eventos hidrometeorológicos intensos y su periodicidad. *Boletín Técnico*, 47(1), 47-60.
- Pendergrass, A. G., Knutti, R., Lehner, F., Deser, C. y Sanderson, B. M. (2017). Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1), 17966. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>
- Pérez-Morga, N., Kretschmar, T., Cavazos, T., Smith, S. V. y Muñoz-Arriola, F. (2013). Variability of extreme precipitation in coastal river basins of the southern Mexican Pacific region. *Geofísica Internacional*, 52(3), 277-291. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71477-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71477-6)
- Pineda-Martínez, L. F., León-Cruz, J. F. y Carbajal, N. (2020). Analysis of severe storms and tornado formation in the northern region of Mexico. *Revista bio ciencias*, 7.

- Rasmusson, E. M. y Arkin, P. A. (1993). A Global View of Large-Scale Precipitation Variability. *Journal of Climate*, 6(8), 1495-1522. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1495:AGVOL S>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1495:AGVOL S>2.0.CO;2)
- Ríos-García, R. del C. (2016). Análisis de fenómenos atmosféricos generadores de precipitaciones moderadas a extremas en el periodo 2000-2013, en la zona conurbada Colima - Villa de Álvarez. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad de Colima.
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E. y dos Santos, C. A. C. (2020). Observed trends in daily extreme precipitation indices in Aguascalientes, Mexico. *Meteorological Applications*, 27(1), e1838. <https://doi.org/10.1002/met.1838>
- Servicio Meteorológico Nacional (2021). Sistema de Información de estaciones climatológicas. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Semmler, T. y Jacob, D. (2004). Modeling extreme precipitation events-a climate change simulation for Europe. *Global and Planetary Change*, 44(1-4), 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.06.008>
- Shen, G. y Hwang, S. N. (2019). Spatial-Temporal snapshots of global natural disaster impacts Revealed from EM-DAT for 1900-2015. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 912-934. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1552630>
- Tramblay, Y., El Adlouni, S. y Servat, E. (2013). Trends and variability in extreme precipitation indices over Maghreb countries. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3235-3248. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3235-2013>
- Yin, H. y Sun, Y. (2018). Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices. *Advances in Climate Change Research*, 9(4), 218-226. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.01.001>
- Zúñiga, E. y Magaña, V. (2018). Vulnerability and risk to intense rainfall in Mexico: The effect of land use cover change. *Investigaciones Geográficas*, 95. <https://doi.org/10.14350/ig.59465>
- Zúñiga, R. A. A. y Villoria, A. M. G. (2018). Desastres en México de 1900 a 2016: Patrones de ocurrencia, población afectada y daños económicos. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 42, e55. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2018.55>