

Eventos de inundación en el Río San Pedro–Mezquital, Nayarit, México

Flood Events in the Rio San Pedro–Mezquital, Nayarit, Mexico

Luis Brito–Castillo, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC

Luis M. Farfán, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Luis Felipe Pineda–Martínez, Universidad Autónoma de Zacatecas

José Pablo Vega–Camarena, Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos

RESUMEN. El río San Pedro Mezquital es una de las pocas corrientes, que hay en México, libre de regulación artificial. El sitio de aforos se localiza a 44 km aguas arriba de la desembocadura garantizando el aforo de casi la totalidad de la descarga de la cuenca. Empleando datos horarios de caudales del río San Pedro Mezquital en el periodo 1944-2006 se investigaron las principales características del hidrograma de caudal de las inundaciones de gran magnitud: el pico de caudal, el tiempo de concentración y la duración total. Se ajustó una función de probabilidad a la serie de gastos máximos horarios (un valor por año) dentro del período de observaciones, y se estimó el periodo de retorno asociado a cada inundación. Los resultados indican que las inundaciones de gran magnitud en el río San Pedro Mezquital ocurren en verano o en invierno. En la temporada cálida, estuvieron asociadas a huracanes, en tanto que en la temporada fría coincidieron con eventos El Niño. El pico medio de descarga estimado en los eventos identificados fue de $4840 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, con un máximo de $6300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y un mínimo de $4020 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La duración entre el inicio de la creciente y el pico máximo fue mayor a seis horas en todos los casos. Por lo tanto, quedan fuera de la clasificación de inundaciones repentinas.

PALABRAS CLAVE: aforos, evento extraordinario, hidrograma, inundación

ABSTRACT. The San Pedro–Mezquital is one of the few streams in the Pacific watershed of Mexico that is free from artificial water-control. The gauging site is located 44 km upstream from the mouth, guarantying to gauge almost the full discharge of the basin. Using hourly streamflow data from the gauge station at the San Pedro Mezquital in the period 1949-2006 we investigated the main characteristics of the flood events hydrographs (i.e. peak flow, time of concentration and total duration). A probability function was fitted to data series of hourly-maximum streamflow (one value per year) within the entire period of data, and the return period was estimated for each of the peak discharges. Results indicate that extraordinary flood events in the San Pedro Mezquital occur in summer or winter. In the warm season, floods were associated to hurricanes, while in the cool season they occur simultaneously with El Niño conditions. The mean peak discharge of the floods was $4840 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, with a maximum of $6300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and a minimum of $4020 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. The duration between the onset of the flood and the peak discharge was up to six hours in all the occurrences. Therefore, floods were not classified as flash floods.

KEYWORDS: discharges, extraordinary events, hydrograph, flood

Introducción

El río San Pedro-Mezquital es una de las pocas corrientes localizadas en la vertiente del Pacífico Mexicano que se encuentra libre del control por presas. Por lo tanto, se presume que su caudal es natural. Desemboca en Marismas Nacionales, donde existe el manglar más extenso del Pacífico Norte (CONANP 2013). Su cuenca de captación cubre una superficie de 27400 km². Nace en la sierra de Michis a unos 2500 m de elevación a 26 km al noroeste de la ciudad de Canatlán, en el estado de Durango. En su parte alta, el río San Pedro-Mezquital se forma por la unión de tres corrientes, La Saucedá, el Tunal y Santiago Bayacora (Fig. 1).

Desciende hacia el sureste donde se le unen los ríos Poana y Súchil recorriendo el cañón del Mezquital, cuya profundidad es mayor a 1500 m en la parte media de la cuenca (Brito-Castillo y col. 2010, Fig. 1). En su recorrido, cruza diferentes zonas climáticas, desde la parte alta de la cuenca, en la región del Altiplano, donde el clima es semiárido, subtropical, con una estación lluviosa que se extiende desde junio hasta octubre y una precipitación anual acumulada promedio de 500 mm. En la desembocadura, en el estado de Nayarit el clima es cálido húmedo con una precipitación anual de 1000 mm y una estación lluviosa que se extiende entre mayo y octubre y una segunda época entre noviembre y abril. El mes más

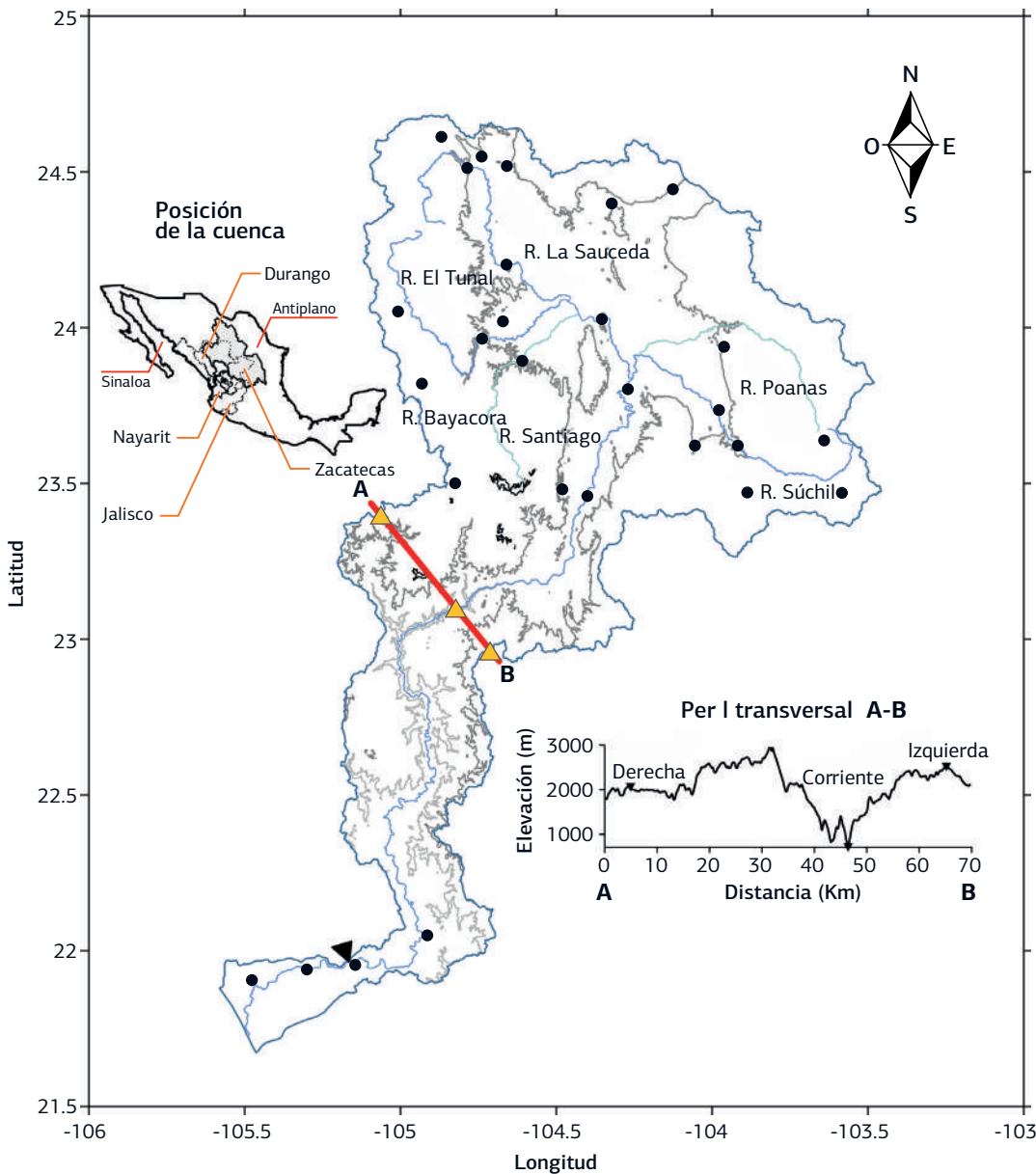


FIGURA 1. Cuenca del río San Pedro Mezquital. El triángulo negro indica la posición de la estación de aforo

- LEYENDA**
- Corrientes
 - Curva de nivel de 1000m
 - Curva de nivel de 2000m
 - Curva de nivel de 3000m

lluvioso en la desembocadura es agosto, debido al desarrollo de tormentas convectivas locales, conocidas como Sistemas Convectivos de Mesoscala (SCM), que descargan un volumen importante de lluvia que si bien se forman entre julio y septiembre, son más prolíficos en agosto (Brito-Castillo y col., 2010). Esta característica le agrega mayor importancia al estudio de eventos extremos, pues muchas poblaciones localizadas en zonas adyacentes al río son vulnerables a las inundaciones. Las inundaciones en la desembocadura del río San Pedro-Mezquital tienen su origen en el volumen de lluvia acumulado tanto en las planicies como al interior de la cuenca, por lo tanto, el estudio del transporte de humedad desde la superficie hacia el interior de la cuenca de este río y la producción de lluvias generadoras de inundaciones es de gran utilidad para una mejor gestión del riesgo. Se han realizado diversos estudios para entender la dinámica del flujo atmosférico entre la costa, en la desembocadura del río San Pedro-Mezquital y el Altiplano, en el interior del continente (Negri y col., 1993/1994; Palacios-Hernández y col., 2010; Brito-Castillo y col., 2010; Vega-Camarena y col., 2018a/2018b). Palacios-Hernández y col., (2010), indican que el incremento de las temperaturas del mar cercanas a la costa en la boca del Golfo de California se retrasa en un mes en relación al incremento en las lluvias, lo que indica que primero se alcanza el máximo de precipitación y un mes después el máximo calentamiento de las aguas del mar. Este desfase sugiere que la influencia dominante en esta relación no es el forzamiento por temperaturas. Negri y col. (1993/1994), por su parte, sugieren que la forma cóncava de la línea de costa incrementa la convergencia de humedad y el máximo de precipitaciones, lo que origina condiciones favorables para la formación de los SCM. Brito-Castillo y col. (2010), sugieren que las condiciones del terreno, las aguas cálidas cercanas a la costa en la boca del Golfo de California y las anomalías de humedad del suelo propician condiciones favorables que controlan el incremento de la actividad de los SCM, y las fuerzas que las originan residen dentro de la región del monzón de Norteamérica (Douglas y col. 1993; Higgins y col., 2003; Gochis y col., 2006) y, por tanto, pueden estar comparativamente menos influenciadas por forzamientos que son externos al monzón (Douglas y col., 1993). Se le denomina monzón de Norteamérica, al sistema climático que se caracteriza por un cambio estacional en la dirección de los

vientos. En verano, por ejemplo, los vientos soplan del suroeste-sureste transportando la humedad de los trópicos hacia el noroeste de México. En invierno, en cambio, los vientos soplan del noreste-noroeste, permitiendo el ingreso de los frentes extratropicales hacia el norte de México, que provocan bajas de temperatura y precipitación en forma de nieve en las partes altas de las montañas.

En este estudio, se analizan y describen las características (i.e. el pico de caudal, el tiempo de concentración y la duración de la creciente), de los eventos históricos extraordinarios de inundación en la desembocadura del río San Pedro-Mezquital y se discuten las potenciales causas que las originaron. Los resultados pueden ser de mucha utilidad para estudios de gestión de riesgo por inundaciones. En la sección 2 se describen los datos utilizados para este estudio, las características de la estación de aforo, el método para identificar las inundaciones de interés y las herramientas estadísticas empleadas para estimar el período de retorno asociado a cada inundación; en la sección 3 se muestran los principales resultados obtenidos, mientras que en la sección 4 se discuten las características del caudal máximo y las potenciales causas que dieron origen a las inundaciones identificadas. Finalmente, en la sección 5 se describen las principales conclusiones de este estudio.

2. Materiales y métodos

Se obtuvieron los registros horarios de gastos medios de la estación hidrométrica San Pedro (clave de registro 11012, Bandas 1997), para el período 1944-2006. La estación hidrométrica San Pedro (105°09'00" LW, 21°58'00" LN, Fig. 1), se localiza en el cruce con el puente del ferrocarril del Pacífico, a la altura de la población de Ruíz, en el municipio de Ruíz, Nayarit, a unos 44 km aguas arriba de la desembocadura del río San Pedro. Se instaló con el objeto de conocer los escurrimientos de la cuenca total del río San Pedro, teniendo en cuenta las derivaciones que se hacen cinco km aguas arriba por el canal principal de la margen derecha (Bandas 1997). El tramo donde se ubica la estación hidrométrica es recto en una longitud de 600 m. La longitud de la sección transversal es de 340 m y no es totalmente perpendicular al cauce, ya que tiene una desviación de 20 grados. En este tramo el lecho y las márgenes del río, están formados por arena, grava y cantos rodados y en partes llega a aflorar una formación de Tepetate

(Bandas 1997). Cuenta con una escala vertical de cemento para medir el nivel del agua cuyas lecturas comenzaron el 22 de enero de 1944. Los aforos se realizan por el método de sección y velocidad y con molinetes Lietz, Tamaya y Gurley e iniciaron el dos de noviembre de 1944. Adicionalmente, se instaló un limnógrafo Stevens tipo E para el registro automático de los niveles desde el siete de marzo de 1948.

Se describen primero las características del caudal máximo, estimando el hidrograma de caudal horario medio histórico con base en el período 1944-2006 (Fig. 2). Se construyen también las series históricas de caudal máximo (un valor por año, Fig. 3), para identificar las épocas susceptibles de inundación. El análisis se realizó para verano (mayo-octubre), invierno (noviembre-abril) y anual (mayo-abril).

A partir de los datos horarios de caudal, se identificaron los eventos con picos mayores a $4000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Fig. 4). El valor de $4000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ establece el umbral para el cual las crecidas en la desembocadura del río San Pedro-Mezquital son excepcionales. Para cada evento identificado se estimaron las características del hidrograma resultante (el pico de caudal, el tiempo de concentración y la duración de la creciente). Se ajustó una función de distribución de frecuencias a la serie de gastos máximos horarios (un valor por año) dentro del período de observaciones. Para el ajuste se utilizaron las distribuciones más comúnmente utilizadas en hidrología (OMM 1994) y se eligió la distribución que mejor se ajustó a los datos. El ajuste se hizo para verano e invierno. A partir de la distribución de frecuencias se estimó el periodo de retorno en años asociado a cada evento identificado como la probabilidad de no excedencia $Tr = 100/P$, donde P, es el percentil asociado a cada evento.

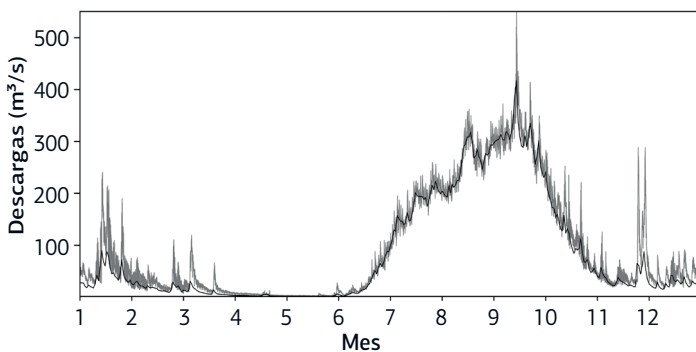


FIGURA 2. Hidrograma promedio histórico con base en el período 1944-2006, de gastos horarios (línea gris) y diarios (línea negra).

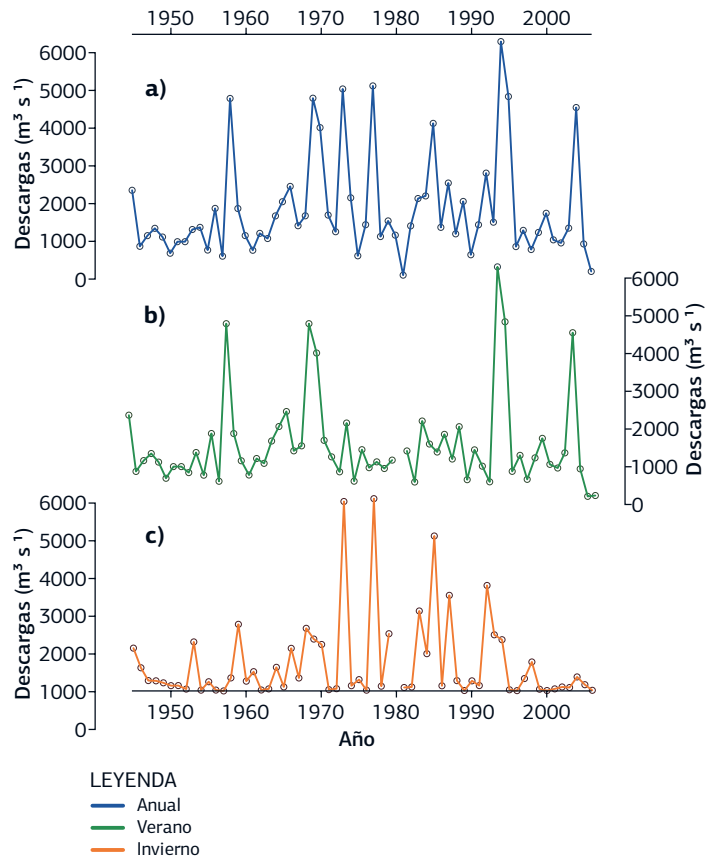


FIG. 3. VARIABILIDAD interanual de gastos máximos horarios (uno por año) en tres épocas distintas: a) anual (mayo-abril); b) verano (mayo-octubre) y c) invierno (noviembre-abril).

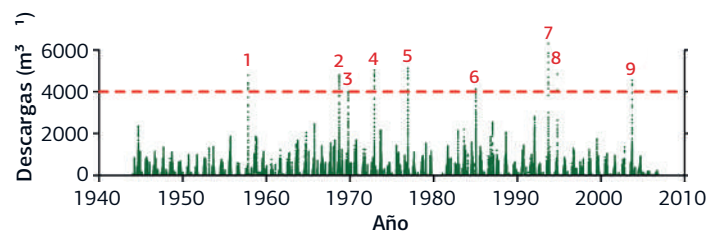


FIGURA 4. Registros horarios de caudales (m^3s^{-1}) entre 1944 y 2006, derivados de los aforos realizados en la estación hidrométrica San Pedro (clave 11012, $105^{\circ}09'00'' \text{ LW}$ y $21^{\circ}58'00'' \text{ LN}$), localizada en el río San Pedro-Mezquital. Se resaltan nueve eventos con gastos mayores a $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

3. Resultados

Las descargas del río San Pedro-Mezquital en la estación de aforo muestran dos épocas en que las crecidas del río son comunes y son parte de su climatología (Fig. 2). La de mayor volumen ocurre en el mes de septiembre y es resultado de la ocurrencia de sistemas de origen tropical como los Sistemas Convectivos de Mesoscala, los ciclones tropicales y

las ondas del este (Brito-Castillo y Pedrozo-Acuña, 2015; Vega-Camarena y col., 2008a). Otra época de crecidas se observa a finales de noviembre y mediados de enero como resultado de la intrusión de frentes extratropicales que pueden propiciar tormentas

CUADRO 1. Lista de nueve eventos con picos máximos de caudal superiores a $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ registrados en la estación hidrométrica San Pedro (clave 11012, $105^{\circ}09'00'' \text{ LW}$, $21^{\circ}58'00'' \text{ LN}$) en el período 1944-2006.

Evento	Año	Mes	Día	Hora local*	Gasto, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$
1	1957	10	22	05	4790
2	1968	09	14	00	4800
3	1969	10	12	14	4020
4	1972	11	24	18	5050
5	1976	11	28	14	5120
6	1985	01	14	06	4120
7	1993	09	13	23	6300
8	1994	10	14	19	4850
9	2003	09	22	01	4550
Media					4840

*Hora en que se alcanzó el pico máximo

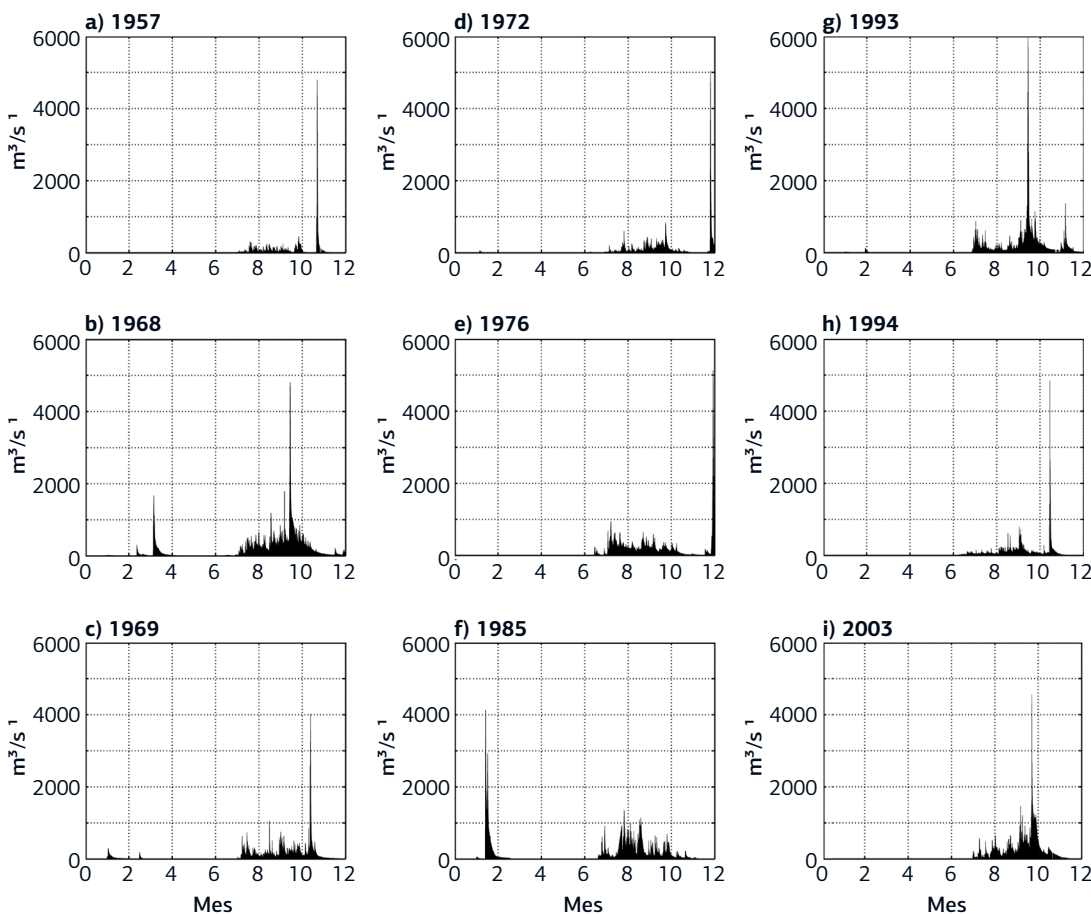


FIGURA 5. Hidrogramas horarios de nueve años en que se presentaron eventos extraordinarios de caudal, con valores superiores a $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

invernales ya sea en forma de lluvia o nieve, en lo alto de las montañas si las condiciones son adecuadas (Brito-Castillo y col. 2010).

El análisis de las series, por épocas (Fig. 3) muestra una alta variabilidad interanual, con años muy caudalosos y años con déficits (Fig. 3a). Resulta notorio que tanto en los meses cálidos (mayo-octubre, Fig. 3b), como en los meses fríos (noviembre-marzo, Fig. 3c), los picos máximos de caudal son comparables en magnitud, y algo aún más notorio, se observa una alternancia en los períodos. Por ejemplo, los períodos 1950-1970 y 1990-2006, con picos muy altos en verano (Fig. 3b) se corresponden con picos bajos en invierno (Fig. 3c), mientras que en el período 1970-1990 se observa lo opuesto, es decir hay picos altos en invierno que coinciden con picos bajos en verano. Esto indica que el riesgo por inundaciones a causa de desbordes en el río San Pedro, en las poblaciones adyacentes al cauce cerca de su desembocadura, está presente en las dos épocas. Más aún, si se presentan inundaciones en los meses cálidos, es poco probable que también ocurran en los meses fríos del mismo año y viceversa. Este resultado es particularmente

notorio para la planeación en la gestión del riesgo por inundación.

Los registros horarios históricos de caudales en la estación de aforo indican que entre 1944 y 2006 ocurrieron nueve eventos con gastos superiores a $4000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Figura 4). En el Cuadro 1 se muestran algunos datos asociados a cada evento.

Como se observa, seis eventos de inundaciones identificadas ocurrieron en septiembre y octubre (1957, 1968, 1969, 1993, 1994 y 2003) y tres en noviembre y enero (1972, 1976 y 1985). No se observa un patrón en la hora en que ocurrió el pico máximo de cada inundación pues este se presentó en horas de la mañana, tarde y noche (Cuadro 1). El pico medio de descarga estimado para los nueve eventos es de $4840 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un máximo de $6300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y un mínimo de $4020 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La Figura 5 muestra los hidrogramas asociados a cada evento mientras que la Figura 6 muestra con mayor detalle las características del hidrograma de cada inundación. Como se aprecia, cada evento fue único en cuanto a su forma y ocurrencia (Fig. 5) y hay una gran variabilidad en cuanto a su duración (Fig. 6).

Los resultados del ajuste de la distribución de frecuencias a las series de gastos máximos horarios de verano e invierno se muestran en el cuadro 2.

La distribución de frecuencias que mejor se ajustó a las observaciones fue la distribución de Pearson del Tipo III. Según estos resultados, la magnitud de gastos máximos de verano es comparable con la magnitud de los gastos máximos de invierno, aunque son un poco mayor en verano. Teóricamente, la magnitud de los gastos máximos con un período de retorno de una

CUADRO 2. Resultados del ajuste de frecuencias a las series de gastos máximos horarios (Q) de verano e invierno. La distribución que mejor se ajustó a los datos fue la distribución de Pearson del Tipo III. Se indica el percentil (P) asociado a cada valor de Q.

Verano: Promedio= $1576 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; Cv=2.13; n=62 años de registros						
P	0.01	0.1	1	2	5	10
Q	11888	8943	6016	4652	4024	3134
Invierno: Promedio= $736 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; Cv=2.39; n=61 años de registros						
P	0.01	0.1	1	2	5	10
Q	11022	8017	5058	3710	3026	2168

n = años de registros

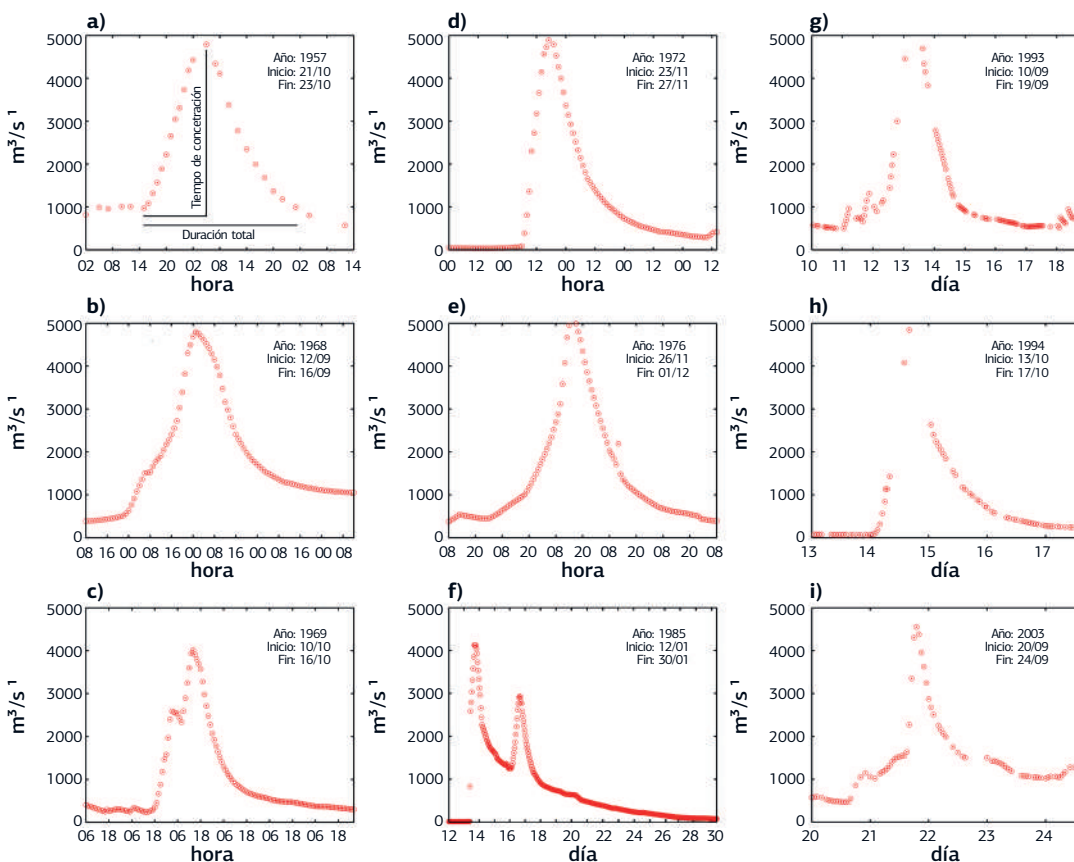


FIGURA 6. Hidrogramas horarios de las crecientes registradas en nueve eventos extraordinarios. Nótese que en a)–e), el eje 'X' está en horas, mientras que en f)–i), está en días. En cada caso se indica el año, inicio (día/mes) y fin (día/mes) del evento.

CUADRO 3. Período de retorno en años (Tr), tiempo de concentración en horas (T) y duración total (D) de nueve eventos de inundación. En la última columna se indica la causa asociada a cada evento.

N	Año	Gasto	Tr	T	D	Causa asociada
1	1957	4790	60	14	34	17-21/oct/Huracán-1
2	1968	4800	60	22	71	09-13/sep/Huracán-1
3	1969	4020	20	24	44	09-12/oct/Huracán-1
4	1972	5050	100	24	48	Año Niño
5	1976	5120	100	37	67	Año Niño
6	1985	4120	60	7	61	Ind.
7	1993	6300	100	28	65	08-14/sep/Lidia cat. 4
8	1994	4850	60	18	43	08-15/oct/Rosa cat. 2
9	2003	4550	60	17	70	19-24/oct/Marty cat. 2
Media	4840	50	21	56		

Ind=indefinido

vez cada diez mil años ($Tr = 100/0.01$) es cercano a los $12000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en verano y poco mayor a $11000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en invierno, mientras que los gastos máximos con un período de retorno de una vez cada cien años ($Tr=100/1.0$) oscila entre los $6000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para verano y $5000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para invierno. En este último caso, los valores son muy cercanos a los observados durante los nueve eventos históricos de inundación. El Cuadro 3 muestra un resumen de las características más sobresalientes de cada evento analizado, i.e. el período de retorno Tr , el tiempo de concentración de la creciente T , la duración total D , y la fuente más probable que dio origen a la inundación.

4. Discusión

Una de las características notorias del clima en la región de la cuenca del río San Pedro-Mezquital tiene que ver con el mes en que ocurren los picos de precipitación (Fig. 7) y de caudal (Fig. 8) (Brito-Castillo y col., 2010). Nótese como al interior de la cuenca del río San Pedro Mezquital los picos de precipitación y de caudal están desfasados un mes en relación a su distribución hacia ambos lados de la cuenca, al norte y sur del territorio. Este comportamiento fue analizado por Brito-Castillo y col. (2010/2011), quienes sugirieron que el desfase temporal en el pico de precipitación y de caudal al interior de la cuenca y la zona costera en el estado de Nayarit, representa una anomalía climática causada por condiciones locales que tienen origen en la cercanía con el mar en la

boca del Golfo de California, las condiciones del relieve y la humedad del suelo. Estas características propician convección de humedad que al combinarse con el relieve en el interior del continente resulta en tormentas locales conocidas como Sistemas Convectivos de Mesoscala (SCM) que proliferan entre julio y septiembre, pero con mayor presencia en agosto.

Al igual que los ciclones tropicales, los Sistemas Convectivos de Mesoscala pueden descargar suficientes cantidades de precipitación en poco tiempo, llegando a generar inundaciones (Brito-Castillo y Pedrozo-Acuña, 2015).

No obstante, los resultados indican que la fuente más probable asociada a inundaciones de gran magnitud de verano, como las observadas en la desembocadura del río San Pedro-Mezquital, proviene de ciclones tropicales (Cuadro 3). Los ciclones tropicales que afectan a la región son más frecuentes en septiembre y octubre que es cuando alcanzan su máxima latitud de desplazamiento (Farfán y col., 2015). La inundación más reciente ocurrida en la región de estudio fue durante el paso del ciclón tropical Willa en octubre de 2018 y dejó incomunicadas muchas poblaciones aledañas al río San Pedro-Mezquital en su desembocadura. Desafortunadamente, los datos de caudales de ese evento no se encuentran disponibles al público para un análisis detallado. Hay un segundo pico en los meses de invierno, apenas perceptible en los acumulados de precipitación (Fig. 7) y de caudal (Fig. 8). El hidrograma medio de caudal del río (Fig. 2), indica que forma parte de su climatología y como ya se mencionó es producto de la incursión de tormentas invernales. Las tormentas invernales, a diferencia de las tormentas de verano cubren un mayor territorio y su duración es mucho mayor.

De las tres inundaciones históricas registradas en la época fría, dos (1972 y 1976) coincidieron con condiciones El Niño y una (1985), con condiciones La Niña (Cuadro 3). Aunque la relación entre eventos El Niño y precipitaciones por arriba de lo normal en la región de interés no es lineal, parece que su intensidad depende del patrón de temperaturas superficiales del mar a través del Pacífico (Hoerling y Kumar, 2002) y la posición e intensidad de la corriente de chorro subtropical. Una corriente en chorro que descienda a una latitud menor a los 30° favorece la penetración de masas de aire frías, que al combinarse con un mar cálido propician condiciones favorables para la precipitación en el interior del continente. Como indica el Cuadro 3, en condiciones excepcionales pueden desarrollarse

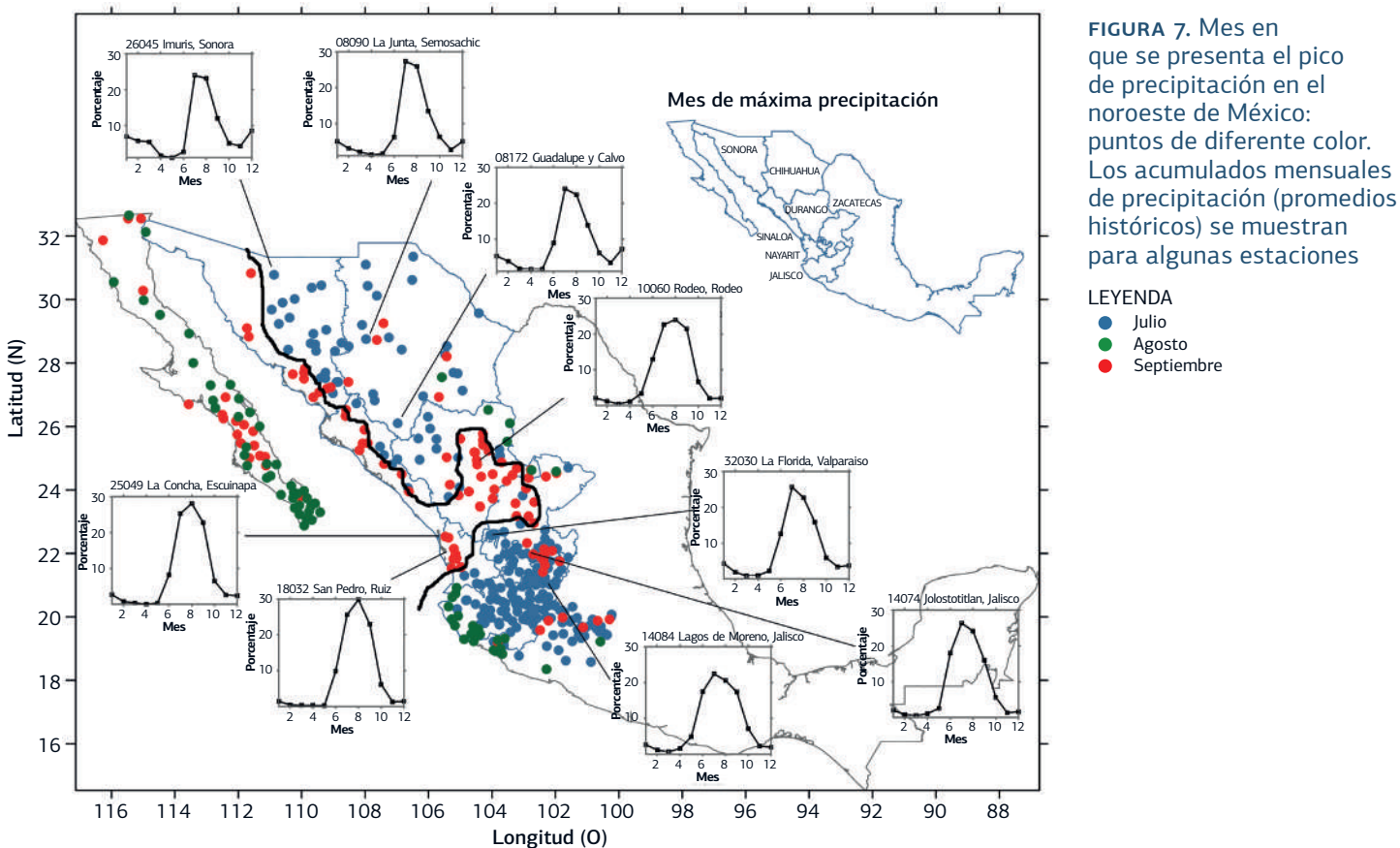


FIGURA 7. Mes en que se presenta el pico de precipitación en el noroeste de México: puntos de diferente color. Los acumulados mensuales de precipitación (promedios históricos) se muestran para algunas estaciones

LEYENDA
 ● Julio
 ● Agosto
 ● Septiembre

tormentas que generan inundaciones extraordinarias como las ocurridas en 1972 y 1976. Un caso inusual fue la inundación de invierno de 1985, que además fue doble (Fig. 6f) y tuvo una duración de dos meses. Lo inusual de esta inundación es que, por lo regular, durante un evento La Niña, las precipitaciones de invierno en la región son por debajo de lo normal. Esto sucede debido a que en condiciones La Niña se favorece la intensificación del sistema de alta presión del Pacífico Oriental, que es especialmente efectiva en conducir la actividad de tormentas hacia Norteamérica limitando la humedad necesaria para la precipitación en la región de estudio. Este resultado indica la contribución de un forzamiento adicional a La Niña que produjo las tormentas que originaron la inundación de 1985.

Los hidrogramas de caudal (Fig. 6), indican que en todos los casos el tiempo de concentración en cada inundación tuvo una duración mayor a seis horas, que es el tiempo mínimo necesario para dar aviso a la población de que se resguarde antes de que se alcance el pico máximo. En esta fase la creciente del río aumenta muy rápido conforme el agua de las precipitaciones, tanto en el sitio de aforo como aguas

arriba de la corriente, drena a través de la red de drenaje hacia el cauce principal hasta la estación de aforo. En la mayoría de los casos, el pico máximo de la creciente se estima ya que el río puede llegar a desbordar inundando las planicies aledañas, denominadas planicies de inundación, que también forman parte del cauce principal. Es en esta parte del río en el que mucha población se asienta, principalmente durante períodos prolongados en los que no se observan inundaciones. La fase de descarga, ocurre más lentamente y su duración es mucho mayor a la fase de crecimiento (Fig. 6a). En casos excepcionales, durante la fase de descarga puede darse otra inundación de menores proporciones (Fig. 6f). Cuando el cauce del río recupera nuevamente los niveles anteriores a la inundación (i.e. el gasto base), se puede contabilizar la duración total del evento. La duración total de las inundaciones resultó muy variable, y fue de unas cuantas horas (Figs. 6a-e) hasta varios días (Figs. 6f-i).

Debido a la importancia de conocer el pico máximo de una inundación, en la práctica, además de los registros históricos de la estación de aforo, es común revisar en campo las marcas históricas que producen las inundaciones pasadas, que por ser muy antiguas no aparecen

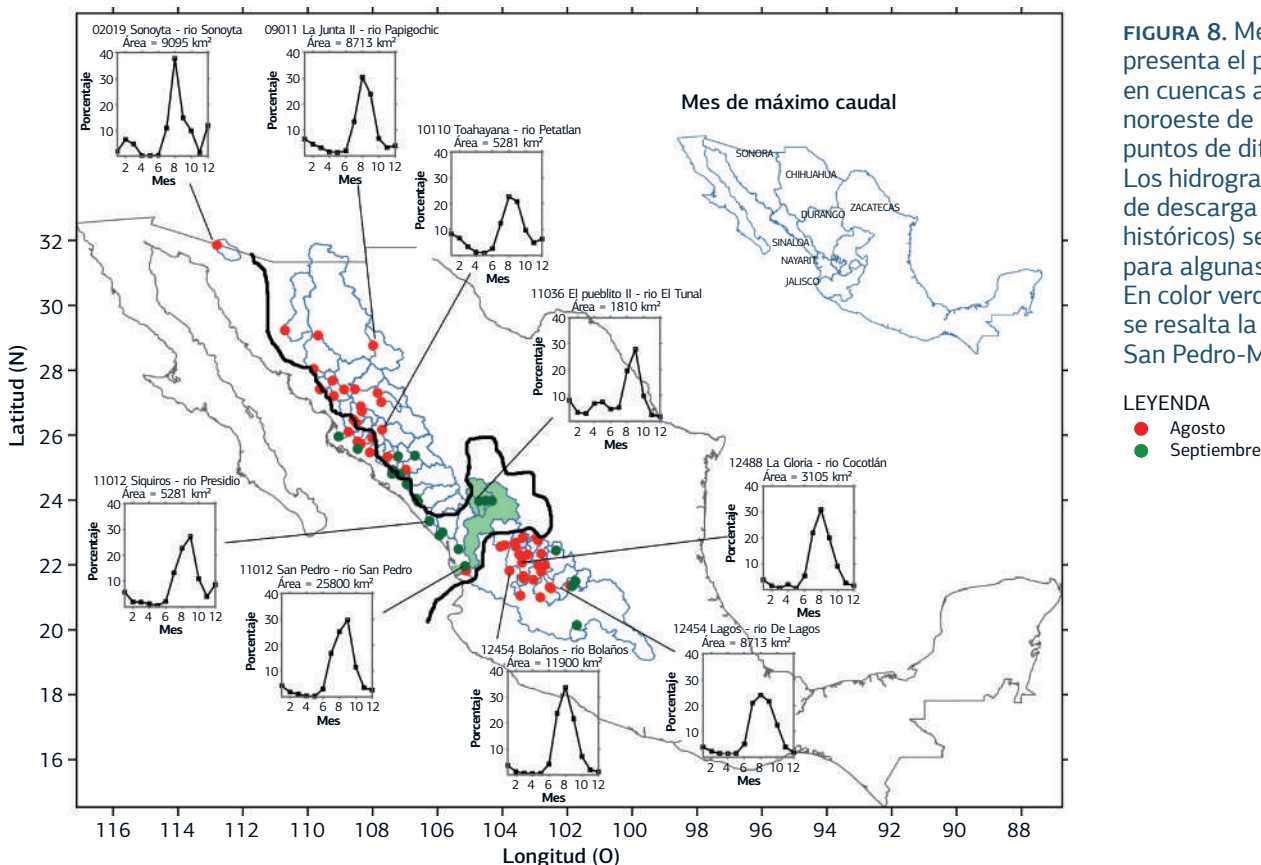


FIGURA 8. Mes en que se presenta el pico de caudal en cuencas aforadas del noroeste de México: puntos de diferente color. Los hidrogramas mensuales de descarga (promedios históricos) se muestran para algunas cuencas. En color verde claro se resalta la cuenca del río San Pedro-Mezquital.

en los registros. Estas marcas se distinguen en los desbordamientos, en las paredes de los edificios o por las crónicas de los pobladores. En este estudio, se demuestra que las inundaciones de gran magnitud observadas en la desembocadura del río San Pedro-Mezquital entre 1944-2006 estuvieron asociadas a períodos de retorno entre una vez cada 20 años (1969) y una vez cada 100 años (1972, 1976 y 1993), con fases de crecimiento de entre 7 y 37 horas y una duración total de entre 34 y 71 horas. La mayoría de las inundaciones tuvieron un período de retorno de una vez cada 60 años (1957, 1968, 1985, 1994 y 2003). Teóricamente, esto indica que aún es posible observar inundaciones mayores, con períodos de retorno de una vez cada mil años (o incluso de una vez cada diez mil años), con picos que pueden superar los $8000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Como se ha discutido ampliamente, la ocurrencia de tales inundaciones excepcionales puede ser en verano o en invierno, pero no en ambas estaciones en un mismo año.

Conclusiones

El río San Pedro Mezquital está libre del control artificial de la corriente, lo que significa que no existen

grandes presas de almacenamiento en la corriente principal. Esta característica otorga la posibilidad de estudiar las variaciones del flujo como un producto del clima. De particular interés es el estudio de eventos extraordinarios que causan inundaciones. Los resultados de este trabajo indican que las inundaciones en el río San Pedro Mezquital pueden ocurrir tanto en verano como en invierno y son comparables en magnitud. Esto sugiere que el riesgo por inundaciones a causa de desbordes en el río San Pedro, está presente en las dos épocas. Más aún, si se presentan inundaciones en los meses cálidos, no es probable que en el mismo año estas ocurran también en los meses fríos y viceversa. El análisis de frecuencias indica que las inundaciones ocurridas entre 1944 y 2006 están asociadas a períodos de retorno de una vez cada 20 y 100 años. En los casos analizados, el tiempo de concentración fue superior a seis horas; por tanto, no son consideradas inundaciones repentinas. Sin embargo, la duración de los eventos indica que una vez iniciada la inundación esta permanecerá por varias horas e incluso días pudiendo llegar a producir, en casos excepcionales, una segunda inundación. Hasta donde los autores tienen conocimiento,

no existen sistemas de alerta temprana que garanticen el resguardo anticipado de las poblaciones adyacentes al río. Las causas asociadas a los eventos de inundación fueron huracanes, en los meses cálidos y eventos El Niño, en los meses fríos. La inundación de 1985, fue inusual, ya que coincidió con condiciones La Niña y además fue doble. Esto sugiere que, en invierno, debe existir un forzamiento adicional a La Niña que contribuye a la formación de tormentas invernales de tal magnitud que dan origen a una inundación extraordinaria.

Agradecimientos

Se agradece a REDESCLIM y al CIB (proyecto PPAC-PC0.1) el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

RESUMEN CURRICULAR

LUIS BRITO-CASTILLO. SNI 1. Investigador titular en CIBNOR, Unidad Sonora, hidrólogo con intereses en hidroclimatología, variabilidad climática e impacto ambiental. Es responsable académico del laboratorio de modelación espacial y sensores remotos del CIB.

LUIS M. FARFÁN. SNI 1. Investigador en CICESE, Unidad La Paz, en meteorología regional con intereses en redes regionales de observación, monitoreo y pronóstico de trayectoria en ciclones tropicales, análisis de imágenes de satélites geoestacionarios, modelación numérica de eventos extremos y desarrollo de portales electrónicos para la visualización de información en tiempo real.

LUIS FELIPE PINEDA. SNI 1. Doctor en Ciencias Aplicadas y profesor-investigador de tiempo completo de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Responsable del proyecto de investigación de ciencia básica eventos extremos climáticos de la región Centro-Norte de México en un escenario de cambio climático.

JOSÉ PABLO VEGA CAMARENA. Es doctor en ciencias en recursos naturales por el CIBNOR, autor de dos publicaciones en revistas internacionales indexadas. Ha realizado estancias en el extranjero, e impartido cursos en área de ciencias a nivel superior y media superior.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bandas (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) (1997). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,

- Período 1997-2006, base de datos en CD-rom, Morelos, México. Disponible en <http://www.imta.gob.mx>
- Brito-Castillo, L., Vivoni, E.R., Gochis, D.J., Filonov, A., Tereshchenko, I., Monzon, C. (2010). An anomaly in the occurrence of the month of maximum precipitation distribution in northwestern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 74, 531-539. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2009.10.014.
- Brito-Castillo, L., Filonov, A., Tereshchenko, I., Palacios-Hernández, E., Monzón, C. (2011). Capítulo 11: Interrupción en la secuencia del mes de máxima precipitación y sus implicaciones en el entendimiento de la dinámica de las lluvias de verano. En U. Oswald Spring, et al. (Eds.), *Retos de la investigación del agua en México*. UNAM, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Red Temática de Conacyt, Cuernavaca, Morelos, 2011. ISBN: 978-3-926979-81-0.
- Brito-Castillo, L., Pedrozo-Acuña, A. (2015). Capítulo 3: Inundaciones, heladas e incendios forestales. En T. Cavazos (Ed.), *Conviviendo con la Naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. REDESCLIM, México. Ediciones ILCSA, pp. 77-119. ISBN: 978-607-8360-39-0.
- CONANP (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas) (2013). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Marismas Nacionales, Nayarit. Primera edición, noviembre de 2013.
- Douglas, M.W., Maddox, R.A., Howard, K., Reyes, S. (1993). The Mexican Monsoon. *Journal of Climate*, 6, 1665-1677. DOI: [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)
- Farfan, L.M., Prieto, R. Martínez-Sánchez, J. Padilla, R. (2015). Capítulo 2: Ciclones tropicales y su influencia en México. En T. Cavazos (Ed.), *Conviviendo con la Naturaleza: El problema de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en México*. REDESCLIM, México. Ediciones ILCSA, pp. 77-119. ISBN: 978-607-8360-39-0.
- Gochis, D.J., Brito-Castillo, L., Shuttleworth, W.J. (2006). Hydroclimatology of the North American Monsoon region in northwest Mexico. *Journal of Hydrology*, 316, 53-70. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.04.021
- Higgins, R.W., Douglas, A.V., Hahmann, A., Berbery, E.H., Gutzler, D., Shuttleworth, W.J., Stensrud, D.J., Amador, J., Carbone, R., Cortez, M., Douglas, M., Lobato, R., Meitin, J., Ropelewski, Ch., Schemm, J., Schubert, S., Zhang, C. (2003). Progress in Pan American Climate Research: The North American Monsoon System. *Atmósfera*, 16, 29-65.

- Hoerling, M.P., Kumar, A. (2002). Atmospheric response patterns associated with tropical forcing. *Journal of Climate* 15:2184-2203.
- Negri, A.J., Adler, R.F., Maddox, R.A., Howard, K.W., Keehn, P.R. (1993). A regional rainfall climatology over Mexico and the Southwest United States derived from passive microwave and geosynchronous infrared data. *Journal of Climate*, 2144-2161.
- Negri, A.J., Adler, R.F., Nelkin, E-J., Huffman, G.J. (1994). Regional rainfall climatologies derived from special sensor microwave imager (SSM/I) data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75(7), 1165-1182.
- OMM (Organización Meteorológica Mundial) (1994). Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición de datos, análisis de predicción y otras aplicaciones. OMM-No 168, quinta edición, ISBN: 92-63-30168-9.
- Palacios-Hernández, E, Carrillo, L.E., Filonov, A., Brito-Castillo, L., Cabrera-Ramos, C.E. (2010=). Seasonality and anomalies of sea Surface temperatures off the coast of Nayarit, Mexico. *Ocean Dynamics*, 60, 81-91, DOI 10.1007/s10236-009-0244-z
- Vega-Camarena J.P., Brito-Castillo, L., Farfan, L.M. (2018a). Constrasting rainfall behaviour between the Eastern Pacific Mexican coast and Mexican Altiplano. *Climate Research*, 76:225-240. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01538>.
- Vega-Camarena, J.P., Brito-Castillo, L., Farfan, L.M., Gochis, D.J., Pineda-Martínez, L.F., y Díaz, S.C. (2018b). Ocean-atmosphere conditions related to severe and persistent droughts in the Mexican Altiplano. *International Journal of Climatology*, 35, 853-866. DOI:1002/joc.5215.

@