



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Posgrado en Ciencias de la Tierra
Centro de Ciencias de la Atmósfera
Ciencias ambientales y Riesgo

Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque tropical húmedo de montaña y su asociación con eventos meteorológicos a diferentes escalas temporales

TESIS

Que para optar por el grado de
Maestra en Ciencias de la Tierra

PRESENTA

Alitzel Guzmán Huerta

Directora de Tesis:

Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers
Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Comité tutor

Dr. Juan Cervantes Pérez (Centro de Ciencias de la Tierra, UV)
Dr. Lorenzo Vázquez Selem (Instituto de Geografía, UNAM)

Ciudad Universitaria, CDMX, Noviembre 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Asunto: Aprobación de tema, asesor de tesis
y asignación de jurado para examen de grado.

GUZMÁN HUERTA ALITZEL

ESTUDIANTE DE MAESTRÍA

P R E S E N T E,

El Comité Académico de Posgrado, reunido el 25 de junio del año en curso, aprobó el título de tesis **“Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque tropical húmedo de montaña y su asociación con eventos meteorológicos a diferentes escalas temporales”**. Así mismo ratificó a la Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers, como su asesora de tesis y designó a los siguientes investigadores como jurado para su examen de grado.

Dr. Lorenzo Vázquez Selem	Presidente
Dra. Paulina Ordoñez Pérez	Vocal
Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers	Secretario
Dra. María Susana Alvarado Barrientos	Suplente
Dr. Juan Cervantes Pérez	Suplente

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 16 de julio de 2019.

COORDINADORA DEL PROGRAMA



DRA. CHRISTINA SIEBE GRABACH

CSG'gaba

“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a, la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales”.

Agradecimientos

Agradecimientos que hicieron posible este trabajo:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca proporcionada para mis estudios de maestría.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra, por los apoyos brindados durante mis estudios.

Al proyecto financiado por la NSF, EUA (No. 1313804) "*Experimental frameworks for evaluating net effects of hydrologic service payments on coupled socio-ecohydrologic systems in Mexico*", a partir del cual se pudieron obtener los datos del río Los Gavilanes.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera, a través del cual recibí una beca de Apoyo para Titulación y Obtención de Grado mediante un Fondo Especial de Ingresos Extraordinarios.

A la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers, por permitirme continuar conociendo a la cuenca del río Los Gavilanes, mejorando así mis competencias en la hidrología de cuencas.

Al Dr. Friso Holwerda, por su dedicación y constancia en mantener el funcionamiento de su estación meteorológica por más de una década, instalada a 2100 m. Gracias a ello logré conocer un poco más la cuenca. ¡Gracias por compartir los datos!

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem y al Dr. Juan Cervantes Pérez, por ser parte de mi Comité de evaluación del Posgrado, gracias a sus comentarios y observaciones este proyecto tomó la forma que ahora es.

A los dueños de los terrenos: Sr. Leónides y la Sra. Refugio, por su cooperación desinteresada para la instalación de los instrumentos, clave para la obtención de datos.

A mis compañeras de campo: Julieta López y Paulina Balcázar, por su ayuda y compañerismo ofrecido en campo y fuera de él. Gracias también por las fotos compartidas. En campo también agradezco el apoyo de la Dra. Lyssette.

A mis amigas y compañeras de posgrado: Mtra. Eréndira Arellano y a I.Q. Gabriela Cano, gracias por las charlas, las risas y los consejos compartidos dentro y fuera del cubículo 16.

Al Mtro. Diego Salazar, por las consultas sobre los fenómenos meteorológicos y la elección definitiva del título de este trabajo.

Al Dr. Lorenzo Vázquez Selem, a la Dra. Paulina Ordoñez Pérez, a la Dra. María Susana Alvarado Barrientos y al Dr. Juan Cervantes Pérez; por leer este documento. Por sus revisiones, observaciones, comentarios y sugerencias que me permitieron complementar este trabajo, y mejorarlo. Gracias.

Agradecimientos personales:

A la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers, mi mentora que durante este tiempo me formó y guió. Muchas gracias por impulsarme a mejorar como profesional y persona, por todo su apoyo y el tiempo invertido en este trabajo.

A las y los investigadores que me dieron clase, cuyas lecciones permitieron ampliar mi visión sobre el potencial de las Ciencias de la Tierra. En especial a la Dra Christina Siebe, el Dr. Lorenzo Vázquez, la Dra. Blanca Prado, el Dr. Leopoldo Galicia y la Dra. Susana Alvarado.

A mis amigos y colegas de Posgrado: Gabriela Zaragoza, Eréndira Arellano, Gabriela Cano, por la amistad forjada y las experiencias compartidas durante este tiempo.

A Yasmin Vázquez, Beatriz Marín, Liliana Flores, Cristina Alonso, Ceres Pérez, Vivian Álvarez, Josué Cadena, Norma López, Estefanía Roldán, Ana Urrutia, Gustavo Gutiérrez y Monserrat Martínez; por enseñarme a trabajar en equipo, compartirme sus propios conocimientos profesionales y por las experiencias compartidas.

A las secretarias y secretarios de Posgrado que me orientaron de manera amable, en especial a Araceli Chamán y Erika Ulloa. Gracias por su trabajo.

Siempre estaré agradecida a mi familia, en especial a mis padres, Lupita y Salvador y a mi hermana Citlali. Gracias por ser cómo son y estar siempre ahí.



Río Los Gavilanes, Veracruz
Agosto 2015



Río Los Gavilanes, Veracruz
Enero 2018

Contenido

Resumen.....	11
Abstract	12
1 Introducción	13
2 Materiales y métodos.....	18
2.1 Área de estudio.....	18
2.2 Instrumentación y medición de variables hidrometeorológicas.....	21
2.2.1 Precipitación	21
2.2.2 Caudal	22
2.3 Remuestreo de datos y análisis.....	26
2.4 Métricas hidrológicas	28
2.5 Identificación de sistemas meteorológicos.....	30
2.6 Condiciones de Sequía.....	31
2.7 Canícula (sequía intraestival o sequía de medio verano).....	32
2.8 El Niño/La Niña y su intensidad.....	33
3 Resultados	34
3.1 Precipitación	34
3.2 Caudal	35
3.2.1 Métricas hidrológicas a escala diaria, estacional y anual.....	36
3.2.2 Precipitación-escurrimiento a nivel de evento.....	39
3.3 Sistemas meteorológicos de escala sinóptica	45
3.3.1 Influencia de los sistemas meteorológicos sobre las respuestas hidrológicas	47
3.4 Serie histórica de precipitación y su asociación con distintos eventos meteorológicos a diferentes escalas.....	52
3.4.1 Época de lluvias (mayo-octubre).....	52
3.4.2 Época de secas (noviembre-abril)	53
3.4.3 Años hidrológicos estudiados (2015-2017).....	55
4 Discusión.....	58
4.1 Comportamiento hidrológico anual y estacional de la cuenca	58

4.2	Fenómenos meteorológicos	61
4.3	Sequía	62
4.4	Canícula	64
4.5	El Niño, La Niña y condiciones neutrales.....	65
4.6	Mejoras a la curva nivel de agua-descarga desarrollada y estimaciones de caudal.....	66
5	Conclusiones.....	67
6	Referencias.....	68
Glosario	74
Anexo	78
Créditos de fotografías	94

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Los Gavilanes en el centro de Veracruz y localización de los sitios de muestreo de precipitación y caudal.....	19
Figura 2. Tipos de vegetación y usos de suelo de la cuenca de estudio.....	20
Figura 3. (A) Profundidad de los horizontes A y B al interior de la cuenca y sus respectivos valores de retención de humedad a capacidad de campo (CC). (B) Profundidad del suelo hasta la zona de contacto con el horizonte C, con sus respectivos valores de conductividad hidráulica saturada (K_s).....	21
Figura 4. (A) Pluviómetro instalado a los 1450 m (abril 2015). (B) Pluviómetro instalado a los 2100 m. (C) Instalación del pluviómetro a los 1450 m de altitud en abril de 2015. (D) Ubicación del pluviómetro en la ladera a los 1450 m (octubre 2015).	22
Figura 5. (A). Sección transversal. (B) Barómetro. (C) Limnógrafo. (D) Mediciones de la profundidad del río sobre la sección transversal (Mayo 2017).	24
Figura 6. (A) Sitios de medición de la conductividad eléctrica indicado con las flechas rojas, vista aguas abajo, enero 2016. (B) Multiparamétrico empleado para medir la conductividad eléctrica en el río.....	25
Figura 7. Medición de la conductividad eléctrica del agua del río en uno de los sitios de observación.....	26
Figura 8. Curva nivel de agua-caudal.	27
Figura 9. Ejemplo de un hidrograma descompuesto en flujos rápido y base, y representación de distintos tiempos de respuesta del hidrograma a un evento de lluvia dado.	29
Figura 10. Cálculo de la intensidad de la canícula.....	33
Figura 11. Precipitación registrada en la cuenca del río Los Gavilanes durante el período mayo 2015-abril 2017.	35
Figura 12. Precipitación (2100 m) y caudal de la cuenca del río Los Gavilanes, para el período 2015-2017.	36
Figura 13. Flujos de agua en la cuenca.....	36
Figura 14. Curvas de duración de flujo para el período estudiado.....	38
Figura 15. Curvas maestras de recesión del flujo base para los años hidrológicos 2015-2016 (58 días) y 2016-2017 (45 días).....	38
Figura 16. Separación del caudal total (Q_T) en sus flujos rápido (Q_r) y base (Q_b).....	42
Figura 17. Serie de precipitación mensual, a los 2100 m (línea negra) y eventos meteorológicos registrados durante el período 2006-2017. (A) Época de lluvias. (B) Época de secas.....	54
Figura 18. Mapa de las condiciones de sequía en la cuenca del río Los Gavilanes durante los años hidrológicos 2015-2017.....	55
Figura 19. Polígonos funiculares de las épocas de lluvias de 2015 y 2016.	57

Índice de tablas

Tabla 1. Categorías de intensidad de la sequía.....	32
Tabla 2. Métricas hidrológicas de la cuenca del río Los Gavilanes.	37
Tabla 3. Características de la precipitación (P) de los eventos analizados durante el período de estudio.....	40
Tabla 4. Estadísticos de las intensidades y del tiempo de duración de los eventos analizados durante el 2015-2017.....	40
Tabla 5. Estadísticos del coeficiente de escurrimiento (Q/P), caudal total (Q_T), flujo rápido (Q_r) y flujo base (Q_b) para los años hidrológicos 2015-2017.	41
Tabla 6. Métricas de los hidrogramas: tiempo de pico (T_p), tiempo de retraso (L) y tiempo de recesión (T_r) para el período de estudio 2015-2017.....	44
Tabla 7. Categorías de los sistemas meteorológicos asociados a los eventos precipitación-escurrimiento.	45
Tabla 8. Sistemas meteorológicos y correspondientes volúmenes de precipitación y caudal para el año 2015-2016.	46
Tabla 9. Sistemas meteorológicos y correspondientes volúmenes de precipitación y caudal para el año 2016-2017.	47
Tabla 10. Comparaciones y agrupaciones entre las categorías de los sistemas meteorológicos.	48
Tabla 11. Categorías de los sistemas meteorológicos que fueron comparados en los análisis de Tukey.....	49
Tabla 12. Comparación de los valores promedios de las características dependientes de cada sistema meteorológico del año 2015-2016.	50
Tabla 13. Comparación de los valores promedios de las características dependientes de cada sistema meteorológico del año 2016-2017.	50
Tabla 14. Comparación entre los años estudiados, de los valores promedios de las características dependientes de los ciclones tropicales, los frentes fríos y las vaguadas.	51
Tabla 15. Intensidad de la canícula de la época de lluvias del 2015 y 2016, para diferentes registros de lluvia.....	56

Resumen

Los ecosistemas húmedos de montaña son de gran valor hidrológico por sostener caudales altos y estables a lo largo del año, y para entender su ciclo del agua es fundamental estudiar los componentes más importantes que controlan su dinámica hidrológica en cuencas. Desde este enfoque, la precipitación y el caudal son los flujos de agua más dinámicos, siendo la lluvia el componente más influenciado por la variabilidad climática con posibles efectos en el caudal de los ríos. Sin embargo, aún son muy pocos los estudios que han evaluado la respuesta de caudales a distintos fenómenos meteorológicos en México, lo cual es trascendente para el suministro de agua a poblaciones y la prevención de riesgos por sequías e inundaciones. Por tanto, este trabajo cuantificó la precipitación y el caudal a través de observaciones continuas y de alta resolución durante dos años hidrológicos (mayo 2015-abril 2017) en la cuenca del río Los Gavilanes (41 km²), centro de Veracruz. En este periodo, los sistemas meteorológicos fueron identificados consultando los boletines del Servicio Meteorológico Nacional y de la Secretaría de Protección Civil del estado de Veracruz. También se evaluó la presencia e intensidad de la canícula, así como de los fenómenos El Niño/La Niña, empleando para estos últimos el índice ONI emitido por la NOAA. La precipitación anual observada (*P*) fue de 2692 y 2524 mm para el año 2015-2016 y 2016-2017, respectivamente, y el caudal anual registrado equivalió al 52% (1394 mm) y 74% (1857 mm) de la *P*. En los eventos analizados en estos dos años, se observó una dominancia del flujo base en el caudal total, con un rango del 53 al 99%. A escala sinóptica, los sistemas meteorológicos que produjeron los mayores caudales durante la época de lluvias (mayo-octubre) fueron las vaguadas y los ciclones tropicales; en cambio, las lluvias asociadas a frentes fríos generaron los mayores volúmenes de caudal durante la época relativamente seca (noviembre-abril). Además, la época de lluvias de 2015 estuvo influenciada por el fenómeno de El Niño y por una canícula, ambos de fuerte intensidad, observándose una disminución en la precipitación del 2% (43 mm) y en el caudal del 30% (274 mm) comparado con la época de lluvias de 2016. Finalmente, la presencia de sequía evaluada a través del Monitor de Sequía de México, producto generado por el SMN a escala nacional, no mostró tener correlación con los patrones mensuales de lluvia y caudal en la cuenca.

Palabras clave: Precipitación, caudal, sistemas meteorológicos, canícula, El Niño, La Niña

Abstract

Humid montane ecosystems have a great hydrological value by sustaining high and stable streamflow over all year, therefore to understand their hydrological cycle, is fundamental to study the principal components that control the hydrological dynamic at watershed scale. From this approach, rainfall and streamflow are the most dynamic water flows, being rainfall the main component influenced by climatic variability, with possible effects on river flow. However, there are still few studies that have evaluated the streamflow response to different meteorological phenomena in Mexico, which is essential for the water supply and preventions of risks due to droughts and floods. Hence, this work quantified the rainfall and streamflow through continuous and high-resolution observations over two hydrological years (May 2015-April 2017) in Los Gavilanes river catchment (41 km²), in central Veracruz. In this period, meteorological systems were identified consulting newsletters of the National Weather Service of Mexico and of the Civil Protection Secretary of Veracruz State. It was also evaluated the presence and intensity of the mid-summer drought (canícula) and the phenomenon El Niño/La Niña, using for the latter the ONI index generated by NOAA. The observed annual precipitation (*P*) was 2692 and 2524 mm for the year 2015-2016 and 2016-2017, respectively, and the observed annual streamflow was 52% (1394 mm) and 74% (1857 mm) of *P*. In the rainfall events analyzed in these two years, a dominance of the baseflow was observed on total streamflow, 53 to 99%. On a synoptic scale, the meteorological systems that produced the highest flows during the wet season (May-October) were the low-pressure channels and tropical cyclones; instead, the rains associated to cold fronts generated the greatest volume of flow during the relatively dry season (November-April). In addition, the rainy season of 2015 was influenced by the El Niño and the mid-summer drought, both of strong intensity; hence a decrease in rainfall of 2% (43 mm) and in streamflow of 30% (274 mm) was observed compared to the 2016 rainy season. Lastly, the presence of droughts evaluated through Drought Monitor's Mexico (Monitor de Sequía de México), a product generated by SMN on a national scale, had no correlation on rainfall and streamflow monthly patterns on the watershed.

Keywords: Rainfall, streamflow, meteorological systems, mid-summer drought, El Niño, La Niña

1 Introducción

Mundialmente los bosques tropicales húmedos de montaña son ecosistemas valorados hidrológicamente por sostener caudales altos y estables a lo largo del año, y prioritarios en virtud de su alta biodiversidad. Sin embargo, estos bosques en México se encuentran fuertemente amenazados por el crecimiento poblacional y el cambio en el uso de suelo y climático (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2008; Toledo-Aceves et al., 2011). Desde el punto de vista hidrológico, estudiar los componentes más importantes que controlan la provisión de agua en cuencas, son clave para entender el funcionamiento de estos ecosistemas tropicales en beneficio de la sociedad (Céleri y Feyen, 2009). Dentro de estos componentes, se encuentran la precipitación y el caudal, siendo también los flujos más dinámicos y que en forma conjunta, presentan gran variabilidad en las regiones tropicales. En cuencas, la variación en la precipitación puede deberse principalmente a su gradiente altitudinal, exposición (barlovento o sotavento) y a las características fisiográficas del terreno (pendiente, forma de la cuenca, entre otros) (Davie, 2008), además de las características propias de los eventos de lluvia (cantidad, intensidad y duración) asociadas a los sistemas meteorológicos que les dio origen (Syvitski et al., 2014). En el caso del caudal, su variabilidad a nivel estacional y anual depende de los patrones espacio-temporales de la precipitación, mientras que su respuesta a nivel de evento de lluvia está directamente influenciada por la geomorfología (longitud, forma, tamaño, pendientes), constitución geológica (permeabilidad, material parental, estructura, etc.) y edáfica (tipo de suelo, profundidad, porosidad, humedad, etc.), así como por el tipo de vegetación y/o usos de suelo (estructura de la vegetación, historia y manejo del suelo) de la cuenca. En conjunto, todos estos factores determinan en gran medida la distribución y movilización de los flujos de agua entre los diferentes reservorios y componentes hidrológicos en cuencas (Brooks et al., 2012; Dingman, 2008). A su vez, la precipitación se encuentra influenciada por cambios en la actividad ciclónica, la presencia de canales de baja presión (vaguadas), sistemas de alta presión y sequías de medio verano (canículas), las que además se encuentran moduladas por anomalías climáticas de mayor escala, producidas por oscilaciones como la de Madden-Julian, El Niño (fase cálida de El Niño-Oscilación del sur), La Niña (fase fría de El Niño-

Oscilación del sur), la del Atlántico Norte, entre otras (Perdigón-Morales et al., 2019; Steptoe et al., 2017). De esta forma, la generación y variabilidad de los flujos de agua en cuencas son resultado de la interacción de los procesos hidrológicos a diferentes escalas espaciales y temporales (Wohl et al., 2012).

En la región central del continente americano, el fenómeno de El Niño o La Niña es de los eventos climatológicos que determinan en mayor medida la variabilidad intraestacional e interanual de la precipitación, la temperatura, los patrones de circulación atmosférica, entre otros; y sus efectos dependen de la fase del fenómeno (cálida o fría) y de la época del año en la que ocurre (Dingman, 2014; Poveda et al., 2006). Al respecto, estudios en Honduras y Venezuela han reportado disminuciones en la precipitación anual en un 29 y 27% en promedio, respectivamente, durante la presencia de El Niño. Y en eventos de La Niña en Venezuela, se han observado incrementos de hasta un 16% de la precipitación anual (Caballero et al., 2012; Rütger y Anhuf, 2007).

En series históricas analizadas de precipitación en México (1950-2013, Álvarez-Olguín y Escalante-Sandoval, 2017; 1961-1990 y 1991-2013, Bravo-Cabrera et al., 2017; 1958-1999, Magaña et al., 2003), con la presencia de El Niño durante la época de secas se han reportado anomalías positivas, es decir incrementos de la precipitación al noroeste del país y anomalías negativas (disminuciones de la precipitación) en la región sur. En cambio, durante la ocurrencia de La Niña en época de estiaje, se han observado condiciones contrarias. Por otra parte, el efecto de El Niño durante la época de lluvias, tiende generalmente a reducir la precipitación sobre la mayor parte del territorio mexicano, mientras que en presencia de La Niña se han observado condiciones “normales” o incluso mayores entradas de precipitación. Por lo que al estar la lluvia estacional y anual influenciada por estos eventos, se podría también explorar su efecto sobre el caudal (Dingman, 2014; Timbal et al., 2015). Por ejemplo, comparando los registros de precipitación y de caudal en años de El Niño y La Niña en el noroeste de México, se observó una menor precipitación durante la época de lluvias (julio-septiembre) en presencia de El Niño y una mayor precipitación durante la época seca (noviembre-febrero). En cambio, condiciones contrarias fueron reportadas bajo la influencia

de La Niña (Brito-Castillo et al., 2003). Estos mismos patrones también fueron observados en la precipitación, en el caudal y en los coeficientes de escurrimiento a nivel estacional; variables que aumentaron durante la época de lluvias y disminuyeron en la época seca durante eventos de La Niña. Por el contrario, situaciones opuestas fueron reportadas en años con influencia de El Niño en esta misma región (Gochis et al., 2007). Al sur del país, se han reportado aumentos en el caudal y en la tasa de exportación de sedimentos durante eventos de La Niña, sin mostrar una diferencia a nivel estacional (Muñoz-Salinas y Castillo, 2015).

En la región centro-oriente de México, durante un evento de El Niño, se observó un incremento (70%) de la precipitación promedio mensual en la época seca de 2006-2007 (noviembre-abril), comparada con la época de secas de 2007-2008, ésta última influenciada por un evento de La Niña. De igual manera se observó un aumento en el caudal promedio mensual del 29 y 14% en microcuencas cubiertas de bosque mesófilo de montaña maduro y secundario, respectivamente, durante este periodo (época seca 2007-2008) (Muñoz-Villers et al., 2012). Cabe mencionar que estas microcuencas son tributarias de la cuenca del río Los Gavilanes (41 km²), objeto de este estudio, en la que Guzmán-Huerta (2017) encontró una reducción en la precipitación y en el caudal en julio de 2015 durante un evento de El Niño en la época de lluvias.

A su vez, los fenómenos de El Niño/La Niña, pueden interactuar y modificar la frecuencia e intensidad de los sistemas meteorológicos a escala sinóptica (Fonseca y Cavalcanti, 2012). Estos fenómenos suelen ser los principales sistemas que determinan la estacionalidad de la lluvia. En México, a excepción de la región noroeste, la época de lluvias (mayo-octubre) se establece por el ingreso y transporte de vapor de agua que proporciona la cercanía de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), los vientos alisios, los ciclones tropicales y la actividad convectiva. En cambio durante la época seca (noviembre-abril), los frentes fríos y los “Nortes” aportan humedad considerable al interactuar con la orografía del país; no obstante se caracteriza por una época relativamente seca debido al desplazamiento de la ZCIT y la ausencia de sistemas tropicales (Bravo-Cabrera et al., 2017; Magaña et al., 2003). Sin embargo, aún se conoce muy poco sobre cómo el caudal puede estar influenciado por la

variabilidad natural de la precipitación a diferentes escalas, lo cual es de gran importancia para conocer la respuesta de los ecosistemas ante estos fenómenos, y trascendente para el suministro de agua a poblaciones y la prevención de riesgos por sequías e inundaciones.

Objetivo

Estudiar la respuesta hidrológica de la cuenca del río Los Gavilanes (centro de Veracruz, México) a partir de datos observados durante dos años hidrológicos (mayo 2015-abril 2017), con el fin de examinar la influencia de distintos sistemas meteorológicos en la relación precipitación-caudal a nivel de evento, estacional y anual.

Objetivos particulares

- Estudiar el comportamiento de la precipitación de la cuenca, y determinar sus características (cantidad total, intensidad y duración) a escala estacional e interanual.
- Analizar el comportamiento anual y estacional del caudal, a partir de la cuantificación de sus flujos (rápido y base) y de sus tiempos de respuesta a nivel de evento.
- Identificar los sistemas meteorológicos de escala sinóptica que ocasionaron los eventos de lluvia y analizar la relación que tienen con la respuesta hidrológica de la cuenca.
- Evaluar condiciones de sequía y la presencia de los eventos de canícula y de El Niño/La Niña, para examinar su posible impacto en una serie de precipitación de 11 años, e interpretar así su probable influencia en el caudal del río.

Hipótesis

1. Los sistemas meteorológicos de escala sinóptica que predominan en la época de lluvias, también dominarán la generación de caudales.
2. En la época relativamente seca, los frentes fríos serán los principales sistemas meteorológicos que producirán flujos en la cuenca, con tiempos de reacción más largos y de recesión más cortos comparados con los observados en la época de lluvias.
3. Con evento de El Niño durante la época de lluvias, se reducirá la cantidad de precipitación y por lo tanto, el caudal de la cuenca. En cambio, los efectos de El Niño durante la época seca, traerán consigo condiciones contrarias.
4. Con evento de La Niña se esperarían aumentos en la precipitación y en el caudal a escala anual, siendo éstos más pronunciados en la temporada de lluvias.

2 Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La cuenca del río Los Gavilanes, cuyo afluente es de quinto orden, se ubica en la vertiente oriental (barlovento) del sistema volcánico Cofre de Perote ($19^{\circ} 28'N$ a $97^{\circ}01'O$) en el centro de Veracruz, México. Es a su vez, una subcuenca de la cuenca exorreica río La Antigua (2637 km^2) perteneciente a la región hidrológica del Papaloapan. La cuenca posee un área de 41 km^2 y una longitud de 70 km. Tiene una forma elongada, es ancha en la parte media-alta y más estrecha en sus extremos (coeficiente de redondez de 5.2, valor adimensional) (Geissert et al., 2013; Muñoz-Villers et al., 2016) (Figura 1).

Se caracteriza por contener un amplio gradiente altitudinal abarcando elevaciones de los 1180 a los 2960 m s.n.m. Posee pendientes moderadas a fuertes (15 a 30°) así como una densa red de drenaje (1.52 km/km^2) (Geissert et al., 2013; Muñoz-Villers et al., 2016; Rossignol 1987). Para más información consultar los trabajos de Guzmán-Huerta (2017) y Muñoz-Villers et al. (2016).

La cuenca se divide en parte baja ($< 1400 \text{ m}$), media ($1400\text{-}2500 \text{ m}$) y alta ($> 2500 \text{ m}$). En la parte baja, la precipitación promedio anual es de 1386 mm, en la parte media es de 3184 mm y en la parte alta es de 1704 mm. Del total anual de precipitación, el 80% se observa durante la época de lluvias (Holwerda et al., 2013; Muñoz-Villers et al., 2012; 2016; SMN, 2019). Así también, en la parte baja se registra una temperatura promedio entre 17 y 20°C (época de secas y de lluvias, respectivamente), en la parte media entre 13 y 15°C (respectivamente), mientras que en la parte alta las temperaturas oscilan entre 9 y 10°C (Holwerda et al., 2010; Muñoz-Villers et al., 2016; SMN, 2019).

El clima es húmedo templado y húmedo subtropical con lluvias en verano (García, 2004). La época relativamente seca (noviembre-abril) se caracteriza por un período seco y frío, con presencia de niebla y llovizna ligera ocasionada por el paso de frentes fríos. En esta época, los aportes por niebla como fuente adicional de la precipitación tienen lugar, principalmente, en la parte media-alta de la cuenca ($\leq 2\%$ de la precipitación anual) (Holwerda et al., 2010; Muñoz-Villers et al., 2012; 2015). La época de lluvias (mayo-octubre) puede ser dividida en

dos períodos: 1) un periodo de transición entre la época de secas y lluvias (abril-mayo) caracterizado por un clima cálido y relativamente seco debido a la estabilidad del cinturón subtropical, y 2) un periodo cálido húmedo (junio-octubre) en el cual se registran las más altas entradas de precipitación por día, las cuales son producto de la humedad producida por la entrada de los vientos alisios primordialmente.

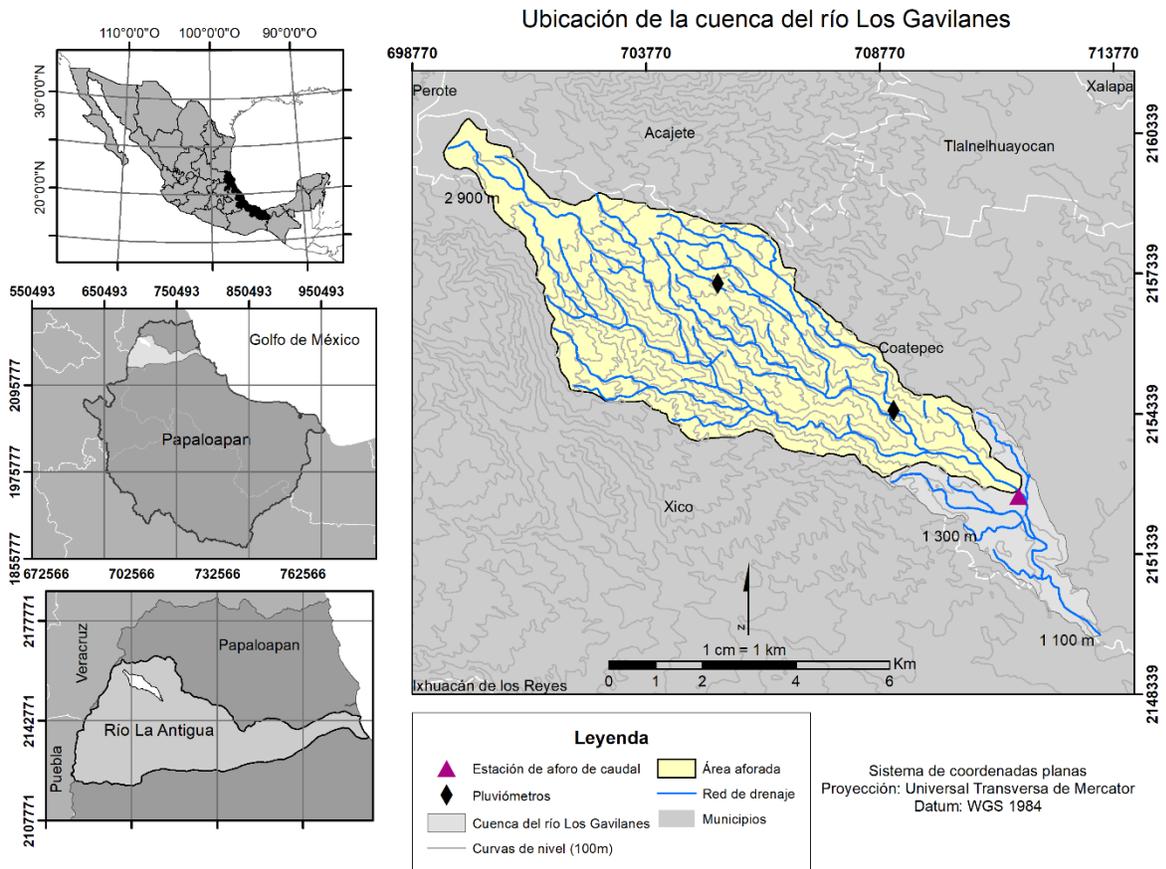


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Los Gavilanes en el centro de Veracruz y localización de los sitios de muestreo de precipitación y caudal.

Los tipos de vegetación y usos de suelo en la cuenca son principalmente: bosque de coníferas, bosque de pino-encino, bosque mesófilo de montaña, pastizal, cultivos de maíz y plantaciones de café bajo sombra (Figura 2) (Gómez-Tagle et al., 2011; Muñoz-Villers y López-Blanco, 2008). El 70% de la cuenca está cubierta por algún tipo de bosque, siendo el bosque mesófilo de montaña la cobertura vegetal dominante (~50%), el cual se encuentra

distribuido entre los 1200 y los 2400 m de altitud (Muñoz-Villers et al., 2016; Rzedowski, 1996; Williams-Linera et al., 2013).

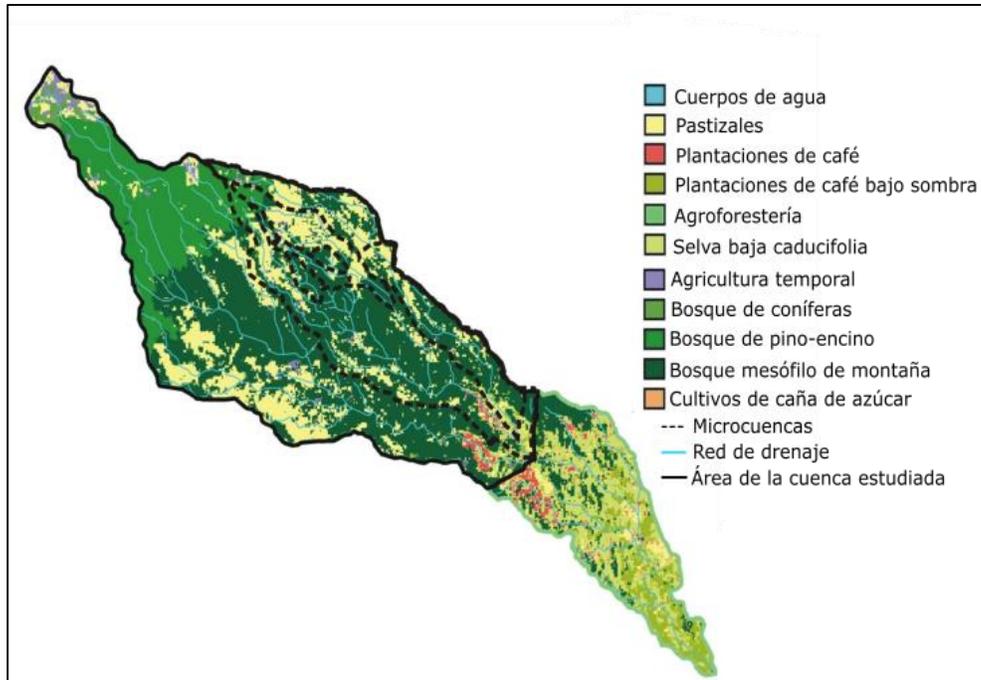


Figura 2. Tipos de vegetación y usos de suelo de la cuenca de estudio.
Figura modificada de Muñoz-Villers et al. (2016).

La geología de la zona es producto de la actividad volcánica del Cofre de Perote o Nauhcampatépetl (4282 m), volcán escudo con actividad en el Pleistoceno. Las andesitas basálticas, semipermeables y fracturadas, son el material parental que da origen al suelo dominante, el cual se clasifica como Andosol úmbrico de textura franco limoso y/o arcilla limosa (Figura 3A). Estos suelos se caracterizan por tener bajas densidades aparentes a escasa profundidad (< 6 cm; 0.25-0.45 g/cm³), altas porosidades (0-120 cm; 89% en promedio) y altas conductividades hidráulicas (615-777 mm/h, K_{fs}). Además, son suelos bastante profundos (> 100 a 200 cm; Figura 3B) y bien desarrollados: A, AB, Bw, Bw/C. En particular, los suelos con cubierta forestal tienen una alta capacidad de infiltración en la superficie (1140-1352 mm/h, f_c) y de retención de agua (≥ 850 mm, Figura 3A), por lo que la generación de escurrimientos superficiales en ellos es muy baja (Carrasco-Núñez et al., 2010; Geissert et al., 2013; Muñoz-Villers et al., 2012, 2016; Rossignol, 1987).

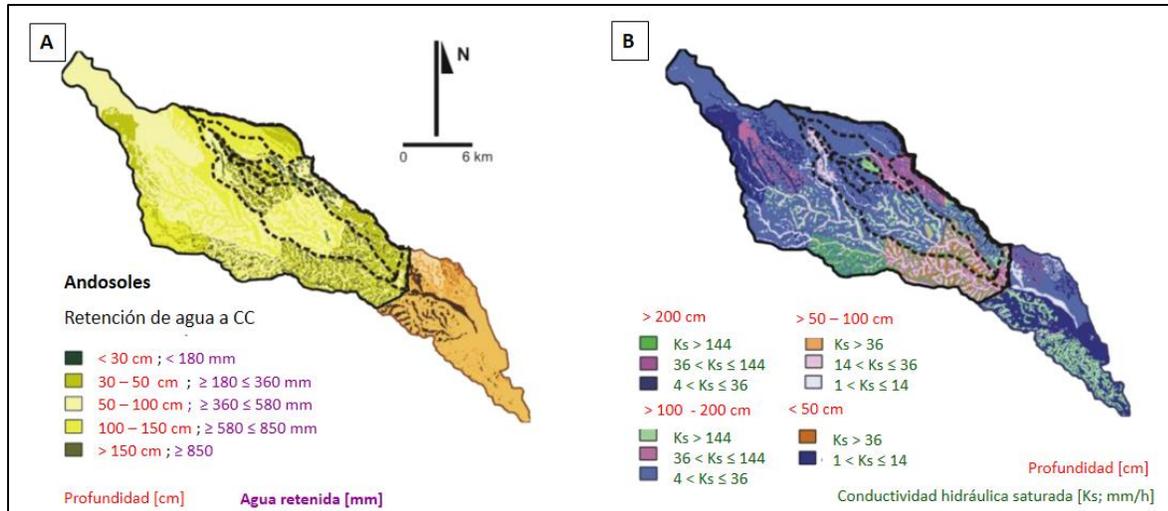


Figura 3. (A) Profundidad de los horizontes A y B al interior de la cuenca y sus respectivos valores de retención de humedad a capacidad de campo (CC). (B) Profundidad del suelo hasta la zona de contacto con el horizonte C, con sus respectivos valores de conductividad hidráulica saturada (K_s), ambos correspondientes al área hasta el punto de aforo de caudal. Figura modificada de Muñoz-Villers et al. (2016).

2.2 Instrumentación y medición de variables hidrometeorológicas

2.2.1 Precipitación

La lluvia fue cuantificada con dos pluviómetros automáticos HOBO RGM3 de la marca Onset (resolución de 0.2 mm por golpe) instalados a los 1450 y 2100 m s.n.m al interior de la cuenca de estudio (Figuras 1 y 4), con un registro de datos cada 5 y 10 min, respectivamente. El período de colecta de datos fue de abril de 2015 a febrero de 2017 a los 1450 m (Figura 4B), y desde junio de 2005 a abril de 2017 para la altitud a los 2100 m (Figura 4A). Los dos meses de datos faltantes a los 1450 m se debieron a fallas en el pluviómetro.

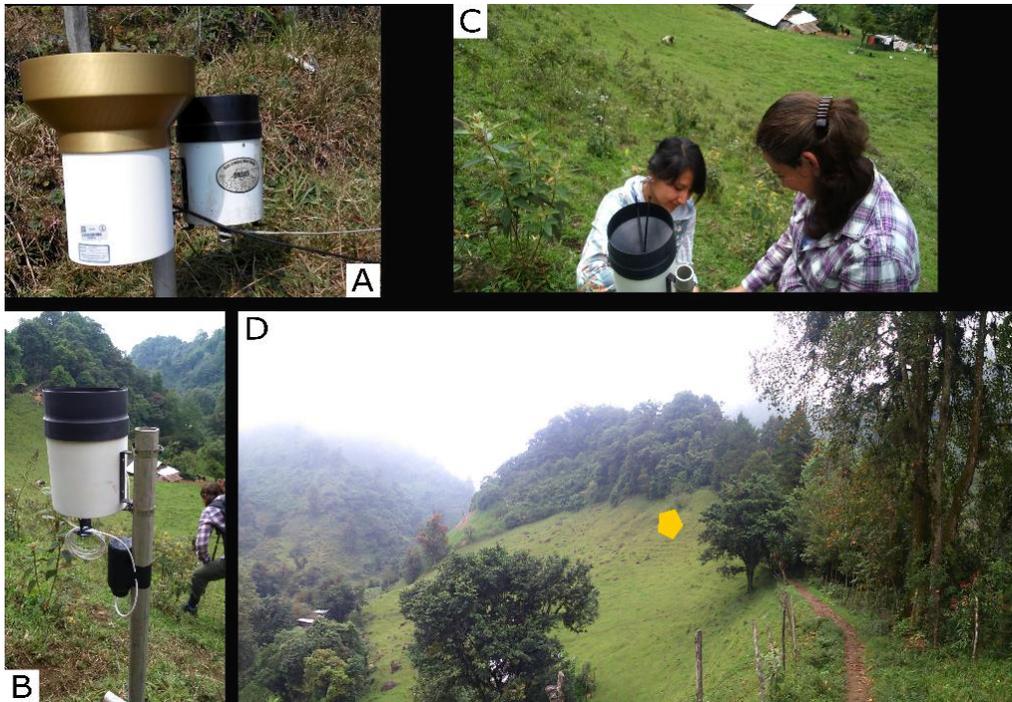


Figura 4. (A) Pluviómetro instalado a los 1450 m (abril 2015). (B) Pluviómetro instalado a los 2100 m. (C) Instalación del pluviómetro a los 1450 m de altitud en abril de 2015. (D) Ubicación del pluviómetro en la ladera a los 1450 m (octubre 2015).

2.2.2 Caudal

De la superficie total que abarca la cuenca (41 km²), el sitio de aforo se ubicó 6 km² aguas arriba del cierre de la cuenca, abarcando así un área de drenaje de 35 km². Esto se hizo así debido a las condiciones de descargas domésticas, de inseguridad y accesibilidad encontradas cuenca abajo. Más detalles al respecto, consultar el trabajo de Guzmán-Huerta (2017).

Al ser un afluente de montaña, el lecho del cauce se caracterizó por contener rocas de diferentes tamaños de forma semi-redondeada sobre sedimento arenoso. Para conocer las condiciones físico-químicas que presentó el río durante el periodo de estudio, consultar el Anexo (Tabla A1).

El sitio de aforo fue ubicado debajo de un puente, lo que permitió tener un área relativamente regular de la sección transversal sobre el cauce (8.4 m, ancho del río) (Figura 5A). El área formada sobre la sección transversal, del lecho del cauce al espejo de agua, fue

calculada a través de mediciones de profundidad del río cada 1.2 m sobre la sección trazada (Figura 5D).

Para la medición del caudal, este sitio fue instrumentado con transductores de presión, esto es un barómetro (Figura 5B) y un limnígrafo (Figura 5C) modelos HOBO U20 de la marca Onset, con una resolución de ± 2 mm y con una frecuencia de muestreo de 10 min en ambos instrumentos. Con estos transductores se obtuvo de forma automática la altura de la columna de agua del río sobre la sección transversal de aforo, a partir de la diferencia entre los datos del limnígrafo y del barómetro (diferencia de la presión hidrostática y la presión atmosférica, en unidades de kPa). Para obtener la columna de agua del río en cm de agua, se convirtió esta columna de presión a altura de agua ($1 \text{ kPa} = 10.2 \text{ cm de agua}$).

Cabe mencionar que el barómetro comenzó a fallar a partir de febrero de 2017, por lo que fue necesario corregir los datos a través de una ecuación de correlación. Dicha correlación fue construida con datos de presión atmosférica de la cuenca de estudio y de la cuenca vecina, el río Pixquiac. El período de datos corregidos abarcó de octubre de 2016 a febrero de 2017 (Figura A1, Anexo).



Figura 5. (A). Sección transversal. (B) Barómetro. (C) Limnógrafo. (D) Mediciones de la profundidad del río sobre la sección transversal (Mayo 2017).

Para conocer la descarga del río en m^3/s , el caudal fue aforado empleando el método de inyección de golpe de una solución de sal (*slug injection using salt in solution*) (Moore, 2004; 2005). Estos aforos se realizaron a diferentes niveles de caudal en condiciones de flujo base, abarcando todo el período de estudio (13 aforos en total durante abril 2015-julio 2017, ver Figuras 8 y A2). Para el aforo se vertió río arriba (26 m) del punto de medición, un volumen de solución de sal (3 kg de sal de mesa disuelta en 15 L de agua del río). Al ser vertida la solución, la conductividad eléctrica del agua fue registrada sobre la sección transversal en el sitio del punto de aforo (aguas abajo, Figura 7) con dos multiparamétricos portátiles marca PC450 (Oakton, Eutech Instruments) (Figura 6B). Los registros de conductividad se realizaron cada 5 seg en dos puntos de observación, escogidos por presentar diferentes velocidades de

la corriente de agua (Figura 6A). De esta forma la conductividad inicial del río fue elevada conforme la solución de sal se mezcló y se desplazó a lo largo del afluente. El experimento terminó una vez que se llegó a la conductividad eléctrica del río medida al inicio del experimento, o en su defecto, cuando ya no se detectaron más cambios en la conductividad llegando ésta a un valor constante. Para obtener un valor promedio del aforo, se realizaron tres experimentos y por cada experimento se tuvieron dos cuantificaciones de caudal, debido a los dos sitios de registro. Por lo que se promediaron los valores de cada aforo para mejorar la cuantificación del caudal. Posteriormente se calculó el caudal en unidades de m^3/s siguiendo el método descrito por Moore (2004; 2005).



Figura 6. (A) Sitios de medición de la conductividad eléctrica indicado con las flechas rojas, vista aguas abajo, enero 2016. (B) Multiparamétrico empleado para medir la conductividad eléctrica en el río.



Figura 7. Medición de la conductividad eléctrica del agua del río en uno de los sitios de observación (margen izquierda de la corriente, vista aguas abajo; julio 2017).

2.3 Remuestreo de datos y análisis

Para analizar los eventos de lluvias durante el periodo mayo 2015-abril 2017, la precipitación fue remuestreada a acumulados de 60 min. Gash (1979) definió a un evento de precipitación como aquel acumulado de lluvia ≥ 0.2 mmy fue separado por un período sin lluvia de al menos de 3 horas. A partir de los acumulados a escala de hora y el criterio de Gash (1979), se identificaron los eventos de lluvia y para cada uno de ellos se determinaron los siguientes parámetros: cantidad total (P ; mm); intensidad promedio (I_{prom} ; mm/h), intensidad máxima ($I_{m\acute{a}x}$; mm/h) y tiempo de duración (T_d ; horas) de la lluvia. La I_{prom} se cuantificó como la razón entre la cantidad de lluvia total y el tiempo de duración del evento, para la $I_{m\acute{a}x}$ se utilizó el valor máximo de lluvia registrado por evento y el T_d se cuantificó como la diferencia entre el tiempo de inicio y fin de cada evento. Para determinar la precipitación a escala estacional y anual, se utilizaron los volúmenes diarios a partir de los cuales se realizaron los acumulados mensuales, para posteriormente hacerlo para las épocas de lluvias (mayo-octubre) y secas (noviembre-abril), y finalmente para el año hidrológico (mayo-abril).

En cuanto al caudal, se construyó la curva nivel de agua-descarga (Figura 8) con los datos de las alturas medidas de la columna del agua del río (eje x) y con los datos de los aforos (eje y).

A esta curva, se le ajustó una ecuación logarítmica, y a partir de ella se transformaron los valores de la altura (m) a caudal (m^3/s). Esta curva fue elaborada con cada uno de los aforos y las mediciones de profundidad de la columna de agua, realizados en diferentes condiciones del flujo del río (cf. Muñoz-Villers y McDonnell, 2012).

Cabe mencionar que en la curva nivel de agua-descarga se emplearon los aforos químicos reportados por Guzmán-Huerta (2017) y se le añadieron cuatro muestreos más, realizados como parte de este trabajo (Figura 8 y A2, Anexo). Las mediciones de la conductividad eléctrica (CE) de los aforos reportados por Guzmán-Huerta (2017) fueron registradas en un solo sitio dentro de la corriente principal del río, lo cual podría haber sobrestimado la velocidad y por lo tanto, el caudal de la cuenca. Por lo que los aforos ampliados en este trabajo, de febrero a julio de 2017, se realizaron con mediciones de la CE en dos sitios diferentes sobre la sección transversal, para así capturar la variabilidad de la velocidad del río (Figura 6A).

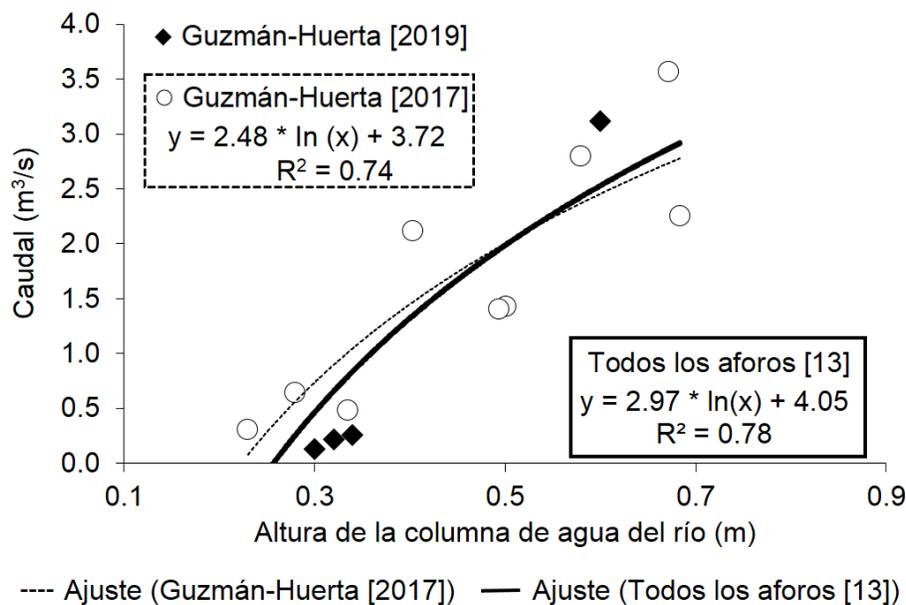


Figura 8. Curva nivel de agua-caudal reportada por Guzmán-Huerta (2017) (curva de línea discontinua y círculos vacíos). Y la curva empleada en el presente trabajo ($n= 13$), con los aforos realizados para este trabajo (rombos negros) y los de Guzmán-Huerta (2017) (curva de línea negra).

2.4 Métricas hidrológicas

Para caracterizar las respuestas hidrológicas a nivel de evento, se determinaron los coeficientes de escurrimiento (Q/P ; adimensional) con el fin de examinar la porción de la precipitación que contribuyó a la formación del caudal por evento de lluvia. Así también se cuantificó el caudal total (Q_T ; mm) de cada hidrograma y sus contribuciones por flujo rápido (Q_r ; mm) y base (Q_b ; mm) empleando el método aproximado de separación de hidrogramas propuesto por Hewlett y Hibbert (1967). Q_T , Q_r y Q_b se reportan en unidades de mm al ser normalizados por el área de la cuenca. Asimismo se determinó el pico de descarga ($Q_{m\acute{a}x}$; m^3/s); el tiempo de pico (T_p ; horas), el tiempo de retraso (L ; horas) y el tiempo de recesión (T_r ; horas) de cada hidrograma (Figura 9). $Q_{m\acute{a}x}$, se determinó en m^3/s para una mejor visualización, ya que de haberlo expresado en mm la cantidad hubiera quedado muy pequeña.

La definición de los parámetros antes mencionados es la siguiente: Q_T es el caudal total producido por un evento de lluvia y está compuesto por el flujo rápido y el flujo base; Q_r es el flujo o escurrimiento, rápido o superficial (generado por el evento de lluvia), y Q_b es el escurrimiento base o subsuperficial, producto de la combinación de los flujos generados en las zonas no saturada (suelo) y saturada (agua subterránea). $Q_{m\acute{a}x}$ es el flujo máximo de caudal observado; T_p es el tiempo que tarda el caudal en llegar al punto máximo del hidrograma ($Q_{m\acute{a}x}$); L es el tiempo transcurrido desde el inicio de la entrada de lluvia a la cuenca hasta su respuesta y T_r es el tiempo que tarda el caudal en regresar a su flujo base desde el pico de descarga (Figura 9) (Dingman, 2014).

El caudal promedio diario (MAF, por sus siglas en inglés *Mean Annual Flow*, mm/día) se calculó como el valor medio de los datos de caudal a escala diaria (Q_d , mm) para cada año hidrológico, y como medida de su variación, se determinó el coeficiente de variación de Q_d (CV_Q , adimensional) (cf. Muñoz-Villers y McDonnell, 2013).

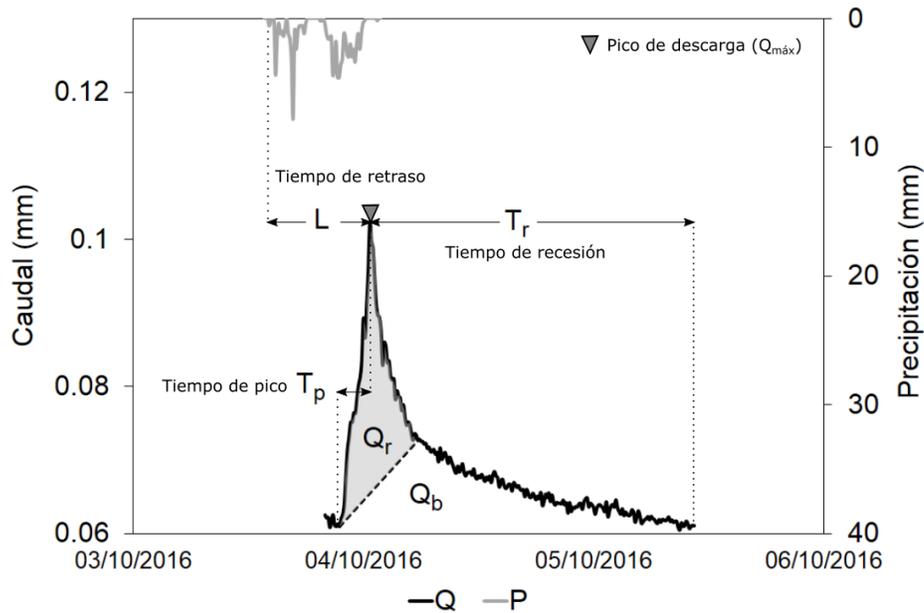


Figura 9. Ejemplo de un hidrograma descompuesto en flujos rápido y base, y representación de distintos tiempos de respuesta del hidrograma a un evento de lluvia dado en el río Los Gavilanes.

La curva de duración de flujo (FCD, *Flow Duration Curve*) también fue elaborada con los valores de Q_d , ordenándolos de forma decreciente. Para ello, a cada valor de Q_d , se le asoció su probabilidad de excedencia correspondiente (%), la cual fue obtenida de la expresión en porcentaje de la enumeración de cada Q_d . Este ordenamiento se realizó de modo decreciente, de 1 a 365 (días), siendo 1 el valor máximo y 365 el valor mínimo, para cada año hidrológico. Esta curva acumulada de frecuencias muestra el porcentaje de probabilidad de tiempo en el que se igualó o excedió un valor de caudal específico, permitiendo así conocer la variabilidad del caudal durante el período de estudio (Dingman, 2014). Además se calculó la pendiente de la curva FDC (S_{FDC} , adimensional), siguiendo la Ecuación (1). S_{FDC} , indica la variabilidad del caudal, y se cuantificó como la diferencia de los logaritmos de los percentiles del caudal, 5 (P_{Q5}) y 95 (P_{Q95}), y de su razón entre la diferencia de dichos percentiles (Sawicz et al., 2011; Zhang et al., 2008).

$$S_{FDC} = \ln(P_{Q5}) - \ln(P_{Q95}) / (0.95 - 0.05) \quad \text{Ec. (1)}$$

De la curva FDC, se calculó el caudal promedio anual más alto (MAHF, *Mean Annual High Flow*, mm/día) y el caudal promedio anual más bajo (MALF, *Mean Annual Low Flow*, mm/día). Estos valores se calcularon a partir de las medias de los percentiles 1 (MALF) y 99 (MAHF) de los valores de Q_d de cada año estudiado (cf. Muñoz-Villers y McDonnell, 2013).

Para analizar la recesión del flujo base, es decir, la liberación del agua por flujos subsuperficiales en días sin lluvia, se construyó la curva maestra de recesión del flujo base utilizando datos diarios de Q_d . El método usado fue el conocido como el de “pegando tiras” por su nombre en inglés, *matching strip*, y se construye a partir de la unión gráfica de diferentes periodos de recesión del caudal durante el tiempo de estudio, en escala logarítmica. A partir de esta gráfica se obtuvo la constante de recesión (k , mm/día), la cual nos indica la velocidad con la que desciende el caudal base a lo largo del tiempo (Yang et al., 2018).

Por último, se calculó el índice de responsividad del flujo (FI, *Flashiness Index*, adimensional) el cual mide la fluctuación del caudal a partir de pequeñas variaciones en escala horaria (Q_h). Este índice se calcula como la sumatoria de los valores absolutos de las diferencias de los caudales registrados hora a hora, es decir, los cambios del caudal de una hora i (Q_{hi}) y de una hora anterior (Q_{hi-1}); y de la razón de éstos cambios entre la sumatoria de los caudales a escala horaria (Q_{hi}), como lo indica la Ecuación (2) (Baker et al., 2004):

$$FI = \frac{\sum_{i=0}^n |Q_{hi} - Q_{hi-1}|}{\sum_{i=0}^n Q_{hi}} \quad \text{Ec. (2)}$$

2.5 Identificación de sistemas meteorológicos

Para asociar la respuesta hidrológica de la cuenca a eventos de lluvia, originados por los sistemas meteorológicos de escala sinóptica, se consultaron los pronósticos, reportes y boletines emitidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2017a, b) y la Secretaría de Protección Civil Veracruz-Meteorología (PCVM, 2017a, b, c, d, e, f, g). Esta información fue consultada con base en las fechas y horas de los registros de los hidrogramas analizados con

sus respectivos eventos de lluvia. Posteriormente se construyó una base de datos con esta información y su correspondiente sistema meteorológico. Para esto último, los criterios utilizados fueron que el sistema asignado debía de mencionarse en al menos una de las fuentes consultadas y concordar con la fecha y hora del registro de lluvia; cuando esto no fue claro, la asignación del evento no fue realizada. Se utilizó el programa Minitab16 Statistical Software para agrupar los sistemas en categorías con base en sus cantidades de precipitación (P) a través de un análisis de comparación de varianzas (ANOVAS). Estas agrupaciones sólo se hicieron para aquellos sistemas meteorológicos que compartían características similares, como la circulación de sus vientos, como por ejemplo las combinaciones entre las categorías de disturbio tropical, depresión tropical, huracán, onda tropical y tormenta tropical. O por la combinación de una categoría bien definida y la combinación de ésta categoría con otras, como los frentes fríos y los frentes fríos con vaguadas. Estas comparaciones se presentan más adelante (Tabla 10).

2.6 Condiciones de Sequía

Para determinar la presencia de sequía en la zona de estudio, se utilizaron las capas de información (“*shapefiles*”) del Monitor de Sequía de México (MSM) creadas por el Servicio Meteorológico Nacional (2018). Estas capas contienen información de las regiones que presentaron sequía en México elaborados a partir de los siguientes indicadores: 1) Índice estandarizado de precipitación (SPI), 2) Anomalía de lluvia en porcentaje de lo normal, 3) Índice satelital de salud de la vegetación (VHI), 4) Modelo de humedad del suelo Leaky Bucket CPC-NOAA, 5) Índice normalizado de diferencia de la vegetación (NDVI), 6) Anomalía de la temperatura media y 7) Porcentaje de disponibilidad de agua en las presas del país. Las categorías de las intensidades de sequía se clasifican en: anormalmente seco (D0), sequía moderada (D1), sequía severa (D2), sequía extrema (D3) y sequía excepcional (D4) (Tabla 1). Con el programa ArcGis 10.4 se cortaron los mapas de sequía de México al tamaño de la cuenca del río Los Gavilanes, por el periodo enero 2007-abril 2017. Cabe mencionar que antes de 2007 no se contaba con esta información. Con las capas cortadas se realizaron

mapas mensuales para evaluar la presencia de sequía en la cuenca, determinando también el área de afectación en porcentaje por las categorías antes mencionadas.

Tabla 1. Categorías de intensidad de la sequía.

Categoría	Abreviatura	Descripción
Anormalmente seco	D0	No es una categoría de sequía, pero indica el inicio o fin de un período de sequía. Al inicio de una sequía, podría retrasar o limitar el crecimiento de los cultivos y pastos; hay riesgo de incendio. Al final de una sequía, persevera un déficit de agua y los cultivos podrían no perderse, parcialmente.
Sequía moderada	D1	Hay daños en los cultivos y pastos, riesgo alto de incendios, bajos niveles de agua en cuerpos de agua. Hay restricción voluntaria de agua.
Sequía severa	D2	Aumenta la probabilidad de pérdidas de cultivos y pastos, riesgo alto de incendios, la escasez de agua es común. Se debe de restringir el uso de agua.
Sequía extrema	D3	Pérdidas mayores de cultivos y pastos, riesgo extremo de incendios forestales. La escasez de agua restringe el uso de agua.
Sequía excepcional	D4	Se presentan condiciones extraordinarias de las pérdidas de cultivos y pastos, y riesgo de incendios. Hay escasez de agua total en cuerpos de agua.

Tomado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/categorias-de-sequia>

2.7 Canícula (sequía intraestival o sequía de medio verano)

Para conocer el posible efecto de la canícula en la respuesta estacional (época de lluvias) del caudal del río, se utilizó la serie de precipitación de 11 años (mayo 2006-abril 2017) disponible a la altitud de 2100 m al interior de la cuenca de estudio (F. Holwerda, *datos sin publicar*). La intensidad de la canícula fue cuantificada siguiendo el método de Mosiño y García (1968). Este método consiste en calcular el área comprendida entre los dos registros máximos de precipitación mensual (polígono funicular), representando así la reducción en la precipitación ocasionada por la presencia de la canícula (Figura 10). La intensidad de la canícula cuantifica esta reducción de precipitación y se calcula con base en la Ecuación 3. La ausencia de la canícula fue determinada cuando no se presentó una reducción de la precipitación entre los dos registros máximos de precipitación.

Así también se categorizó la intensidad de la canícula de acuerdo a la clasificación propuesta por Mosiño y García (1968), siendo de la siguiente manera: canícula fuerte (>16%), canícula moderada (11-15%) y canícula débil (0-10%).

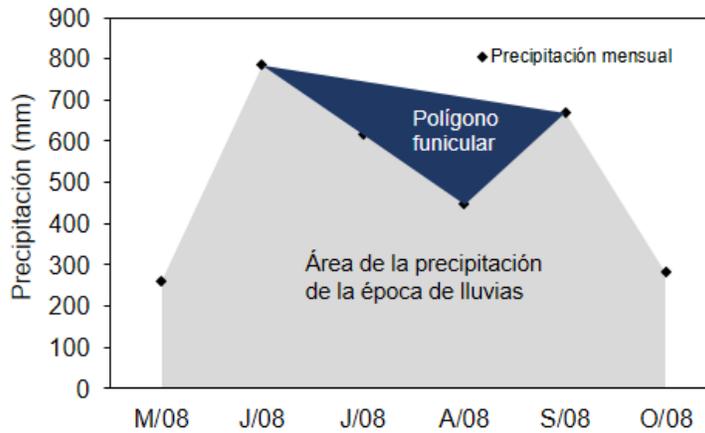


Figura 10. Cálculo de la intensidad de la canícula.

La gráfica muestra los registros mensuales de precipitación de la época de lluvia de 2008 del pluviómetro registrado a los 2100 m.

$$\text{Intensidad de la canícula (\%)} = \left(\frac{\text{Área del polígono funicular}}{\text{Precipitación de la época de lluvias}} \right) * 100 \quad \text{Ec. (3)}$$

2.8 El Niño/La Niña y su intensidad

Para conocer si el fenómeno de El Niño, La Niña o condiciones neutrales estuvieron presentes en la serie de precipitación de 11 años, se utilizó el índice ONI (Oceanic Niño Index) de la NOAA (2017). Así también se utilizó la clasificación de Null (2017) para cuantificar la intensidad de estos eventos.

3 Resultados

3.1 Precipitación

La precipitación promedio para el primer año hidrológico estudiado (mayo 2015-abril 2016) fue de 2692 mm, mientras que para el segundo año (mayo 2016-abril 2017) fue de 2524 mm. Entre años, las épocas de lluvias fueron muy similares con una diferencia del 2% entre ellas (1989 mm en 2015 y 2032 mm en 2016). En contraste, la época relativamente seca del primer año recibió 43% (703 mm) más precipitación comparada con la del segundo año (491 mm).

La precipitación observada a los 1450 m fue 12% mayor en el primer año (2838 mm) comparada con el segundo año (2539 mm), distribuida en 291 y 259 eventos, respectivamente. Hay que recordar que existe un faltante de datos de dos meses (marzo y abril de 2017) en esta serie. La precipitación registrada a los 2100 m fue semejante en ambos años, se observaron 2545 mm en el primer año y 2508 mm en el segundo año, distribuida en 302 y 297 eventos, respectivamente.

Al comparar la precipitación anual entre las altitudes, se observó una mayor precipitación a los 1450 m, +12% en el primer año y 14% en el segundo año. Aclarando que en el segundo año sólo se comparó el periodo con datos en ambos pluviómetros, de mayo 2016 a febrero 2017 (10 meses) (Figura 11). Las características de los eventos de precipitación a escala estacional y anual se encuentran en el Anexo (Tabla A2 y A3).

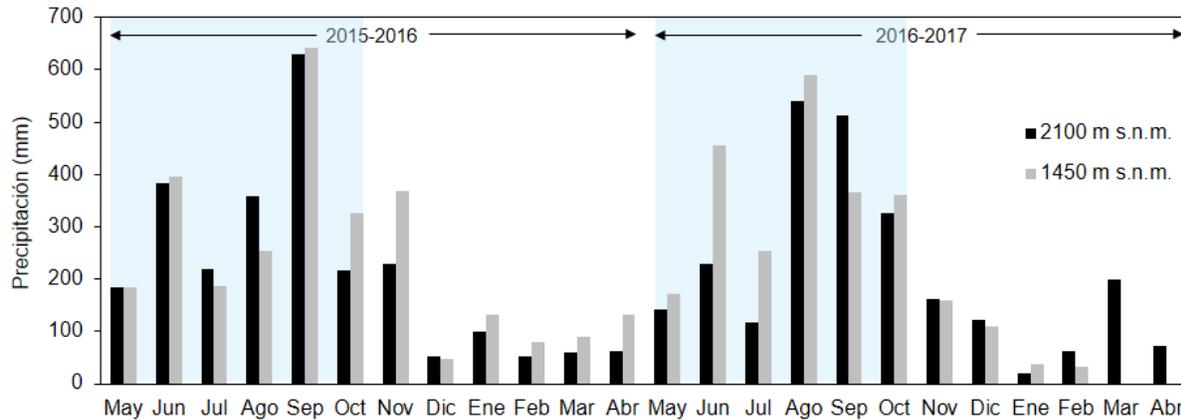


Figura 11. Precipitación registrada en la cuenca del río Los Gavilanes durante el período mayo 2015-abril 2017. Las áreas sombreadas en azul marcan las épocas de lluvias.

3.2 Caudal

Al comparar ambas curvas de nivel de agua-caudal se observó que la construida previamente con aforos en la corriente principal (Guzmán-Huerta, 2017) subestimó los flujos más bajos mensuales del río en un 63 ± 94 (σ) %, siendo mayor esta diferencia en las alturas de la columna de agua más pequeñas (0.24-0.27 m), mismas que fueron corregidas con los aforos realizados en el 2017, año en el cual se cuantificaron los caudales más bajos (Anexo, Figura A2). En cuanto a los flujos más altos, estos fueron sobrestimados en un 155 ± 138 (σ) %; ubicando la mayor sobrestimación para las alturas en el río entre 0.71 y 0.78 m.

De forma general se observó que las variaciones registradas en el caudal obedecieron al patrón estacional de la lluvia registrado durante el período de estudio (Figura 12). Al respecto, los valores de descarga del río (Q) y del coeficiente de escurrimiento (Q/P) fueron mayores en el segundo año (1857 mm y 74%) comparado con el primer año (1394 mm y 52%) (Figura 12). Este aumento del caudal en el segundo año fue observado tanto en la época de lluvias (+30%; 274 mm) como en la época relativamente seca (+41%; 189 mm).

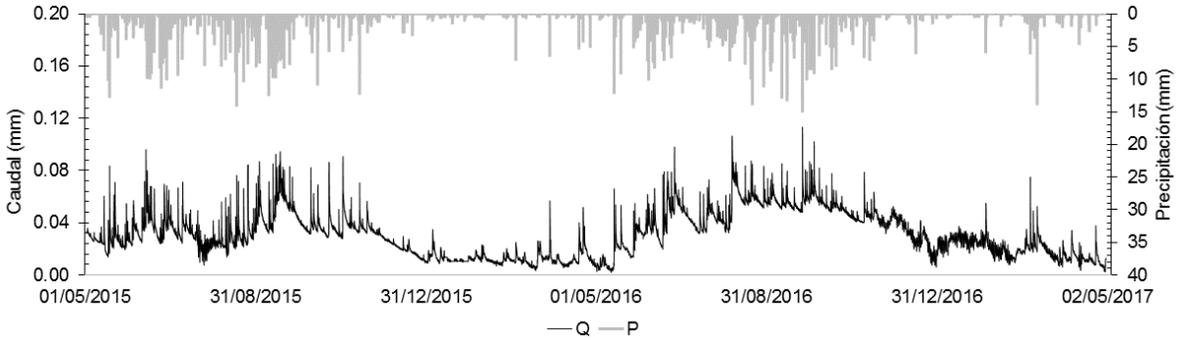


Figura 12. Precipitación (2100 m) y caudal de la cuenca del río Los Gavilanes, para el período 2015-2017. Los datos se presentan a una resolución de 10 min.

A escala mensual, los caudales siguieron bastante de cerca los patrones de precipitación. En el primer año, el flujo del río presentó su valor máximo en septiembre y su valor mínimo en febrero. En cambio, para el segundo año el valor máximo fue observado en agosto y el registro mínimo en abril. Para ambos años, los registros máximos coincidieron con las entradas más altas de precipitación, pero los valores mínimos tuvieron un retraso con respecto a los registros más bajos de precipitación, en este caso de dos meses en el primer año y de tres meses en el segundo año (Figura 13).

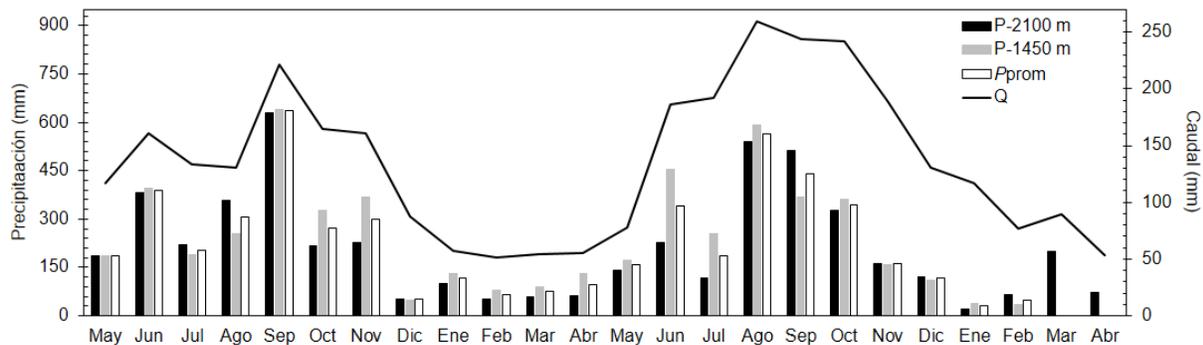


Figura 13. Flujos de agua en la cuenca. Las barras muestran los registros de precipitación y la línea el flujo de caudal. P_{prom} es la precipitación promedio para la cuenca. Los datos que no se encuentran a los 1450 m, se debe a la ausencia de estos durante ese periodo.

3.2.1 Métricas hidrológicas a escala diaria, estacional y anual

El caudal promedio fue de 4.5 mm/día, sin advertirse una importante variabilidad interanual (CV_Q , Tabla 2) durante el período de estudio. Así también, el caudal promedio diario osciló en

un rango de 0.9 y 9.8 mm/día, valores que corresponden al caudal promedio más bajo (MALF) y al caudal promedio anual más alto (MAHF), respectivamente (Tabla 2, Figura 14).

Tabla 2. Métricas hidrológicas de la cuenca del río Los Gavilanes.

Año hidrológico	MAF $\pm \sigma$ (mm/día)	CV_Q (-)	S_{FDC} (-)	FI (-)	MAHF (mm/día)	MALF (mm/día)	P_{Q1} (mm/día)	P_{Q99} (mm/día)
2015-2016	3.8 \pm 2.0	0.5	-1.9	0.03	---	---	1.0	9.1
2016-2017	5.1 \pm 2.5	0.5	-2	0.02	---	---	0.8	10.6
2015-2017	4.5 \pm 2.3	0.5	-2	0.02	9.8	0.9	0.9	10.2

Valores del caudal promedio diario (MAF, Mean Annual Flow), coeficiente de variación del caudal (CV_Q), Pendiente de la curva de flujo base (S_{FDC}), Richards-Baker Flashiness Index (FI), caudal promedio anual más alto (MAHF, Mean Annual High Flow) y caudal promedio anual más bajo (MALF, Mean Annual Low Flow). No se reporta datos en MAHF y MALF, porque representan los promedios para ambos años de P_{Q1} y P_{Q99}.

Los caudales promedios diarios fueron de 3.8 y 5.1 mm/día, respectivamente para el primer y segundo año. Interesantemente en el segundo año no solo se observó un mayor caudal, sino que también los valores máximos de caudal diario, lo cual concuerda con los percentiles 1 (P_{Q1}) para el valor mínimo y 99 (P_{Q99}) para el valor máximo (Tabla 2).

Durante el primer año, los caudales máximos diarios se presentaron en el mes de septiembre (> 8 mm/día) con una baja probabilidad de excedencia ($\leq 3\%$); mientras que los caudales mínimos se observaron en el mes de marzo (< 1 mm/día) con una alta probabilidad ($\geq 99\%$). En cambio durante el segundo año, los caudales máximos se registraron en su mayoría durante el mes de agosto (> 9.5 mm/día), con una probabilidad $\leq 2\%$ y los mínimos en mayo (≤ 0.9 mm/día) con una probabilidad > 98%.

Por otro lado, el hecho de que el río es una corriente perenne, se observa en la forma casi recta de la curva de duración de flujo, y en la ausencia de curvatura en su extremo inferior, lo cual indica un flujo constante por el aporte ininterrumpido de agua (Figura 14). Así también la poca variación del caudal y la gran capacidad de almacenamiento de agua en el subsuelo, se confirma a través de la pendiente suave de la curva de duración de flujo, ~ -2 (S_{FDC}, Tabla

2, valor adimensional). Asimismo, los valores bajos de FI (*Flashiness Index*) obtenidos en ambos años mostraron también la estabilidad del caudal anual (Tabla 2).

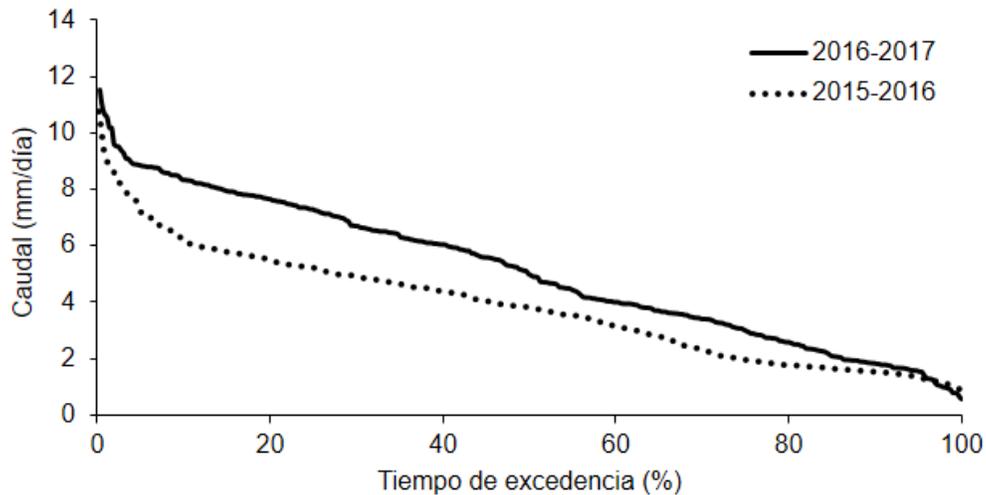


Figura 14. Curvas de duración de flujo para el período estudiado. Esta gráfica nos permite conocer el porcentaje del tiempo en el que un valor de caudal se presentó o éste fue excedido. Por ejemplo, el 50% del tiempo de cada año hidrológico, se observó un caudal de 3.8 mm/día y de ~ 5mm/día, respectivamente para el año 2015-2016 y 2016-2017.

Por otra parte, la liberación del agua en la cuenca se realizó de forma gradual de acuerdo a las pendientes suaves de las curvas maestras de recesión y a su constante de recesión (k), la cual fue de 0.96 para ambos años (Figura 15).

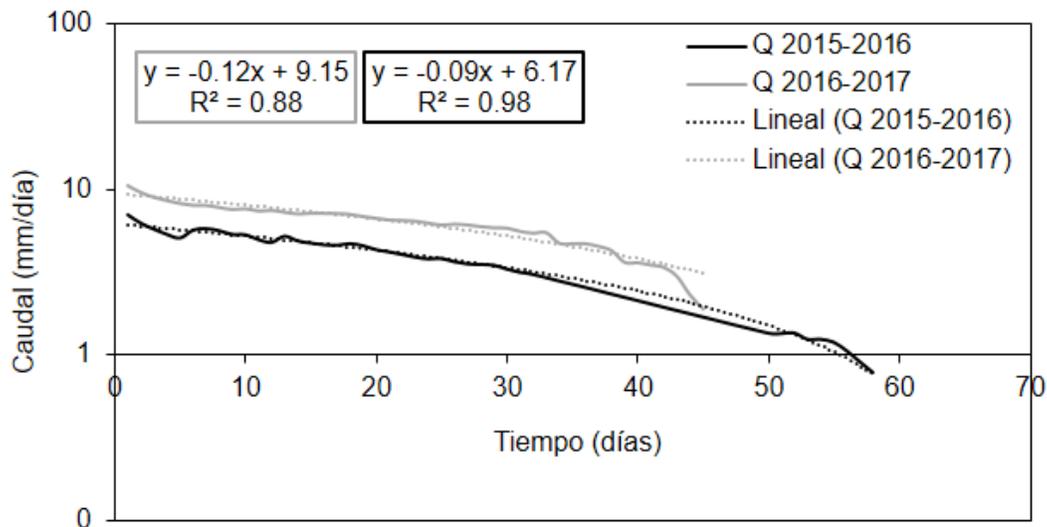


Figura 15. Curvas maestras de recesión del flujo base para los años hidrológicos 2015-2016 (58 días) y 2016-2017 (45 días) (líneas continuas). El eje y se encuentra en escala semilogarítmica. Para la obtención de la constante de recesión, se utilizó la ecuación $Q_t = Q_0 k^t$. Las líneas punteadas son los ajustes lineales que se emplearon.

3.2.2 Precipitación-escorrentamiento a nivel de evento

Para separar los hidrogramas, se utilizaron los mismos criterios descritos por Guzmán-Huerta (2017), estos fueron: 1) seleccionar hidrogramas completos y bien definidos, es decir que el evento de lluvia que generó una respuesta en el caudal debió tener una cantidad de precipitación (P) mayor a 1 mm; 2) descartar hidrogramas poco claros, y 3) considerar hidrogramas que presentan dos picos de descarga ($Q_{m\acute{a}x}$), producto de dos eventos de precipitación consecutivos. En total, se examinaron 165 hidrogramas en el primer año y 141 en el segundo año. Los hidrogramas eliminados por no contar con un registro de lluvia asociado fueron 22 y 26 hidrogramas, respectivamente, para el primer y segundo año. Así también, los hidrogramas no analizados por tener un $Q/P > 1$ fueron 3 en el primer año y 4 en el segundo año.

Los eventos de lluvia relacionados con las respuestas hidrológicas analizadas, presentaron cantidades de lluvia 21% mayores en la época de lluvias del primer año (24 mm), en comparación a la del segundo año (20 mm). En el caso de las épocas secas, ambos años presentaron valores promedio muy similares de precipitación (Tabla 3). Para conocer su comportamiento a escala mensual, ver el Anexo (Tabla A4).

En cuanto a las otras características de precipitación, se observó que los valores promedios de las intensidades fueron mayores para el segundo año. En la época de lluvias, fue 24% mayor la I_{prom} y 15% mayor la $I_{m\acute{a}x}$. En cambio, en la época seca los valores incrementaron 81% para la I_{prom} y 38% para la $I_{m\acute{a}x}$ (Tabla 4). Estas características a nivel mensual se encuentran en el Anexo, para el primer y segundo año (Tablas A5 y A6).

Tabla 3. Características de la precipitación (P) de los eventos analizados durante el período de estudio.

Período	n (eventos)	P (mm)				
		Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	
Estacional						
Lluvias	2015	118	1.0	86.0	19.8 \pm 18.2	13.6
	2016	101	1.6	135.6	24.0 \pm 24.1	15.6
Secas	2015-2016	47	1.4	71.2	11.4 \pm 13.5	7.6
	2016-2017	40	1.8	66.8	13.1 \pm 13.5	7.8
Anual						
2015 – 2016		165	1.0	86.0	17.4 \pm 17.3	10.4
2016 – 2017		141	1.6	135.6	21.0 \pm 22.1	11.2

Tabla 4. Estadísticos de las intensidades y del tiempo de duración de los eventos analizados durante el 2015-2017.

Período	I_{prom} (mm/h)				$I_{máx}$ (mm/h)				T_d (h)				
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	
Estacional													
Lluvias	2015	0.2	26.2	5.1 \pm 4.8	4.0	0.4	73.2	11.7 \pm 11.1	8.2	0	31.0	5.5 \pm 5.0	4.0
	2016	0.4	31.4	6.3 \pm 5.4	4.5	1.2	54.4	13.5 \pm 11.6	9.2	0	41.0	5.0 \pm 5.3	4.0
Secas	2015-2016	0.2	7.8	1.6 \pm 1.7	1.0	0.4	25.4	3.9 \pm 4.8	2.4	1.0	41.0	9.4 \pm 8.7	7.0
	2016-2017	0.4	13.9	2.9 \pm 3.7	1.3	0.6	24.4	5.4 \pm 5.7	3.0	0	44.0	7.5 \pm 8.5	5.0
Anual													
2015 – 2016		0.2	26.2	4.1 \pm 4.4	2.3	0.4	73.2	9.5 \pm 10.3	5.2	0	41.0	6.6 \pm 6.5	5.0
2016-2017		0.4	31.4	5.3 \pm 5.2	3.2	0.6	54.4	11.4 \pm 11.0	7.4	0	44.0	5.7 \pm 6.4	4.0

Tabla 5. Estadísticos del coeficiente de escurrimiento (Q/P), caudal total (Q_T), flujo rápido (Q_r) y flujo base (Q_b) para los años hidrológicos 2015-2017 (2015-2016, $n=165$; 2016-2017, $n=141$).

Período	Q/P			Q_T (mm)			Q_r (mm)			Q_b (mm)			
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	
Estacional													
Lluvias	2015	0.04	0.9	0.3 ± 0.2	0.4	12.9	4.0 ± 2.7	0.01	2.1	0.4 ± 0.4	0.4	12.1	3.5 ± 2.4
	2016	0.1	1.0	0.3 ± 0.2	0.6	18.5	5.3 ± 3.0	0.006	3.4	0.3 ± 0.4	0.6	15.1	5.0 ± 2.7
Secas	2015-2016	0.1	0.8	0.3 ± 0.2	0.2	14.5	3.1 ± 2.8	0.01	2.7	0.3 ± 0.5	0.2	11.7	2.8 ± 2.5
	2016-2017	0.1	0.8	0.3 ± 0.2	0.6	7.0	2.9 ± 1.7	0.01	0.9	0.3 ± 0.3	0.5	6.6	2.6 ± 1.6
Anual													
	2015-2016	0.04	0.9	0.3 ± 0.2	0.2	14.5	3.7 ± 2.8	0.01	2.7	0.4 ± 0.4	0.2	12.1	3.3 ± 2.5
	2016-2017	0.1	1.0	0.3 ± 0.2	0.6	18.5	4.7 ± 2.9	0.006	3.4	0.4 ± 0.4	0.5	15.1	4.4 ± 2.7

A nivel de evento, los coeficientes de escurrimiento (Q/P) fueron en promedio de 0.3 ± 0.2 (σ) (Tabla 5), con una contribución del flujo rápido (Q_r) del 2 al 45% (0.01 a 2.7 mm) para el primer año y del 1 a 47% (0.01 a 3.4 mm) para el segundo año. En el caso del flujo base (Q_b) su contribución fue del 55 al 98% (0.4 a 12.1 mm) para el primer año y del 53 al 99% (0.5 a 15.1 mm) para el segundo año (Figura 16). Los Q/P a escala mensual se encuentran en el Anexo, Tabla A7 y A8.

Mensualmente, se observó una alta contribución de Q_b , con un rango de 86 a 94% durante el primer año y de 76 a 97% en el segundo año, lo cual es consistente con el gran almacén de agua subsuperficial observado en la curva de duración de flujo (Figura 14). Sus mayores aportes fueron durante la época de lluvias, en el mes de julio y en los meses de septiembre a noviembre durante el primer año, y de junio a noviembre en el segundo año. Por otro lado, el Q_r tuvo una considerable contribución durante las épocas secas, en diciembre y enero del primer año, y en febrero para el segundo año; y también en la transición secas-lluvias para ambos años.

Más detalles sobre la distribución mensual de los flujos consultar el Anexo (Tabla A7 y A8).

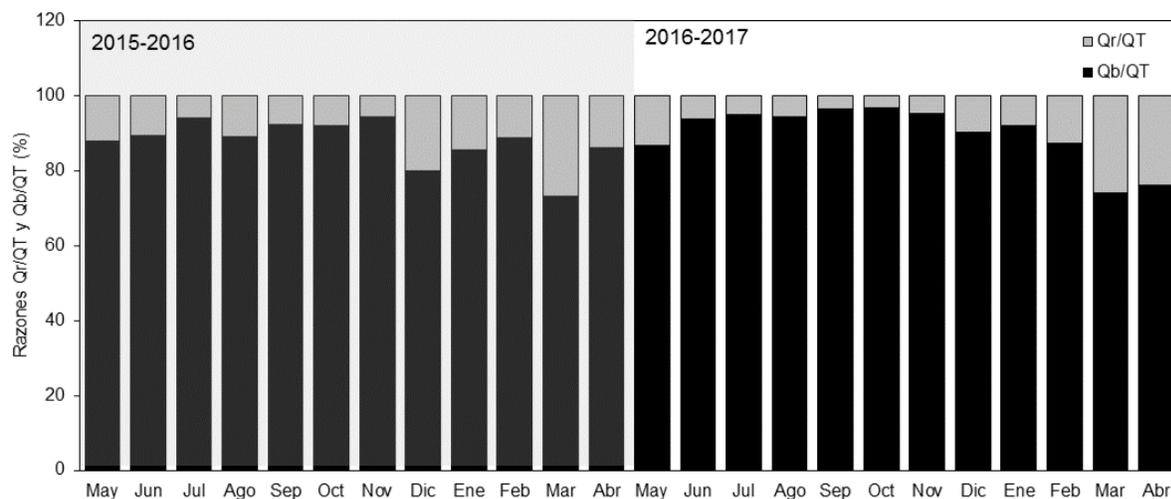


Figura 16. Separación del caudal total (Q_T) en sus flujos rápido (Q_r) y base (Q_b). La parte sombreada y no sombreada marca los años hidrológicos estudiados.

Cabe resaltar que en el segundo año también se observaron mayores valores promedio de otras variables, en la época de lluvias incrementaron ligeramente los picos de descarga ($Q_{m\acute{a}x}$, 23%) y los tiempos de pico (T_p , 45%) y de retraso (L , 25%) (Tabla 6). Mientras que en la época seca, aumentaron ligeramente $Q_{m\acute{a}x}$ (29%) y L (20%). Por el contrario, para el primer año sólo se observó un aumento del tiempo de recesión (T_r), 59% (Tabla 6). Los estadísticos mensuales de los $Q_{m\acute{a}x}$ (Tabla A9) y de los tiempos de respuestas (Tabla A10 y A11) se encuentran en el Anexo.

Tabla 6. Métricas de los hidrogramas: tiempo de pico (T_p), tiempo de retraso (L) y tiempo de recesión (T_r) para el período de estudio 2015-2017.

Período	$Q_{\text{máx}}$ (m^3/s)			T_p (horas)			L (horas)			T_r (horas)			
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	
Estacional													
Lluvias	2015	1.5	7.5	3.0 ± 1.1	0.2	11.5	2.2 ± 1.8	1.2	26.3	4.0 ± 3.0	0.5	46.5	13.7 ± 9.5
	2016	0.8	6.6	3.7 ± 1.0	0.2	12.5	3.2 ± 2.2	0.7	22.7	5.0 ± 3.3	1.0	36.2	13.4 ± 7.5
Secas	2015-2016	0.5	5.3	1.7 ± 1.0	0.5	25.8	5.3 ± 4.0	1.7	26.2	7.0 ± 4.8	0.3	41.2	14.6 ± 11.0
	2016-2017	0.9	4.6	2.2 ± 0.9	0.5	19.0	5.3 ± 4.4	1.7	33.0	8.4 ± 6.6	1.5	22.2	9.2 ± 5.5
Anual													
	2015- 2016	0.5	7.5	2.6 ± 1.2	0.2	25.8	3.0 ± 3.0	1.2	26.3	4.8 ± 3.8	0.3	46.5	14.0 ± 9.9
	2016 -2017	0.8	6.6	3.3 ± 1.2	0.2	19.0	3.8 ± 3.1	0.7	33.0	5.9 ± 4.7	1.0	36.2	12.2 ± 7.2

3.3 Sistemas meteorológicos de escala sinóptica

A partir de los reportes del Servicio Meteorológico Nacional y de la Secretaría de Protección Civil de Veracruz, se identificaron 133 sistemas meteorológicos durante el primer año hidrológico y 122 sistemas durante el segundo año (Tabla 7).

Tabla 7. Categorías de los sistemas meteorológicos asociados a los eventos precipitación-escorrentamiento.

Categoría	Número de sistemas meteorológicos					
	2015-2016			2016-2017		
	Anual	Lluvias	Secas	Anual	Lluvias	Secas
Vaguada	31	27	4	46	42	4
Depresión tropical sistemas complejos	---	---	---	4	4	---
Disturbio tropical	4	4	---	1	1	---
Dorsal	6	2	4	9	3	6
Dorsal y Vaguada	10	9	1	10	9	1
Frente frío	22	4	18	20	4	16
Frente frío, vaguada y disturbio tropical	2	2	---	---	---	---
Huracán	2	2	---	---	---	---
Masa de aire frío	4	---	4	2	---	2
Onda tropical	9	9	---	5	5	---
Sin asignación	24	21	3	7	5	2
Sin información	8	2	6	7	4	3
Surada y vaguada	3	---	3	---	---	---
Tormenta tropical	---	---	---	4	4	0
Vaguada y disturbio tropical	6	6	---	3	3	---
Vaguada y Frente frío	10	6	4	9	5	4
Vaguada y Onda tropical	24	24	---	11	11	---
Total	165	136	29	138	100	38

La categoría "Sin asignación", son eventos emitidos en el boletín, pero no fue claro el fenómeno que generó la lluvia. En cambio la categoría "Sin información" son aquellos eventos que no contaron con una registro de información. La presencia de frente frío, vaguada y disturbio tropical se le llama después como "sistemas complejos".

Durante la época de lluvias, los sistemas que generaron más eventos de lluvia fueron las vaguadas y la combinación de éstas con las ondas tropicales, con 27 y 24 respuestas hidrológicas de la cuenca para el primer año, respectivamente (Tabla 8). En el segundo año dominaron las vaguadas (42 eventos) sobre la combinación de éstas con las ondas tropicales (11 eventos). En cambio, durante las épocas de secas, los frentes fríos fueron los principales sistemas que generaron lluvias durante esta temporada (Tabla 8 y 9).

Tabla 8. Sistemas meteorológicos y correspondientes volúmenes de precipitación y caudal para el año 2015-2016.

Época	Fenómeno meteorológico	<i>n</i> (eventos)	Rango de precipitación (mm)	Rango de caudal (mm)
Lluvias	Vaguada	27	1.4 - 51.2	0.4 - 12.9
	Vaguada y Onda tropical	24	9.8 - 55.5	1.3 - 12.2
	Onda tropical	9	20.8 - 63.3	3.4 - 10.9
	Vaguada y dorsal	9	2.4 - 19.2	0.6 - 5.3
	Vaguada y disturbio tropical	6	9.3 - 59.6	1.5 - 8.1
	Vaguada y frente frío	6	8.6 - 12.4	1.7 - 3.9
	Disturbio tropical	4	18.4 - 53.0	3.9 - 7.7
	Frente frío	4	5.2 - 11.6	1.3 - 5.2
	Dorsal	2	1.8 - 3.2	0.8 - 1.7
	Influencia de Huracán	2	19.8 - 84.2	7.2 - 9.2
	Sistemas complejos	2	48.8 - 59.6	4.9 - 8.1
Secas	Frente frío	18	4.0 - 71.2	1.7 - 11.3
	Dorsal	4	1.8 - 4.8	0.7 - 2
	Frente frío y Vaguada	4	8.6	58.2
	Masa de aire frío	4	5.0 - 7.6	1.5 - 2.6
	Vaguada	4	6.2 - 11.4	0.6 - 4
	Surada	3	3.6 - 7.6	0.2 - 2.1
	Vaguada y dorsal	1	---	---

Los sistemas complejos corresponden a eventos en los que concurrieron al mismo tiempo un frente frío, una vaguada y un disturbio tropical.

Tabla 9. Sistemas meteorológicos y correspondientes volúmenes de precipitación y caudal para el año 2016-2017.

Época	Fenómeno meteorológico	<i>n</i> (eventos)	Rango de precipitación (mm)	Rango de caudal (mm)
Lluvias	Vaguada	42	2.4 - 41.6	1.5 - 11.5
	Vaguada y onda tropical	11	24.8 - 95.8	2.1 - 12.2
	Vaguada y dorsal	9	3.2 - 40.2	2.8 - 9.0
	Onda tropical	5	42.2 - 84.6	5.4 - 8.5
	Vaguada y frente frío	5	21.4 - 92.8	3.1 - 5.3
	Depresión tropical	4	11.8 - 30.0	2.7 - 8.4
	Frente frío	4	9.8 - 25.4	1.3 - 8.8
	Tormenta tropical	4	32.4 - 135.6	5.0 - 18.5
	Vaguada y disturbio tropical	3	11.8 - 26.4	2.7 - 8.4
	Dorsal	3	1.8 - 7.2	0.7 - 2.9
	Disturbio tropical	1	19	3.9
Secas	Frente frío	16	5.4 - 66.8	0.8 - 6.7
	Dorsal	6	2.6 - 7.8	0.6 - 2.7
	Frente frío con vaguada	4	12.2 - 28.6	2.8 - 4.2
	Vaguada	4	7.0 - 40.4	3.1 - 3.8
	Masa de aire frío	2	38.0 - 38.8	5.9 - 7.0
	Vaguada y dorsal	1	5	1.1

3.3.1 Influencia de los sistemas meteorológicos sobre las respuestas hidrológicas

Para poder examinar el efecto de los distintos sistemas meteorológicos en los flujos del río y en las métricas de los hidrogramas (Q_T , Q_r , Q_b , $Q_{m\acute{a}x}$, L , T_p , y T_r); éstos se agruparon en función de los tamaños de lluvia de cada evento (P , valor absoluto), utilizando un análisis de varianza (ANOVA, $p \leq 0.05$). Aquellas categorías que fueron estadísticamente similares ($p > 0.05$) fueron agrupadas. Por lo que de acuerdo al análisis de varianza se pudieron agrupar los sistemas quedando de la siguiente manera: cuatro categorías para el año 2015-2016 y cinco categorías para el 2016-2017 (Tabla 10, categorías marcadas con “*” y Tabla 11).

Una vez agrupadas las categorías, se realizaron análisis estadísticos de Tukey entre los distintos sistemas meteorológicos (Tabla 11) y las variables dependientes de cada respuesta

hidrológica. Estas comparaciones se realizaron primeramente por año y luego interanualmente.

Tabla 10. Comparaciones y agrupaciones entre las categorías de los sistemas meteorológicos.

Categorías comparadas		Categoría agrupada	p
Categoría 1	Categoría 2		
2015 – 2016			
Disturbio tropical	Disturbio tropical y vaguada	Disturbios tropicales	0.473
Onda tropical	Onda tropical y vaguada	Ondas tropicales	0.427
Ondas tropicales	Disturbio tropical	Tropicales	0.133
Ondas tropicales	Huracán	----	0.105
Disturbios tropicales	Huracán	----	0.121
Tropicales	Huracán	Ciclones*	0.074
Frente frío	Vaguada y Frente frío	Frentes fríos*	0.238
Vaguadas	Dorsal y vaguadas	Vaguadas*	1.161
Dorsal*	Dorsal y vaguadas	----	0.026
2016 – 2017			
Onda tropical	Vaguada y Onda tropical	Ondas tropicales	0.022
Ondas tropicales	Disturbio tropical	Tropicales	0.207
Ondas tropicales	Depresión tropical	----	0.016
Ondas tropicales	Tormenta tropical	----	0.293
Disturbio tropical	Depresión tropical	Tropicales 0	0.111
Disturbio tropical	Tormenta tropical	----	0.242
Depresión tropical	Tormenta tropical	----	0.099
Tropicales 0	Tormenta tropical	Tropicales 2	0.045
Tropicales	Depresión tropical	Tropicales 3	0.021
Tropicales 3	Tormenta tropical	----	0.097
Dorsal*	Dorsal y vaguada	----	0.09
Tropicales 2	Ondas tropicales	Ciclones*	0.372
Frentes fríos*	Vaguada y Frente frío*	----	0.005
Vaguadas	Dorsal y vaguada	Vaguadas*	0.483

Las categorías de los sistemas meteorológicos que fueron comparadas con los análisis de Tukey se encuentran señalados con un asterisco (*). Las categorías “Tropicales”, fueron enumerados para comparar las diferentes categorías que finalmente se agruparon en Ciclones.

Tabla 11. Categorías de los sistemas meteorológicos que fueron comparados en los análisis de Tukey.

Sistema meteorológico	<i>n</i>	
	2015-2016	2016-2017
Ciclones	45	28
Dorsales	6	9
Frentes fríos	32	20
Vaguada y Frente frío	---	9
Vaguadas	41	56

n es el número de eventos.

La categoría de ciclones engloba los sistemas de disturbios tropicales (disturbio tropical y vaguada, con disturbio tropical), ondas tropicales (onda tropical y vaguada, con onda tropical) y huracán para el 2015-2016. Para el 2016-2017, además de las categorías mencionadas, incluye a los sistemas de depresión tropical y tormenta tropical. Las dorsales no están agrupadas con otra categoría, solo son la categoría de dorsal, pero se les cambio el nombre a plural. Los frentes fríos solo están agrupados para el primer año, con vaguada y frentes fríos. Y las vaguadas agrupan vaguadas con dorsal y vaguadas.

De manera general se observó que los ciclones generaron los mayores volúmenes de caudal total (Q_T), flujo base (Q_b) y flujo rápido (Q_r), en cambio las dorsales estuvieron relacionadas con la generación de los flujos más bajos de Q_T y Q_b principalmente. En cuanto a los tiempos de reacción de la cuenca, los ciclones se caracterizaron por producir los tiempos de recesión (T_r) más prolongados, mientras que los frentes fríos produjeron los tiempos de retraso (L) y de pico (T_p) más largos. Finalmente, los mayores picos de descarga ($Q_{m\acute{a}x}$) fueron observados durante los ciclones tropicales y menores picos estuvieron asociados con la presencia de las dorsales (Tabla 12 y 13).

Entre años, se observó que los ciclones tropicales y las vaguadas generaron los mayores flujos (Q_T , Q_b y $Q_{m\acute{a}x}$) en el segundo año. Así también fueron más prolongados los tiempos L y T_p , bajo la presencia de ciclones. En el caso de los frentes fríos, los dos años mostraron características muy similares, solamente difirieron en la variable T_r , con tiempos más largos en el primer año (Tabla 14).

Tabla 12. Comparación de los valores promedios de las características dependientes de cada sistema meteorológico del año 2015-2016.

Sistemas meteorológicos	n	Q_T (mm)	Q_b (mm)	Q_r (mm)	Q/P	Q_b/P	Q_r/P	$Q_{m\acute{a}x}$ (m ³ /s)	L (horas)	T_p (horas)	T_r (horas)
Ciclones	45	5.9 ± 2.5 ^a	5.2 ± 2.2 ^a	0.7 ± 0.4 ^a	0.2 ± 0.1 ^b	0.2 ± 0.1 ^b	0.02 ± 0.02 ^a	3.7 ± 0.9 ^a	3.5 ± 1.5 ^b	2.2 ± 1.2 ^b	19.6 ± 9.2 ^a
Dorsales	6	1.2 ± 0.5 ^c	1.1 ± 0.6 ^c	0.1 ± 0.04 ^b	0.4 ± 0.1 ^a	0.4 ± 0.1 ^a	0.03 ± 0.02 ^a	1.3 ± 0.9 ^c	6.6 ± 3.7 ^{ab}	4.8 ± 4.0 ^{ab}	7.6 ± 4.1 ^b
Frentes fríos (FF)	32	4.1 ± 2.9 ^b	3.7 ± 2.5 ^b	0.4 ± 0.5 ^{ab}	0.3 ± 0.2 ^a	0.3 ± 0.1 ^a	0.03 ± 0.01 ^a	2.2 ± 0.2 ^{bc}	7 ± 4.9 ^a	5.5 ± 4.8 ^a	17 ± 10.5 ^{ab}
Vaguadas	41	3.1 ± 2.3 ^{bc}	2.7 ± 2.1 ^{bc}	0.3 ± 0.4 ^b	0.3 ± 0.2 ^a	0.3 ± 0.2 ^a	0.03 ± 0.02 ^a	2.6 ± 1.2 ^b	4.1 ± 2.3 ^b	2.3 ± 1.7 ^b	12 ± 8.5 ^b

Tabla 13. Comparación de los valores promedios de las características dependientes de cada sistema meteorológico del año 2016-2017.

Sistemas meteorológicos	n	Q_T (mm)	Q_b (mm)	Q_r (mm)	Q/P	Q_b/P	Q_r/P	$Q_{m\acute{a}x}$ (m ³ /s)	L (horas)	T_p (horas)	T_r (horas)
Ciclones	28	7.4 ± 2.9 ^a	6.8 ± 2.5 ^a	0.6 ± 0.6 ^a	0.2 ± 0.1 ^b	0.9 ± 0.04 ^{ab}	0.01 ± 0.01 ^b	4.4 ± 0.8 ^a	6 ± 3.9 ^{ab}	4.3 ± 2.9 ^{ab}	16.3 ± 6.9 ^a
Dorsales	9	1.5 ± 0.8 ^c	1.4 ± 0.8 ^c	0.1 ± 0.2 ^b	0.3 ± 0.2 ^{ab}	0.9 ± 0.1 ^{ab}	0.02 ± 0.03 ^{ab}	1.9 ± 0.8 ^c	6.8 ± 4.0 ^{ab}	3.5 ± 2.4 ^{ab}	6.1 ± 4.4 ^c
Frentes fríos (FF)	20	3.5 ± 2.5 ^{bc}	3.3 ± 2.4 ^{bc}	0.3 ± 0.2 ^b	0.3 ± 0.2 ^{ab}	0.9 ± 0.1 ^b	0.03 ± 0.03 ^a	2.5 ± 1.1 ^{bc}	8.1 ± 6.2 ^a	5.4 ± 4.8 ^a	9.7 ± 5.7 ^{bc}
FF y vaguada	9	5.8 ± 3.9 ^{ab}	5.4 ± 3.9 ^{ab}	0.4 ± 0.3 ^{ab}	0.2 ± 0.1 ^b	0.9 ± 0.1 ^{ab}	0.02 ± 0.02 ^{ab}	3.3 ± 1.9 ^b	6 ± 4.5 ^{ab}	4.6 ± 4.5 ^{ab}	18 ± 5.4 ^a
Vaguadas	56	4.6 ± 2.2 ^{bc}	4.4 ± 2.1 ^b	0.2 ± 0.2 ^b	0.4 ± 0.2 ^a	0.9 ± 0.04 ^a	0.02 ± 0.01 ^{ab}	2.3 ± 0.8 ^b	4.8 ± 3.1 ^b	3 ± 1.6 ^b	12.8 ± 6.8 ^{ab}

Los valores presentados son los promedios ($\pm \sigma$) de cada variable dependiente que caracterizan a los sistemas meteorológicos. Sobre la misma columna de cada variable se realizaron las comparaciones, los valores que no comparten la(s) misma(s) letra(s) del alfabeto, fueron diferentes significativamente ($p < 0.05$). Para su mejor visualización, se resaltaron en color azul los valores más altos (letra a), en verde los valores intermedios (letra b) y en amarillo los valores más bajos (letra c). Los que no tienen color presentaron características similares. La combinación de letras en una misma variable significa que presentó características similares a las de otras categorías, por ejemplo los Q_b de los FF (2016-2017) presentó letras bc, esto significa que sus Q_b fueron estadísticamente parecidos a los de las vaguadas (letra b) y a las dorsales (letra c). n corresponde al número de eventos.

Tabla 14. Comparación entre los años estudiados, de los valores promedios de las características dependientes de los ciclones tropicales, los frentes fríos y las vaguadas.

Año hidrológico	<i>n</i>	Q_b/P	Q/P	Q_T (mm)	Q_b (mm)	$Q_{máx}$ (m ³ /s)	<i>L</i> (horas)	T_p (horas)	Q_r (mm)	T_r (horas)	Q_r/P
Ciclones											
2015-2016	45	0.2 ± 0.08 ^a	0.2 ± 0.09 ^a	5.9 ± 2.5 ^b	5.2 ± 2.2 ^b	3.6 ± 0.9 ^b	3.5 ± 1.5 ^b	2.2 ± 1.2 ^b	0.7 ± 0.4 ^a	19.6 ± 9.2 ^a	0.02 ± 0.01 ^a
2016-2017	28	0.2 ± 0.07 ^a	0.2 ± 0.07 ^a	7.4 ± 2.9 ^a	6.8 ± 2.5 ^a	4.4 ± 0.8 ^a	6.0 ± 4.9 ^a	4.3 ± 2.9 ^a	0.6 ± 0.6 ^a	16.3 ± 6.9 ^a	0.01 ± 0.008 ^b
Frentes fríos											
2015-2016	32	0.3 ± 0.2 ^a	0.3 ± 0.2 ^a	4.1 ± 2.9 ^a	3.7 ± 2.5 ^a	2.2 ± 1.0 ^a	7.0 ± 4.9 ^a	5.5 ± 4.8 ^a	0.4 ± 0.5 ^a	17.0 ± 10.5 ^a	0.03 ± 0.01 ^a
2016-2017	20	0.3 ± 0.2 ^a	0.3 ± 0.2 ^a	3.5 ± 2.5 ^a	3.3 ± 2.4 ^a	2.5 ± 1.1 ^a	8.1 ± 6.2 ^a	5.4 ± 4.8 ^a	0.3 ± 0.2 ^a	9.7 ± 5.7 ^b	0.03 ± 0.03 ^a
Vaguadas											
2015-2016	41	0.3 ± 0.2 ^b	0.3 ± 0.2 ^b	3.1 ± 2.3 ^b	2.7 ± 2.1 ^b	2.6 ± 1.2 ^b	4.1 ± 2.3 ^a	2.3 ± 1.7 ^a	0.3 ± 0.4 ^a	12.0 ± 8.5 ^a	0.03 ± 0.02 ^a
2016-2017	56	0.4 ± 0.2 ^a	0.4 ± 0.2 ^a	4.6 ± 2.2 ^a	4.4 ± 2.1 ^a	3.3 ± 0.8 ^a	4.8 ± 3.1 ^a	3.0 ± 1.6 ^a	0.2 ± 0.2 ^a	12.7 ± 6.8 ^a	0.02 ± 0.01 ^b

Los valores presentados son los promedios ($\pm \sigma$) de cada variable dependiente que caracterizan a los sistemas meteorológicos. Sobre la misma columna de cada variable se realizaron las comparaciones, los valores que no comparten la misma letra del alfabeto, fueron diferentes significativamente ($p < 0.05$). Para su mejor visualización, se resaltaron en color azul los valores más altos. *n* es el número de eventos.

3.4 Serie histórica de precipitación y su asociación con distintos eventos meteorológicos a diferentes escalas

De los 11 años hidrológicos (mayo 2006-abril 2017) que se tienen registrados en la cuenca, el rango de precipitación anual observado fue de 2508 mm a 3462 mm, con un promedio anual de lluvia de 2922 ± 348 (σ) mm (Figura 17; Tabla A12, Anexo). Los años más lluviosos fueron 2008-2009 (3462 mm), 2013-2014 (3403 mm) y 2006-2007 (3213 mm), en cambio los menos lluviosos fueron 2016-2017 (2508 mm), 2010-2011 (2536 mm) y 2015-2016 (2545 mm).

3.4.1 Época de lluvias (mayo-octubre)

En estos 11 años (2006-2017), la precipitación promedio durante la época de lluvias fue de 2327 ± 359 (σ) mm, con un rango observado entre 1866 mm y 3064 mm. Las épocas con los mayores registros de lluvia fueron 2008, 2009 y 2006; en cambio las épocas de lluvias con los menores registros fueron 2016, 2015 y 2014 (Figura 17A; Tabla A12, Anexo).

A nivel mensual, las condiciones de sequía presentadas en la época de lluvias durante este periodo de análisis fueron poco frecuentes, en el 17% de los meses se observaron condiciones anormalmente secas (D0), las cuales abarcaron toda el área de la cuenca; la menor cobertura se observó en el 2015 ($\leq 23\%$) seguida por el 2010 (51%). Las condiciones de sequía de intensidad moderada (D1), se observaron en el 14% de los meses, cubriendo toda la superficie de la cuenca. Fueron aún menos frecuentes las condiciones de sequía severa (D2), ocurriendo solamente el 3% de los meses, y con una cobertura total para la cuenca en el año 2011. Y fue también raro observar condiciones de sequía extrema (D3), tan solo el 2% de los meses en toda la cuenca. Para más información ver Anexo, Tabla A13.

Durante esta década fue muy frecuente observar la canícula de intensidad débil con aproximadamente un mes de duración (Figura 17A; Anexo, Tabla A14 y Figura A3) y muy poco frecuente no observarla (2009, 2011 y 2016). La probabilidad de observar canículas

de intensidad moderada y fuerte fue muy baja, presentándose esta situación únicamente en los años 2008 y 2015.

Con respecto al fenómeno de El Niño o La Niña, sobresalieron por su intensidad el evento de La Niña en 2010 y El Niño en 2015 (Figura 17A). Si bien los eventos de La Niña no mostraron una relación directa con la precipitación a nivel estacional, en el evento de El Niño en 2015, sí se observaron las menores entradas de precipitación durante la temporada de lluvias en los 11 años analizados.

3.4.2 Época de secas (noviembre-abril)

La precipitación promedio en la época de secas fue de 595 ± 168 (σ) mm, con un rango de 331 a 835 mm. Las épocas de secas con las mayores precipitaciones fueron 2006-2007 (835 mm), 2014-2015 (786 mm) y 2011-2012 (775 mm); y las épocas con las menores precipitaciones fueron en 2010-2011 (331 mm), 2008-2009 (398 mm) y en 2012-2013 (468 mm) (Figura 17B; Tabla A12, Anexo).

Durante estos 11 años, las condiciones de sequía fueron anormalmente secas (D0) en el 14% de los meses, cubriendo más de la mitad del área de la cuenca ($\geq 51\%$) (Tabla A13, Anexo), mientras que la sequía de intensidad moderada (D1) ocurrió el 5% de los meses con una cobertura total de la cuenca. La concurrencia de las condiciones de sequía en un mismo año hidrológico, se observaron principalmente en los años 2008-2009, 2011-2012 y 2009-2010.

Finalmente, se destaca la presencia de El Niño de intensidad fuerte en la época de secas de 2015-2016 (Figura 17B).

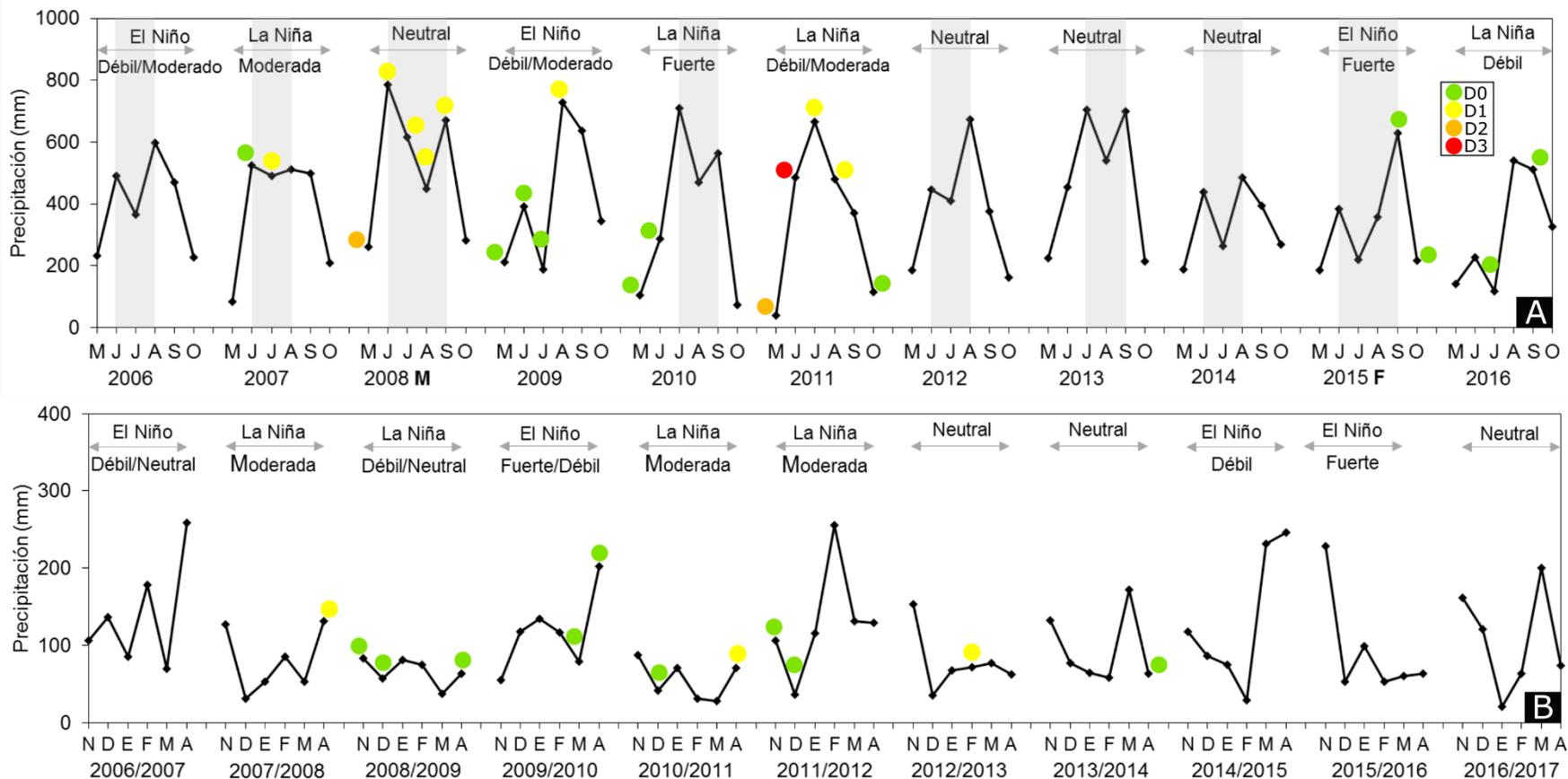


Figura 17. Serie de precipitación mensual, a los 2100 m (línea negra) y eventos meteorológicos registrados durante el período 2006-2017. (A) Época de lluvias. (B) Época de secas.

El círculo junto al registro de precipitación, indica la presencia e intensidad de la sequía (ver colores). D0, anormalmente seco; D1, sequía moderada; D2, sequía severa y D3, sequía extrema. En sombreado se señala la presencia de la canícula, si no hay letra en el año, fue una canícula débil; M, fue canícula moderada y F, canícula fuerte. En la parte superior de cada panel se señala el período de lluvias/secas y se indica si se observó un evento de El Niño, La Niña o neutral, y su intensidad.

3.4.3 Años hidrológicos estudiados (2015-2017)

La precipitación en la cuenca durante los dos años hidrológicos estudiados (mayo 2015-abril 2017), fue muy similar (7% de diferencia), y también durante las épocas de lluvias (2% de diferencia) (Figura 17; Tabla A12, Anexo). Por otro lado, este periodo solamente registró condiciones anormalmente secas (D0) en cuatro meses. En el primer año de estudio, esto solamente se observó en la parte alta de la cuenca, correspondiendo al 5% y 23% del área total de la cuenca en los meses de septiembre y octubre de 2015, respectivamente. En cambio, en el segundo año, estas condiciones se presentaron para toda la cuenca en los meses de julio y septiembre de 2016 (Figura 18).

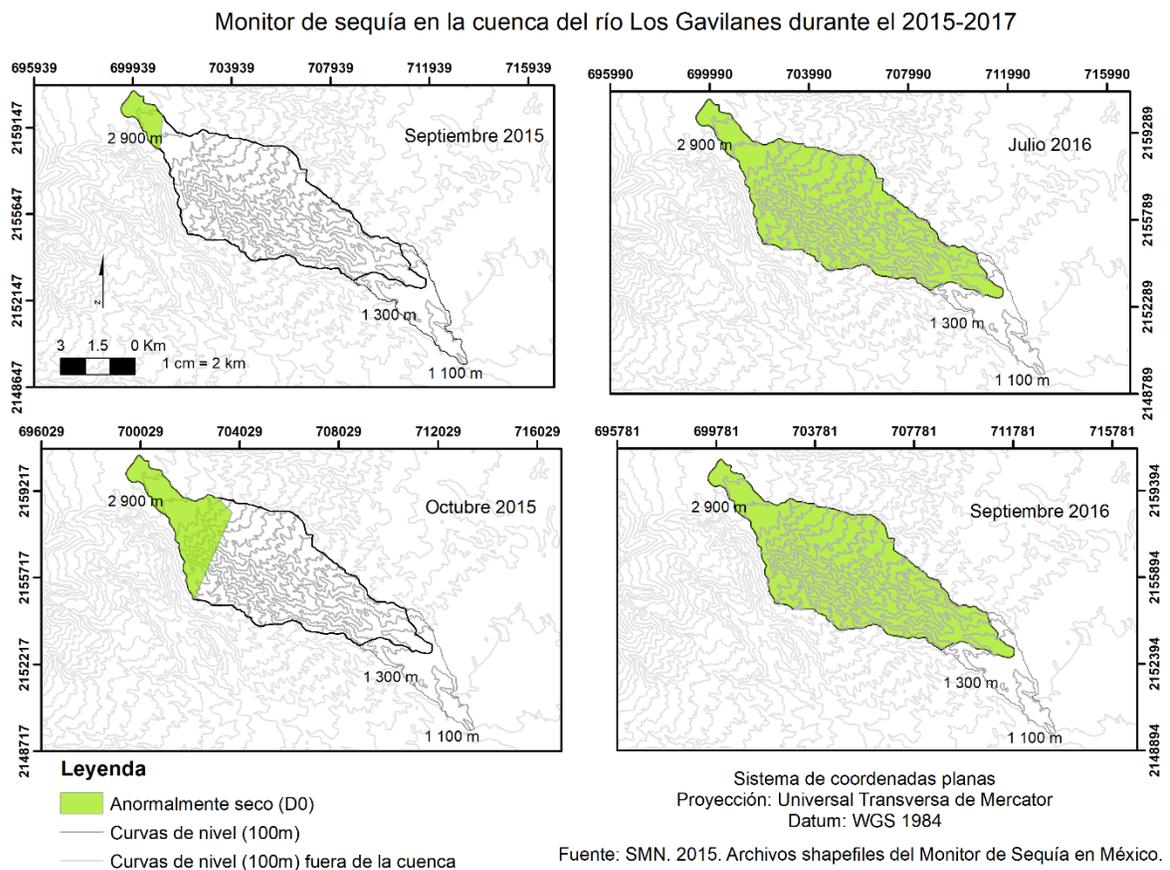


Figura 18. Mapa de las condiciones de sequía en la cuenca del río Los Gavilanes durante los años hidrológicos 2015-2017.

En cuanto a la canícula, ésta se presentó con intensidad fuerte en la época de lluvias de 2015, observándose una reducción de la precipitación en los dos pluviómetros instalados al interior de Los Gavilanes (1450 y 2100 m s.n.m) (Tabla 15, Figura 19A1, A2 y AP). Se observó un mayor efecto de la canícula a los 1450 m (Figura 19A1), sin embargo en ambas altitudes tuvo una duración de dos meses (junio y julio). En cambio, durante la época de lluvias de 2016 la canícula sólo se observó en el registro de lluvia a los 1450 m, con una intensidad moderada y con un mes de duración (julio) (Tabla 15, Figura 19B1, B2 y BP).

Por último, un evento de El Niño de intensidad fuerte estuvo presente en el año hidrológico 2015-2016, así también se observó un evento de La Niña de intensidad débil en la época de lluvias de 2016, mientras que condiciones neutrales prevalecieron durante la época de secas de 2016-2017.

Tabla 15. Intensidad de la canícula de la época de lluvias del 2015 y 2016, para diferentes registros de lluvia

Época de lluvias	Intensidad de la canícula (%)		
	Pprom	2100 m s.m.m.	1450 m s.m.m.
2015	26	22	30
2016	13.2	---	12

Pprom son los datos promedio de los dos pluviómetros instalados a 1450 y 2100 m, de acuerdo al período de tiempo estudiado.

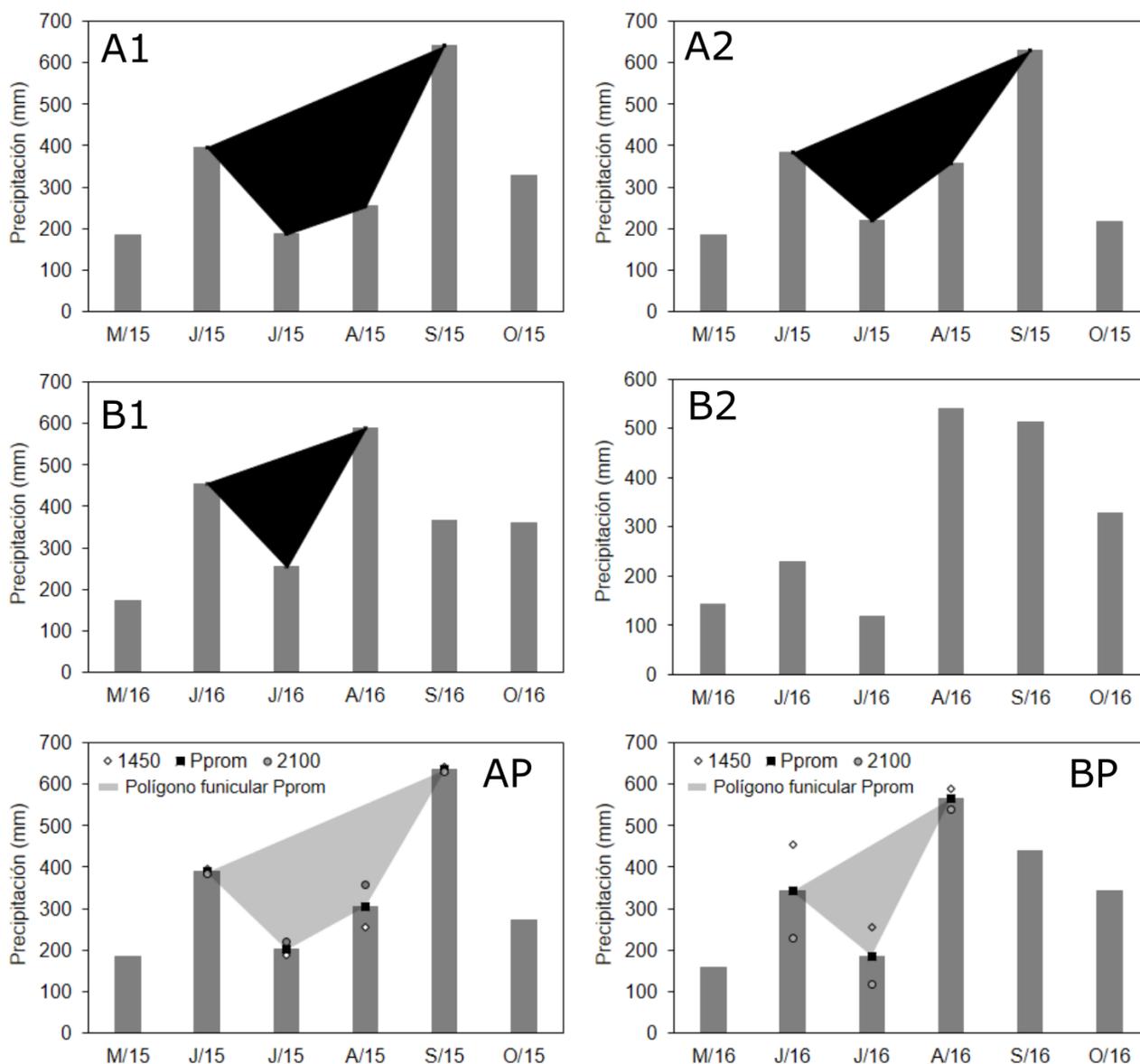


Figura 19. Polígonos funiculares de las épocas de lluvias de 2015 y 2016. A1: Datos del pluviómetro a los 1450 m de 2015; A2: Datos del pluviómetro a los 2100 m de 2015; AP: Datos promediados de ambas altitudes para el 2015; B1: Datos del pluviómetro a los 1450 m de 2016; B2: Datos del pluviómetro a los 2100 m de 2016; BP: Datos promediados de ambas altitudes para el 2016. En las Figuras referidas con la letra P se señalan los registros mensuales de precipitación por cada pluviómetro y por el promedio de estos.

4 Discusión

4.1 Comportamiento hidrológico anual y estacional de la cuenca

La cuenca mostró un mayor caudal anual (+33%) y un mayor coeficiente de escurrimiento (Q/P) (+22%) en el segundo año (2016-2017) comparado con el primer año (2015-2016). Cabe que señalar que si bien la precipitación anual presentó muy pocas diferencias (2%), las características de los eventos de precipitación sí difirieron entre años como se discutirá más adelante.

Esta diferencia en el caudal puede deberse, por un lado, a entradas de precipitación que no fueron registradas en la cuenca. Como se observa en la Figura 1, las mediciones de precipitación se concentraron en la parte oriental, debido al difícil acceso en los demás sitios de la cuenca. Aunado a lo anterior, el río Huehueyapan (19.7 km²), principal tributario del río Los Gavilanes, drena la vertiente occidental de la cuenca en donde justamente no existen registros de precipitación (Muñoz-Villers et al., 2016). Por consiguiente, hay una incertidumbre en el ingreso de lluvia en la cuenca, lo cual puede haber conllevado a un mayor coeficiente de escurrimiento (Q/P). Respecto a esto, el rango del Q/P promedio a nivel mensual de los dos años hidrológicos (20-40%, Tabla A7 y A8, Anexo), indica que no más allá del 40% de lo que llueve se refleja en el río. Por lo que es posible que a otras altitudes no cuantificadas, se observe mayor precipitación y a las cuales el río respondió más en el segundo año. Asimismo, fue interesante observar que el 64% de los hidrogramas analizados en el primer año, respondieron a la precipitación procedente de los 2100 m de altitud; en cambio, en el segundo año el 69% de los eventos respondieron a la lluvia registrada a los 1450 m (Figura A4, Anexo). Además, la parte media y alta de la cuenca (1800-3000 m s.n.m) constituyen las principales áreas de recarga de agua subsuperficial (Muñoz-Villers et al., 2016, 2016b). Por esta razón es muy importante densificar la red de pluviómetros, para caracterizar mejor la variabilidad espacial y temporal de la lluvia, y de igual forma la respuesta hidrológica de la cuenca.

Otra posible hipótesis, es que la variabilidad observada en el caudal anual se deba a las condiciones de precipitación de hace 2 años, ya que los tiempos de residencia estimados del flujo base para la cuenca del río Los Gavilanes es del orden de 2.2 años (Muñoz-Villers et al., 2016), lo cual pudo haber influido en ambos años. Al respecto, la época de lluvias del año hidrológico anterior (2014-2015) fue la tercera época con el menor registro de precipitación de los 11 años con datos (14%, 288 mm menor al promedio estacional por estos 11 años). Por lo cual la disminución de lluvia observada en el 2014-2015 pudo haberse reflejado en la época de lluvias de 2015, año en el cual se observó una reducción del caudal.

Por otro lado, este mayor escurrimiento en el segundo año también podría deberse a la falla del barómetro, ya que desde febrero de 2017 las mediciones registradas del instrumento sobreestimaban el caudal medido. Si bien, esto fue corregido con correlaciones de datos de presión atmosférica de la cuenca vecina, el río Pixquiac (Figura A1, Anexo), el posible uso de datos de otras cuencas pudo haber influido en las estimaciones de caudal anual.

Con respecto a la variabilidad estacional y anual del caudal, en cuencas húmedas templadas se ha observado una mayor movilización de agua joven debido a la saturación del almacenamiento subsuperficial, llamado efecto de almacenamiento inverso (*inverse storage effect*) (Benettin et al., 2017; Fang et al., 2019; Harman 2015). Sin embargo esto no es factible en la cuenca estudiada, ya que en microcuencas de bosque mesófilo de montaña del sitio de estudio, se ha observado un amortiguamiento de eventos extraordinarios de lluvia, al disminuir la escorrentía superficial y movilizarse grandes flujos de agua subsuperficialmente (> 86% es flujo base). Esto debido al tipo de suelo (Andosol), su profundidad (1 a 1.5 m en el 65% de la cuenca, valor promedio) y sus altas conductividades hidráulicas (1 a 15 mm/h, en promedio) (Muñoz-Villers et al., 2016; Muñoz-Villers y McDonnell, 2012; 2013). Por lo que es posible que las características de precipitación observadas en el segundo año, anteriormente mencionadas, promovieran la movilización del agua en el suelo y del agua subterránea; y de esta forma se incrementara el caudal de la cuenca y, consecuentemente el coeficiente de escurrimiento anual.

A nivel estacional, se aprecia mejor el aumento del caudal en el segundo año hidrológico, el cual incrementó 30% en la época de lluvias y 40% en la época de secas.

Para la época de lluvias del segundo año, se observaron eventos con mayores cantidades de precipitación e intensidades promedio y máxima. Por lo que esto podría indicar que los caudales producidos en el segundo año, pudieron ser producto de las características de los eventos de lluvia registrados, ya que en un trabajo anterior, Guzmán-Huerta (2017) encontró que el caudal total y el flujo base están fuertemente correlacionados con la cantidad de precipitación (≥ 0.83 , r_s), intensidad máxima (≥ 0.65 , r_s) y tiempo de duración (≥ 0.61 , r_s) de los eventos de lluvia. En la época relativamente seca, también se registraron mayores entradas de lluvia e intensidades promedio y máximas en el segundo año.

Si bien, a escala anual sí se observó una diferencia entre el caudal anual de ambos años hidrológicos. Las métricas hidrológicas mostraron poca variación del régimen del caudal diario (-2 ; S_{FDC}), la variabilidad que llegó a presentar fue sobre sus valores promedios (0.5 ; CV_Q); y así también el caudal tuvo una contribución alta de flujo base (0.96 , k) durante el periodo de estudio.

Por otro lado, el coeficiente de escurrimiento anual (Q/P) de la cuenca del río los Gavilanes, siendo del 52% en el 2015-2016 y del 74% en el 2016-2017, se encuentra dentro del rango reportado en otras cuencas tropicales. Por ejemplo, en Puerto Rico, en tres cuencas tributarias de tamaño similar ($39-47 \text{ km}^2$) al del río Los Gavilanes (35 km^2), con suelos Utisoles provenientes de materiales volcánicos con granodiorita y caliza, se observaron Q/P de 45 y 50% en cuencas dominadas por café bajo cobertura forestal (Beck et al., 2013). En Costa Rica, en la cuenca Sarapiquí (74 km^2), cubierta por bosque de niebla (66%) y con suelos Andisoles (63%) e Inceptisoles (37%), con floraciones piroclásticas como material parental, se determinó un valor de Q/P del 76% (Birkel y Soulsby, 2012), valor semejante al mayor valor observado en Los Gavilanes (2016-2017, 74%). En Ecuador, en la cuenca del río San Francisco (75 km^2) y en dos subcuencas de ésta, de 64 km^2 y 35 km^2 , con suelos Histosoles (66-74%) y Regosoles (15-21%), con material parental de rocas metamórficas (semipelitas, filitas y

cuarcita) y dominadas por bosque de niebla (65-68%) y presencia de sub-páramo (21-29%). También se observaron altos valores de Q/P , de 65 y 75% en las cuencas más grandes, y de 81% en la cuenca más pequeña (Crespo et al., 2011).

4.2 Fenómenos meteorológicos

Por evento, los ciclones tropicales se caracterizaron por generar los mayores caudales, flujos rápido y base, y picos máximos de descarga. Al respecto, Muñoz-Villers y McDonnell (2013) analizaron respuestas hidrológicas en microcuencas de bosque mesófilo de montaña (< 0.3 km²), de las cuales dos de ellas fueron generadas por ondas tropicales, y siendo solamente una de ellas la que generó los mayores caudales, flujos y picos de descarga en comparación con los otros eventos de lluvia. Lo cual es congruente con lo observado en este trabajo, ya que los ciclones generaron los mayores flujos por evento.

Si bien a escala de evento, los ciclones tropicales son de los sistemas que producen más precipitación durante la época de lluvias (Ponette-González et al., 2010), en ocasiones puede haber influencia entre los ciclones tropicales y los frentes fríos, interacción que puede ocasionar desastres naturales extraordinarios, debido a la generación de grandes volúmenes de lluvia y escurrimiento superficial (Acevedo-Rosas, 2018; SMN, 2008). En este estudio, se observaron mayores cantidades de precipitación por la interacción de estos sistemas (49 a 60 mm), sin embargo los caudales generados no fueron los más grandes (5 a 8 mm; Tabla 8).

Cabe mencionar que durante el periodo estudiado (2015-2017) ningún ciclón tropical tocó tierra en el estado de Veracruz, pero de haber impactado, es probable que se hubiesen observado mayores flujos de precipitación y caudal. Ponette et al. (2010) sí reportaron ciclones que tocaron tierra durante sus años de estudio (2005 y 2007) en forma de tormentas tropicales y huracanes. Asimismo observaron que estos ciclones triplicaron (109 mm) la precipitación promedio estacional, y el tiempo de duración de sus eventos de lluvia osciló en un rango de 71 a 246 h, el cual fue mucho mayor al tiempo promedio observado en este trabajo.

De acuerdo a los resultados de este trabajo, se confirma la hipótesis 1 y 2 planteadas, pero también se debe considerar que las vaguadas y su combinación con dorsales son sistemas de gran importancia durante la época de lluvias.

4.3 Sequía

Las condiciones de sequía más sobresalientes se presentaron en los años hidrológicos 2008-2009 y 2011-2012, abarcando el 60% de sus meses. También se observó que estas condiciones estuvieron más presentes en la época de lluvias, cubriendo en ambos años el 83% (5 meses) del tiempo. Y de estas sequías, las más pronunciadas se presentaron en el 2011, tanto a escala anual como en la época de lluvias. Al respecto, las condiciones de sequía que presentó ese año fueron en mayo (sequía severa), junio (sequía extrema), julio y agosto (sequía moderada), y en octubre (condiciones anormalmente secas). Y estacionalmente, fue la cuarta época de lluvias con el menor registro de precipitación (2157 mm).

De acuerdo a los reportes anuales del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y los mensuales de Monitor de Sequía de América del Norte (MS), éstos indicaron que el déficit de lluvia en el estado de Veracruz fue ocasionado y acentuado por las bajas precipitaciones registradas desde la época de secas anterior (desde octubre de 2010). Cabe mencionar que el MSM es parte del MS. Así también reportaron bajos volúmenes de agua en las presas (disminución del 42 al 60% de su capacidad) y Veracruz fue el 7° estado con mayores incendios forestales registrados, de enero a mayo de 2011 (SMN, 2011a, b), por lo que incluso algunos municipios declararon emergencia por sequía. Así también, en junio de 2011 se presentó el único caso de sequía extrema, mes en el que existió un retraso de la ocurrencia de los fenómenos tropicales a nivel nacional (SMN 2011b). Por lo que las condiciones de sequía de 2011 parecen tener una relación con los registros a escala nacional del SMN. Acerca de los registros de precipitación en la cuenca, sólo se observó que en mayo de 2011 (con D2) se registró la menor precipitación de los 11 años monitoreados (40 mm). Sin embargo al comparar con los datos de lluvia mensual medidos en la cuenca, el mes de junio presentó un registro semejante al promedio mensual de los 11 años, (+9%, 38 mm). Así también, al analizar los registros mensuales de cada altitud (1400 y 2100 m s.n.m) de la

cuenca de estudio, los registros mínimos de lluvia no concordaron con las categorías más severas del MSM.

Por otro lado, en el período en que se estudió la precipitación y caudal en la cuenca (2015-2017) se presentaron condiciones anormalmente secas en algunos meses (en septiembre y octubre de 2015; y en julio y septiembre de 2016). Sin embargo estas condiciones no representan condiciones de sequía, solamente indican la posibilidad de que se presente este fenómeno, por lo que podría no tener un efecto directo en el caudal. En este caso las más representativas se presentaron en el segundo año estudiado. Al respecto, el SMN (2016a) reportó que las condiciones cálidas y secas observadas en septiembre de ese año fueron favorecidas por la presencia de sistemas semipermanentes de alta presión, la Oscilación del Ártico (fase positiva) y del patrón de transición del Pacífico, es decir, teleconexiones que afectaron las condiciones atmosféricas.

Con respecto al caudal, tampoco se observó una relación con las condiciones de sequía del MSM. Por lo que estas categorías de sequía parecen tener poca relación con los menores registros de precipitación de la cuenca estudiada y ninguna conexión con el caudal. De igual forma, hay que tener cautela con estas condiciones de sequía, ya que los monitoreos del MSM analizan condiciones a escala nacional, por lo que este contraste se puede deber a la variación de la información. Puesto que en la cuenca estudiada se contó con más datos a escala local, ya que se instalaron dos pluviómetros dentro de la cuenca. En cambio, el MSM tiene la información a escala nacional y en este caso el SMN no cuenta con ninguna estación dentro de la cuenca estudiada (Muñoz-Villers et al., 2016b). Con base en lo anterior, aún se requiere mejorar la resolución de estos monitoreos de gran escala o se deben de complementar y comparar con otras herramientas, como el Monitor de Sequías Multivariado en México (MoSeMM, <http://201.116.60.187/index.html>).

4.4 Canícula

En los 11 años de estudio de la lluvia, la cuenca estuvo influenciada en general por canículas débiles (6 años) y también por la ausencia de ella (3 años). Sin embargo, existieron dos años (2008 y 2015) en los que su intensidad registrada fue de moderada a fuerte.

Dentro de las canículas débiles observadas en la cuenca y con una duración de un mes, los reportes del clima anual del SMN (2013, 2014) indicaron que las condiciones del 2013 y 2014 fueron más adversas (canícula fuerte) y prolongadas (\geq dos meses) en el sur y centro de Veracruz, lo cual contrasta con lo analizado en este trabajo. Esto podría deberse a la falta de estaciones meteorológicas, tanto en Veracruz como en el país, lo cual impide caracterizar la lluvia y por lo tanto, el comportamiento de este tipo de fenómenos climáticos a escala local. Por lo que se resalta de nuevo la gran importancia de densificar las estaciones meteorológicas, con mediciones de largo plazo.

En cuanto a las canículas fuertes, no se cuenta con un reporte de lo observado en el 2008 ya que los reportes del SMN se encuentran disponibles a partir del 2011. Mientras que la canícula fuerte de 2015 presentó las mismas características a las estatales (del norte al centro de Veracruz), es decir de fuerte intensidad y con dos meses de duración. Condiciones que también fueron similares a las observadas en gran parte del país, desde Coahuila hasta Quintana Roo (SMN, 2015b). En la cuenca se observó que la precipitación registrada en la época de lluvias de 2015 fue menos lluviosa (-17%, 338 mm) al promedio estacional observado durante los 11 años de medición de lluvia.

Así también, es escasa la información acerca de los efectos de la canícula en la precipitación y en la generación de flujos y caudales. Acerca del caudal, en la época de lluvias de 2015 se observó una reducción del 30% (274 mm), esto en comparación a la época de lluvias de 2016, en la cual sólo se observó canícula a los 1450 m.

4.5 El Niño, La Niña y condiciones neutrales

En el periodo de estudio de 11 años se observó, en términos generales, que había condiciones más húmedas con eventos neutrales, débiles o moderados de El Niño en la época de lluvias; mientras que con eventos fuertes de El Niño la precipitación se reduce. En el caso de la época seca, las condiciones menos húmedas se presentaron con mayor frecuencia, bajo condiciones de La Niña de intensidad débil y moderada; en cambio, las más húmedas se relacionaron con eventos de El Niño débil.

Durante el periodo de estudio 2015-2017, se presentó El Niño fuerte en todo el año hidrológico 2015-2016. Siendo más interesante el que se observó en la época de lluvias de 2015, ya que en él se observaron condiciones menos lluviosas al ser la segunda temporada de lluvias con los registros más bajos de precipitación (1989 mm).

Cabe resaltar que el evento fuerte de El Niño registrado en la época de lluvias de 2015 también estuvo asociado a un evento fuerte de la canícula, presentando así menores registros estacionales de caudal, 30% (274 mm), en comparación a la de 2016. Asimismo, a nivel de evento, se observaron menores flujos de caudal total (32%, 1.3 mm), flujo base (43%, 1.5 mm), picos de descarga (23%, 0.7 m³/s), tiempos de pico (45%, 1 h) y de retraso (25%, 1 h), en la época de lluvias.

Este evento de 2015 fue declarado como uno de los eventos más intensos de El Niño desde 1950, el cual ocasionó un déficit de lluvia en el sureste del país, debido a la baja actividad convectiva en el océano Atlántico, la escasa actividad ciclónica, la posición anormal de la Zona de Convergencia Intertropical y de las anomalías positivas de radiación saliente de onda larga (SMN, 2015b).

Estudios hidrológicos en el centro de Veracruz, han reportado que durante la época de lluvias y durante un evento de El Niño hay condiciones menos húmedas de precipitación y caudal, en comparación a condiciones neutrales (Goldsmith et al., 2012) o de La Niña moderada (Muñoz-Villers et al., 2012). En cambio durante la época seca, y con presencia de El Niño, hay

mayores registros de precipitación (Alvarado-Barrientos et al., 2015; Goldsmith et al., 2012; Holwerda et al., 2010; Muñoz-Villers et al., 2012; Ponette et al., 2010), niebla (Ponette et al., 2010) y caudal (Muñoz-Villers et al., 2012) en contraste con eventos de La Niña (Tabla A15, Anexo), lo cual concuerda con lo observado en este trabajo.

Con este análisis y sus respectivos resultados, se corrobora la hipótesis 3, mientras que la hipótesis 4 sólo se rechaza durante la época seca, ya que se observaron condiciones menos húmedas durante La Niña.

Con respecto a la interacción y variación entre los eventos aquí analizados, se ha reportado que la presencia de la canícula puede estar influenciada por El Niño y por la oscilación del Atlántico Norte (NAO, por sus siglas en inglés) (Torres-Alavez et al., 2010). Por lo cual, es importante analizar el impacto de la relación e interrelación de diferentes teleconexiones con la precipitación y el caudal, además de analizar el posible efecto intensificado por su interacción, para así comprender su conexión con la variabilidad de los flujos de agua.

4.6 Mejoras a la curva nivel de agua-descarga desarrollada y estimaciones de caudal

Por último, se observó que al incrementarse el número de aforos y ampliarse las mediciones sobre la sección transversal en el río, en general se disminuye la subestimación de los flujos mínimos y la sobreestimación de los flujos máximos de la corriente del río, lo cual es congruente con lo observado por Kiang et al., (2018) en la cuenca Mahurangi (47 km²) en Nueva Zelanda. Estos autores reportaron un rango alto de incertidumbre (41 a 200%) a flujos grandes (alturas ≥ 3 m), mientras que en flujos bajos (con alturas ≤ 1 m) no encontraron una importante incertidumbre. Esto debido a que su curva de altura de agua-caudal, compuesta por 78 aforos, contuvo más observaciones de estos caudales pequeños. Por lo tanto, es muy importante contar con el mayor número de aforos, en especial en caudales altos y bajos, ya que el río Los Gavilanes es un afluente de montaña, y puede llegar a presentar fuertes precipitaciones. Y por esta naturaleza, su caudal es variable, debido a las modificaciones que puede presentar su sección trasversal. Por ejemplo, en su geometría o rugosidad (del lecho del cauce), causados por el arrastre de sedimento durante eventos de precipitación fuertes.

5 Conclusiones

- Los ciclones tropicales y las vaguadas fueron los sistemas meteorológicos de escala sinóptica que caracterizaron las respuestas hidrológicas de la cuenca durante la época de lluvias. Estos sistemas no sólo ingresaron altas cantidades de precipitación, sino que también generaron los volúmenes de caudal más altos, sostenidos por tiempos largos de recesión del flujo base. Por otro lado, las vaguadas y su combinación con las dorsales fueron los sistemas meteorológicos más frecuentes en la región, responsables de producir en promedio la mayor cantidad de caudal total y flujo base por evento. Durante la época de secas, los frentes fríos fueron los sistemas dominantes generando, por sus características, flujos base altos y tiempos de reacción más lentos en la cuenca.
- Las condiciones de sequía evaluadas con el Monitor de Sequía de México mostraron poca correlación con los patrones de precipitación y caudal observados a escala mensual y estacional en la cuenca.
- En la región de estudio, cuando se presentó la canícula durante la época de lluvias, fue común observarla con una intensidad débil y con un mes de duración. Mientras que canículas fuertes fueron poco frecuentes y el único caso observado fue en 2015.
- En general se observó que condiciones débiles y moderadas de eventos de El Niño y fases neutrales en la región, estuvieron asociadas con entradas más altas de precipitación durante la época de lluvias. La influencia de El Niño durante la época de secas trae consigo mayor precipitación sin importar su intensidad; mientras que condiciones más secas estuvieron relacionadas con eventos de La Niña débil y moderada en esta temporada.
- La influencia de eventos fuertes de El Niño y la canícula tuvo una disminución importante sobre el caudal (-30%, 274 mm) del río y menos significativa en la precipitación (-2%, 43 mm), durante la época de lluvias. En cambio, El Niño de intensidad fuerte en la época seca estuvo asociado con un incremento en la precipitación (+43%, 212 mm) y una disminución del caudal (-40%, 189 mm) durante el periodo de estudio.

6 Referencias

- Acevedo-Rosas, F., 2018. Los principales desastres por hidrometeoros 1999, 2005, 2010, 2013 y 2017. Taller cambio climático y sus repercusiones en Veracruz. Taller llevado a cabo por el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana y la Cátedra UNESCO "Ciudadanía, Educación y Sustentabilidad Ambiental del Desarrollo". Xalapa, Veracruz, México.
- Acevedo-Rosas, G., 2018. Sistemas hidrometeorológicos. Taller cambio climático y sus repercusiones en Veracruz. Taller llevado a cabo por el Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana y la Cátedra UNESCO "Ciudadanía, Educación y Sustentabilidad Ambiental del Desarrollo". Xalapa, Veracruz, México
- Alvarado-Barrientos, M. S., Holwerda, F., Geissert, D. R., Muñoz-Villers, L. E., Gotsch, S. G., Asbjornsen, H., Dawson, T. E., 2015. Nighttime transpiration in a seasonally dry tropical montane cloud forest environment. *Trees*. 29, 259-274.
- Álvarez-Olguín, G., Escalante-Sandoval, C., 2017. Modes of variability of annual and seasonal rainfall in Mexico. *Journal of the American Water Resources Association*. 53, 144-157.
- Baker, D.B., Richards R.P., Loftus, T.T., Kramer, J.W., 2004. A new flashiness index: characteristics and applications to midwestern rivers and streams. *Journal of the American Water Resources Association*. 40, 503-522.
- Beck, H. E., Bruijnzeel, L. A., van Dijk, A. I. J. M., McVicar, T. R., Scatena, F. N., Schellekens, J. 2013. The impact of forest regeneration on streamflow in 12 mesoscale humid tropical catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17, 2613-2635.
- Benettin, P., Soulsby, C., Birkel, C., Tetzlaff, D., Botter, G., Rinaldo, A., 2017. Using SAS functions and high-resolution isotope data to unravel travel time distributions in headwater catchments. *Water Resources Research*. 53, 1864-1878.
- Birkel, C., Soulsby, C., 2016. Linking tracers, water age and conceptual models to identify dominant runoff processes in a sparsely monitored humid tropical catchment. *Hydrological Processes*. 30, 4477-4493.
- Bravo-Cabrera, J. L., Azpra-Romero, E., Zarraluqui-Such, V., Gay-García, C. Effects of El Niño in Mexico during rainy and dry seasons: an extended treatment. *Atmósfera*. 30 (3), 221-232.
- Brito-Castillo, L., Douglas, A.V., Leyva-Contreras, A., Lluchbelda, D., 2003. The effect of large-scale circulation on precipitation and streamflow in the Gulf of California continental watershed. *International Journal of Climatology*. 23, 751-768.
- Brito-Castillo, L., 2003. Variabilidad interanual de los escurrimientos superficiales en la vertiente continental del Golfo de California y patrones de de circulación atmosférica a 700 mb. [Tesis de doctorado]: La Paz, Baja California Sur. Centro de investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., 99.
- Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., Magner, J. A., 2012. *En Hydrology and the Management of Watersheds*. (4ª ed.), Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, 533 p.
- Caballero, L. A., Rimmer, A., Easton, Z. M., Steenhuis, T. S., 2012. Rainfall runoff relationship for a cloud forest watershed in Central America: Implications for the water resource engineering. *Journal of the American Water Resources Association*. 48, 1022-1031.
- Carrasco-Núñez, G., Lee, S., Díaz-Castellón, R., Vázquez-Selem, L., Capra, L., 2010. Evolution and hazards of a long-quiescent compound shield-like volcano: Cofre de Perote, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 197, 209-224.
- Célleri, R., Feyen, J., 2009. The hydrology of tropical andean ecosystem: Importance, knowledge status and perspectives. *Mountain Research and Development*. 29, 350-355.

- Crespo, P., Bücker, A., Feyen, J., Breuer, L., Vaché, K. B., Frede, H., 2011. Identification of the runoff generation processes in a montane cloud forest combining hydrometric data and mixing model analysis. *MASKANA*. 2, 59-80.
- Davie, T., 2008. Precipitation. *En Fundamentals of hydrology – Routledge Fundamentals of Physical Geography* (2ª ed.). Gerrard, J (Ed.). Routledge Taylor & Francis Group. Taylor & Francis e-Library, 16-19.
- Dingman, S.L., 2008. *En Physical Hydrology* (2ª ed.) Waveland Press, Inc, United States of America, 656p.
- Dingman, S.L., 2014. *En Physical Hydrology* (3ª ed.) Waveland Press, Inc, United States of America, 643p.
- Fang, Z., Carroll, R. W. H., Schumer, R., Harman, C., Wilusz, D., Willlams K. H., 2019. Streamflow partitioning and transit time distribution in snow-dominated basins as a function of climate. *Journal of Hydrology*. 570, 726-738.
- Fonseca, I., Cavalcanti, A., 2012. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century. *Atmospheric Research*. 118, 27-40.
- García, E., 2004. Primera parte. Modificaciones al sistema de Köppen. *En Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. (5ª ed.), García, E (Ed.). Instituto de Geografía UNAM, D.F., México, 21-24.
- Gash, J.H.C., 1979. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 105, 43–55.
- Geissert, D., Gómez-Tagle, C.A., Martínez-Hernández, L., Meza-Pérez, E., Enríquez-Fernández, E., 2013. Cartografía del suelo para la identificación de unidades hidroedáficas funcionales en una cuenca de montaña: Conceptos y propuesta metodológica. *En Memorias del Tercer Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Aguilar, R., Burgos, A., Gonzáles, R., Carmona, E., Ríos, E (Eds.), Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Morelia, Michoacán: UNAM, 3-12.
- Gochis, D.J., Brito-Castillo, L., Shuttleworth, W.J., 2007. Correlations between sea-surface temperatures and warm season streamflow in northwest Mexico. *International Journal of Climatology*. 27, 883-901.
- Goldsmith, G.R., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., McDonnell, J. J., Asbjornsen, H., Dawson, T. E., 2012. Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest. *Ecohydrology*. 5, 779-790.
- Gómez-Tagle, A. Jr., Geissert, D.K., Perez-Maqueo, O., Marín-Castro, B. E., Rendón-López, M. B., 2011. Chapter 10. Saturated hydraulic conductivity and land use change, new insights to the payments for ecosystem services programs: a case study from a tropical montane cloud forest watershed in eastern central Mexico. *En Developments in Hydraulic Conductivity Research*. Dikinya, O (Ed.), InTech, India, 225-248.
- Guzmán-Huerta, A., 2017. Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque húmedo de montaña, centro de Veracruz, México [Tesis de licenciatura]: Ciudad Universitaria, Universidad Nacional Autónoma de México, 54.
- Harman, C. J., 2015. Time-variable transit time distributions and transport: Theory and application to storage-dependent transport of chloride in a watershed. *Water Resources Research*. 51, 1-30.
- Hewlett, J.D., Hibbert, A.R., 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *En Forest hydrology*. Scooper, W. E., Lull, H.W (Eds.). Pergamon Press, New York, USA, 275-290.

- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Barradas V.L., Cervantes, J., 2013. The water and energy exchange of a shaded coffee plantation in the lower montane cloud forest zone of central Veracruz, Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*. 173, 1-13.
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Muñoz-Villers, L. E., Equihua, M., Asbjornsen, H., 2010. Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forest of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*. 384, 84-96.
- IPCC, 2013. Annex II. Glossary. En *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1447-1465. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_AnnexIII_FINAL.pdf
- Kiang, J. E., Gazorian, C., McMillan, H., Coxon, G., Coz, J. L., Westerberg, I. K., Belleville, A., Sevez, D., Sikorska, A. E., Petersen-Overleir, A., Reitan, T., Freer, J., Renard, B., Mansanarez, V., Mason, R., 2018. A comparison of methods for streamflow uncertainty estimation. *Water Resources Research*. 54, 7179-7176.
- Magaña, V.O, Vázquez, J.L., Pérez, J.L., Pérez, J.B., 2003. Impact of El Niño in precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*. 43, 313-330.
- Moore, R.D., 2004. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part II: Constant-rate injection. *Streamline Watershed Management Bulletin*. 8, 11-15.
- Moore, R.D., 2005. Introduction to salt dilution gauging for streamflow measurement part III: slug injection using salt in Solution. *Streamline Watershed Management Bulletin*. 8, 1-6.
- Mosiño, P. A., García, E., 1968. Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana. *En Serie de Sobretiros No. 6 de Los climas del Valle de México*. García, E (Eds.). Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México, 35-59.
- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., 2015. Streamflow and sediment load assessment from 1950 to 2006 in the Usumacinta and Grijalva Rivers (Southern Mexico) and the influence of ENSO. *Catena*. 127, 270-278.
- Muñoz-Villers, L.E., Aranda-Delgado, E., Castilleja-Delgado, E., Holwerda, F., 2016b (octubre). La cuenca del río Pixquiac, centro de Veracruz ¿Qué nos dicen 10 años de monitoreo de precipitación y caudal?. Cartel presentado en el IV Congreso Nacional de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Xalapa-Veracruz, México.
- Muñoz-Villers, L. E., Geissert, D.R., Holwerda, F., McDonnell, J.J., 2016. Factors influencing stream baseflow transit times in tropical montane watersheds. *Hydrology and Earth System Sciences*. 12, 10975-11011.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M.S., Geissert, D., Marín-Castro, B., Gómez-Tagle, A., McDonnell, J., Asbjornsen H., Dawson, T., Bruijnzeel, A. L., 2015. Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque*. 36, 395-407.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Gómez-Cardenas, M., Equihua, M., Asbjornsen, H., Bruijnzeel, L. A., Marín-Castro, B. E., Tobón, C., 2012. Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forest in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*. 462-463, 53-66.
- Muñoz-Villers, L. E., López-Blanco, J., 2008. Land use/cover using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiversity mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*. 29, 71-93.
- Muñoz-Villers, L. E., McDonnell, J.J., 2012. Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research*. 48, 1-17.

- Muñoz-Villers, L. E., McDonnell, J.J., 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrology and Earth System Sciences*. 17, 3543-3560.
- NOAA, 2017. Cold & warm episodes by season. Recuperado durante el 2017 de https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Null, J., 2017. El Niño and La Niña years and intensities. Recuperado durante el 2017 de <https://www.ggweather.com/enso/oni.htm>
- PCVM, 2017a. Actualización del tiempo. Recuperado diariamente durante el 2017, para el 2015-2017 de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM, 2017b. Alerta gris. Recuperado diariamente durante el 2017, para el 2015-2017 de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM, 2017c. Aviso especial. Recuperado diariamente durante el 2017, para el 2015-2017 de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM, 2017d. Boletín meteorológico matutino. Recuperado diariamente durante el 2017, para el 2015-2017 de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM, 2017e. Boletín meteorológico vespertino. Recuperado diariamente durante el 2017, para el 2015-2017 de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM, 2017f. Boletín semanal. Recuperado diariamente durante el 2017, para el 2015-2017 de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- PCVM, 2017g. Boletín tropical. Recuperado diariamente durante el 2017, para el 2015-2017 de <http://meteorologiaspcver.blogspot.com/>
- Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Barrett, B.S., Ordoñez, P., 2019. Intraseasonal variability of summer precipitation in Mexico: MJO Influence on the Midsummer Drought. *Journal of Climate*. 32, 2313-2327.
- Ponette-González, A.G., Weathers, K., Curran, L.M., 2010. Water inputs across a tropical montane landscape in Veracruz, Mexico: synergistic effects on land cover, rain and fog seasonality, and interannual precipitation variability. *Global Change Biology*. 16, 946-963.
- Poveda, G., Waylen, P. R., Pulwarty, R., S., 2006. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 234, 3 – 27.
- Riedinger, E. A. 2019. La Niña. Salem Press Encyclopedia of Sciences. Recuperado de <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=89475729&lang=es&site=eds-live>
- Rossignol, J-P., 1987. Los estudios morfoedafológicos en el área Xalapa-Coatepec, Veracruz. *En La morfoedafología en la ordenación de los paisajes rurales Conceptos y primeras aplicaciones en México*. Geissert, D., Rossignol, J-P (Eds.), INEREB-IRD, Xalapa, México, 23-39.
- Rütger, R., Anhuf, D., 2007. Characteristics of the water and energy balance in an Amazonian lowland rainforest in Venezuela and the impact of the ENSO-cycle. *Journal of Hydrology*. 337, 337-390.
- Rzedowski, J. 1996. Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botánica Mexicana*. 35, 25-44.
- Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P. A., Carrillo, G., 2011. Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15, 2895-2911.
- SMN, 2011a. Monitor de Reporte sequía de América del Norte. Mayo 31 2011. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Disponible en: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-de-america-del-norte>
- SMN, 2011b. Monitor de Reporte sequía de América del Norte. Junio 30 2011. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Disponible en:

- <https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Sequ%C3%ADa/Monitor%20de%20sequ%C3%ADa%20en%20America%20del%20Norte/sequia0611.pdf>
- SMN, 2013. Reporte del clima en México, reporte anual 2013: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2013.pdf>
- SMN, 2014. Reporte del clima en México, reporte anual 2014: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2014.pdf>
- SMN, 2015a. Comunicado de prensa No. 683-15.
- SMN, 2015b. Reporte del clima en México, reporte anual 2015: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Disponible en: <https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2015.pdf>
- SMN, 2017a. Pronóstico Meteorológico General. Recuperado diariamente durante el 2017 del sitio web del Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN), para el 2015-2017 de <https://smn.cna.gob.mx/es/pronosticos/pronosticosubmenu/pronostico-meteorologico-general> y también de la dirección https://smn.cna.gob.mx/tools/DATA/Formularios/Pronóstico%20Meteorológico%20General/Pronóstico%20Meteorológico%20General_2877.pdf
- SMN, 2017b. Comunicados de prensa. Recuperado diariamente durante el 2017 del sitio web del Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN), para el 2015-2017 de <https://smn.cna.gob.mx/es/> y también de la dirección <https://smn.cna.gob.mx/es/comunicados-de-prensa>
- SMN, 2018. Archivos shapefiles del Monitor de Sequía en México (MSM) generados en el Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN). Disponible en: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- SMN, 2019. Normales climatológicas publicadas en el sitio web del Servicio Meteorológico Nacional de México (SMN). Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales8110/NORMAL30175.TXT> (recuperado el 6 de noviembre de 2019).
- Stephens, H., Jones, S.E.O., Fox, H., 2018. Correlations between extreme atmospheric hazards and global teleconnections: Implications for multihazard resilience. *Reviews of Geophysics*. 56, 50-78.
- Syvitski, J. P. M., Cohen, S., Kettner, A. J., Brakenridge, R., 2014. How important and different are tropical rivers? – An overview. *Geomorphology*. 221, 5-17.
- Tallaksen, L. M., Van Lanen, H. A. J. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. En *Developments in Water Science*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science B.V; 2004.
- Timbal, B., Griffiths, M., Tan, K. S., 2015. Rainfall and streamflows in the Greater Melbourne catchment area: variability and recent anomalies. *Climate Research*. 63, 215-232.
- Toledo-Aceves, T., Meave, J. A., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., 2011. Tropical montane cloud forest: Current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *Journal of environmental management*. 92, 974-981.
- Torres-Alavez, J. A., Tejeda-Martínez, A., Vázquez-Aguirre, J. L., Brunet-India, M., Hernández-Ávila, P., Ruiz-Barradas, A., 2010. Índices de cambio climático y análisis de variabilidad en el estado de Veracruz, México. En *Clima, Ciudad y Ecosistemas*. Fernández-García, F., Galán-Gallego, E.,

- Cañada-Torrecilla, R (Eds.), Publicaciones de la Asociación Española de Climatología (AEC) Serie A, nº 7., España, 295-304.
- Van Loon, A. F., 2015. Overview Hydrological drought explained. *WIREs Water*. 2, 359-392.
- Williams-Linera, G., Toledo, M., Hernández, C.G., 2013. How heterogeneous the cloud forest communities in the mountains of central Veracruz, Mexico?. *Plant Ecology*. 214, 685-701
- Wohl, E., Barros, A., Brunzell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., Goldsmith, S., Harmon, R., Hendrickx, J. M. H., Juvik, J., McDonnell, J., Ogden, F., 2012. The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*. 2, 655-662.
- Yang, H., Choi, H. T., Lim, H., 2018. Applicability assessment of estimation methods for baseflow recession constants in small forest catchments. *Water*. 10, 1074.
- Zhang, Z., Wagener, T., Reed, P., Bhushan, R., 2008. Reducing uncertainty in predictions in ungauged basins by combining hydrologic indices regionalization and multiobjective optimization. *Water Resources Research*. 44, W00B04.

Glosario

Actividad convectiva: Término utilizado para describir el movimiento de ascenso del viento en la atmósfera y el desarrollo de nubes convectivas. Puede generar lluvias, chubascos, tormentas, tornados, granizo, etc. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Alta presión: Después de que una masa de aire se enfría, el movimiento de las moléculas que lo componen disminuye. La masa de aire se contrae aumentando su densidad y por lo tanto pesa más y baja hacia el suelo, donde crea una zona de alta presión (anticiclón). Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Anticiclón: Zona atmosférica de alta presión atmosférica. El aire de un anticiclón desciende sobre el suelo desde las capas altas de la atmósfera, produciendo subsidencia. Los anticiclones provocan tiempo estable y ausencia de precipitaciones, ya que la subsidencia limita la formación de nubes. La circulación del aire de un anticiclón en el Hemisferio Norte es en sentido de las manecillas del reloj. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Baja presión: Es un sistema de isobaras cerradas concéntricas en el cual la presión mínima se localiza en el centro. Su circulación es en sentido contrario a las manecillas del reloj, en el hemisferio Norte. Este fenómeno provoca convergencia y convección por lo que es asociado con la presencia de gran nubosidad y lluvias. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Canícula: También conocida como sequía intraestival, sequía de agosto, sequía de medio verano, inviernillo, veranillo o veranillos de San Juan. Se define como la disminución de la precipitación mensual y estacional, observada a mitad de la época de lluvias (mayo-octubre), debido a cambios temporales de la circulación atmosférica sobre el Golfo de México.

Es un fenómeno climático que afecta principalmente al oriente y sur del territorio mexicano. No es una sequía absoluta y su intensidad y duración pueden variar interanualmente (Mosiño y García, 1968). De acuerdo al SMN (2019), es una característica climática donde los vientos alisios soplan con fuerza desde el Este, impidiendo así la formación de nubes convectivas sobre el océano, lo cual reduce la precipitación en la parte continental.

Ciclón o ciclón tropical: Es un sistema de baja presión atmosférica con forma de remolino, que cubre de cientos a miles de km². Este sistema es característico de los océanos tropicales, sus vientos tienen una circulación ciclónica bien organizada y de movimiento ascendente, generando así tiempo nublado y lluvioso.

Los ciclones tropicales se clasifican de acuerdo a la intensidad de sus vientos, en perturbación tropical (zona de inestabilidad), depresión tropical, tormenta tropical y huracán.

La temporada en la que se presentan es del 1 de junio al 30 de noviembre, en el Océano Atlántico (Acevedo-Rosas, 2018; Brito-Castillo, 2003; SMN, 2019).

Circulación anticiclónica: Circulación atmosférica sistemática asociada a un sistema de alta presión. En el Hemisferio Norte su sentido de rotación es igual al de las manecillas del reloj. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Circulación ciclónica: Circulación atmosférica asociada a un sistema de baja presión. El movimiento del viento en el Hemisferio Norte es en el sentido contrario a las manecillas del reloj. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Convergencia: Zona donde choca el flujo del viento, genera movimientos convectivos (ascenso o descenso del aire) para compensar la acumulación de aire. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Depresión tropical: Es un ciclón tropical que presenta una presión central de 1065 mb y su viento máximo (valor promedio durante un minuto) alcanza velocidades de hasta 62 km/h. Localmente tiene efectos destructivos (Acevedo-Rosas, 2018).

El SMN (2019) considera a este sistema como una etapa de transición entre una zona de inestabilidad atmosférica (perturbación) y un ciclón. En esta etapa de formación el ciclón todavía no tiene nombre, a menos que sea producto de una degradación de una tormenta tropical o un huracán con nombre.

Disturbio o perturbación tropical (zona de inestabilidad): Es una perturbación ondulatoria o una zona de inestabilidad atmosférica moderada, asociada a un área de baja presión atmosférica. La cual propicia la generación incipiente de vientos convergentes. Su organización eventual puede desarrollar una depresión tropical (Acevedo-Rosas, 2018). Los boletines de la Secretaría de Protección Civil Veracruz-Meteorología (PCVM, 2017 d, e) utilizan el nombre de “disturbio o perturbación tropical”. En cambio, el SMN lo nombra como “zona de inestabilidad”.

Dorsal: Es la elongación central de un centro de alta presión, generalmente se le asocian estados del tiempo despejados y baja humedad en el ambiente (PCVM, 2017 d, e).

De acuerdo al SMN (2019), es un sistema de alta presión que se desplaza entre dos depresiones o vaguadas. Generalmente provoca buen tiempo.

El Niño Oscilación del Sur: ENSO, por sus siglas en inglés (*El Niño-Southern Oscillation*). Es un fenómeno acoplado océano-atmósfera, la parte oceánica se le conoce como El Niño y es el calentamiento del agua de la cuenca del Océano Pacífico tropical. Este fenómeno oceánico está asociado a la fluctuación del patrón global de presiones atmosféricas en la superficie tropical y subtropical del Océano Pacífico, denominado Oscilación del Sur (parte atmosférica).

La presencia del ENSO se puede determinar por la anomalía de presión en superficie, entre Tahití y Darwin; y de la temperatura superficial del mar en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial. Durante un episodio del ENSO, se debilitan los vientos alisios, se reduce la subsidencia y se alteran las corrientes oceánicas. Este fenómeno afecta los patrones del viento, la temperatura superficial del mar y la precipitación en el Pacífico tropical. Estos

efectos climáticos afectan tanto a la región del Pacífico, como a otras partes del mundo a través de teleconexiones. La fase fría del ENSO se conoce como La Niña, es decir, es una anomalía de temperatura fría en la superficie del mar. Modificado de IPCC (2013).

Frente frío: Es una zona de transición entre dos masas de aire de diferente temperatura, una cálida y una fría. Se forma por el desplazamiento de una masa de aire frío hacia latitudes menores y al chocar con una masa de aire cálida, se introduce entre el suelo y la masa de aire caliente, por diferencia de densidad, y desplaza a la masa de aire cálido.

El frente es la parte delantera de la masa de aire frío y provoca descenso de la temperatura en la zona que recorre. Cuando se combina con una masa de aire cálido y humedad abundante, genera inestabilidad atmosférica, la cual provoca nublados y en algunas ocasiones precipitaciones pluviales, así como también niebla, heladas, vientos intensos y oleaje elevado. El frente frío puede tener una duración entre tres y siete días.

La temporada de los frentes fríos en México es de septiembre a mayo, y pueden prolongarse hasta agosto, por lo que al mismo tiempo pueden interactuar un frente frío y un ciclón tropical. (PCVM, 2017 d, e; SMN, 2015a, 2019).

Huracán: Es un ciclón tropical bien organizado con viento sostenido (viento máximo superior) ≥ 118 km/h. El área nubosa que genera cubre un diámetro entre 500 y 900 km, produciendo en él intensas lluvias. De acuerdo a la escala Saffir-Simpson, se distinguen 5 categorías de huracán, basada en la magnitud del viento sostenido. El grado de destrucción aumenta progresivamente, de 1 a 5 (Acevedo-Rosas, 2018).

Masa de aire estable: Masa de aire en la que prevalece la estabilidad estática en sus capas inferiores, se dice que está libre de actividad convectiva; tiene un grado débil de turbulencia, y presenta nubes estratiformes o ausencia de ellas. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Masa de aire inestable: Masa de aire que tiene inestabilidad estática en sus capas inferiores; tiende a formar nubes convectivas y precipitaciones, si su contenido de humedad es suficientemente elevado. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Onda tropical (Onda del Este): Es una perturbación u ondulación (de baja presión atmosférica) de la corriente de vientos alisios (viento del Este), que viaja hacia el Oeste con una velocidad media de 15 km/h. La onda tropical puede generar actividad convectiva moderada, a su paso puede dejar vaguadas remanentes y se le puede asociar con el desarrollo potencial de circulación ciclónica

Al igual que los ciclones tropicales, la temporada en la que se presentan las ondas tropicales es de junio a noviembre, en el territorio mexicano (Acevedo-Rosas, 2018; SMN, 2019).

Perturbación tropical: Sistema tropical débil de baja presión, con convección organizada (generalmente de 185 a 556 km de diámetro). Es la primera fase, de cuatro, en la que podría convertirse en huracán. Tomado del Glosario técnico del SMN (2019).

Sequía: De acuerdo a la definición de Tallaksen y Van Lanen (2004), una sequía es un período anormal prolongado que se encuentra por debajo de la disponibilidad de agua promedio. Es un fenómeno recurrente y su extensión puede ir desde la escala local a mundial. Su duración puede ser de meses a años, e incluso decenios en el caso de las megasequías. Por lo que sus características espaciales y temporales pueden variar significativamente de un lugar a otro.

Una sequía es una condición relativa, y no absoluta, del sistema hidrológico. Cabe señalar que los eventos de sequía tienen un desarrollo lento y progresivo, que frecuentemente no es detectable, pero sus consecuencias pueden ser indirectas y diversas.

La definición de la sequía puede depender del objetivo del estudio, pero se pueden identificar cuatro tipos de sequías en función del déficit de la disponibilidad de agua: la sequía meteorológica, cuando es un déficit de precipitación; la sequía de humedad en suelo o sequía agrícola, cuando el déficit de agua impide el crecimiento de la vegetación; la sequía hidrológica, el déficit se observa en el agua superficial y subsuperficial; y la sequía socioeconómica, en la cual se analiza el impacto ecológico y social que tienen las otras tres categorías de sequía (IPCC, 2013; Van Loon, 2015).

Tormenta tropical: Es un ciclón tropical organizado con viento máximo entre 63 y 118 km/h, su presión central varía de 1004 a 985 mb. A esta velocidad, se le asigna un nombre preestablecido por la Organización Meteorológica Mundial. Puede tener efectos destructivos y también causar marea de tormenta de hasta 1.1 m (PCVM, 2017 d, e; Acevedo-Rosas, 2018).

Vaguada (Canal de baja presión): Es un eje o zona elongada de baja presión atmosférica que se ubica entre dos áreas de mayor presión (anticiclones), y se produce por el ascenso de masas de aire cálido y húmedo. Puede formar nubes de gran desarrollo vertical y lluvias (PCVM, 2017 d, e; Acevedo-Rosas, 2018;).

Los boletines de la Secretaría de Protección Civil Veracruz-Meteorología (PCVM, 2017 d, e) utilizan el nombre de “vaguada”. En cambio, el SMN lo nombra “canal de baja presión”.

Anexo

Tabla A16. Condiciones fisicoquímicas del agua del río, en el punto de aforo. Mediciones realizadas al inicio de los aforos (2015-2017)

Fecha	T* (°C)	CE* (μS)	SDT (ppm)	pH (-)	DO ₁ (%)	T ₁ (°C)	DO ₂ (mg/L)	T ₂ (°C)
07-abr-15	16.1	43.06	-----	-----	-----	-----	-----	-----
01-may-15	-----	41.91	-----	-----	-----	-----	-----	-----
15-jun-15	16.9	36.27	-----	-----	-----	-----	-----	-----
18-jun-15	16.7	35.60	-----	-----	-----	-----	-----	-----
06-ago-15	16.5	39.25	-----	-----	-----	-----	-----	-----
14-sep-15	17.3	35.34	-----	-----	-----	-----	-----	-----
30-oct-15	17.9	38.66	-----	-----	-----	-----	-----	-----
30-ene-16	13.1	41.76	-----	-----	-----	-----	-----	-----
12-mar-16	15.1	43.11	-----	-----	-----	-----	-----	-----
25-feb-17	15.6	43.98	21.37	7.3	94.0	16.3	8.33	15.9
04-abr-17	16.7	46.51	21.22	6.7	95.7	17.3	7.98	17.4
22-may-17	19.5	46.08	22.39	6.8	91.3	19.6	7.04	20.0
17-jul-17	16.1	37.68	18.35	6.8	94.4	16.3	7.93	-----

T: temperatura del agua; CE: conductividad eléctrica del agua; SDT: sólidos disueltos totales; DO, oxígeno disuelto.

La T y la CE que tienen un asterisco (*), fueron medidos con el multiparamétrico Oakton PC450, mientras que en los demás parámetros se utilizó el multiparamétrico Oakton PD650.

Las columnas de DO y T tienen un sombreado de color similar, y un número en subíndice en el nombre de la variable, ya que se les asocia la temperatura correspondiente a la medición de DO.

Tabla A2. Características de los eventos de precipitación a los 1450 m durante los años hidrológicos estudiados

Estadísticos	2015-2016					2016-2017			
	<i>P</i> (mm)	<i>I</i> _{máx} (mm/h)	<i>I</i> _{prom} (mm/h)	<i>T</i> _d (horas)		<i>P</i> (mm)	<i>I</i> _{máx} (mm/h)	<i>I</i> _{prom} (mm/h)	<i>T</i> _d (horas)
Mín.	0.2	0.2	0.2	0	Anual	0.2	0.2	0.1	0
Máx.	128.2	73.2	29	41		135.6	54.4	32.4	41
Mediana	3.4	1.6	1.4	2		2	1.4	1.8	2
Promedio ± (σ)	9.8 ± 16.3	5.4 ± 9.2	3.3 ± 4.3	2.8 ± 5.2		9.8 ± 17.3	5.5 ± 8.9	4.4 ± 6.1	2.7 ± 4.1
Mín.	0.2	0.2	0.2	0	Lluvias	0.2	0.2	0.1	0
Máx.	87	73.2	29	28		135.6	54.4	32.4	41
Mediana	5.8	3.4	2.7	2		3.4	2.4	3.1	2
Promedio ± (σ)	12.1 ± 17.5	7.4 ± 10.7	4.3 ± 4.6	3.2 ± 3.9		12.3 ± 19.8	7.2 ± 10.1	5.5 ± 6.7	2.7 ± 4.2
Mín.	0.2	0.2	0.2	0	Secas	0.2	0.2	0.2	0
Máx.	128.2	45.2	26.2	41		38	14.4	10.6	21
Mediana	2.2	1	1	2		1.2	0.8	0.9	2
Promedio ± (σ)	6.7 ± 14.1	2.8 ± 5.8	1.9 ± 3.5	4.6 ± 6.4		4.2 ± 7.4	1.9 ± 3	1.8 ± 2.3	2.6 ± 3.8

P cantidad de precipitación; *I*_{máx} intensidad máxima; *I*_{prom} intensidad promedio y *T*_d tiempo de duración.

Tabla A3. Características de los eventos de precipitación a los 2100 m durante los años hidrológicos estudiados

Estadísticos	2015-2016					2016-2017			
	<i>P</i> (mm)	<i>I</i> _{máx} (mm/h)	<i>I</i> _{prom} (mm/h)	<i>T</i> _d (horas)		<i>P</i> (mm)	<i>I</i> _{máx} (mm/h)	<i>I</i> _{prom} (mm/h)	<i>T</i> _d (horas)
Mín.	0.2	0.2	0.1	0	Anual	0.2	0.2	0.1	0
Máx.	69.2	40.2	18.4	37		157	50	52.3	34
Mediana	2.5	1.2	0.7	2		2.6	1.6	1.1	2
Promedio ± (σ)	8.4 ± 12.7	4.6 ± 7.0	1.9 ± 2.6	3.7 ± 5.2		8.4 ± 15.3	4.7 ± 7.6	3.0 ± 5.1	2.6 ± 3.5
Mín.	0.2	0.2	0.1	0	Lluvias	0.2	0.2	0.2	0
Máx.	69.2	40.2	15.4	25		157	50	52.3	17
Mediana	4.6	2.2	1.2	2		3	2.2	1.8	1
Promedio ± (σ)	10.5 ± 14.4	6.0 ± 8.0	2.3 ± 2.8	3.2 ± 3.6		10.2 ± 17.6	6.0 ± 8.6	3.8 ± 5.7	2.3 ± 2.7
Mín.	0.2	0.2	0.1	0	Secas	0.2	0.2	0.1	0
Máx.	58.2	26.6	18.4	37		66.8	34.4	28	34
Mediana	1.6	0.6	0.5	3		1.6	0.8	0.6	2
Promedio ± (σ)	4.9 ± 8.1	2.2 ± 3.8	1.1 ± 2.1	4.7 ± 7.0		5.6 ± 10.4	2.6 ± 5.0	1.8 ± 3.7	3.2 ± 4.5

P cantidad de precipitación; *I*_{máx} intensidad máxima; *I*_{prom} intensidad promedio y *T*_d tiempo de duración.

Tabla A4. Características mensuales de la cantidad de precipitación

Mes	<i>P</i> (mm)									
	2015-2016					2016-2017				
	<i>n</i> (eventos)	Mín.	Máy.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	<i>n</i> (eventos)	Mín.	Máy.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana
Mayo	16	1.0	51.2	17.2 \pm 13.7	11.2	6	2	42	16 \pm 15	10
Junio	24	1.4	33.6	16.0 \pm 9.8	16.3	21	4	82	22 \pm 22	11
Julio	12	3.2	53.6	18.9 \pm 17.0	13.8	19	2	45	14 \pm 13	10
Agosto	26	1.2	39.8	13.9 \pm 11.6	9.0	20	4	136	33 \pm 33	21
Septiembre	25	1.0	59.6	29.6 \pm 21.1	30.8	20	3	96	28 \pm 25	28
Octubre	15	2.0	86.0	23.2 \pm 29.8	9.4	15	6	93	27 \pm 24	20
Noviembre	14	1.4	71.2	17.4 \pm 21.8	8.2	12	2	67	15 \pm 19	8
Diciembre	6	1.8	13.8	7.9 \pm 5.0	7.4	6	3	38	17 \pm 16	8
Enero	4	2.6	19.4	8.9 \pm 7.3	6.7	3	5	11	8 \pm 3	6
Febrero	8	2.0	15.6	7.9 \pm 4.4	7.4	4	6	40	15 \pm 17	8
Marzo	6	3.6	31.4	13.3 \pm 10.5	11.3	14	3	28	9 \pm 7	7
Abril	9	1.8	22.0	7.4 \pm 6.3	6.2	1	---	---	---	---

Tabla A5. Estadísticos de las características de precipitación de los eventos analizados para el año hidrológico 2015-2016 ($n=165$)

Mes	n (eventos)	I_{prom} (mm/h)				$I_{m\acute{a}x}$ (mm/h)				T_d (h)			
		Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana
Mayo	16	0.5	23.1	7.6 \pm 7.3	5.8	0.4	25.0	11.3 \pm 7.2	10.2	1.0	8.0	3.5 \pm 2.3	3.0
Junio	24	0.4	26.2	4.4 \pm 5.3	3.3	0.4	25.6	9.8 \pm 7.4	8.2	1.0	12.0	5.3 \pm 3.2	5.0
Julio	12	1.1	12.5	4.9 \pm 3.9	3.3	2.2	26.4	10.8 \pm 9.4	6.5	1.0	10.0	4.2 \pm 3.2	3.0
Agosto	26	0.4	15.3	5.2 \pm 4.3	4.5	1.2	27.0	8.9 \pm 7.9	5.3	0.0	12.0	3.6 \pm 3.1	2.5
Septiembre	25	0.2	10.3	4.4 \pm 3.2	4.6	0.4	40.2	16.1 \pm 12.0	16.8	0.0	31.0	7.8 \pm 6.3	6.0
Octubre	15	0.3	14.3	4.4 \pm 4.5	3.5	1.0	73.2	13.5 \pm 20.0	4.0	1.0	26.0	8.2 \pm 7.9	5.0
Noviembre	14	0.7	5.1	1.9 \pm 1.2	1.7	1.2	25.4	6.5 \pm 6.8	4.4	2.0	21.0	7.4 \pm 5.3	5.0
Diciembre	6	0.2	1.7	1.0 \pm 0.5	1.1	0.4	6.2	3.0 \pm 2.0	3.1	3.0	14.0	8.8 \pm 3.7	8.5
Enero	4	0.3	0.8	0.6 \pm 0.2	0.6	0.4	2.4	1.5 \pm 0.9	1.6	7.0	41.0	16.5 \pm 16.4	9.0
Febrero	8	0.3	1.0	0.7 \pm 0.3	0.7	0.6	2.8	1.8 \pm 0.7	1.8	4.0	37.0	12.5 \pm 10.4	9.5
Marzo	6	1.1	6.3	2.5 \pm 2.0	1.5	2.0	17.6	4.9 \pm 6.2	2.5	1.0	13.0	6.7 \pm 4.6	6.0
Abril	9	0.3	7.8	2.2 \pm 2.8	0.7	0.6	7.6	3.0 \pm 2.6	1.6	1.0	37.0	8.8 \pm 11.0	6.0

Tabla A6. Estadísticos de las características de precipitación de los eventos analizados para el año hidrológico 2016-2017 ($n=141$)

Mes	n (eventos)	I_{prom} (mm/h)				$I_{máx}$ (mm/h)				T_d (h)			
		Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana
Mayo	6	1.4	20.8	6.6 \pm 7.3	3.9	2.2	33.4	10.3 \pm 11.8	5.9	1.0	7.0	3.3 \pm 2.4	3.0
Junio	21	1.2	31.4	7.1 \pm 7.1	5.8	2.8	35.8	12.8 \pm 9.1	9.0	0	18.0	4.9 \pm 4.5	4.0
Julio	19	0.4	22.7	6.0 \pm 5.8	3.6	1.2	43.4	9.7 \pm 10.3	6.8	0	15.0	2.9 \pm 3.5	2.0
Agosto	20	1.2	26.4	8.1 \pm 6.7	5.1	2.8	54.4	16.8 \pm 14.1	12.4	1.0	41.0	6.0 \pm 8.5	4.0
Septiembre	20	0.9	19.2	5.8 \pm 4.7	4.5	1.8	50.0	15.8 \pm 13.5	14.3	0	12.0	4.7 \pm 2.7	5.0
Octubre	15	1.8	13.2	6.7 \pm 3.6	6.4	3.2	44.4	14.3 \pm 10.4	11.6	0	11.0	4.3 \pm 3.4	3.0
Noviembre	12	0.5	8.4	2.7 \pm 2.8	1.2	0.6	24.4	6.4 \pm 7.1	3.3	0	15.0	5.5 \pm 3.7	5.0
Diciembre	6	0.4	2.0	1.2 \pm 0.6	1.1	1.0	16.4	5.5 \pm 6.2	4.0	5.0	34.0	14.2 \pm 11.5	10.0
Enero	3	0.5	1.2	0.8 \pm 0.4	0.7	1.6	2.8	2.3 \pm 0.6	2.4	5.0	15.0	10.7 \pm 5.1	12.0
Febrero	4	1.0	6.7	3.1 \pm 2.6	2.3	2.0	12.4	5.0 \pm 4.9	2.8	2.0	9.0	5.3 \pm 3.0	5.0
Marzo	14	0.6	13.9	3.7 \pm 4.5	1.8	1.4	20.6	5.0 \pm 5.3	3.2	1.0	11.0	4.2 \pm 3.3	3.0
Abril	1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla A7. Estadísticos mensuales del coeficiente de escurrimiento (Q/P), del caudal (Q_T) y de las partición del caudal en flujo rápido (Q_r) y flujo base (Q_b), de las respuestas hidrológicas analizadas para el año hidrológico 2015-2016 ($n= 165$)

Mes	Q/P			Q_T (mm)				Q_r (mm)				Q_b (mm)			
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Total	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Total	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Total
Mayo	0.04	0.7	0.2 \pm 0.2	0.3	6.3	3.0 \pm 1.6	47.6	0.01	1.3	0.4 \pm 0.4	7.0	0.4	5.5	2.5 \pm 1.3	40.7
Junio	0.05	0.7	0.3 \pm 0.2	0.4	7.2	3.8 \pm 2.2	90.0	0.01	1.4	0.4 \pm 0.4	10.6	0.4	6.6	3.3 \pm 1.9	79.4
Julio	0.1	0.6	0.3 \pm 0.2	0.6	12.9	4.7 \pm 3.9	57.3	0.02	1.6	0.4 \pm 0.5	4.4	0.6	12.1	4.4 \pm 3.5	52.8
Agosto	0.09	0.9	0.3 \pm 0.2	0.4	9.2	3.4 \pm 2.5	88.9	0.02	1.8	0.5 \pm 0.5	12.1	0.4	7.5	3.0 \pm 2.0	76.8
Septiembre	0.09	0.9	0.3 \pm 0.2	0.9	12.2	4.9 \pm 3.0	123.7	0.03	1.3	0.4 \pm 0.4	10.7	0.9	11.3	4.5 \pm 2.7	113.0
Octubre	0.07	0.7	0.3 \pm 0.2	0.7	10.9	3.9 \pm 3.2	59.1	0.02	2.1	0.4 \pm 0.6	6.5	0.7	9.9	3.5 \pm 2.7	52.6
Noviembre	0.2	0.8	0.4 \pm 0.2	0.4	14.5	5.1 \pm 4.0	70.8	0.01	2.7	0.4 \pm 0.7	5.9	0.4	11.7	4.6 \pm 3.4	64.8
Diciembre	0.2	0.5	0.3 \pm 0.1	0.5	3.7	2.2 \pm 1.1	13.3	0.01	1.2	0.4 \pm 0.4	2.3	0.5	3.3	1.8 \pm 0.9	11
Enero	0.2	0.7	0.4 \pm 0.2	1.5	3.8	2.3 \pm 1.0	9.1	0.20	0.6	0.3 \pm 0.2	1.4	1.3	3.1	1.9 \pm 0.8	7.7
Febrero	0.2	0.7	0.4 \pm 0.1	0.5	6.8	2.9 \pm 2.2	23.2	0.03	1	0.3 \pm 0.3	2.6	0.5	6.4	2.6 \pm 2.0	20.6
Marzo	0.1	0.3	0.2 \pm 0.1	0.2	4.2	2.5 \pm 1.7	15.1	0.03	1.1	0.4 \pm 0.4	2.5	0.2	3.5	2.1 \pm 1.4	12.6
Abril	0.1	0.6	0.3 \pm 0.1	0.6	5.5	1.7 \pm 1.5	15	0.01	0.6	0.2 \pm 0.2	1.6	0.6	4.9	1.5 \pm 1.4	13.5

Tabla A8. Estadísticos mensuales del coeficiente de escurrimiento (Q/P), del caudal (Q_T) y de las particiones del Q_T en flujo rápido (Q_r) y flujo base (Q_b), de las respuestas hidrológicas analizadas para el año hidrológico 2015-2016 ($n= 141$)

Mes	Q/P			Q_T (mm)				Q_r (mm)				Q_b (mm)			
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Total	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Total	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Total
Mayo	0.1	0.7	0.3 ± 0.2	1.3	6.6	3.1 ± 1.9	18.5	0.04	1.1	0.4 ± 0.4	2.5	0.9	5.8	2.7 ± 1.7	16.0
Junio	0.1	0.8	0.3 ± 0.2	1.2	7.6	4.4 ± 2.1	93.2	0.02	1.2	0.4 ± 0.3	7.5	1.2	6.8	4.1 ± 1.8	85.7
Julio	0.1	1.0	0.5 ± 0.3	0.6	9.3	4.6 ± 2.5	266.8	0.01	1.0	0.3 ± 0.3	101.3	0.6	8.4	4.3 ± 2.3	775.0
Agosto	0.1	0.8	0.3 ± 0.2	1.1	18.5	6.8 ± 3.5	135.1	0.01	3.4	0.5 ± 0.7	9.3	1.1	15.1	6.3 ± 3.0	125.9
Septiembre	0.1	0.6	0.3 ± 0.2	0.7	12.2	5.4 ± 2.9	107.2	0.01	0.9	0.2 ± 0.2	4.7	0.7	11.3	5.1 ± 2.7	102.4
Octubre	0.1	0.5	0.3 ± 0.1	3.1	15.3	6.7 ± 3.4	100.5	0.06	0.8	0.3 ± 0.2	3.7	3.0	14.5	6.5 ± 3.2	96.8
Noviembre	0.1	0.8	0.4 ± 0.2	1.3	6.7	3.8 ± 1.8	45.6	0.01	0.9	0.2 ± 0.3	2.7	1.3	5.8	3.6 ± 1.6	42.9
Diciembre	0.1	0.5	0.3 ± 0.2	1.2	7.0	3.4 ± 2.3	17.0	0.05	0.8	0.3 ± 0.3	1.7	1.1	6.6	3.1 ± 2.2	15.3
Enero	0.1	0.3	0.2 ± 0.1	0.8	3.7	2.0 ± 1.5	6.0	0.02	0.6	0.2 ± 0.3	0.7	0.8	3.2	1.8 ± 1.3	5.3
Febrero	0.1	0.2	0.2 ± 0.1	1.0	3.4	1.9 ± 1.1	7.5	0.03	0.5	0.3 ± 0.2	1.1	0.9	2.9	1.6 ± 0.9	6.4
Marzo	0.1	0.6	0.3 ± 0.2	0.6	4.2	2.3 ± 1.1	29.9	0.04	0.9	0.3 ± 0.3	4.2	0.5	3.5	2.0 ± 1.0	25.7
Abril	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla A9. Características estadísticas de los picos de descarga ($Q_{\text{máx}}$) a nivel mensual, para el período de estudio 2015-2017

Mes	$Q_{\text{máx}} \text{ (m}^3\text{/s)}$							
	2015-2016				2016-2017			
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mediana
Mayo	1.7	4.4	2.5 \pm 0.8	2.2	0.8	3.9	2.3 \pm 1.1	2.3
Junio	1.7	7.5	3.3 \pm 1.6	3.1	1.9	5.7	3.6 \pm 1.0	3.5
Julio	2.2	3.7	2.8 \pm 0.5	2.8	2.0	4.3	3.1 \pm 0.6	3
Agosto	1.5	4.4	2.6 \pm 0.8	2.5	3.1	6.2	4.3 \pm 0.8	4.2
Septiembre	2.3	4.9	3.7 \pm 0.8	3.8	3.1	6.6	4.0 \pm 0.9	3.9
Octubre	2.1	4.5	2.8 \pm 0.8	2.5	2.9	6.0	4.0 \pm 0.9	3.8
Noviembre	2.0	5.3	2.8 \pm 1.0	2.4	2.3	4.6	3.0 \pm 0.7	2.9
Diciembre	1.2	1.7	1.5 \pm 0.2	1.6	1.4	2.3	1.7 \pm 0.4	1.7
Enero	1.0	1.5	1.2 \pm 0.3	1.2	1.4	1.6	1.5 \pm 0.1	1.5
Febrero	0.9	1.3	1.1 \pm 0.2	1.1	1.2	3.5	2.2 \pm 1.0	2.1
Marzo	0.7	3.3	1.5 \pm 1.1	1	0.9	4.4	1.8 \pm 0.9	1.6
Abril	0.5	1.5	0.9 \pm 0.4	0.9	---	---	---	---

Tabla A10. Métricas de los hidrogramas: tiempo de pico (T_p), tiempo de retraso (L) y tiempo de recesión (T_r) para el año 2015-2016 ($n=165$)

Mes	T_p (horas)			L (horas)			T_r (horas)		
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)
Mayo	0.2	4.5	1.7 \pm 1.2	1.2	7.3	3.6 \pm 1.7	0.5	27.2	12.9 \pm 7.6
Junio	0.2	5.3	2.1 \pm 1.3	1.5	6.2	3.7 \pm 1.4	2.2	23.2	12.9 \pm 6.5
Julio	0.5	9.0	2.9 \pm 2.3	1.2	12.8	4.0 \pm 3.0	1.7	41.0	15.7 \pm 13.8
Agosto	0.3	4.7	2.0 \pm 1.2	1.8	5.8	3.7 \pm 1.3	0.8	46.5	14.5 \pm 11.6
Septiembre	0.2	3.7	1.6 \pm 0.9	1.5	12.3	3.6 \pm 2.4	3.0	29.2	13.8 \pm 7.5
Octubre	0.7	11.5	3.5 \pm 3.6	1.8	26.3	6.1 \pm 6.6	1.7	43.3	12.7 \pm 11.7
Noviembre	0.5	8.3	3.8 \pm 1.9	1.7	14.0	5.6 \pm 3.2	1.2	40.0	16.5 \pm 13.1
Diciembre	1.7	7.0	3.4 \pm 2.1	2.3	7.2	4.1 \pm 1.7	2.5	19.3	10.5 \pm 7.5
Enero	2.7	7.3	5.5 \pm 2.0	4.2	8.5	7.2 \pm 2.1	9.5	35.7	17.0 \pm 12.5
Febrero	3.5	25.8	9.3 \pm 7.1	5.2	26.2	12.2 \pm 7.7	0.3	36.3	13.9 \pm 11.4
Marzo	2.2	7.3	4.9 \pm 2.2	3.2	8.5	5.8 \pm 2.2	2.0	21.8	14.1 \pm 9.0
Abril	1.8	12.3	5.3 \pm 3.5	2.5	13.8	6.9 \pm 4.0	2.7	41.2	14.0 \pm 11.2

Tabla A11. Métricas de los hidrogramas: tiempo de retraso (L), tiempo de pico (T_p) y tiempo de recesión (T_r) para el año 2016-2017 ($n=141$)

Mes	T_p (horas)			L (horas)			T_r (horas)		
	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)	Mín.	Máx.	Promedio ($\pm \sigma$)
Mayo	0.2	7.2	3.8 \pm 2.5	1.8	9.7	6.6 \pm 3.1	6.2	36.2	15.1 \pm 11.0
Junio	0.3	12.5	3.1 \pm 2.5	2.0	22.7	5.7 \pm 5.1	2.7	24.7	11.3 \pm 6.2
Julio	0.7	8.8	3.4 \pm 2.2	1.8	10.2	4.6 \pm 2.2	1.0	34.5	13.5 \pm 8.7
Agosto	0.7	8.7	3.4 \pm 2.3	0.7	17.5	4.9 \pm 3.5	2.5	30.7	14.7 \pm 7.4
Septiembre	0.7	8.0	3.1 \pm 2.0	1.2	10.3	4.7 \pm 2.5	1.3	28.5	11.0 \pm 6.6
Octubre	0.7	8.5	2.8 \pm 1.9	2.2	10.5	4.2 \pm 2.1	8.8	32.8	17.0 \pm 6.6
Noviembre	1.7	5.8	3.1 \pm 1.3	2.8	6.8	4.6 \pm 1.5	3.0	16.5	9.5 \pm 5.3
Diciembre	4.5	18.5	8.4 \pm 5.7	6.2	6.2	20.0 \pm 6.1	3.0	16.0	8.7 \pm 6.5
Enero	4.2	19.0	9.1 \pm 8.6	5.8	28.7	14.5 \pm 12.4	1.5	5.8	4.3 \pm 2.5
Febrero	2.8	6.2	4.3 \pm 1.6	6.3	10.7	9.0 \pm 2.1	3.3	10.7	6.9 \pm 3.1
Marzo	0.5	13.0	5.1 \pm 3.2	1.7	14.2	7.7 \pm 3.8	3.5	22.2	10.6 \pm 6.2
Abril	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Tabla A12. Serie de precipitación a los 2100 m para el período 2006-2017

Año hidrológico	Precipitación anual (mm)	Precipitación estacional (mm)	
		Época lluvias	Época de secas
2006-2007	3213	2378	835
2007-2008	2797	2317	481
2008-2009	3462	3064	398
2009-2010	3200	2495	705
2010-2011	2536	2205	331
2011-2012	2932	2157	775
2012-2013	2719	2251	468
2013-2014	3403	2834	569
2014-2015	2825	2039	786
2015-2016	2545	1989	557
2016-2017	2508	1866	642

Tabla A13. Monitor de sequía para los 10 años hidrológicos (2007-2016)

Año	Mes	Tipo de sequía	Área con sequía (%)	Partes de la cuenca
2007	Junio	D0	100	Toda
	Julio	D1	100	Toda
2008	Abril	D1	100	Toda
	Mayo	D2	11	Parte media y hacia la parte baja
		D1	89	Parte media y alta
	Junio	D1	100	Toda
	Julio	D1	100	Toda
	Agosto	D1	100	Toda
	Septiembre	D1	100	Toda
	Noviembre	D0	100	Toda
Diciembre	D0	100	Toda	
2009	Abril	D0	100	Toda
	Mayo	D0	100	Toda
	Junio	D0	100	Toda
	Julio	D0	100	Toda
	Agosto	D1	100	Toda
2010	Marzo	D0	71	Parte baja, media y un poco de la parte alta
	Abril	D0	51	Parte baja y un poco de la parte media
	Mayo	D0	51	Parte baja y un poco parte media
	Junio	D0	100	Toda
	Diciembre	D0	100	Toda
2011	Abril	D1	100	Toda
	Mayo	D2	100	Toda
	Junio	D3	100	Toda
	Julio	D1	100	Toda
	Agosto	D1	100	Toda
	Octubre	D0	100	Toda
	Noviembre	D0	100	Toda
	Diciembre	D0	100	Toda
2013	Febrero	D1	100	Toda
2014	Abril	D0	88	Parte alta y media
2015	Septiembre	D0	5	Parte alta
	Octubre	D0	23	Parte alta
2016	Julio	D0	100	Toda
	Septiembre	D0	100	Toda

Tabla A14. Intensidad de la canícula observada a los 2100 m, durante 11 años

Año hidrológico	Intensidad de la canícula (%)	Duración (meses)
2006 – 2007	8	1
2007 – 2008	1	1
2008 – 2009	13	2
2009 – 2010	No hubo canícula	---
2010 – 2011	8	1
2011 – 2012	No hubo canícula	---
2012 – 2013	7	1
2013 – 2014	6	1
2014 – 2015	10	1
2015 – 2016	22	2
2016 – 2017	No hubo canícula	---

De color rojo se resalta el año con la canícula fuerte (>16%), de color amarillo los de intensidad moderada (11-15%) y los que no están resaltados presentaron una canícula débil (0 – 10%).

Tabla A15. Efectos de El Niño/La Niña, en diferentes variables hidrológicas en el centro de Veracruz

Variable hidrológica	Año hidrológico	Época más húmeda		Año de comparación	Época menos húmeda		Mayor humedad (%)	Referencia
		Evento	Intensidad		Evento	Intensidad		
Época seca								
Lluvia	2006/2007		Débil a neutral	2007/2008		Moderada	175.1	Holwerda et al., 2010
	2006/2007		Débil a neutral	2005/2006		Débil a neutral	177	Ponette-González et al., 2010
	2006/2007		Débil a neutral	2007/2008		Moderada	447	Ponette-González et al., 2010
	2006/2007		Débil a neutral	2007/2008		Moderada	170	Muñoz-Villers et al., 2012
	2009/2010		Débil a fuerte	2008/2009		Débil a neutral	179	Goldsmith et al., 2012
	2009/2010		Débil a fuerte	2008/2009		Débil a neutral	175	Alvarado-Barrientos et al., 2015
	2009/2010	El Niño	Débil a fuerte	2008/2009	La Niña	Débil a neutral	193	Alvarado-Barrientos et al., 2015
Niebla	2006/2007		Débil a neutral	2005/2006		Débil a neutral	176	Ponette-González et al., 2010
	2006/2007		Débil a neutral	2007/2008		Moderada	Sec (164); Mad (182)	Holwerda et al., 2010
	2006/2007		Débil a neutral	2007/2008		Moderada	347	Ponette-González et al., 2010
Ocurrencia de niebla	2009/2010		Débil a fuerte	2008/2009		Débil a neutral	63	Alvarado-Barrientos et al., 2015
Caudal	2006/2007		Débil a neutral	2007/2008		Moderada	Sec (15%); Mad (29%)	Muñoz-Villers et al., 2012
Época de lluvias								
Lluvia	2008/2009	Neutral	-----	2009/2010	El Niño	Débil a moderado	124.6	Goldsmith et al., 2012
	2007/2008	La Niña	Moderada	2006/2007	Neutral	Neutral a El Niño débil	134	Muñoz-Villers et al., 2012
Caudal	2007/2008	La Niña	Moderada	2006/2007	Neutral	Neutral a El Niño débil	Sec (45%); Mad (62%)	Muñoz-Villers et al., 2012

La ocurrencia de niebla se refiere al porcentaje de cada año hidrológico en el que ocurrieron eventos de niebla, Bosque Mesófilo de montaña maduro (Mad) y secundario (Sec).

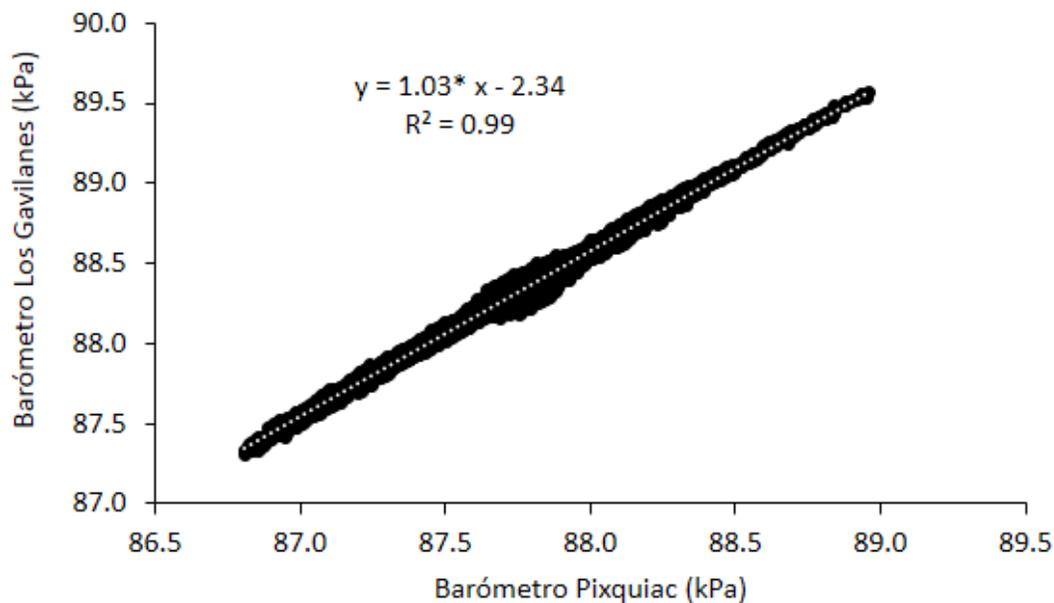


Figura A1. Regresión lineal ajustada a los datos de presión atmosférica de los barómetros. Barómetro Pixquiac corresponde a los dato de la cuenca del río Pixquiac, y barómetro Los Gavilanes, corresponde a los datos de la cuenca bajo estudio.

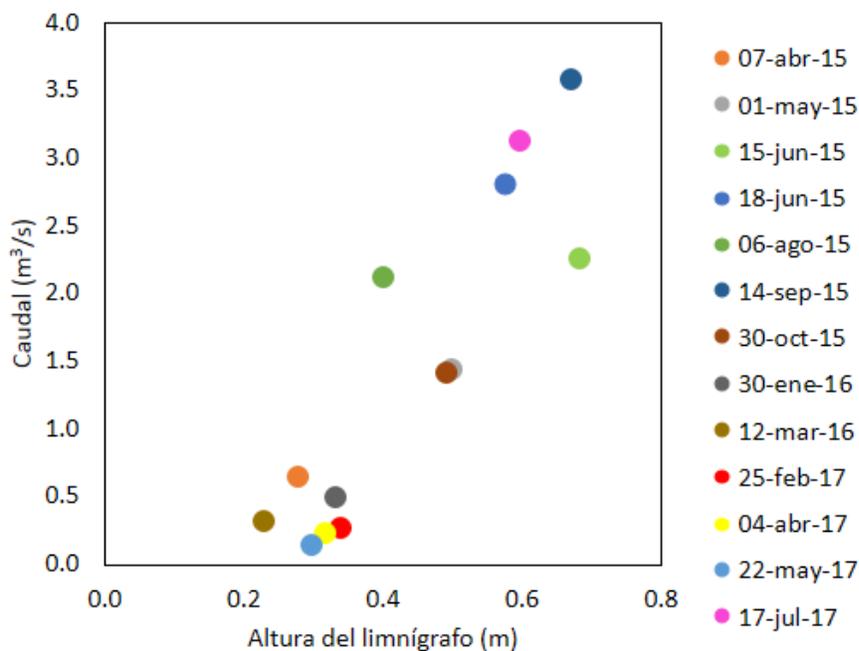


Figura A2. Relación nivel de agua-caudal, por cada aforo realizado

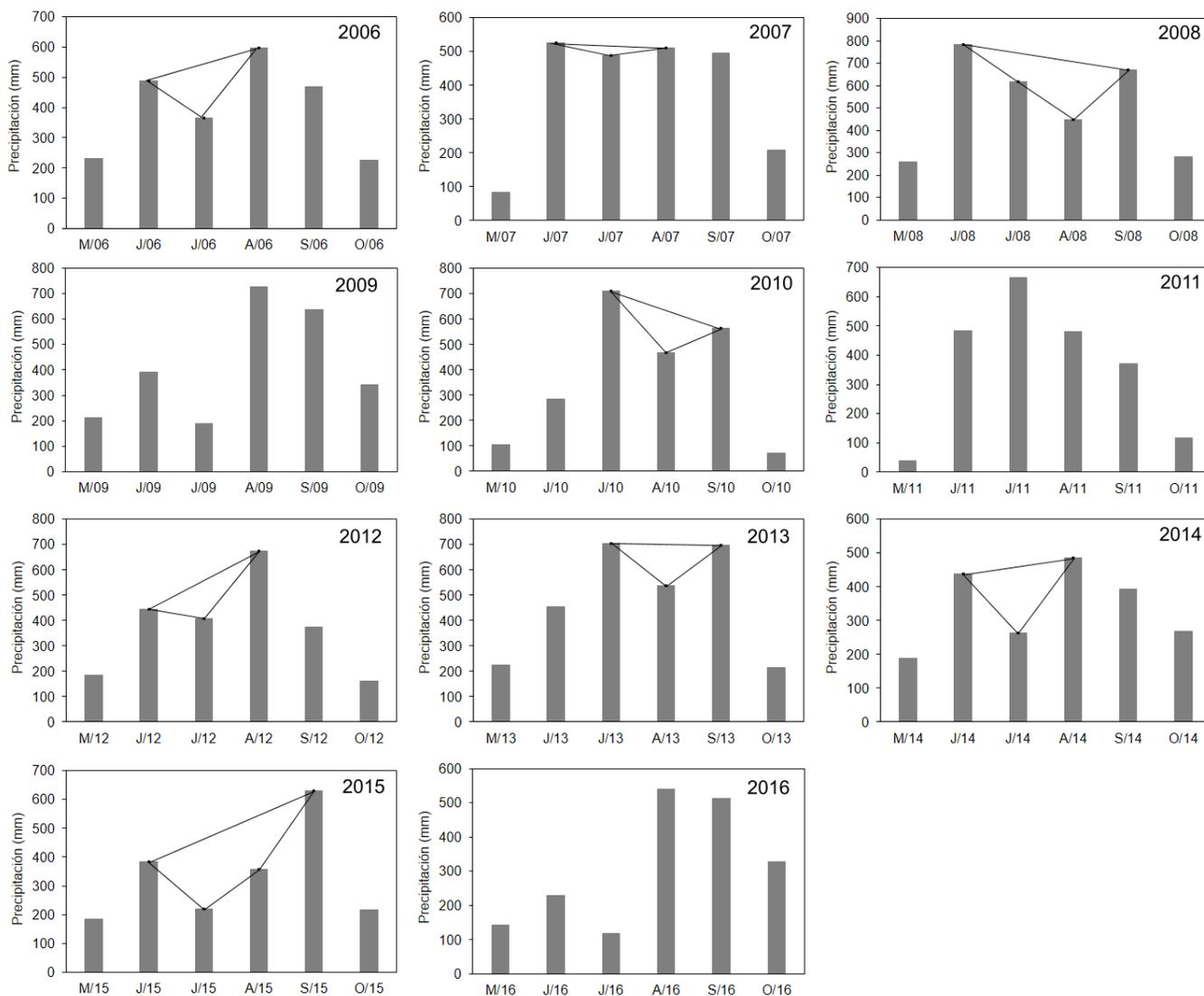


Figura A3. Polígonos funiculares de la serie de precipitación de 11 años, a la altitud de 2100 m.

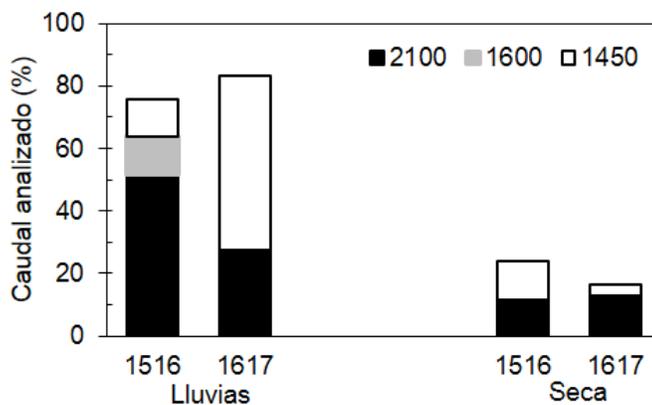


Figura A4. Distribución estacional del caudal analizado en hidrogramas, durante el período de estudio.

Créditos de fotografías

Las figuras de fotografía sin autor en la Tabla B, fueron tomadas por la autora de la tesis.

Tabla B. Autores de las fotografías

Figura	Autor
Foto de portada (lado izquierdo) Agosto 2015	Citlali Guzmán Huerta
4A	Friso Holwerda
5D	Paulina Balcázar Vargas
7	Paulina Balcázar Vargas
7B	Lyssette Elena Muñoz Villers



Panorámica debajo del puente, de aguas abajo (lado izquierdo) a aguas arriba (lado derecho).
Fotografía de Alitzel Guzmán (Enero 2016).



En camino al sitio (1450 m).
Fotografía de Alitzel Guzmán
(abril 2015).



Vista del río hacia aguas abajo.
Fotografía de Alitzel Guzmán (abril 2015).



Campaña de abril de 2015.
Fotografía de Alitzel Guzmán.



Ladera con pluviómetro (1450 m).
Fotografía de Alitzel Guzmán
(abril 2015).



Cauce del río Los Gavilanes, vista aguas arriba.
Fotografía de Alitzel Guzmán (Mayo 2017).



Preparación de la solución de sal.
Fotografía de Paulina Balcázar (julio 2017).



Medición de altura del agua del río.
Fotografía de Rodrigo Gómez (Mayo 2015)



Margen izquierdo del río, punto de medición
para su aforo.
Fotografía de Paulina Balcázar (febrero 2017).



Bucando y desenterrando el limnógrafo.
Fotografía de Paulina Balcázar (febrero 2017).