



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE CIENCIAS

Comportamiento hidrológico a varias escalas  
temporales de una cuenca periurbana, centro de  
Veracruz, México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

PRESENTA:

Julieta López Hernández

TUTORA

Dra. Lyssette Elena Muñoz Villers

Ciudad Universitaria, 2019  
Cd. Mx.





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.

• **Datos del alumno**

López  
Hernández  
Julieta  
55 1972 0435  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Ciencias  
Ciencias de la Tierra  
311174823

• **Datos de la tutora**

Dra  
Lyssette Elena  
Muñoz  
Villers

• **Datos del sinodal 1**

Dr  
Enrique Arturo  
Cantoral  
Uriza

• **Datos del sinodal 2**

Dra  
Melanie  
Kolb

• **Datos del sinodal 3**

M. en C.  
María Carolina  
Muñoz  
Torres

• **Datos del sinodal 4**

Dra  
María Susana  
Alvarado  
Barrientos

• **Datos del trabajo escrito**

Comportamiento hidrológico a varias escalas temporales de una cuenca periurbana,  
centro de Veracruz, México  
55 p.  
2019

*Para mi abuelo Alfredo  
y mi primo Arturo  
por su ejemplo y guía.*

# Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento brindado por parte del proyecto “*Experimental frameworks for evaluating net effects of hydrologic service payments on coupled socio-ecohydrologic systems in Mexico*” financiado por la National Science Foundation, EUA (No. 1313804) que busca entender la dinámica de los componentes sociales y ambientales a nivel cuenca y entender el impacto de programas de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos a través de la colaboración interdisciplinaria.

A la Dra. Lyssette E. Muñoz Villers, por la oportunidad de trabajar en este proyecto y dirigirme para su integro desarrollo. Así como al Dr. Enrique Cantoral, Dra. Melanie Kolb, M. en C. Carolina Muñoz y Dra. Susana Alvarado por sus valiosos comentarios en la revisión y culminación de este trabajo.

A la LCT. Alitzel Guzmán por su consejo y atención a mis dudas ocasionales.

Por su apoyo en campo y en la recolección de datos a Alitzel Guzmán y Paulina Balcazar, así como Eduardo Aranda y Eduardo Castilleja, miembros del programa de monitoreo comunitario del río “Asociación Amigos del Pixquiac”.

## Agradecimientos que permitieron mi formación

A la Dra. Lyssette Muñoz por ser una maravillosa tutora y persona, por guiarme y motivarme durante la realización de este trabajo e inspirarme en mi desarrollo profesional y personal. Mi gratitud y cariño eterno.

Agradezco al Taller de Ciencia para Jóvenes (proyectos PAPIME PE100912 y PE100915 de la DGAPA) donde tuve la oportunidad de trabajar directamente con jóvenes entusiastas y conocer investigadores con pasión en la ciencia que me han servido de inspiración y ejemplo en mi desarrollo profesional. Gracias especialmente al Dr. Juan Martín Gómez y a la M. en C. Carolina Muñoz por permitirme ser parte de este proyecto en el que creo firmemente y que es uno de los cimientos de mi formación académica.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el espacio de crecimiento profesional y personal. A la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación Campus Juriquilla donde senté las bases de mi formación.

### III

A Caro Muñoz por todas las oportunidades de crecimiento. Por tu apoyo, cariño y amistad, mi más sincero agradecimiento.

A la Ing. Tonantzin Camacho y al Geog. Marco A. Pérez por darme la oportunidad de trabajar con ustedes y brindarme el espacio para desarrollar mis habilidades y establecer cimientos de mi profesión. Agradezco su confianza, guía y amistad.

Al Dr. Christian Birkel y al equipo que conforma el Observatorio del Agua y Cambio Global (OACG) con quienes tuve la oportunidad de trabajar en la Universidad de Costa Rica y donde establecí las bases de mi profesión e interés profesional.

Agradezco a mi familia toda por ser maravillosa. De manera especial a mi abuelo Alfredo que es la raíz de lo que soy y de lo que somos como familia.

A mi madre por su amor y su consejo, por regalarme siempre la risa y por enseñarme de bondad y de empatía. A mi padre por su apoyo incondicional e impulsarme siempre a alcanzar mis objetivos. Este logro es tan suyo como mío y todo lo he logrado es por ustedes. Los amo.

A Dany, mi hermano, que me quiere y me cuida a su particular forma de ser.

Agradezco a mi prima Alejandra y mi primo Arturo que son mi más grande inspiración profesional pero sobre todo personal. Gracias infinitas por su apoyo y cariño, pero sobre todo por su ejemplo.

A mis tías, tíos, primas y primos, por motivarme y alentarme. A mi tía José por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí y mi tía Tere por su amor y fortaleza.

A Palito e Itzelo por su amistad que me ha hecho crecer y florecer. A Juan Ri por ser y siempre estar y a Daniel por su amistad inquebrantable. Celebro su amistad y su cariño cada día, gracias por llegar a mi vida.

A Charlie, Luis Fer y Clara por su amistad cálida y sincera. Y a mi familia de terrólogos juriquillos por la complicidad y el acompañamiento a lo largo de estos años.

A mis amigas de hoy y siempre, Vale y Lu.

A todos aquellos de quienes he aprendido y a quienes me enseñaron a aprender.

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Resumen</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Cuencas hidrográficas . . . . .	5
2.2. Ciclo hidrológico . . . . .	5
2.2.1. Generación de flujos en cuencas . . . . .	7
2.3. Caudal y métricas hidrológicas . . . . .	8
<b>3. Materiales y métodos</b>	<b>10</b>
3.1. Área de estudio . . . . .	10
3.1.1. Presas hidráulicas en la cuenca del río Pixquiac . . . . .	13
3.2. Instrumentación y medición de la precipitación . . . . .	13
3.3. Instrumentación y medición del caudal . . . . .	14
3.3.1. Medición de la columna de agua: limnígrafo y barómetro . . . . .	14
3.3.2. Aforo químico . . . . .	15
3.3.3. Método de área velocidad . . . . .	18
3.4. Medición de parámetros fisicoquímicos . . . . .	18
3.5. Análisis de datos . . . . .	19
3.5.1. Análisis de la precipitación . . . . .	19
3.5.2. Análisis de caudal . . . . .	19
<b>4. Resultados</b>	<b>22</b>
4.1. Precipitación . . . . .	22
4.2. Caudal . . . . .	24
4.3. Métodos de separación de hidrogramas . . . . .	25
4.4. Análisis de hidrogramas . . . . .	26
4.4.1. Separación del caudal en flujo rápido ( $Q_r$ ) y flujo base ( $Q_b$ ) . . . . .	26
4.4.2. Coeficiente de escurrimiento ( $Q_T/P$ ) . . . . .	28
4.4.3. Coeficiente de escurrimiento del flujo rápido ( $Q_r/P$ ) y flujo base ( $Q_b/P$ ) . . . . .	29
4.4.4. Tiempos de respuesta . . . . .	30

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	V
4.5. Área máxima de contribución (AMC) y antecedente de precipitación (AP) . . . . .	31
4.6. Curva de duración flujo (CDF) . . . . .	32
4.7. Curva maestra de recesión de flujo base (CMRFB) . . . . .	33
4.8. Parámetros fisicoquímicos . . . . .	34
<b>5. Discusión</b>	<b>35</b>
5.1. Comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pixquiac . . . . .	35
5.2. Eventos hidrometeorológicos extraordinarios . . . . .	38
5.3. Trabajo a futuro y recomendaciones . . . . .	39
<b>6. Conclusiones</b>	<b>40</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>41</b>

# Índice de figuras

1.	Representación del ciclo hidrológico . . . . .	6
2.	Fuentes de generación de caudal. . . . .	7
3.	Propiedades y métricas del hidrograma . . . . .	9
4.	Ubicación de la cuenca del Río Pixquiac en el estado de Veracruz . . . . .	11
5.	Tipo de vegetación y usos del suelo en la cuenca del río Pixquiac . . . . .	12
6.	Mapa de ubicación del área y punto de aforo, y red de pluviómetros dentro y fuera de la cuenca . . . . .	12
7.	Ubicación y área presas dentro de la cuenca del río Pixquiac . . . . .	14
8.	Instrumentación utilizada para la medición de caudal . . . . .	15
9.	Sección transversal para la caracterización del río . . . . .	16
10.	Instrumentación de los métodos de aforo . . . . .	17
11.	Sección transversal del río y puntos de medición de velocidad en profundidad . . . . .	18
12.	Curva columna-caudal construida para el periodo de septiembre 2015 a septiembre 2016 (punteada) y septiembre 2015-octubre 2017 (negra) . . . . .	20
13.	Métodos de separación de hidrogramas: A) Método Aproximado, B) Método A-B, C) Método A-A <sup>1</sup> . . . . .	21
14.	Precipitación y caudal mensual . . . . .	22
15.	Serie de caudal y precipitación anual . . . . .	25
16.	Contribución del flujo rápido y base al caudal mensual promedio . . . . .	26
17.	Aporte de los flujos rápidos y base al $Q_T$ . . . . .	27
18.	Disminución del caudal en su descenso (círculo gris) en la curva de recesión durante el evento del 25/6/17 16:00 hrs al 27/6/17 03:50 hrs . . . . .	28
19.	Coefficiente de escurrimiento mensual del flujo rápido y el flujo base . . . . .	30
20.	Relación del flujo rápido con la precipitación promedio por evento . . . . .	30
21.	Promedio mensual del tiempo de pico ( $T_p$ ), tiempo de retraso ( $T_r$ ) y tiempo de recesión ( $L$ ) . . . . .	31
22.	Área máxima de contribución (AMC) de la cuenca con base en el antecedente de precipitación (AP) a 15 días . . . . .	32
23.	Curva de duración de flujo . . . . .	33
24.	Curva maestra de recesión de flujo base . . . . .	33

# Índice de tablas

1.	Fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad de Xalapa. Las resaltadas en gris son aquellas que se encuentran ubicadas dentro de la cuenca del río Pixquiac. Fuente Paré y Gerez (2012) . . . . .	13
2.	Precipitación promedio por mes en el período noviembre 2016-octubre 2017 . . . . .	23
3.	Parámetros descriptivos y estadísticos de la precipitación anual para la época de secas . . . . .	24
4.	Parámetros descriptivos y estadísticos de la precipitación anual para la época de lluvias . . . . .	24
5.	Caudal mensual diario . . . . .	25
6.	Número de hidrogramas separados por cada método . . . . .	26
7.	Coefficiente de escurrimiento $Q_T/P$ mensual . . . . .	29
8.	Parámetros fisicoquímicos . . . . .	34

# Resumen

El abastecimiento de agua a ciudades es uno de los retos ambientales más grandes que enfrenta México en la actualidad. Por ello, es imprescindible proteger y mantener las fuentes confiables de agua, lo que lleva a entender el funcionamiento hidrológico de cuencas para implementar políticas adecuadas de gestión y conservación de los recursos hídricos. La cuenca de río Pixquiac ubicada en Veracruz, abastece de agua en un 40 % a la ciudad capital Xalapa y pueblos aledaños. Está compuesta por un mosaico diverso de vegetación, siendo el bosque mesófilo de montaña (BMM) la cobertura dominante (33 %); este bosque además, es mundialmente importante por su gran valor ecológico e hidrológico. A su vez, el entendimiento de la dinámica hidrológica en cuencas de mediana escala es muy limitado, a pesar de su importancia ambiental y socioeconómica. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pixquiac a lo largo de un año hidrológico (noviembre 2016-octubre 2017), utilizando mediciones continuas y de alta resolución de precipitación y caudal. Durante este periodo, la precipitación promedio registrada fue de 2645 mm asociada principalmente a entradas de lluvia en la parte media-alta de la cuenca (~2000-2200 m s.n.m). El caudal observado fue de 992 mm con un coeficiente de escurrimiento ( $Q/P$ ) del 37 %. Este porcentaje fue en promedio 10 % más bajo que lo observado en cuencas similares, y se atribuye principalmente a la captación de agua en presas dentro de la cuenca y a pérdidas por evapotranspiración y percolación profunda. En total, se analizaron 159 eventos de precipitación-caudal, donde se observó un aporte del 95 % del flujo base sobre el 3 % del flujo rápido, lo que sugiere una dominancia de los flujos subsuperficiales en la generación de caudales. A su vez, la curva de duración de flujo (CDF) muestra un régimen hidrológico poco variable, por su parte la curva maestra de recesión del flujo base (CMRFB) con una duración de 94 días muestra desviación de la regresión lineal, lo que sugiere pérdidas de agua por percolación profunda.

*Palabras clave:* Caudal, precipitación, bosque mesófilo de montaña, flujo base, suministro de agua, Xalapa, Veracruz.

# Capítulo 1

## Introducción

El crecimiento desproporcionado de las ciudades pequeñas y medianas en México, la disponibilidad de suficientes servicios de provisión de agua y la capacidad de los ecosistemas para proveer este recurso, es uno de los grandes retos que enfrentan en la actualidad la mayoría de las áreas urbanas en el país. En el año 2015, la cantidad de agua disponible promedio por habitante en el país era de 3736 m<sup>3</sup>/hab/año, lo que representa una disminución del 79 % respecto a los 17742 m<sup>3</sup>/hab/año que solían haber en el año 1950 (CONAGUA, 2015; SEMARNAT, 2016).

Por otra parte, la desigualdad en la disponibilidad natural del agua a lo largo del territorio mexicano, al igual que su distribución a nivel estacional, dificulta la gestión y manejo sustentable de éste, lo que conlleva a elevados costos de infraestructura de almacenamiento y suministro. Por ejemplo, se invierte una gran cantidad de dinero en conducir agua de sitios remotos en cuencas, con el fin de poder abastecer regularmente a las poblaciones (Cotler-Ávalos, 2010). La correcta gestión del agua es un proceso indispensable que condiciona la existencia misma de las ciudades y su desarrollo (Caire-Martínez, 2005; Fonseca-Ortiz et al., 2013).

Actualmente, la ciudad de Xalapa, Veracruz enfrenta este problema. Hoy en día, su población es de aproximadamente 500 mil habitantes, y ha experimentado un rápido crecimiento poblacional de más del 30 % del año 1995 al 2017 (Cameron, 2016; SEFIPLAN, 2016). El sistema de abastecimiento de agua potable para la ciudad depende en un 58 % de la presa de Los Colibríes ubicada en el río Huitzilapan, de un 38 % de las presas Medio Pixquiac, Alto Pixquiac, Xocoyolapan y Cinco Palos, ubicadas en la parte media y alta de la cuenca del río Pixquiac y de un 4 % de la laguna El Castillo ubicada al oeste del municipio de Xalapa (Paré y Gerez, 2012).

La importancia de la cuenca del río Pixquiac, cuyo nombre proviene del náhuatl *pixquitl* que significa cosecha y *atl* que significa agua, por lo tanto “cosecha de agua”

(GDN-UNAM, 2012), radica en que es una de las fuentes principales de abastecimiento de agua para la ciudad de Xalapa y otras poblaciones dentro de la cuenca y en la zona aledaña (Paré y Gerez, 2012). Esta cuenca se localiza al oeste de Xalapa; y se encuentra en su mayoría cubierta por pastizales (22%), cafetales bajo sombra (9%) y por bosque (46%), donde la vegetación dominante es el bosque mesófilo de montaña con un 33% (Holwerda et al., 2016). El bosque mesófilo de montaña (BMM), también conocido como bosque de niebla, es mundialmente importante por su biodiversidad (Williams-Linera, 2012) y gran valor hidrológico (Muñoz-Villers et al., 2015, 2012). El BMM está asociado a diversos servicios ecosistémicos como son la regulación de flujos de agua, conservación de la calidad del agua, control de la erosión y sedimentación, recarga de acuíferos y regulación del nivel freático, favorecimiento de la infiltración y conservación de hábitats acuáticos, entre otros (García-Coll et al., 2004; Gómez-Tagle et al., 2011; Martínez et al., 2009; Williams-Linera, 2012).

A pesar de ello, el BMM es uno de los ecosistemas más amenazados debido a la deforestación, perturbación y cambio de uso de suelo, consecuencia de la alta demanda de recursos por el acelerado crecimiento poblacional y su impacto en los ecosistemas (National Research Council, 2008). En el centro de Veracruz, durante el periodo de 1990 a 2003, se observó la pérdida de este ecosistema en un 30%, debido a la deforestación y conversión a pastizales y zonas de cultivo (Muñoz-Villers y López-Blanco, 2008).

Desde el punto de vista hidrológico, el deterioro y cambio de uso del suelo en cuencas con cubierta forestal altera el ciclo del agua terrestre, y en consecuencia la dinámica ecohidrológica de la cuenca. En forma particular, la capacidad de infiltración se ve afectada con el cambio de la cobertura del suelo promoviendo superficies impermeables, tales como carreteras o bien, cuando las capas superficiales del suelo se ven alteradas por compactación, reduciendo así la capacidad de infiltración del suelo favoreciendo la generación de flujos superficiales, y con ellos el transporte de sedimentos y altas tasas de erosión en laderas y cuencas (National Research Council, 2008). A su vez, esta reducción en la capacidad de infiltración afecta la recarga de agua en el subsuelo y de los mantos freáticos, teniendo como consecuencia la disminución del caudal durante la época de secas. Por otra parte, la evapotranspiración también disminuye por el cambio de vegetación lo que conlleva a aumentos en el caudal anual (Bruijnzeel, 2004; Muñoz-Villers et al., 2015).

Ante esta situación de rápido deterioro, surge el programa de pago por servicios ambientales (PSA) que consiste en la retribución económica a las comunidades por la conservación y manejo sustentable de sus predios con áreas naturales (Williams-Linera, 2012). En 2003 se puso en marcha por primera vez en México por parte de la Comi-

sión Nacional Forestal (CONAFOR), el programa de pago por servicios ambientales hidrológicos (PSAH), en el municipio de Coatepec, Veracruz, donde el pago anual por hectárea era de \$300 a \$400 por parte de CONAFOR o hasta \$500 por parte del municipio de Coatepec (Cameron, 2016; García-Coll et al., 2004; Williams-Linera, 2012). En el 2006, se implementó en la cuenca del río Pixquiac el programa de pago de compensación por servicios ambientales y desarrollo rural integral del Pixquiac (PROSAPIX), como una herramienta que busca impulsar el desarrollo local que permita reducir la presión sobre los recursos naturales e impulsar las capacidades locales (Paré y Gerez, 2012). A través de este programa, se busca la protección del recurso hídrico, con el fin de garantizar el abastecimiento autosuficiente de agua en buena calidad y cantidad. Para alcanzar ese objetivo, se requiere pensar en el enfoque de cuenca como unidad básica de manejo y gestión, con lo que se permite una visión completa de los procesos hidrológicos en el espacio y tiempo (Birkel, 2007; Cotler-Ávalos, 2010; Espejel et al., 2011).

El entendimiento de la dinámica hidrológica de las cuencas resulta indispensable para la implementación de políticas de gestión y conservación del agua (García-Coll et al., 2008). Ante esta perspectiva y ante la preocupación por el acelerado deterioro ambiental consecuencia del crecimiento poblacional y de zonas urbanas, la cuenca del río Pixquiac ha sido monitoreada en su parte baja por la “Asociación Amigos del Pixquiac” desde el 2005. Se miden parámetros como caudal, temperatura, pH, turbidez, oxígeno disuelto, alcalinidad y dureza empleando técnicas de monitoreo comunitario establecidas por el programa Global Water Watch. En el estudio realizado por Dapa-Zapiain (2018), se compararon las observaciones obtenidas de caudal en condiciones base a través del método del flotador utilizado durante el monitoreo comunitario con un método de aforo científico estándar, y se observó que las mediciones realizadas por el monitoreo comunitario fueron muy similares para caudales bajos (rango de 0.1 a 2.07 m<sup>3</sup>/s), mientras que para caudales medios (2.015-3.92 m<sup>3</sup>/s) y altos (4.3-6.63 m<sup>3</sup>/s), la sobreestimación fue del 66 % y 144 %, respectivamente. Estas diferencias se atribuyen a la dificultad de controlar la trayectoria del flotador en superficie ya que, a caudales altos, la velocidad del agua suele ser mayor en la superficie del río.

A pesar de que la información recabada por el monitoreo comunitario confiere un buen acercamiento a la dinámica hidrológica de la cuenca y condiciones fisicoquímicas del río, es necesario entender el funcionamiento hidrológico de la cuenca empleando técnicas de medición continua y de alta resolución. Con base en lo anterior, el objetivo de esta tesis fue estudiar por vez primera la dinámica hidrológica de la cuenca del río Pixquiac a diferentes escalas temporales, con lo que se busca entender el comportamiento de la precipitación y el caudal en la cuenca, debido a su importancia socioam-

biental para la ciudad de Xalapa.

### **Objetivo general**

Estudiar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pixquiac durante el periodo noviembre 2016-octubre 2017, utilizando datos observados de precipitación y caudal para examinar la respuesta del río a varias escalas temporales.

### **Objetivos particulares**

1. Cuantificar el caudal del río en distintas condiciones del flujo base utilizando varios métodos de aforo para construir la curva columna de agua-caudal.
2. Analizar la relación precipitación-caudal a escala anual, estacional, mensual, diaria y por eventos durante el año noviembre 2016-octubre 2017.
3. A nivel de evento de lluvia, examinar la respuesta del río para cuantificar el caudal y su partición en flujos rápidos y base. Asimismo, determinar los tiempos de retraso y de recesión así como los picos máximos de descarga.
4. Construir y evaluar la curva de duración del caudal (CDF) y la curva maestra de recesión del flujo base (CMRFB).

## Capítulo 2

# Marco teórico

### 2.1. Cuencas hidrográficas

Las cuencas hidrográficas son las unidades de estudio en la hidrología y se refiere a un área del paisaje que drena el agua de la precipitación dentro de un límite topográfico o parteaguas y donde la salida es en forma de evapotranspiración y caudal, y en su caso también por percolación profunda (Robinson y Ward, 2017). La dinámica de la escorrentía en una cuenca está en función de sus características geomorfológicas, tales como el índice de Gravelius que señala la compacidad de una cuenca. La densidad de drenaje que indica el desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca, donde una mayor densidad de escurrimientos indica mejor estructura de la red fluvial y mayor potencial de erosión. El número de orden de la cuenca, describe el número de ramificaciones y la estructura de la red de drenaje. Además, el movimiento del agua a través de la cuenca depende intrínsecamente de otras propiedades físicas como el gradiente altitudinal y la pendiente, así como del tipo de suelo, la cobertura y el uso del suelo. Como sistema, la concepción de cuenca como unidad también permite el estudio del balance hídrico sin importar su tamaño o condición (Robinson y Ward, 2017).

### 2.2. Ciclo hidrológico

La continua transferencia de agua entre la superficie terrestre, el océano y la atmósfera, a través del movimiento continuo e interdependiente del agua en todas sus fases, se refiere al *ciclo hidrológico* y es la clave para su distribución a lo largo de la superficie de nuestro planeta (Lutgens y Tarbuck, 2013; Robinson y Ward, 2017). La complejidad del ciclo hidrológico, comprende el ininterrumpido y secuencial movimiento del

agua a través de diversos procesos y mecanismos, tales como la transpiración o la interceptación; sin embargo, con el fin de enfocarnos en los procesos implicados para este trabajo, nos centraremos solo en la descripción de la precipitación y la generación de flujos y caudales.

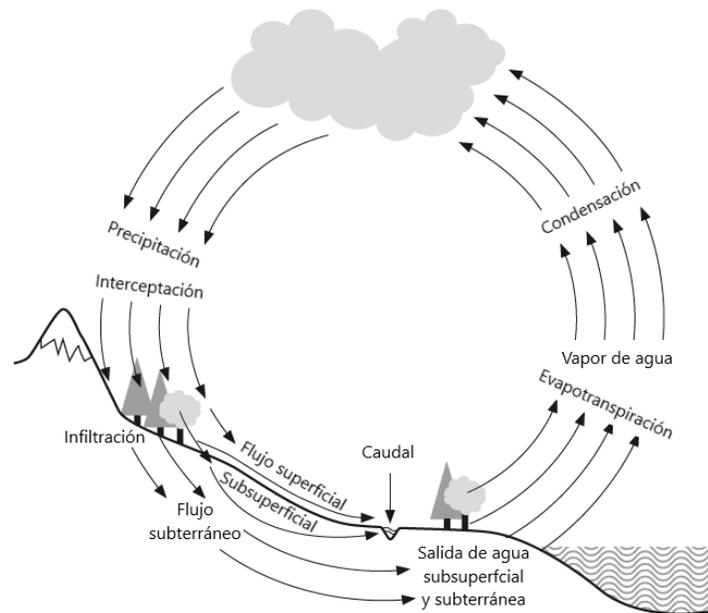


Figura 1: Representación del ciclo hidrológico. Modificado de Robinson y Ward (2017).

La precipitación ( $P$ ), es uno de los factores determinantes sobre la hidrología de una región (Robinson y Ward, 2017). Se forma tras la evaporación y elevación de masas de agua en la atmósfera, para su posterior enfriamiento y condensación y se manifiesta en diferentes formas, ya sea como lluvia, niebla, nieve o granizo. Tras un evento de precipitación, esta se puede ver implicada en distintos procesos del ciclo hidrológico; una parte puede ser interceptada por la vegetación, mientras que otra caerá directamente al suelo, dando pie a la infiltración.

La infiltración ( $F$ ), es el proceso mediante el cual el agua ingresa al suelo en sus capas superficiales. La capacidad de infiltración, es definida por Horton (1933) como la tasa máxima a la cual el agua puede ser absorbida por el suelo; generalmente decrece rápidamente al principio de un evento de precipitación y más lentamente con el paso del tiempo y del evento. Este comportamiento se ve determinado por diversos factores como las condiciones de la superficie del suelo, su compactación y estructura, y el tipo de vegetación dominante. Además, para continuar con este proceso, el suelo debe

tener la capacidad de conducir el agua infiltrada a una determinada tasa, que también dependerá de las propiedades del suelo como la textura y la estructura (Robinson y Ward, 2017). Cuando el suelo se satura, el agua se moverá en el sentido de la pendiente en forma de escorrentía superficial, así bien otra parte del agua que se infiltra en el suelo será absorbida por la vegetación y reintegrada a la atmósfera en forma de evapotranspiración ( $E_t$ , Muñoz-Villers, 2008).

### 2.2.1. Generación de flujos en cuencas

La precipitación puede llegar al cauce del río para la formación de caudal, a través de diversas rutas, tales como precipitación directa en el canal ( $Q_p$ ), por flujo superficial ( $Q_o$ ), por flujo subsuperficial ( $Q_i$ ) y por flujo subterráneo ( $Q_g$ ) (Figura 2; Robinson y Ward, 2017)

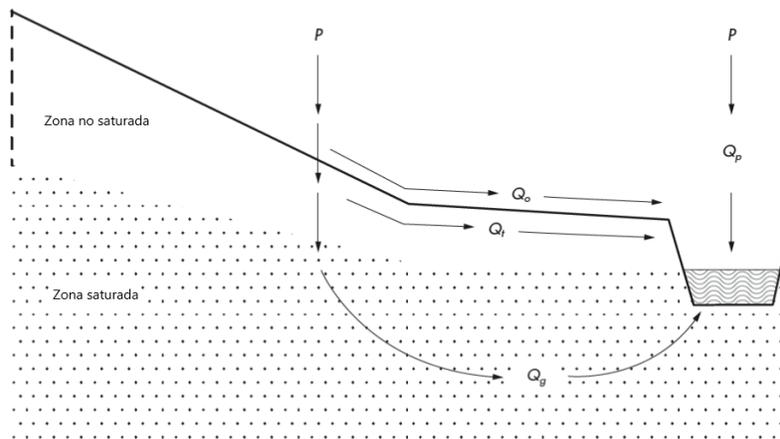


Figura 2: Fuentes de generación de caudal. Modificado de Robinson y Ward (2017).

La precipitación de canal ( $Q_p$ ), suele tener poca contribución debido a que la superficie del canal del río ocupa un área muy pequeña de aproximadamente del 1 al 2% del área de la cuenca. Sin embargo,  $Q_p$  podría aumentar durante tormentas o eventos de lluvia prolongados, dado que el canal del río tiende a crecer y expandirse (Robinson y Ward, 2017).

El flujo superficial ( $Q_o$ ) es el movimiento del agua sobre el terreno hacia el cauce de un río. Puede ser generado con base a dos mecanismos físicos diferentes: 1) el *flujo hortoniano*, que sucede cuando la intensidad de la lluvia ( $I_p$ ) excede la capacidad de infiltración del suelo ( $F$ ), por lo que el agua se acumula sobre el suelo y empieza a mo-

verse pendiente abajo hasta llegar al cauce del afluente (Law, 2013; Liu et al., 2004) y 2) cuando el suelo alcanza su nivel máximo de saturación, por lo que el exceso de agua empezará a moverse en el sentido de la pendiente de la cuenca como flujo superficial (Beven y Freer, 2001; Muñoz-Villers, 2008). El  $Q_o$  se ve afectado por diversos factores, como la permeabilidad del suelo, la pendiente topográfica, y el tipo y densidad de vegetación (Beven y Freer, 2001; Law, 2013; Muñoz-Villers, 2008; Robinson y Ward, 2017).

El flujo subsuperficial ( $Q_t$ ) se refiere al movimiento del agua cuando infiltra en el suelo y se mueve lateralmente en el sentido de la pendiente hacia el canal del río (Muñoz-Villers, 2008). Este flujo puede ocurrir cuando la conductividad hidráulica lateral del suelo, excede considerablemente la vertical. Las condiciones que favorecen la generación de flujo subsuperficial es cuando una capa de suelo impermeable superpone otra de roca, cuando el suelo está marcadamente estratificado, por cambio en la textura entre los horizontes, por la presencia de macroporos y macrofisuras y la actividad biológica (Robinson y Ward, 2017).

El flujo subterráneo ( $Q_g$ ) es el flujo de agua que percola a horizontes más profundos del suelo hasta el nivel freático y que, eventualmente, puede aportar al caudal de río. Debido a que el movimiento del agua a mayor profundidad es más lento, el aporte del flujo subterráneo al caudal puede estar desfasado del evento de precipitación, por semanas, meses e incluso años. El aporte de  $Q_g$  suele ser regular y representa un componente importante del caudal total, especialmente durante la temporada de secas (Hewlett y Hibbert, 1967; Robinson y Ward, 2017).

En conjunto, la precipitación en canal, el flujo superficial, subsuperficial y subterráneo, son las principales fuentes de generación de caudal en un río. En cuencas de gran cobertura forestal, los principales mecanismos de generación de escurrimiento son los flujos subsuperficiales y ocasionalmente los superficiales, cuando los eventos de precipitación son de alta intensidad y corta duración (Muñoz-Villers, 2008).

### 2.3. Caudal y métricas hidrológicas

El caudal es el flujo del agua en corrientes, ríos u otro tipo de canales; suele por lo general recibir agua únicamente de su cuenca de drenaje, que es delimitada topográficamente por los parteaguas y depende intrínsecamente de las características fisiográficas de esta. En general, es representado con la letra  $Q$  y suele representarse en  $m^3/s$  como unidad de descarga, o bien en  $mm$  como unidad de lámina de agua. En ríos perennes, el caudal es continuo a lo largo del tiempo y varía dependiendo de las entradas por preci-

pitación. La respuesta del caudal a un evento de lluvia, se representa gráficamente con un hidrograma, que muestra la descarga de agua en un río en un tiempo determinado (Edwards et al., 2015). En la figura 3 se representa un hidrograma con los parámetros de interés para este trabajo: Flujo rápido ( $Q_r$ ), flujo base ( $Q_b$ ), tiempo de pico ( $T_p$ ), tiempo de retraso ( $L$ ) y tiempo de recesión ( $T_r$ ).

La respuesta inmediata del caudal, indica la parte de la precipitación que llega al cauce por medio de rutas rápidas como el flujo superficial ( $Q_o$ ) y precipitación de canal ( $Q_p$ ) y corresponde al flujo rápido ( $Q_r$ ) del evento. Por su parte, el flujo base ( $Q_b$ ) es el componente del caudal generado por flujos subsuperficiales ( $Q_t$ ) y subterráneos ( $Q_g$ ), y es el responsable de mantener los flujos en los ríos durante la época de estiaje (Hewlett y Hibbert, 1967; Robinson y Ward, 2017).

En cuanto al tiempo de pico ( $T_p$ ) se refiere al tiempo de respuesta entre el inicio del flujo rápido y el pico (valor máximo de caudal alcanzado durante el evento), el tiempo de retraso ( $L$ ) es el tiempo transcurrido entre el inicio de la precipitación y el pico del hidrograma y el tiempo de recesión ( $T_r$ ) refiere al tiempo que tarda el descenso del caudal hasta alcanzar el nivel del flujo base o bien hasta el inicio de un nuevo evento; esta última situación ocurre principalmente durante época de lluvias donde los eventos suelen ser diarios y no permiten disminuir la recesión del hidrograma hasta el flujo base inicial.

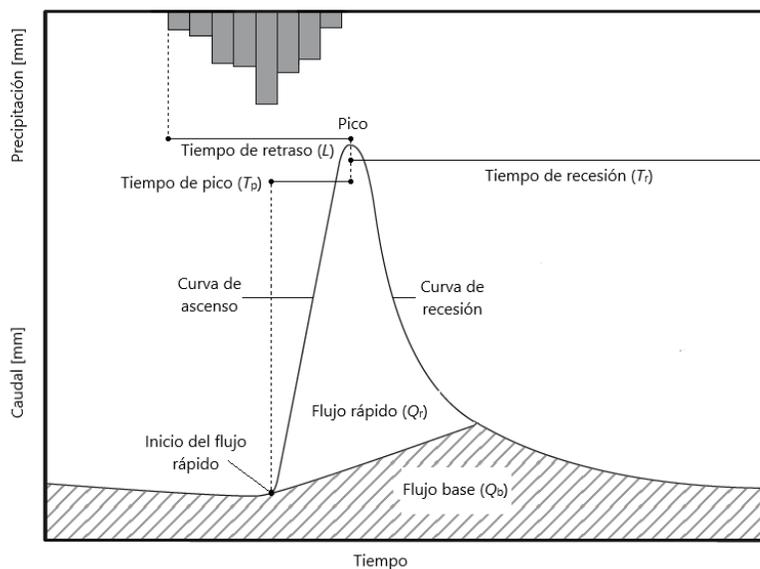


Figura 3: Propiedades y métricas del hidrograma. Modificado de Robinson y Ward (2017).

## Capítulo 3

# Materiales y métodos

### 3.1. Área de estudio

La cuenca del río Pixquiac se ubica en la vertiente nororiental del sistema volcánico de montaña Cofre de Perote ( $19^{\circ}30'36''$  N y  $97^{\circ}08'56.1''$  O), en la región centro del estado de Veracruz; específicamente, al oeste de la ciudad de Xalapa y al noroeste de la ciudad de Coatepec (Figura 4). La cuenca comprende una superficie de  $107.27 \text{ km}^2$  y una longitud de  $30.27 \text{ km}$  (Paré y Gerez, 2012), abarcando una variación altitudinal de los  $1040$  a los  $3740 \text{ m s.n.m}$  (García-Coll et al., 2008). Pertenece a la cuenca alta del río La Antigua, la que a su vez forma parte de la región hidrológica número 28 del río Papaloapan (Paré y Gerez, 2012).

La cuenca posee un coeficiente de compacidad de Gravelius de  $1.98$  que indica una forma alargada-rectangular; esto es, estrecha en los extremos y ancha en la parte media-alta, con una pendiente promedio del  $10\%$ . Los principales ríos tributarios de la cuenca son Huichila, Agüita Fría, Xocoyoloapan y Atopa (Menchaca y Alvarado, 2011), formando un río perenne de orden cuatro y red de drenaje promedio de  $3.95 \text{ km/m}^2$  conformada por  $213$  ríos,  $25$  perennes y  $188$  intermitentes (Menchaca y Alvarado, 2011; Paré y Gerez, 2012). De acuerdo con Holwerda et al. (2016), la precipitación promedio anual a los  $2100 \text{ m}$  de altitud es de  $\sim 2950 \text{ mm}$ , mientras que el caudal promedio anual es de  $\sim 620 \text{ mm}$  reportado por la asociación “Amigos del Pixquiac”, quienes desde 2005 realizan cada mes un monitoreo comunitario utilizando técnicas de Global Water Watch (GWW). De la precipitación promedio anual reportada, el  $80\%$  se observa en la época de lluvias (mayo-octubre), al igual que el  $74\%$  del caudal promedio anual reportado.

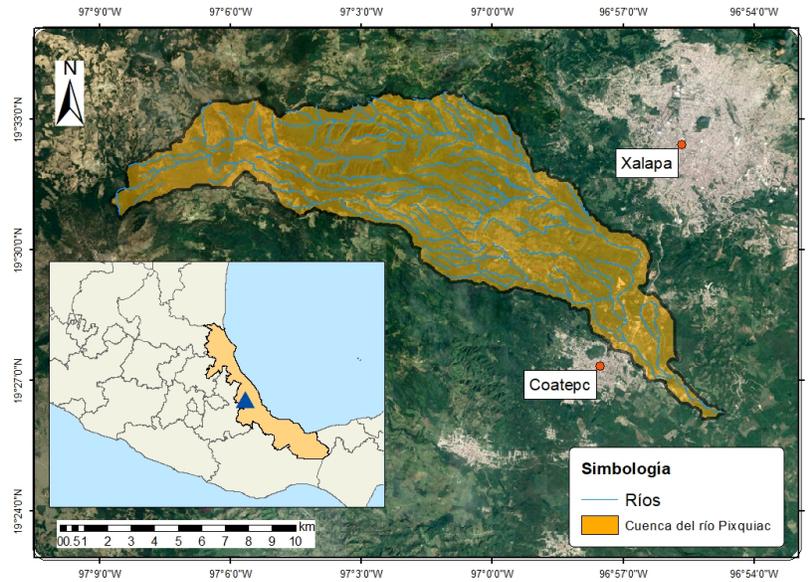


Figura 4: Ubicación de la cuenca del Río Pixquiatic en el estado de Veracruz.

El gradiente altitudinal de la cuenca proporciona las condiciones para que existan varios tipos de climas, con base en el sistema de clasificación de Köppen modificado por García (2004), estos son: Cb'(m)(f) templado-semifrío en la zona alta de la cuenca, C(f) templado húmedo en la zona media y (A) Cf semicálido templado en la zona baja (Manson, 2007). Los tipos de vegetación dominantes son el bosque mesófilo de montaña (33%), bosque de coníferas (13%), pastizal (22%) y sistemas agroforestales (cafetal de sombra, 9%) (Holwerda et al., 2016; Figura 5).

La cuenca es de origen volcánico por lo que predominan tipos de roca como andesitas, toba básica y brecha volcánica, cada una con resistencia diferencial a los procesos de erosión (Paré y Gerez, 2012). En cuanto al tipo de suelo, Manson (2007) reporta que los predominantes son el Acrisol órtico, Andosol húmico y Andosol ocrico. Estos tipos de suelo tienen alto contenido de ceniza volcánica (Paré y Gerez, 2012) provenientes del volcán del Cofre de Perote. Son suelos con textura franco limosa y someros, o bien profundos limitados por rocas ígneas extrusivas (Williams-Linera, 2012). Son suelos fértiles debido al alto contenido de materia orgánica, y a pesar de su carácter ácido y bajo en nutrientes, poseen minerales alófonos que les confieren un gran potencial de infiltración y retención de agua (Kutflék y Nielsen, 2015; Williams-Linera, 2012).

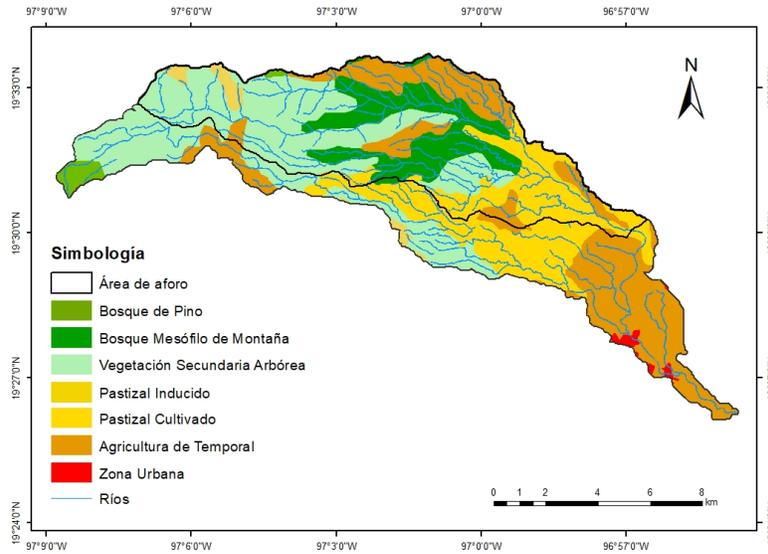


Figura 5: Tipo de vegetación y usos del suelo en la cuenca del río Pixquiá. Elaboración propia con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2016) Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, Serie VI (Capa Unión).

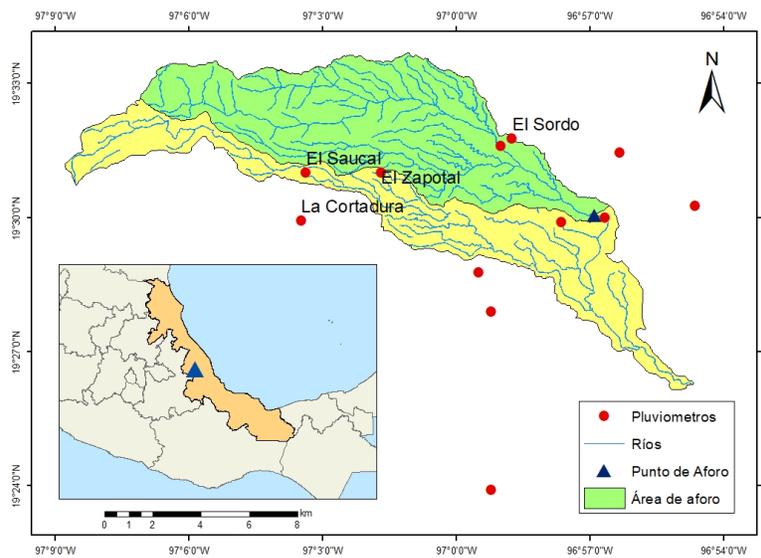


Figura 6: Mapa de ubicación del área y punto de aforo, y red de pluviómetros dentro y fuera de la cuenca

### 3.1.1. Presas hidráulicas en la cuenca del río Pixquiac

El abastecimiento de agua para la ciudad de Xalapa depende en un 38 % de las presas ubicadas dentro de la cuenca del río Pixquiac. El abasto actual de la ciudad es de 1464 L/s (con un déficit por fugas en el sistema de suministro de ~400 L/s), de los cuales 560 L/s son extraídos de la cuenca del río Pixquiac por cuatro presas derivadoras (Tabla 1; Paré y Gerez, 2012).

Tabla 1: Fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad de Xalapa. Las resaltadas en gris son aquellas que se encuentran ubicadas dentro de la cuenca del río Pixquiac.  
Fuente Paré y Gerez (2012).

Presas o fuente	Volumen (Q) concesionado [L/s]	Volumen (Q) usado [L/s]
Los Colibríes	1000	850
Medio Pixquiac	250	180
Alto Pixquiac	250	250
Xocoyolapan	100	80
Cinco Palos	200	50
El Castillo	60	54
Total	Q = 1860 L/s	Q = 1464 L/S

El área total de captación de las presas es de 30.3 km<sup>2</sup> y se encuentran ubicadas en la zona alta-media alta dentro del área de aforo contemplada para este estudio (Figura 7).

### 3.2. Instrumentación y medición de la precipitación

Para la medición de los eventos de precipitación se utilizaron pluviómetros automáticos HOBO RGM3 marca Onset, EUA con una resolución de 0.2 mm por golpe y registro de datos cada 10 minutos. Del mes de noviembre 2016 a mayo 2017, los registros de lluvia se llevaron a cabo con un pluviómetro ubicado en el extremo sur de la cuenca a una altitud de 2100 m s.n.m (Reserva Forestal “La Cortadura”), instalado previamente al periodo de estudio de este trabajo. De junio a noviembre 2017 la cuantificación de la lluvia se realizó con una red de pluviómetros instalados al interior de la cuenca del río Pixquiac durante el mes de mayo 2017. De estos se seleccionaron los sitios “El Saucal”(ubicado a los 2581 m s.n.m.), “El Zapotal”(2131 m s.n.m) y “El Sordo”(1481 m s.n.m.) cubriendo de mejor manera la variación altitudinal de la cuenca (Figura 6).

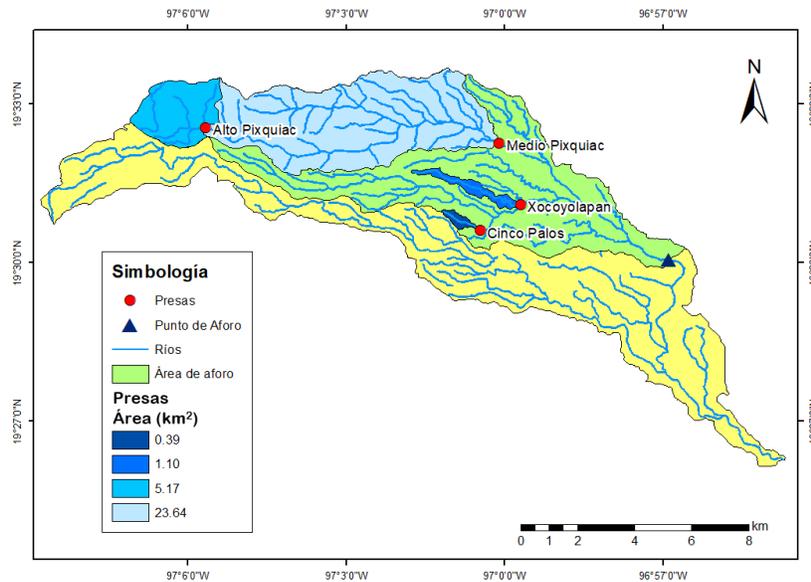


Figura 7: Ubicación y área presas dentro de la cuenca del río Pixquiac.

### 3.3. Instrumentación y medición del caudal

#### 3.3.1. Medición de la columna de agua: limnógrafo y barómetro

Con el fin de realizar las mediciones en una sección del río donde no hubiera presencia significativa de contaminación, se seleccionó el sitio de aforo 11 km río arriba del punto de cierre de la cuenca, por lo que el área aforada en este estudio fue de 60.6 km<sup>2</sup> (Figura 6). Para la cuantificación de la columna de agua, se instalaron un barómetro (Figura 8A) y un limnógrafo (Figura 8B), ambos transductores de presión modelo HOBO U20 marca Onset, EUA. El barómetro (rango de 0 a 4 metros y precisión de  $\pm 1$  cm) que mide la presión atmosférica (kPa) fue colocado cerca del sitio de aforo, mientras que el limnógrafo (rango de 0 a 9 metros y precisión de  $\pm 1$  cm) el cual registra la presión hidrostática de la columna de agua (kPa) y la presión atmosférica, fue colocado en el lecho del río con un contrapeso en una zona segura con el fin de evitar su arrastre, pérdida o robo (Figura 8C). Ambos instrumentos registraron datos cada 10 minutos durante el periodo de medición de noviembre 2016 a octubre 2017.

Para calcular el valor de la columna de agua en centímetros, se calculó la diferencia entre los datos del limnógrafo y el barómetro, con lo que se obtuvo la presión de la

columna de agua (kPa). Este valor fue multiplicado posteriormente por un factor de conversión  $1 \text{ kPa} = 10.2 \text{ cm}$ , con lo que se generó la serie de profundidad de la columna de agua para el periodo de estudio.

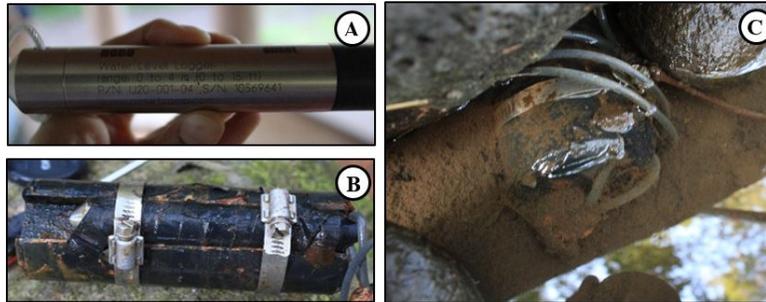


Figura 8: A) Barómetro. B) Limnígrafo. C) Limnígrafo ubicado en el lecho del río.

### 3.3.2. Aforo químico

Se realizaron cuatro visitas al río Pixquiac durante el mes de febrero, abril, mayo y julio de 2017. En cada visita, se trazó una sección a lo largo del río (Figura 9) con el fin de calcular su área transversal; por lo que se midió el ancho de ésta y la profundidad sobre la sección cada 0.5 m.

A través del método de aforo químico (*slug injection using salt in solution*) descrito por Moore (2004, 2005) se realizó la estimación del caudal. Este método consiste en verter cuenca arriba del punto medición una solución de sal de volumen ( $V$ ), concentración ( $C_m$ ) y conductividad eléctrica conocidos ( $CE_m$ ) (Figura 10B). Se mide la conductividad eléctrica base del río ( $CE_b$ ) (Figura 10A) y después de vertida la solución se toman mediciones de conductividad eléctrica en el punto de aforo cada 5 segundos (Figura 10C) y hasta alcanzar nuevamente  $CE_b$  o bien, cuando la conductividad se mantenga en valores constantes. Se realizaron tres experimentos por cada aforo, con excepción del mes de mayo en el que solo se realizaron dos debido al bajo volumen de caudal que presentaba el río en ese momento, por tratarse de la época de secas. En los aforos del mes de febrero, abril y julio se utilizó una solución de 3 kg de sal de mesa por experimento, mientras que en el mes de mayo se realizó el primer experimento con 3 kg y el segundo con 1 kg. Para este último aforo se redujo la cantidad de sal utilizada, ya que en el primer experimento la disolución de la solución trazadora en el río fue muy lenta, por lo que se tardó mucho tiempo en alcanzar la  $CE_b$  del río. En todos los casos la sal fue disuelta en 15 litros de agua del río, que fueron vertidos



Figura 9: Sección transversal para caracterización del río. Julio del 2017.

38 m río arriba del punto de medición. Todas las mediciones de conductividad fueron realizadas con un multiparamétrico portátil marca Oakton PC450. Debido a que el río presentaba distintas velocidades a lo largo de la sección transversal de aforo, se hicieron mediciones en dos puntos: una donde la velocidad del río se mostraba más lenta y otra donde se mostraba más rápida, de forma que se intentó evitar la sobreestimación o subestimación del caudal midiendo en un solo punto. Posteriormente, se cuantificó el caudal en  $m^3/s$ , con base en lo descrito en el método, siguiendo los siguientes pasos:

1. Se calculó el valor de la concentración relativa ( $RC_f$ ) con base en la siguiente fórmula:

$$RC_f = \frac{X}{V_0 + X} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde  $X$  es el volumen extraído de la solución trazadora = 20 ml,  $V_0$  es el volumen del solvente para  $X = 1980$  ml.

2. Se obtuvo el valor de la constante de calibración con base en la siguiente fórmula:

$$k = \frac{RC_f}{CE_m - CE_b} \quad \left[ \frac{cm}{\mu S} \right] \quad (\text{Ec. 3.2})$$

3. Se obtuvo la diferencia:

$$[CE(t) - CE_b] \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde  $CE(t)$  es la conductividad eléctrica medida en el punto de aforo por intervalo de tiempo.

4. Se obtuvo el valor de  $RC(t)$  con base en la siguiente fórmula:

$$RC(t) = k[CE(t) - CE_b] \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde  $RC(t)$  es la concentración relativa de la solución trazador por intervalo de tiempo.

5. Con cada valor de  $RC(t)$  se hizo la suma para cada tiempo, con la finalidad de hacer la siguiente aproximación:

$$\int_T RC(t) dt \approx \sum_n RC(t) \Delta t \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde  $n$  es el número de mediciones realizadas y  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo de medición = 5 segundos.

6. Finalmente, se obtuvo el valor del caudal ( $Q$ ) con base en la fórmula:

$$Q = \frac{V}{\int_T RC(t) dt} = \frac{V}{k \Delta t \sum_n [CE(t) - CE_b]} \quad (\text{Ec. 3.6})$$



Figura 10: A) Medición de  $CE_b$ . B) Medición de  $CE_m$ . C) Medición de la CE del río cada 5 segundos. D) Medición de la velocidad con molinete.

### 3.3.3. Método de área velocidad

Además del método de aforo químico, se realizó la estimación del caudal por el método de área-velocidad. Para ello, se midió la velocidad sobre las mismas verticales en las que se midió la profundidad (Figura 10D), cada metro en el mes de febrero y cada 0.5 m en abril y julio. En el caso de la visita de mayo no se realizó esta medición debido al bajo caudal que presentaba el río en ese momento. Se utilizó un molinete marca AquaCal 5000 (JBS Instruments) que se colocó al 50% de la columna de agua medida (Figura 11), para evitar la sobreestimación de la velocidad en superficie y considerando las condiciones de profundidad característica del río. Para la cuantificación del caudal, se obtuvo el área correspondiente a la sección de medición (1 ó 0.5 m de ancho por la profundidad en ese punto) y después el promedio de la velocidad en todos los puntos, arrojando un valor de caudal  $Q$  en  $m^3/s$ .

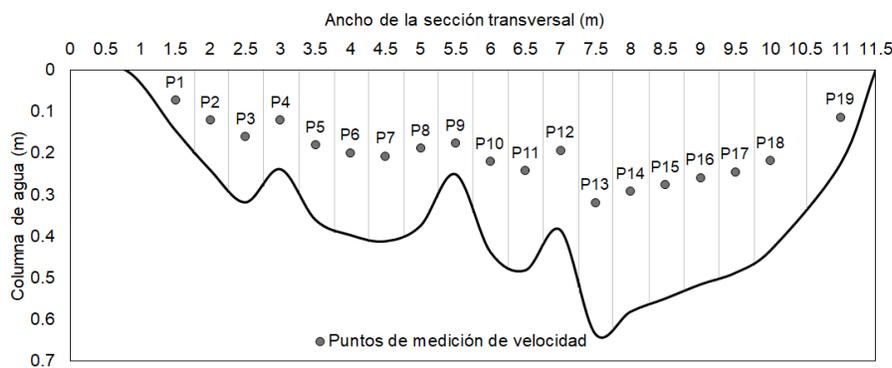


Figura 11: Sección transversal del río y puntos de medición de velocidad en profundidad.

### 3.4. Medición de parámetros fisicoquímicos

En cada visita a campo se obtuvieron los valores de temperatura ( $^{\circ}C$ ), pH (-), oxígeno disuelto ( $mg/l$ , %) y sólidos totales disueltos (ppm) con un multiparamétrico marca Oakton PD650, y conductividad eléctrica ( $\mu S/cm$ ) con un multiparamétrico marca Oakton PC450 (Figura 4A), con el fin de caracterizar las condiciones fisicoquímicas del río durante los aforos realizados en condiciones de caudal base.

## 3.5. Análisis de datos

### 3.5.1. Análisis de la precipitación

La separación de eventos de precipitación se realizó definiendo un evento como aquel con un acumulado de lluvia  $\geq 0.2$  mm y con separación entre eventos de al menos 3 horas sin lluvia (Guzmán-Huerta, 2017; Holwerda et al., 2010; Muñoz-Villers et al., 2012). Se calculó para cada evento su intensidad promedio ( $I_p$ , mm/hr) y duración ( $T_d$ , hr), definiendo  $I_p$  como la razón de la cantidad de lluvia y el tiempo de duración de cada evento y  $T_d$  como el tiempo transcurrido entre el inicio y fin de cada evento. A su vez, se calculó el antecedente de precipitación (AP) como el acumulado de precipitación de los 15 días previos al evento.

También se calculó la precipitación para cada hora, día, mes, época de lluvias (mayo 2017-octubre 2017) y época de secas (noviembre 2016-abril 2017).

La estimación de precipitación anual de la cuenca se calculó como la suma de la lluvia acumulada en la época de secas y de lluvias. Para la época de secas, se utilizó el valor obtenido del pluviómetro de "La Cortadura", mientras que para la época de lluvias, se utilizó el promedio de los valores obtenidos en "El Saucal", "El Zapotal" y "El Sordo", correspondientes a la parte alta, media-alta y media de la cuenca, respectivamente.

### 3.5.2. Análisis de caudal

Los datos obtenidos por el método de área-velocidad, se usaron para dividir el caudal del río en dos zonas, una influenciada por un flujo más rápido y otro más lento, cada uno con 40% y 60% de contribución al caudal total del río, respectivamente. Estas zonas, fueron usadas para ponderar los datos del método de trazador químico. De esta forma, el caudal obtenido para cada visita a campo se calculó como:

$$Q_p = (Q_d * 0.6) + (Q_i * 0.4) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde  $Q_p$  es el caudal ponderado,  $Q_d$  el caudal obtenido en la sección con flujo lento por el método de trazador químico, y  $Q_i$  el caudal obtenido en la sección con flujo rápido por el método de trazador químico.

Los valores de caudal ( $Q_p$ ) asociados a un valor de columna de agua de la sección transversal, fueron agregados a la curva de columna de agua-caudal construida previamente por Dapa-Zapiain (2018) durante el periodo de septiembre 2015 a octubre 2016. De forma que se generó la curva de columna de agua-caudal para el periodo de septiem-

bre 2015 a octubre 2017 (Figura 12). Una vez obtenida la ecuación de esta curva, se realizó la conversión de la serie de columna de agua a valores de caudal, que fueron remuestreados a valores horarios, diarios y mensuales. A su vez, se calculó el coeficiente de escurrimiento para cada evento ( $Q/P$ ) indicando el porcentaje de precipitación que contribuyó a la formación de caudal.

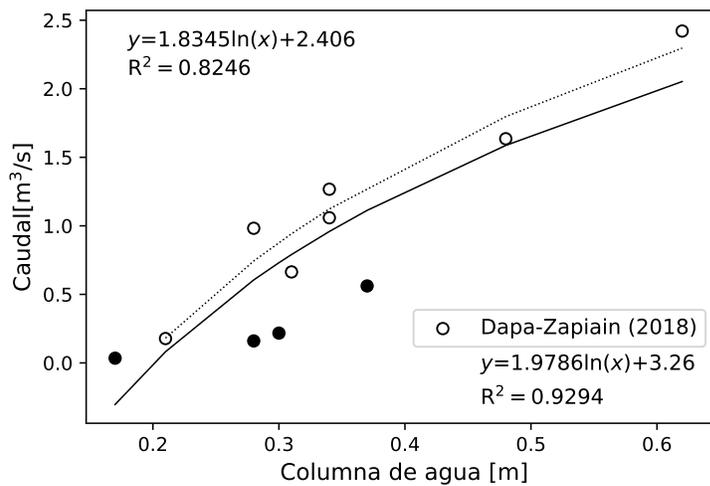


Figura 12: Curva columna-caudal construida para el periodo de septiembre 2015 a septiembre 2016 (punteada) y septiembre 2015-octubre 2017 (negra).

Para la separación de hidrogramas, se utilizó en su mayoría el “Método aproximado” propuesto por Hewlett y Hibbert (1967), sin embargo, para aquellos hidrogramas en los que el algoritmo de este método no funcionó adecuadamente se simplificó la separación de flujos utilizando el método “A-B” y “A-A<sup>1</sup>”. Aquellos eventos separados por el método aproximado fueron los que la respuesta del caudal a la precipitación generó un hidrograma claro con un pico de descarga y una curva de recesión bien definida, mientras que los separados por el método A-B y A-A<sup>1</sup> fueron aquellos que presentaron un aumento claro del caudal base pero el pico de descarga y la curva de recesión no presentaba una forma típica o un punto de inflexión evidente. En el método de A-B se considera el límite del flujo base desde el punto de inicio del pico (punto A) hasta el punto de inflexión en el curva de recesión (punto B), y en el de A-A<sup>1</sup> se considera una línea recta como límite del flujo base, desde el inicio del pico (punto A) y hasta que el caudal alcanza el mismo valor que el punto de inicio (punto A<sup>1</sup>) (Figura 13).

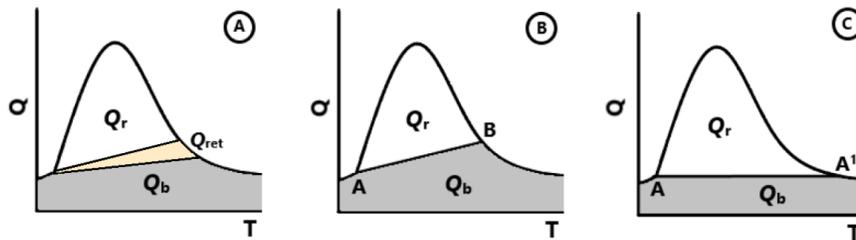


Figura 13: Métodos de separación de hidrogramas: A) Método Aproximado, B) Método A-B, C) Método A-A<sup>1</sup>

La separación de hidrogramas se utilizó para caracterizar y cuantificar los siguientes parámetros hidrológicos en cada evento de lluvia: flujo rápido ( $Q_r$ , mm/hr) o superficial de la cuenca; flujo base ( $Q_b$ , mm/hr) o escurrimiento subsuperficial; flujo total ( $Q_T$ , mm/hr) que contempla la suma de  $Q_r$  y  $Q_b$ ; tiempo de pico ( $T_p$ , hr) que indica el tiempo que tarda el caudal en llegar al pico de descarga; tiempo retraso ( $L$ , hr) que indica el tiempo transcurrido entre el inicio del evento de precipitación y la respuesta en el caudal; y tiempo de recesión ( $T_r$ , hr) que es el tiempo que tarda el caudal en regresar al caudal base desde el pico de descarga (Dingman, 2014). Para cada uno de estos eventos se realizó la estimación del área máxima de contribución de la cuenca (AMC) que indica el área potencial de la cuenca que contribuye a la generación de escurrimiento en un evento de precipitación. Para este cálculo se usó el valor obtenido del caudal total por evento, empleando la siguiente fórmula:

$$AMC = (Q_T/P) * A \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde  $Q_T$  es el caudal total del evento,  $P$  la precipitación observada por evento y  $A$  el área de aforo.

Con la serie anual a escala diaria, se obtuvo la curva de duración de flujo (CDF) que indica gráficamente la frecuencia de distribución de valores de caudal y permite la estimación del porcentaje de tiempo que un valor de caudal específico es igualado o excedido (Reichl y Hack, 2017). Así mismo, se construyó la curva maestra de recesión de flujo base (CMRFB) por medio del método de *matchings strips* que consiste en graficar en orden descendente los periodos de recesión observados en la serie de datos de caudal a escala diaria y representa el escenario de recesión más probable bajo una condición determinada (Nathan y McMahon, 1990).

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.1. Precipitación

La precipitación promedio registrada en la cuenca fue de 2644.9 mm durante el año hidrológico estudiado (noviembre 2016-octubre 2017). Para la época de secas (noviembre 2016-abril 2017), el total de la precipitación fue de 640.8 mm, que corresponde al 24.2% de la lluvia observada en el periodo de estudio, mientras que la registrada para la época de lluvias (mayo 2017-octubre 2017) fue de 2004.1 mm correspondiente al 75.8%. En la cuenca del río Pixquiac, el pluviómetro que registró la mayor cantidad de precipitación en el año estudiado fue el sitio “El Zapotal” (2131 m s.n.m) con 2904 mm, seguido por el sitio “El Saucal” (2581 m s.n.m) con 2764.2 mm, ambos ubicados en la parte media-alta de la cuenca, mientras que el sitio “El Sordo” (1481 m s.n.m) ubicado en la parte baja de la cuenca, registró un total de 2266.6 mm.

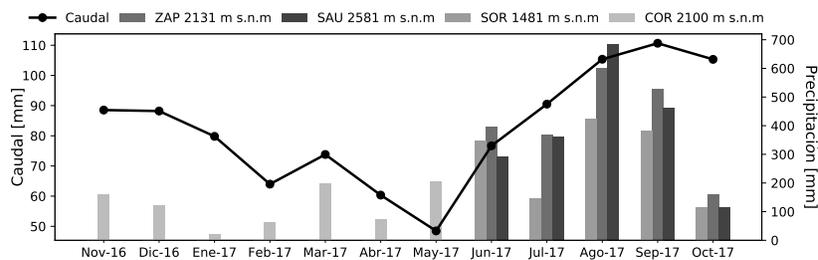


Figura 14: Precipitación y caudal mensual.

A nivel mensual, el mínimo de precipitación fue observado en enero con un valor de 20.6 mm, mientras que los mayores aportes de lluvia fueron registrados en agosto

con un total de 570.8 mm, con lluvias asociadas principalmente a la parte media-alta de la cuenca (Figura 14).

La precipitación promedio anual diaria fue de 7.2 mm; para la época de secas fue de 3.5 mm, con un rango de 0.2 a 65.8 mm, mientras que en la época de lluvias el promedio fue de 10.9 mm con un rango de 0.2 a 191.4, donde el máximo durante la época de secas fue en el mes de marzo y durante la época de lluvias fue en el mes de agosto. En la Tabla 2 se presentan las características de la precipitación diaria por mes a las diferentes altitudes.

Tabla 2: Precipitación promedio por mes en el período noviembre 2016-octubre 2017.

Mes	La Cortadura 2100 m s.n.m	El Saucal 2581 m s.n.m	El Zapotal 2131 m s.n.m	El Sordo 1481 m s.n.m
Noviembre	5.4	-	-	-
Diciembre	3.9	-	-	-
Enero	0.7	-	-	-
Febrero	2.3	-	-	-
Marzo	6.4	-	-	-
Abril	2.4	-	-	-
Mayo	6.6	-	-	-
Junio	-	9.8	13.3	11.6
Julio	-	11.6	11.9	4.7
Agosto	-	22.1	19.4	13.7
Septiembre	-	15.4	17.6	12.8
Octubre	-	3.8	5.2	3.8

En cuanto a la precipitación separada por eventos, se registraron un total de 355 durante el período estudiado. De los cuales, 196 (rango de 0.2 a 6.8 mm) fueron descartados por no generar una respuesta clara en el caudal del río.

De las características de precipitación por evento, se observó que, para la época de lluvias, tanto la cantidad, la intensidad promedio ( $I_{prom}$ ) y el tiempo de duración ( $T_d$ ) no fueron significativamente (del análisis  $p \geq 0.05$  para cantidad,  $I_{prom}$  y  $T_d$ ) diferentes entre las altitudes alta y media-alta, mientras que en la parte media de la cuenca se presentó disminución en los valores de  $I_{prom}$  y  $T_d$  (Tabla 4). Para la época de secas, el registro de precipitación se realizó únicamente en el sitio “La Cortadura” (2100 m s.n.m), los parámetros obtenidos para este se presentan en la Tabla 3. En general, se observó que la cantidad y la  $I_{prom}$  fueron mucho menores comparado con la época de lluvias, comportamiento que se observa tanto en el promedio como en los máximos de los valores. Sin embargo, el valor promedio de  $T_d$  fue mayor durante la época de secas, mas el valor máximo fue mayor en lluvias.

Tabla 3: Parámetros descriptivos y estadísticos de la precipitación anual para la época de secas.

Características	La Cortadura 2100 m s.n.m		
	Prom ( $\pm\sigma$ )	Máx	Mín
Cantidad [mm]	10.6 $\pm$ 14.1	79.2	0.6
$I_{\text{prom}}$ [mm/h]	2.3 $\pm$ 3.2	18.5	0.2
$T_d$ [h]	6.5 $\pm$ 6.4	33.5	0.5

Tabla 4: Parámetros descriptivos y estadísticos de la precipitación anual para la época de lluvias.

Características	El Saucal 2581 m s.n.m			El Zapotal 2131 m s.n.m			El Sordo 1481 m s.n.m		
	Prom ( $\pm\sigma$ )	Máx	Mín	Prom ( $\pm\sigma$ )	Máx	Mín	Prom ( $\pm\sigma$ )	Máx	Mín
Cantidad [mm]	20.7 $\pm$ 31.8	249	0.2	20.4 $\pm$ 28.6	197	0.2	17.5 $\pm$ 25.8	142.2	0.2
$I_{\text{prom}}$ [mm/h]	4.3 $\pm$ 4.5	26.8	0.2	4.9 $\pm$ 6.8	55.6	0.2	4.3 $\pm$ 4.7	25.2	0.1
$T_d$ [hr]	5.6 $\pm$ 6	34.5	0.2	5.2 $\pm$ 5.2	33.8	0.2	4.9 $\pm$ 5.6	34.7	0.2

## 4.2. Caudal

El caudal durante el año hidrológico de estudio fue de 991.7 mm, donde el 45.8% se observó en la época de secas con 454.7 mm y el 54.2% en la época de lluvias con 537 mm. Durante la época de secas se presentaron los frentes fríos no. 6 y no. 13, generando dos eventos hidrometeorológicos extraordinarios en los que se observó un acumulado de caudal de 6.8 y 20.44 mm, mientras que la precipitación fue de 79.2 y 28.2 mm, respectivamente. Por su parte, durante la época de lluvias se presentaron los huracanes Franklin (Categoría 1 EHSS) y Katia (Categoría 2 EHSS) en los que el caudal total fue de 11.5 y 22.5 mm y precipitación acumulada de 189.8 y 135.4 mm, respectivamente. La Figura 15 presenta la serie de precipitación promedio y caudal, donde se puede observar la variación temporal a lo largo del año hidrológico a una resolución horaria para ambas variables.

Se observó que los volúmenes mensuales más bajos de caudal tuvieron lugar en el mes de mayo, lo cual corresponde al periodo de transición entre la época de secas y de lluvias, mientras que los caudales más altos fueron observados en el mes de septiembre, correspondiente a la mitad de la época de lluvias y consecuencia al máximo de precipitación observado en el mes de agosto (Figura 14).

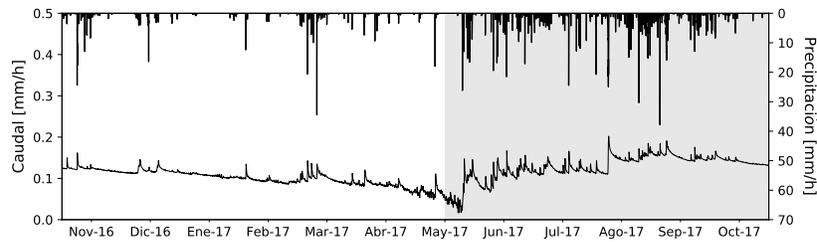


Figura 15: Serie de caudal y precipitación anual. La zona sombreada representa la época de lluvias del periodo de estudio.

Tabla 5: Caudal mensual diario.

Mes	Caudal [mm/día]		
	Prom $\pm \sigma$	Máx	Mín
Noviembre	2.9 $\pm$ 0.1	3.2	2.8
Diciembre	2.8 $\pm$ 0.1	3.3	2.7
Enero	2.6 $\pm$ 0.1	2.7	2.4
Febrero	2.3 $\pm$ 0.1	2.7	2.1
Marzo	2.4 $\pm$ 0.2	2.9	2.1
Abril	2 $\pm$ 0.2	2.5	1.6
Mayo	1.6 $\pm$ 0.5	2.7	0.7
Junio	2.6 $\pm$ 0.4	3.2	1.7
Julio	2.9 $\pm$ 0.2	3.4	2.7
Agosto	3.4 $\pm$ 0.4	4.4	2.7
Septiembre	4 $\pm$ 0.2	4.3	3.4
Octubre	3.4 $\pm$ 0.2	3.8	3.1

En cuanto al caudal diario, se registró un promedio de  $2.7 \pm 0.6$  mm en un rango de 0.7 a 4.4 mm, de estos, el valor máximo se observó en el mes de septiembre y el mínimo en mayo lo que coincide con el comportamiento observado a escala mensual (Tabla 5).

### 4.3. Métodos de separación de hidrogramas

La separación de los hidrogramas se realizó con tres métodos diferentes previamente descritos en la sección 3.5.2. En total se analizaron 159 eventos de los cuales 54 fueron en la época de secas y 105 en la época de lluvias. En la Tabla 6 se muestra el número de eventos analizados por método en cada época del año.

Tabla 6: Número de hidrogramas separados por cada método.

Método	Secas	Lluvias	Total anual
Aproximado	18	60	78
A-B	18	19	37
A-A <sup>1</sup>	18	26	44

#### 4.4. Análisis de hidrogramas

##### 4.4.1. Separación del caudal en flujo rápido ( $Q_r$ ) y flujo base ( $Q_b$ )

Para la separación del caudal en sus flujos rápidos y base, fue necesario considerar sólo aquellos eventos de precipitación que generaron una respuesta clara en la descarga del río. Para hacer esta consideración, se graficó individualmente el hidrograma y hietograma de cada evento, con el fin de observar el comportamiento del caudal y su respuesta a la precipitación. Es importante mencionar que para la época de secas, todos los eventos de lluvia fueron asociados al pluviómetro de “La Cortadura” (2100 m s.n.m), mientras que para la época de lluvias se examinó la precipitación a las tres altitudes registradas (“El Saucal” 2581 m s.n.m, “El Zapotal” 2131 m s.n.m, “El Sordo” 1481 m s.n.m) y se eligió aquella altitud donde se presentaba el primer registro de lluvia y la mayor cantidad de precipitación previo al inicio del flujo rápido. Los datos para el mes de mayo provenientes de “La Cortadura” se añadieron a la serie de “El Zapotal” por ser el pluviómetro de mayor proximidad al sitio.

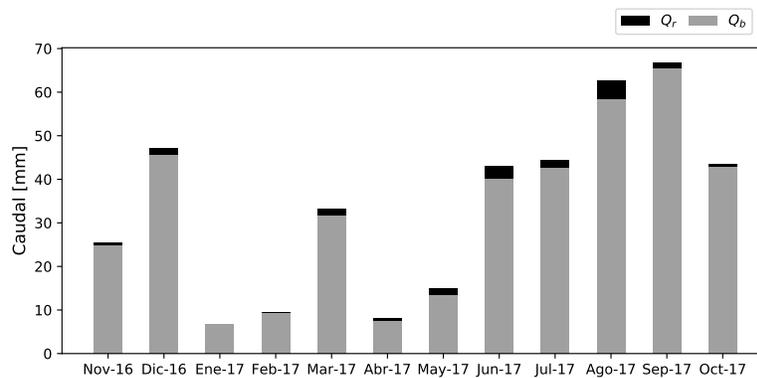


Figura 16: Contribución del flujo rápido y base al caudal mensual promedio

El caudal promedio ( $Q_T$ ) generado durante estos eventos fue de  $2.5 \pm 3.1$  mm ( $252.4 \pm 312.9$  m<sup>3</sup>/s), con un máximo de 22.5 mm ( $2271.1$  m<sup>3</sup>/s) y un mínimo de 0.2 mm ( $20.2$  m<sup>3</sup>/s) en los meses de septiembre y mayo respectivamente. En cuanto al flujo rápido ( $Q_r$ ), el valor promedio fue de  $0.1 \pm 0.3$  mm ( $10.1 \pm 30.3$  m<sup>3</sup>/s), con un máximo de 3.0 ( $302.9$  m<sup>3</sup>/s) y un mínimo de 0.001 mm ( $0.1$  m<sup>3</sup>/s). Por otra parte, el valor promedio del flujo base ( $Q_b$ ) fue de  $2.4 \pm 2.9$  mm ( $242.2 \pm 292.7$  m<sup>3</sup>/s) alcanzando un máximo de 21.9 mm ( $2210.6$  m<sup>3</sup>/s) y un mínimo de 0.04 mm ( $4.0$  m<sup>3</sup>/s). A escala mensual, el flujo rápido mostró un ligero aumento con la entrada de la época de lluvias, alcanzando su aporte máximo promedio durante el mes de agosto, se observó el aumento del flujo base conforme fue avanzado la época de lluvias, mientras que durante la época de secas no se mostró un patrón definido. El máximo aporte del flujo base se presentó en el mes de septiembre y el mínimo durante el mes de enero que coincide con el menor aporte del flujo rápido con 0.02 mm (Figura 16).

El análisis de los hidrogramas mostró que la contribución de  $Q_r$  al caudal total fue en promedio del  $3 \pm 7\%$ , mientras que la aportación del  $Q_b$  fue de  $95 \pm 12\%$ . Por tanto, se observó una dominancia del flujo base en relación al flujo rápido. Ninguno de los dos flujos mostró un patrón definido a lo largo del año, sin embargo, el flujo rápido presentó un ligero aumento durante los primeros meses de la época de lluvias donde alcanzó su valor máximo en el mes de mayo con un promedio de 8%. El flujo base, por su parte alcanzó el valor máximo de contribución en los meses de enero y octubre con un promedio del 99% en los eventos de cada mes (Figura 17).

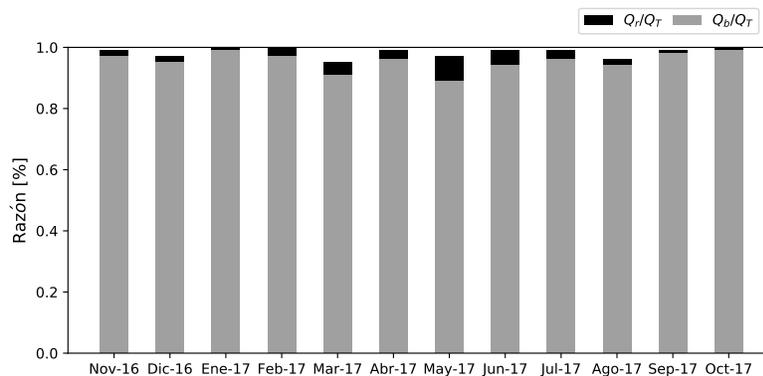


Figura 17: Aporte de los flujos rápidos y base al  $Q_T$ .

#### 4.4.2. Coeficiente de escurrimiento ( $Q_T/P$ )

El coeficiente de escurrimiento anual ( $Q_T/P$ ) fue de 37% de los cuales el 17% se observó en la época de secas y el 20% en la época de lluvias, lo que sugiere un escurrimiento con respecto a la precipitación anual similar entre épocas. En relación a esto, se observó que la curva de recesión en algunos eventos no fue gradual, mostrando en estos casos saltos abruptos durante el tiempo de recesión, el origen de estos puede ser consecuencia de la extracción de agua del río desde las distintas presas ubicadas a lo largo del área de estudio lo que interfiere directamente en la cuantificación de los parámetros del hidrograma en el evento. En total, se encontraron 18 eventos en los que se presentó este fenómeno, de los cuales 11 fueron en época de secas y 7 en lluvias, en la Figura 18 se muestra un ejemplo de estos casos.

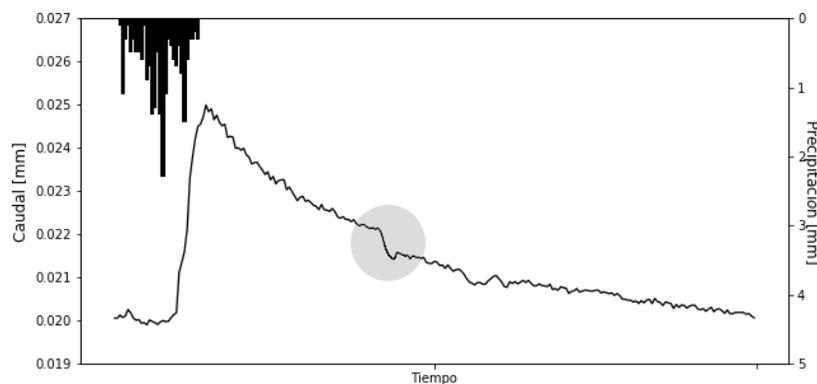


Figura 18: Disminución del caudal en su descenso (círculo gris) en la curva de recesión durante el evento del 25/6/17 16:00 hrs al 27/6/17 03:50 hrs a una resolución de 10 minutos.

Por evento, se obtuvo un  $Q_T/P$  promedio del  $26 \pm 24\%$ . Durante la época de secas se registró un valor  $Q_T/P$  de  $31 \pm 24\%$  en un rango de 2 a 132%, mientras que para la época de lluvias el valor fue de  $22 \pm 23\%$  en un rango de 4 a 141%. (Tabla 7). En general, se observaron menores valores durante lluvias, alcanzando el mínimo de  $14 \pm 10\%$  en el mes de mayo al inicio de la temporada de lluvias, mientras que los mayores fueron al final de esta con el máximo de  $46 \pm 40\%$  en el mes de octubre. Los valores observados fueron iguales o menores al 100%, exceptuando tres eventos durante el mes de marzo, junio y octubre donde los valores fueron de 134, 141 y 142% respectivamente.

Tabla 7: Coeficiente de escurrimiento  $Q_T/P$  mensual.

Mes	$Q_T/P$		
	Prom $\pm \sigma$	Máx	Mín
Noviembre	$0.3 \pm 0.3$	1.0	0.1
Diciembre	$0.4 \pm 0.2$	0.7	0.1
Enero	$0.4 \pm 0.1$	0.5	0.3
Febrero	$0.3 \pm 0.2$	0.4	0.1
Marzo	$0.3 \pm 0.3$	1.3	0.02
Abril	$0.3 \pm 0.2$	0.5	0.1
Mayo	$0.1 \pm 0.1$	0.3	0.04
Junio	$0.3 \pm 0.3$	1.4	0.1
Julio	$0.2 \pm 0.2$	0.7	0.1
Agosto	$0.2 \pm 0.2$	0.6	0.04
Septiembre	$0.2 \pm 0.1$	0.4	0.1
Octubre	$0.5 \pm 0.4$	1.4	0.1

#### 4.4.3. Coeficiente de escurrimiento del flujo rápido ( $Q_r/P$ ) y flujo base ( $Q_b/P$ )

Se encontró un coeficiente de escurrimiento de flujo rápido ( $Q_r/P$ ) de  $0.01 \pm 0.01$  y uno de flujo base ( $Q_b/P$ ) de  $0.3 \pm 0.2$ , con un valor máximo de 0.08 y 1.41, respectivamente y un mínimo de 0.0 y 0.01. Respecto a la serie mensual (Figura 19), se observa que el valor de aporte del flujo base disminuye a lo largo de la época de lluvias, exceptuando el mes de mayo donde alcanza su mínimo y el mes de octubre donde presenta un incremento importante y alcanza su valor máximo en la serie anual. Durante la época de secas no se presenta un comportamiento definido. De la misma manera, en el flujo rápido no se encontró un comportamiento evidente a lo largo del año, sin embargo se encontró el mínimo de contribución durante los meses de agosto, septiembre y enero y el máximo en el mes de mayo, lo que corresponde a lo observado en el coeficiente de escurrimiento ( $Q_T/P$ ).

Por su parte, en la relación de  $Q_r$  con  $P$ , se muestra en la Figura 20 la tendencia a generar mayor  $Q_r$  cuando el evento de precipitación es mayor. Este comportamiento se ve mejor diferenciado durante la época de lluvias y en los eventos de mayor  $P$  en la época de secas. Los eventos donde los valores de  $P$  están en el rango de 5 a 20 mm, muestra mayor variabilidad pero se rigen igualmente al comportamiento descrito.

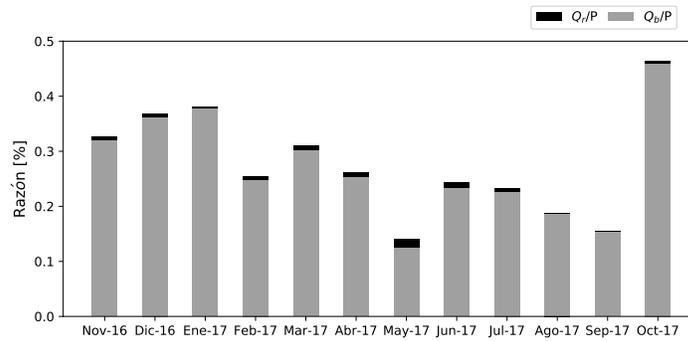


Figura 19: Coeficiente de escurrimiento mensual del flujo rápido y el flujo base.

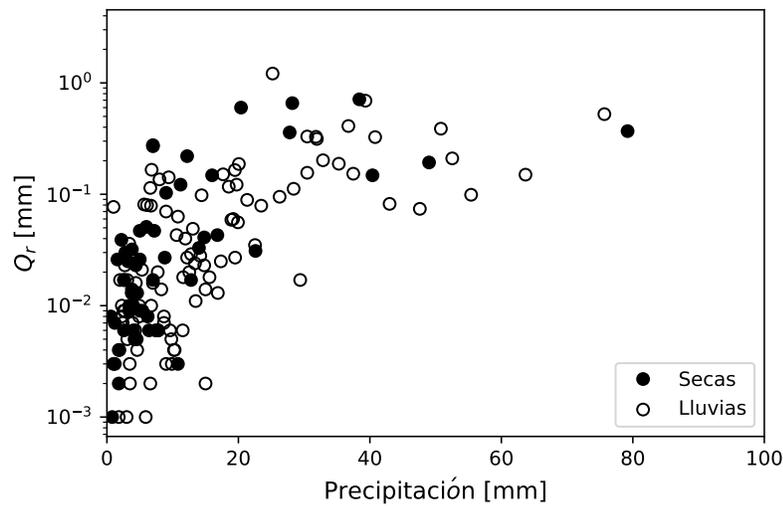


Figura 20: Relación del flujo rápido con la precipitación promedio por evento.

#### 4.4.4. Tiempos de respuesta

De manera general, el análisis de hidrogramas arrojó un promedio de tiempo de pico ( $T_p$ ) de  $4 \pm 4$  hrs (rango de 0.2 a 30.8 hrs), de tiempo de retraso ( $T_r$ ) de  $3.2 \pm 2.9$  hrs (rango de 0.2 a 24.8 hrs) y de tiempo de recesión ( $L$ ) de  $15.6 \pm 20.1$  hrs (rango de 0.2 a 140.7 hrs). Respecto a la época de secas el promedio de  $T_p$  fue de  $5.1 \pm 5.1$  hrs, mientras que para la de lluvias fue de  $3.37 \pm 3.07$  hrs; la tendencia a valores mayores durante la época de secas también se observa en la escala mensual, ya que el máximo registrado se presenta en el mes de diciembre mientras que los mínimos son durante

los meses de marzo, julio y agosto. En cuanto a  $T_r$  se presenta un promedio de  $2.8 \pm 2.15$  hrs durante la época de secas, y uno de  $3.4 \pm 3.2$  hrs para lluvias; presentando el máximo en el mes de enero y el mínimo en diciembre. Finalmente, para el tiempo de recesión se observa un comportamiento similar a lo largo del periodo de estudio, registrando un promedio de  $15.3 \pm 3$  hrs y  $15.8 \pm 18.5$  hrs para la época de secas y de lluvias, respectivamente. Para este parámetro el valor máximo en el mes de mayo y el mínimo en abril (Figura 21).

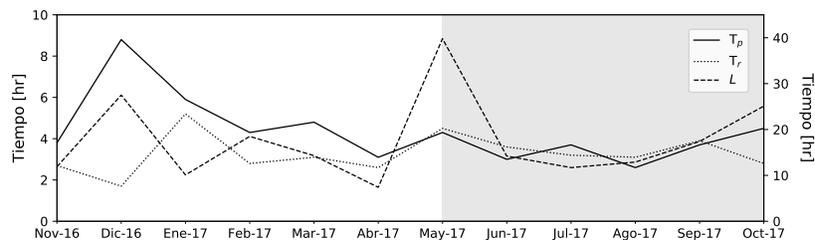


Figura 21: Promedio mensual del tiempo de pico ( $T_p$ ), tiempo de retraso ( $T_r$ , eje izquierdo) y tiempo de recesión ( $L$ , eje derecho). La zona sombreada corresponde a la época de lluvias.

#### 4.5. Área máxima de contribución (AMC) y antecedente de precipitación (AP)

En el análisis de la precipitación antecedente a los 15 días previos al evento, se obtuvo que el promedio de precipitación fue de  $150.4 \pm 85.4$  mm en un rango de 356.9 a 0.0 mm, donde el máximo se observó durante el mes de septiembre y el mínimo en enero. Durante la época de secas el promedio fue de  $65.4 \pm 48.9$  mm y de  $189.3 \pm 68.6$  mm en la de lluvias.

En el cálculo del área máxima de contribución con el caudal total por evento se encontró un valor promedio de  $26.2 \pm 23.8\%$  del área aforada, ( $1586.3 \pm 1441.3$  ha) con un máximo de  $141.6\%$  (8578.5 ha) cuando la respuesta del caudal fue mayor a la entrada de precipitación presentado en el mes de octubre y un mínimo de  $2.4\%$  (146.8 ha) observado en el mes de marzo. Se observó que el promedio por época fue mayor en secas ( $32.4 \pm 23.9\%$ ) que en lluvias ( $23.0 \pm 23.2\%$ ), contrario al comportamiento esperado. Los promedios mensuales mayores se presentan en la época de secas, con excepción del mes de octubre en donde se observa el máximo anual. Durante la época de secas se observa una disminución progresiva durante los meses de julio a septiembre.

Por otra parte, la relación entre AMC y AP muestra resultados variables, ya que existen eventos con valores altos de AP con áreas de contribuciones tanto menores como mayores, por ejemplo para dos eventos con la misma AP (108.4 mm), la AMC varía de 9.2% en uno a 56.8% en otro. Se puede distinguir, sin embargo, que los eventos de la época de lluvias con mayor AP suelen contribuir a una mayor AMC, mientras que para la época de secas la distribución de los eventos en respuesta a estos dos parámetros es menos clara (Figura 22).

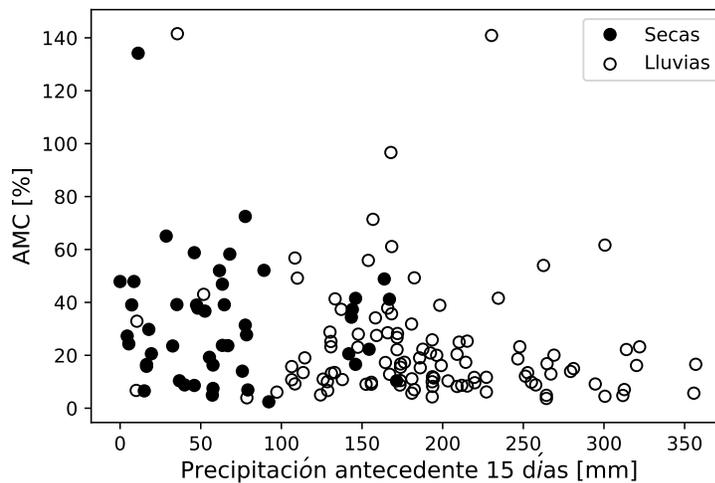


Figura 22: Área máxima de contribución (AMC) de la cuenca con base en en el antecedente de precipitación (AP) a 15 días.

#### 4.6. Curva de duración flujo (CDF)

La curva de duración de flujo (CDF) (Figura 23) indica que durante el periodo de estudio, el río Pixquiác presentó un caudal base de carácter perenne. La pendiente de 0.25 en el rango del 5 al 90%, sugiere caudales poco variables a largo del año, con un promedio de 2.7 mm/día. Los caudales máximos se presentan en un periodo de tiempo de menos del 5% con promedio de 3.9 mm, mientras que los caudales más bajos se presentan en un 90 a 100% con promedio de 1.5 mm. La pronunciada pendiente en ambos casos, sugiere caudales muy variables no observables durante las condiciones base del río.

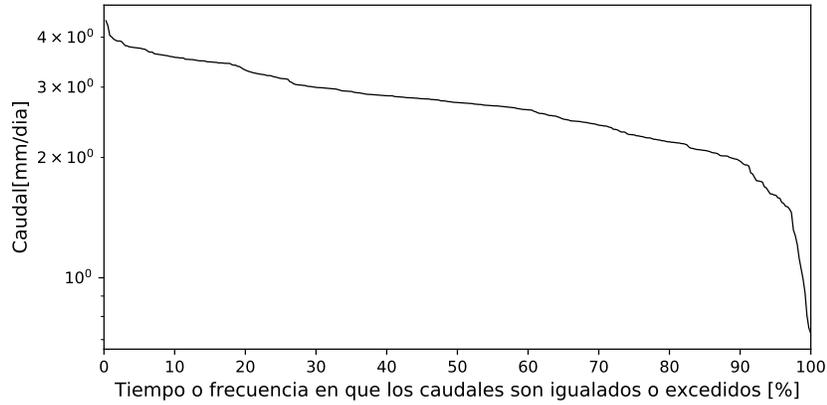


Figura 23: Curva de duración de flujo. Datos en escala semilogarítmica.

#### 4.7. Curva maestra de recesión de flujo base (CMRFB)

La curva maestra de duración de flujo base (CMRFB) con una duración de 94 días, presenta una desviación de la relación lineal hacia el final de la curva, que podría indicar pérdida de agua subterránea por percolación profunda (Figura 24).

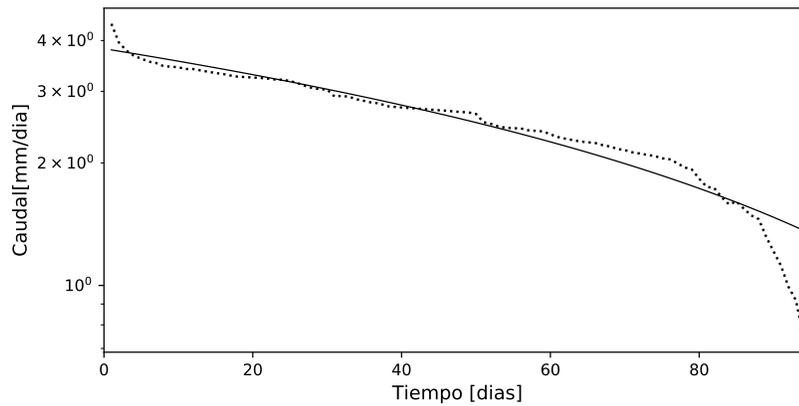


Figura 24: Curva maestra de recesión (línea punteada) y regresión lineal  $y = -0.0261x + 3.8198$  (línea sólida). Datos en escala semilogarítmica.

## 4.8. Parámetros fisicoquímicos

La medición de parámetros fisicoquímicos se realizó con el fin de caracterizar el flujo base del río durante las visitas de muestreo. Se encontró que el río mantiene un pH neutro con tendencia a la alcalinidad a lo largo del año con un valor promedio de 7.4. La conductividad eléctrica mostró un máximo durante el mes de mayo, coincidiendo con el menor caudal observado en la cuenca, mientras que el mínimo fue durante el mes de julio. Estos valores son congruentes con el comportamiento esperado de la conductividad eléctrica, ya que este aumenta cuando el flujo del río está enriquecido con una mayor cantidad de sólidos suspendidos que se disocian en iones favoreciendo la conductividad, de esta forma durante la época de secas cuando el caudal es menor, la carga de sedimentos en el agua es mayor y lo contrario ocurre durante la época de lluvias cuando los caudales son más altos. Por su parte, los sólidos disueltos aumentaron gradualmente a lo largo de las primeras tres visitas de campo. En cuanto al oxígeno disuelto, se observó el valor más elevado durante el mes de febrero, a mitad de la época de secas y fue reduciendo conforme avanzó la época de secas y aumentado con la entrada de la época de lluvias. Este parámetro depende tanto de factores biológicos como físicos, por lo que la disminución en los valores podría estar relacionado a una menor turbulencia en el agua durante esta época o bien, a la disminución de actividad biológica fotosintética en el río. Por su parte, el aumento durante el mes de julio, se puede atribuir al aumento en la aeración del agua por aumento en el caudal y al aumento de actividad biológica.

Tabla 8: Parámetros fisicoquímicos.

Parámetro	Visita a campo			
	Febrero	Abril	Mayo	Julio
pH (-)	7.84	7.315	7.375	7.065
CE <sub>b</sub> ( $\mu$ S/cm)	56.31	58.41	62.005	50.68
T (°C)	15.5	16.65	19.8	16.5
OD (mg/l)	8.39	7.88	6.72	8.12
OD (%)	99.2	98.1	87.8	96
SD (ppm)	27.33	28.325	30.41	-

## Capítulo 5

# Discusión

### 5.1. Comportamiento hidrológico de la cuenca del río Pixquiac

El caudal total anual de la cuenca fue 992 mm, lo que equivale al 37 % de la precipitación anual registrada durante el período de estudio. En un intento de comparar estos resultados con los obtenidos por el monitoreo comunitario, se encontró que la aportación del caudal a la precipitación en el año hidrológico investigado, fue 16 % mayor con respecto al valor promedio de caudal anual reportado por los ciudadanos. Esta discrepancia puede ser reflejo de las diferencias generadas por los métodos de medición establecidos por el programa de GWW y las empleadas en este estudio. Como se menciona en el estudio realizado por Dapa-Zapiain (2018), en el monitoreo de GWW la medición de caudal en condiciones base del río se realiza una sola vez por mes empleando el método del flotador, mientras que para este trabajo se realizaron mediciones continuas y de alta resolución de la columna de agua. Además se generó la curva de columna-caudal con base en mediciones por métodos de aforo científico estándar, con lo que se generó la serie de datos continuos de caudal cada diez minutos para el año hidrológico de estudio.

Por otra parte, en la cuenca del río Los Gavilanes (41 km<sup>2</sup>), afluente vecino del río Pixquiac, se reportó un valor promedio del coeficiente de escurrimiento ( $Q/P$ ) del 63 % durante el período 2015-2017 (Guzmán-Huerta, 2019) lo cual se compara 26 % mayor a lo observado en la cuenca del río Pixquiac. Por su parte, en el estudio realizado por Muñoz-Villers et al. (2012) en la parte alta de Los Gavilanes, se reportaron valores de  $Q/P$  de 7 y 2 % mayores en microcuencas de bosque mesófilo de montaña regenerado

(0.1 km<sup>2</sup>) y otra de bosque maduro (0.3 km<sup>2</sup>), respectivamente.

En otras cuencas ubicadas en América Latina y Sudamérica, cuya vegetación dominante es comparable de bosque mesófilo de montaña, se han reportado coeficientes de  $Q/P$  en un rango del 42 al 81 %. Por ejemplo, en el estudio realizado por Tomasella et al. (2008) se reportó un coeficiente de escurrimiento promedio de 44 % para la cuenca del río Asu (6.6 km<sup>2</sup>) ubicada al noroeste de Brasil. Esta cuenca drena suelos de tipo Latosol y el caudal está principalmente generado por flujos de agua subsuperficiales.

A su vez, Dehaspe et al. (2018) reportó un coeficiente de escurrimiento del 69 % para la cuenca del río San Lorencito (3.2 km<sup>2</sup>) ubicada en la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenas en Costa Rica. En este caso, el tipo de suelo dominante es Andosol y el caudal está dominado por flujos superficiales generados por el exceso de saturación del suelo. Recientemente, Frêne et al. (2019) realizó un estudio en Chile en tres microcuencas con cobertura de bosque secundario (0.19, 0.22 y 0.03 km<sup>2</sup>) y tres cubiertas con bosque maduro (0.14, 0.09 y 0.13 km<sup>2</sup>), en todas ellas el tipo de suelo dominante fue Ultisol. Los coeficientes de  $Q/P$  encontrados fueron del 55, 58, 42, 59, 62 y 65 %, respectivamente. Finalmente, para la cuenca del río Kosñipata en Perú (164.4 km<sup>2</sup>, tipo de suelo Inceptisol) el coeficiente de escurrimiento reportado fue del 81 % asociado a aportaciones de flujos subsuperficiales (Clark et al., 2014).

Para todos los casos descritos, el coeficiente de escurrimiento obtenido en la cuenca del río Pixquiac fue menor. Esta diferencia puede deberse a diversos factores, entre ellos, la captación de agua por parte de las cuatro presas de almacenamiento ubicadas dentro del área de aforo, cuya presencia podría ser un factor determinante por el impacto en el caudal anual de la cuenca y por tanto para coeficiente de escurrimiento presentado. Al respecto, se encuentra el estudio realizado por Men et al. (2019), quienes estudiaron el impacto de la presa Nierji (área de drenaje de 66.4 km<sup>2</sup>) sobre el caudal de la cuenca del río Nenjiang (297 km<sup>2</sup>). Ellos mostraron que la presencia de la presa redujo la descarga total anual del río hasta en un 34 %, disminuyendo el coeficiente  $Q/P$  durante la época de lluvias y aumentándolo para el periodo de secas. Para el río Pixquiac, los aportes fueron del 17 % para la época de secas y del 20 % para la época de lluvias, por lo que la diferencia en el escurrimiento entre épocas es relativamente poca, sin embargo en otros estudios se han observado diferencias de más del 30 % entre épocas (Clark et al., 2014), como resultado de la extracción de agua en cuencas y su almacenamiento en presas. Un segundo factor que pudiese explicar la diferencia en el coeficiente de escurrimiento comparado con otras cuencas de características similares, es la pérdida de agua por procesos de evapotranspiración, sin embargo, no hay estudios que hayan cuantificado este componente en la cuenca del río Pixquiac. En una microcuenca de bosque maduro, por ejemplo, el componente de eva-

potranspiración (interceptación y transpiración) es del 38 % del total de precipitación, mientras que para una de bosque secundario el valor es de 30 % (Muñoz-Villers et al., 2015).

También se encontró que el flujo base es el componente dominante (95 %) del caudal en el río Pixquiac, lo cual podría sugerir que el principal mecanismo de generación de caudales proviene de flujos subsuperficiales. Esto podría atribuirse a una alta capacidad de infiltración en la cuenca, favoreciendo la capacidad de almacenamiento en el suelo y percolación del agua a capas más profundas, lo cual es consistente con las características del suelo tipo Andosol órtico, Andosol húmico y Andosol ócrico, dominantes en la cuenca de estudio y el bosque mesófilo de montaña dominante en la cuenca, (Kutfllek y Nielsen, 2015; Muñoz-Villers y McDonnell, 2012; Williams-Linera, 2012).

Otro aspecto también importante es que la curva de duración de flujo construida con valores diarios de caudal (Figura 23) mostró una pendiente ligeramente pronunciada, lo que muestra un régimen hidrológico poco variable con un caudal promedio de 2.7 mm/día a lo largo del año estudiado. Por otra parte, los valores más altos de descarga se presentaron en una fracción muy pequeña del tiempo (<5 %), mientras que los mínimos se superaron entre el 90 y el 100 % del tiempo. Esto indica una mayor frecuencia de volúmenes bajos de caudal, que pueden ser consecuencia de la extracción de agua en la cuenca aunado a la alta capacidad de infiltración del suelo dominante.

En cuanto a la curva maestra de recesión de flujo base (Figura 4.10), es notario el descenso de la curva con respecto a la recta en su porción final, lo cual podría sugerir pérdidas de agua por percolación profunda aunadas al almacenamiento de agua en las presas ubicadas en la cuenca. Para el caso de las microcuencas estudiadas por Muñoz-Villers et al. (2012) en la misma región de estudio, se obtuvieron valores de pérdida por percolación profunda de 702 y 876 mm (20 y 25 % de la precipitación anual) para la cuenca de bosque maduro y secundario, respectivamente, debidas a fracturas en el terrero que permiten el flujo del agua fuera de la cuenca (Muñoz-Villers y McDonnell, 2012). Este factor de pérdida de agua puede ser un elemento importante a considerar en el valor del coeficiente de escurrimiento presentado para la cuenca, sin embargo, se requiere un estudio completo de todos los componentes del balance hídrico en la cuenca del río Pixquiac para dar una estimación adecuada del total de la pérdida de agua por este componente.

En cuanto al aporte del flujo rápido, se observó una contribución promedio al caudal total de sólo el 3 %, lo cual se compara menor a lo observado en la cuenca de Los Gavilanes (10%; Guzmán-Huerta, 2019). Este comportamiento, sugiere una baja frecuencia de generación de flujos superficiales que puede ser consecuencia de la disminución del caudal como efecto de las presas ubicadas en la cuenca, ya que impiden

el escurrimiento natural del agua en los eventos de precipitación, ocasionando bajos aportes del flujo rápido al caudal total en respuesta a la precipitación (Kondolf y Bata-lla, 2005; Martínez Yrizar et al., 2012). A su vez, la baja aportación del flujo rápido a la generación el caudal sugiere un buen drenaje en la cuenca así como una alta capacidad de infiltración debido a sus propiedades geomorfológicas.

En cuanto a las métricas obtenidas de los hidrogramas, se observó un tiempo de recesión ( $L$ ) promedio de  $15.6 \pm 20.1$  hrs a lo largo del año, siendo muy similar el valor promedio entre la temporada de secas y lluvias ( $15.3 \pm 3$  y  $15.8 \pm 18.5$  hrs, respectivamente). Sin embargo, cabe hacer notar que la desviación estándar para la época de lluvias es mucho mayor que para la de secas, lo que indica que la recesión del caudal después de alcanzar el pico máximo es mucho más pronunciada en la temporada de lluvias debido a la disminución de la tasa de infiltración por el antecedente de humedad en el suelo por eventos posteriores, lo que facilita la saturación del suelo y el continuo escurrimiento del agua.

En cuanto al tiempo de pico ( $T_p$ ) se observó que fue menor para la temporada de lluvias que para la de secas, lo que sugiere suelos con mayor porcentaje de humedad en lluvias, lo que permite la saturación más rápida y facilitación de la generación de flujos superficiales y subsuperficiales. En general, el tiempo de retraso ( $T_r$ ) fue menor para los eventos de mayor intensidad ( $I_p$ ), sin embargo, a pesar de que la época de lluvias presentó los eventos de mayor intensidad, secas presentó un promedio menor en este parámetro.

## 5.2. Eventos hidrometeorológicos extraordinarios

En el año hidrológico 2016-2017 se presentaron 4 eventos de precipitación de gran tamaño. Dos ellos estuvieron asociados a los frentes fríos No. 6 y No. 13 ocurridos el 08/11/16 y 19/12/16, respectivamente. En la temporada de lluvias de 2017, el huracán Franklin de categoría 1 en la escala Saffir-Simpson (EHSS) impactó la región del 7 al 10 de agosto. Este evento registró el máximo de precipitación del periodo investigado con una cantidad promedio de 190 mm y, en respuesta, un caudal total de 11.5 mm. Cabe destacar que en este caso el volumen de caudal del río se vio interrumpido, ya que después de este evento se presentó otro de menor magnitud, y por tanto la curva de recesión no descendió hasta su nivel base inicial. En el siguiente mes (del 5 al 9 de septiembre), se presentó el huracán Katia de categoría 2 (EHSS), impactando la región central de Veracruz en forma de tormenta tropical. Este evento alcanzó una precipitación de 135 mm generando un caudal en el río de 22.5 mm. Es interesante

observar que el caudal producido en este evento fue casi el doble comparado con el generado por el huracán Franklin, a pesar de que el aporte de lluvia por Katia fue menor. Analizando estos eventos se observó que a pesar de que la cantidad e intensidad promedio de la lluvia (8.9 mm/h) fueron mayores en Franklin con respecto a Katia (3.9 mm/h), tanto la duración del evento como el antecedente de precipitación fueron mayores para el segundo huracán (Franklin:  $T_d= 20.9$  hrs,  $AP= 97.2$  mm; Katia:  $T_d= 34.3$  hrs,  $AP= 356.93$ ). Es importante mencionar que la diferencia en  $T_d$  y  $AP$ , son de particular relevancia para explicar las respuestas del caudal, así como diferencias en los volúmenes totales de descarga. Un mayor antecedente de precipitación indica un mayor estado de saturación del suelo, y por tanto favorece un mayor movimiento del agua y mayores flujos superficiales y subsuperficiales, contribuyendo así un mayor volumen de caudal en la cuenca.

Debemos reconocer que la estimación del caudal en respuesta a eventos grandes de precipitación, está sujeta a imprecisiones debido a que los aforos no se realizaron durante eventos de tormenta por cuestiones de seguridad. Por tanto la curva altura de agua-caudal desarrollada fue construida con aforos realizados en el río en distintas condiciones de flujo base. De esta forma, la curva y por consiguiente la cuantificación de descarga, presenta cierta incertidumbre para los caudales altos. A pesar de estas limitaciones, durante el año hidrológico estudiado se presentaron solamente cuatro eventos máximos, lo que representa tan solo el 2.5% de los eventos analizados. En cuanto al caudal, el total acumulado por estos eventos fue de 61.2 mm, equivalente al 6% del caudal total anual observado.

### 5.3. Trabajo a futuro y recomendaciones

En un trabajo hidrológico a futuro en la cuenca del río Pixquiac es importante considerar la incertidumbre de la conversión a caudal por medio de la curva de columna de agua-caudal, por lo que se sugiere continuar con el monitoreo de caudal y realización de aforos, con lo que se buscaría mejorar la cuantificación del flujo en la cuenca. Por otra parte, se observó la clara influencia de presas en el régimen hidrológico de la cuenca, por lo que se sugiere estudiar con más detalle cuáles podrían ser los efectos sobre el caudal a nivel estacional y anual. Finalmente, y con el fin de mejorar el entendimiento hidrológico de la cuenca del río Pixquiac, se sugiere realizar un estudio completo del balance hídrico llevando a cabo mediciones de interceptación y transpiración, que sugieren ser de gran importancia con base en los resultados obtenidos en este trabajo.

## Capítulo 6

# Conclusiones

El presente trabajo estudió por primera vez la dinámica hidrológica de la cuenca periurbana del río Pixquiac a partir de datos continuos de alta resolución de precipitación y caudal, siendo así de gran aporte para el manejo y gestión de la cuenca como uno de las principales abastecedoras de agua para la ciudad de Xalapa y comunidades aledañas.

La caracterización de la dinámica hidrológica de la cuenca del río Pixquiac presenta un coeficiente de escurrimiento bajo en comparación con cuencas de características similares, esta diferencia se atribuye al almacenamiento de agua en las presas ubicadas dentro de la cuenca y a la posible pérdida de agua por percolación profunda.

Por su parte, la generación de caudal está dominado por una alta contribución del flujo base lo que sugiere que es una cuenca dominada por flujos subsuperficiales, que se atribuye a la alta capacidad de infiltración y almacenamiento de agua por el tipo de suelo de origen volcánico y las propiedades geomorfológicas de la cuenca.

A pesar de la presencia de las presas y la percolación de agua profunda, la CDF fue característica de una cuenca de régimen hidrológico poco variable, por lo que le confiere un gran potencial de almacenamiento y de aprovechamiento del agua por su carácter perenne y de acceso continuo al recurso hídrico.

Con este precedente, se hace énfasis en la importancia de la cuenca del río Pixquiac siendo esta de gran valor social y ambiental como una de las principales fuentes de provisión de agua para los más de 500 mil habitantes de la ciudad de Xalapa, así como ecosistema para la vida acuática en general.

# Bibliografía

- Beven, K. y Freer, J. (2001). A dynamic topmodel. *Hydrological Processes*, 15(10):1993–2011.
- Birkel, C. D. (2007). Delimitación empírica de áreas prioritarias para el manejo del recurso hídrico en Costa Rica. *Rev. Reflexiones*, 86(2):39–49.
- Bruijnzeel, L. A. (2004). *Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees?*, volumen 104.
- Caire-Martínez, G. (2005). Conflictos por el Agua en la Cuenca Lerma-Chapala, 1996-2002. *Región y Sociedad*, XVII(34):73–125.
- Cameron, B. (2016). Protecting Xalapa's Water : Sustainable Management of the Pixquiac River Watershed in Veracruz , Mexico , 2005 – 2015. En *Inovations for Successful Societies*. Princeton University.
- Clark, K. E., Torres, M. A., West, A. J., Hilton, R. G., New, M., Horwath, A. B., Fisher, J. B., Rapp, J. M., Robles Caceres, A., y Malhi, Y. (2014). The hydrological regime of a forested tropical Andean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12):5377–5397.
- CONAGUA (2015). *Atlas del Agua en México 2015*.
- Cotler-Ávalos, H. (2010). *Las Cuencas Hidrográficas de México: Diagnóstico y Priorización*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Dapa-Zapiain, J. (2018). *Estudio comparativo de caudales y análisis de la calidad del agua del río Pixquiac, centro de Veracruz, México*. Tesis, UNAM.
- Dehaspe, J., Birkel, C., Tetzlaff, D., Sánchez-Murillo, R., Durán-Quesada, A. M., y Soulsby, C. (2018). Spatially distributed tracer-aided modelling to explore water

- and isotope transport, storage and mixing in a pristine, humid tropical catchment. *Hydrological Processes*, 32(21):3206–3224.
- Dingman, S. (2014). *Physical Hydrology*. Waveland Press, Inc, United States of America, 2da edición.
- Edwards, P. J., Williard, K. W. J., y Schoonover, J. E. (2015). Fundamentals of Watershed Hydrology. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, (154):3–20.
- Espejel, I., Eaton, R., y Daesslé, W. (2011). Propuesta de evaluación rápida para el pago de servicios ambientales hidrológicos en zonas áridas. *Investigación ambiental*, 3(2):18–30.
- Fonseca-Ortiz, C., Díaz-Delgado, C., Hernández-Téllez, M., y Esteller-Alberich, M. (2013). Demanda hídrica urbana en México: Modelado espacial con base en sistemas de información geográfica. *Interciencia*, 38(1):17–25.
- Frêne, C., Dörner, J., Zúñiga, F., Cuevas, J. G., Alfaro, F. D., y Armesto, J. J. (2019). Eco-hydrological Functions in Forested Catchments of Southern Chile. *Ecosystems*.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 5ta edición.
- García-Coll, I., Martínez-Otero, A., Ramírez-Soto, A., Niño-Cruz, A., Juan-Rivas, A., y Domínguez-Barrada, L. (2004). La relación agua-bosque: delimitación de zonas prioritarias para pago por servicios ambientales hidrológicos en la cuenca del río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. En Ecología, I. N. d. y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, editors, *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental.*, páginas 99–115. D.F. México.
- García-Coll, I., Martínez Otero, A., y Vidriales Chan, G. (2008). Delimitación de Zonas Prioritarias y Evaluación de los Mecanismos Existentes para Pago de Servicios Ambientales Hidrológicos en la Cuenca del Río Pixquiac, Veracruz, México.
- GDN-UNAM (2012). *Gran Diccionario Náhuatl UNAM*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez-Tagle, Geissert, D., Perez-Maqueo, O. M., Marin-Castro, B. E., y Rendon-Lopez, M. B. (2011). 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. *Developments in Hydraulic Conductivity Research*, páginas 225–248.
- Guzmán-Huerta, A. (2017). *Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque húmedo de montaña, centro de Veracruz, México*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guzmán-Huerta, A. (2019). *Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque tropical húmedo de montaña y su asociación con eventos meteorológicos*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hewlett, J. D. y Hibbert, A. R. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. En *Proceedings of 1st International Symposium on Forest Hydrology*., páginas 275–290.
- Holwerda, F., Aranda-Delgado, E., Castilleja-Delgado, E., y Muñoz-Villers, L. (2016). Ten years of rainfall and community-based streamflow monitoring in the tropical montane cloud forest region of central Veracruz , Mexico : What do these data tell us ? H21E-1448.
- Holwerda, F., Bruijnzeel, L. A., Muñoz-Villers, L. E., Equihua, M., y Asbjornsen, H. (2010). Rainfall and cloud water interception in mature and secondary lower montane cloud forests of central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 384(1-2):84–96.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1):446.
- Kondolf, G. M. y Batalla, R. J. (2005). Chapter 11 Hydrological effects of dams and water diversions on rivers of Mediterranean-climate regions: examples from California. En *Developments in Earth Surface Processes*, volumen 7, páginas 197–211.
- Kutílek, M. y Nielsen, D. R. (2015). *Soil*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Law, O. H. M. S. (2013). Encyclopedia of agrophysics. *Choice Reviews Online*, 49(06):49–3031.
- Liu, Q. Q., Chen, L., Li, J. C., y Singh, V. P. (2004). Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow. *Journal of Hydrology*, 291(1-2):28–41.
- Lutgens, F. K. y Tarbuck, E. J. (2013). *The Atmosphere: An Introduction to Meteorology*. Pearson, 12ta edición.

- Manson, R. H. (2007). Efectos del uso del suelo sobre la provisión de servicios ambientales hidrológicos: monitoreo del impacto del PSAH. Reporte técnico.
- Martínez, M. L., Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehlreter, K., Equihua, M., y Landgrave, R. (2009). Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, 258(9):1856–1863.
- Martínez Yrizar, A., Búrquez, A., y Calmus, T. (2012). Disyuntiva: impactos ambientales asociados a la construcción de presas. *Región y Sociedad*, (Número especial 3):289–307.
- Men, B., Liu, H., Tian, W., Wu, Z., y Hui, J. (2019). The Impact of Reservoirs on Runoff Under Climate Change: A Case of Nierji Reservoir in China. *Water*, 11(5):1005.
- Menchaca, M. S. y Alvarado, E. L. (2011). Efectos antropogénicos provocados por los usuarios del agua en la microcuenca del río Pixquiac. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, Pub. Esp.:85–96.
- Moore, R. D. D. (2004). Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement Part 2: Constant-rate Injection. *Streamline Watershed Management Bulletin-Watershed Management Bulletin*, 8(1):11–16.
- Moore, R. D. D. (2005). Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement Part III: Slug Injection Using Salt in Solution. *Streamline Watershed Management Bulletin*, 8(2):1–6.
- Muñoz-Villers, L. E. (2008). *Efecto del cambio de uso de suelo sobre la dinámica hidrológica y calidad del agua en el trópico húmedo del centro de Veracruz, México*. Tesis, Universidad Autónoma Metropolitana.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Marín-Castro, B., Gómez-Tagle, A., McDonnell, J., Asbjornsen, H., Dawson, T., y Adrian Bruijnzeel, L. (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3):395–407.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Gómez-Cárdenas, M., Equihua, M., Asbjornsen, H., Bruijnzeel, L. A., Marín-Castro, B. E., y Tobón, C. (2012). Water balances of old-growth and regenerating montane cloud forests in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 462-463:53–66.

- Muñoz-Villers, L. E. y López-Blanco, J. (2008). Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 29(1):71–93.
- Muñoz-Villers, L. E. y McDonnell, J. J. (2012). Runoff generation in a steep, tropical montane cloud forest catchment on permeable volcanic substrate. *Water Resources Research*, 48(9):1–17.
- Nathan, R. y McMahon, T. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resources Research*, 26(7):1465–1473.
- National Research Council (2008). *Hydrologic Effects of a Changing Forest Landscape*. National Academies Press, Washington, D.C.
- Paré, L. y Gerez, P. (2012). *Al filo del agua: cogestión de la subcuenca del río Pixquiác, Veracruz*. INE- SEMARNAT, 1ra edición.
- Reichl, F. y Hack, J. (2017). Derivation of Flow Duration Curves to Estimate Hydro-power Generation Potential in Data-Scarce Regions. *Water*, 9(8):572.
- Robinson, M. y Ward, R. (2017). *Hydrology: Principles and processes*. IWA, 1 edición.
- SEFIPLAN (2016). Sistema de Información Municipal, Cuadernillos Municipales 2016: Xalapa.
- SEMARNAT (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición*. SEMARNAT, México, 2015 edición.
- Tomasella, J., Hodnett, M. G., Cuartas, L. A., Nobre, A. D., Waterloo, M. J., y Oliveira, S. M. (2008). The water balance of an Amazonian micro-catchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hydrological Processes*, 22(13):2133–2147.
- Williams-Linera, G. (2012). *El bosque de niebla del centro de Veracruz: ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático*. Xalapa, Veracruz, México, 1ra edición.