



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

“ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL RÉGIMEN DE CAUDAL
AMBIENTAL EN EL RÍO GRANDE DE COMITÁN, CHIAPAS”

T E S I S

Que para optar por el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Presenta:

CLAUDIA ANDREA SALGUERO OLVERA

Tutor: Dr. Oscar A. Escolero Fuentes, Instituto de Geología, UNAM

Comité Tutorial: Dr. Javier Alcocer Durand. FES Iztacala, UNAM

Dr. Eric Morales Casique, Instituto de Geología, UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Octubre 2018



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.

Agradecimientos

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de seguir alcanzando mis metas profesionales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mi posgrado.

Al fondo sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua CONAGUA-CONACyT, por el financiamiento del proyecto "Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello", realizado en el estado de Chiapas durante los años 2012-2015 con clave 000000000167603. Realizado bajo la coordinación técnica del Dr. Oscar A. Escolero Fuentes del Instituto de Geología, UNAM.

A mi tutor Dr. Oscar A. Escolero Fuentes por la oportunidad de formar parte de un gran equipo de trabajo, por su confianza en mis capacidades para realizar este trabajo y por brindarme su apoyo incondicional durante este proceso.

A Gemma Abisay Ortiz Haro, por compartirme datos de peces, una parte fundamental de este trabajo.

A Felipe Armas, por su paciencia y tiempo para guiarme en el uso del modelo PHABSIM.

A todo mis amigos y compañeros del posgrado, por las risas y momentos compartidos.

A los miembros de comité tutor y miembros del jurado, por brindarme su apoyo y sus comentarios a este trabajo.

A mi familia, con todo mi corazón.

Índice

Resumen	i
Abstract	ii
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Justificación	4
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Objetivos	6
Capítulo 2. Marco teórico	7
2.1 Conceptos y definiciones.....	7
2.2 Modelo HEC-HMS.....	9
2.3 Caudal ambiental.....	10
2.4 La metodología IFIM.....	13
2.5 El modelo PHABSIM.....	14
2.6 Curvas de Preferencia de Hábitat para peces	15
2.7 Interacción río-acuífero.....	16
Capítulo 3. Área de estudio	22
3.1 Localización	22
3.2 Vías de acceso	23
3.3 Actividades económicas	23
3.4 Geología y geomorfología	24
3.5 Estratigrafía	26
3.6 Clima.....	29
3.7. Hidrología	30
3.8 Edafología y Uso de Suelo	32
Capítulo 4. Métodos	35
4.1 Recopilación de información.....	35
4.2 Hidrogramas.....	37
4.3 Flujo base.....	45
4.4 Red de flujo	46
4.5 Especies indicadoras.....	46
4.6 Secciones transversales.....	49
4.7 Curvas de preferencia de hábitat (III).....	51
4.8 Simulación de hábitat.....	52

Capítulo 5. Resultados	58
5.1 Esguerrimiento	58
5.2 Flujo Base	61
5.3 Relación río-acuífero	63
5.4 Régimen de Caudal Ambiental	63
5.5 Contribución del Flujo Base al Régimen de Caudal Ambiental	68
Capítulo 6. Discusión de resultados	70
Capítulo 7. Conclusiones	75
Referencias	76

Resumen

En la actualidad, el establecimiento de un régimen de caudal ambiental se considera una herramienta imprescindible en la gestión de cuencas hidrográficas, especialmente aquellos ríos en los que se pueden ver en peligro los sistemas naturales que albergan, como actualmente se observa en el Río Grande de Comitán, en donde debido a las actividades antropogénicas que se desarrollan en las proximidades del río, tales como extracción de agua superficial y subterránea, principalmente para abastecimiento urbano y agrícola, los caudales circulantes durante la temporada de estiaje se ven reducidos. En este trabajo se determinó que el Río Grande de Comitán recibe aportes de un sistema local de agua subterránea a lo largo de su trayecto a través de su cuenca homónima. Este flujo representa una tercera parte del total durante la temporada de lluvias (mayo a octubre) mientras que, durante la temporada de estiaje (noviembre a abril) el flujo total en el cauce está compuesto por los aportes de agua subterránea (flujo base). Para determinar el régimen de caudal ambiental se utilizó el método de simulación de hábitat físico (PAHBSIM) para establecer la variación de la disponibilidad de hábitat en función del caudal y de la morfología del cauce, utilizando como especies objetivo dos especies de peces pertenecientes a la familia *Profundulidae* (*Profundulus candalarius* y *Profundulus aff. candalarius*) y *Poeciliidae* (*Poecilia mexicana* y *Poecilia reticulata*), los cuales se distribuyen en la parte alta y media del río y la especie *Rhamdia guatemalensis* localizada en la parte baja. Como resultado de la simulación de hábitat, se han propuesto los requerimientos mínimos ambientales en diferentes sitios del cauce del río, considerando que los requerimientos de hábitat físico para las especies varían a lo largo de las estaciones y responden a la etapa de vida en la que se encuentran. Para el caso de los sitios Los Riegos y Los Desamparados el requerimiento mínimo ambiental va de 0.5 a 1.5 m³/s durante los meses de enero a junio y un valor mínimo de 3 m³/s de junio a diciembre. En el sitio Venustiano Carranza se requiere un mínimo de 20 m³/s durante los meses de mayo a octubre y de 4 m³/s durante los meses de noviembre a abril, mientras que en el sitio El Carrizal los requerimientos mínimos se duplican para los mismos periodos. Estos flujos mínimos propuestos representan una recuperación de los flujos en temporada de estiaje cuando los flujos regulados están cerca o por debajo de los flujos ambientales. En consecuencia, el caudal ambiental es susceptible a las variaciones del flujo base, especialmente en la temporada de estiaje donde el requerimiento ambiental depende de las aportaciones del agua subterránea.

Abstract

Currently, the establishment of an environmental flow regime is considered an essential tool in the management of watersheds, specially those rivers in which the natural systems they maintain can be endangered like it is currently observed in the Río Grande of Comitán in which due to anthropogenic activities around of the river, such as groundwater and superficial pumping, mainly for urban and agricultural supplies, the circulating flows during the low water period are reduced. In this study it was determined that the Río Grande de Comitán receives contributions from a local groundwater system, along its course through the basin. This flow represents a third part of total flow during the rainy season (May to October), while during the low flow period (November to April), the total flow in the stream is composed by the contributions of groundwater (base flow). The determination of the regime of environmental flow was obtained using the physical habitat simulation (PHABSIM), by setting the variation habitat availability depending on the flow and channel morphology, taking as target species two species of fish belonging to the Pofundulidae (*Profundulus candalarius* y *Profundulus aff. candalarius*) and Poeciliidae (*Poecilia mexicana* y *Poecilia reticulata*) families, which are distributed in the upper and middle part of the river, and the *Rhamdia guatemalensis* specie located in the lower part. As a result of the habitat simulation, the minimum environmental requirements have been proposed in different sites along the river, considering that the physical habitat requirements for the species vary throughout the seasons and depend on the lifestage in which they are. The minimum environmental requirement proposed for Los Riegos and Los Desamparados sites ranges from 0.5 to 1.5 m³/s from January to June and a minimum value of 3 m³/s from June to December. The Venustiano Carranza site requires a minimum value of 20 m³/s from May to October and a value of 4 m³/s from November to April, while in the El Carrizal site the minimum requirements are doubled during the same period. These proposed minimum flows represent a recovery of flows during the low season when the regulated flows are close to or below the environmental flows. Consequently, the environmental flow is susceptible to variations in the base flow, specially during the dry season where the environmental requirements depends on the contributions of groundwater.

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Introducción

A través del tiempo los ríos han jugado un papel determinante en la evolución de las sociedades humanas; desde una perspectiva hidrológica desempeñan un papel medular en el ciclo global del agua entre el mar, el aire y la tierra, y junto con los acuíferos acumulan el agua que cae por precipitación y la acarrearán a manera de escurrimiento hacia el mar que, a su vez, continúa el ciclo y regresa la humedad a la tierra por medio de la atmósfera. Este ciclo renueva constantemente el abasto limitado de agua en los continentes y, por tanto, sustenta toda la vida sobre la Tierra. Desde un punto de vista humano, los ríos son las principales fuentes de agua para beber, cocinar, higiene personal y cultivar, para generar energía eléctrica y para manufacturar todo tipo de artículos materiales. Estos beneficios han dado lugar al establecimiento de asentamientos humanos alrededor de los ríos. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que los efectos de la urbanización de cuencas en los ecosistemas fluviales están asociados a cambios en la hidrología (Roy *et al.*, 2009; Konrad y Booth, 2005), a la alteración de la morfología de las corrientes (Brown *et al.*, 2005) y al aumento de nutrientes y contaminantes (Brown *et al.*, 2009), además, las corrientes que soportan comunidades acuáticas diversas y que a menudo albergan taxones raros o endémicos son particularmente susceptibles a los cambios asociados con la urbanización (Morgan y Cushman, 2005; Smith y Lamp, 2008).

Debido a que la mayoría de estos perjuicios no son reconocidos o no se valoran, quedan fuera de las ecuaciones de costo-beneficio, que a menudo determinan cómo se gestionan los ríos. Como resultado de ello, muy poco se ha hecho para detener, y mucho menos revertir, el descenso en la salud de los ríos. Hasta la fecha, los esfuerzos para restaurar y proteger los ríos se han centrado principalmente en dos objetivos: mejorar la calidad del agua y establecer los requerimientos de flujos mínimos para que ríos y arroyos no se dessequen por completo. Estas medidas han mejorado las condiciones de los ríos en muchos lugares, pero generalmente no son suficientes.

Durante la última década, se han acumulado considerables pruebas de que el régimen natural de fluctuación de un río –su patrón variable de crecidas y escurrimientos base ya sea durante uno o a través de varios años– ejerce gran influencia sobre la salud del río. Cada componente de fluctuación natural realiza una valiosa labor para el sistema en su conjunto (Postel *et al.*, 2010).

En pocas palabras, el reto a enfrentar es gestionar los ríos para mejorar el equilibrio entre la demanda humana de agua y a la vez, cubrir las necesidades de agua de los mismos ríos. El establecimiento de un régimen de caudal ambiental es, en la actualidad, una herramienta imprescindible en la gestión de las cuencas hidrográficas, especialmente en aquellos ríos que han sido regulados mediante diversas infraestructuras hidráulicas o aquellos en los que se pueden ver en peligro los sistemas naturales que albergan (Magdaleno, 2004).

Las metodologías desarrolladas para determinar el caudal ambiental generalmente se basan únicamente en el análisis del escurrimiento superficial, mientras que en los métodos más recientes ya se han incorporado variables biológicas. Sin embargo, aún no se han realizado estudios que reconozcan la importancia del flujo de agua subterránea al caudal ambiental que se requiere en un río, especialmente porque durante la época de estiaje el escurrimiento superficial que circula en los ríos perenes generalmente proviene de las descargas naturales de agua subterránea, constituyendo así el flujo base de los ríos.

En este trabajo se propone llevar a cabo un estudio que permita cuantificar la contribución del agua subterránea al flujo base de un río y, de esta manera, determinar su importancia en el régimen de caudal ambiental que se requiere en este. Con base en estos resultados se podrán replicar estudios similares en otras cuencas del mundo.

Este estudio constituye la parte posterior de un proyecto de investigación (Proyecto CONACyT “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello” con clave 167603) llevado a cabo del año 2012 al 2015, el cual estuvo enfocado al conocimiento de las causas del cambio de coloración de algunos lagos de Montebello, en el estado de Chiapas. Como resultado del proyecto se identificó que el Río Grande de Comitán –principal aporte de agua superficial de los lagos– presenta importantes problemas, principalmente por la reducción de caudales, la alteración de la continuidad hidrológica a lo largo del cauce y por los cambios en la composición química del agua que circula por el río. Por esta razón, resulta importante conocer, en este caso, la aportación de agua subterránea al escurrimiento superficial y su importancia con respecto al caudal ambiental que se requiere en el Río Grande de Comitán.

Dentro del marco del Proyecto CONACyT se generó información hidrológica y de calidad del agua dentro de la cuenca. Esta información fue utilizada en este trabajo para establecer un régimen de caudal ambiental en el Río Grande de Comitán, así como también determinar la relación que existe entre este último y el agua subterránea.

1.2 Antecedentes

De acuerdo con Stalnaker (1982) y Trihey y Stalnaker (1985), los primeros indicios de evaluaciones de caudal ambiental surgen en la década de los años 40, en los Estados Unidos de América. Pero no fue sino hasta la década de los años setenta cuando se inicia un importante trabajo resultado de las modificaciones en la legislación estadounidense en cuanto al uso del agua y el inicio de la era de la construcción de las grandes presas (WCD, 2000). Fuera de Estados Unidos de América, y de algunos países de Europa (España, Francia y Suiza), la historia de la evaluación de caudal ambiental es escasa, y no es sino hasta mediados de los años ochenta que se registra el uso de estas metodologías para países como Inglaterra, Australia y Nueva Zelanda, mientras que países en desarrollo, como son los de Centro y Sudamérica, la historia del uso de dichas metodologías está apenas en sus inicios (Tharme, 2003; Córdoba e Iza, 2007).

En México, la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 (DOF, 2012) establece el procedimiento para evaluar los caudales ecológicos en las cuencas. Esta norma se refiere a las metodologías hidrológicas como el enfoque más simple para obtener resultados a corto plazo, como lo demuestran los casos de estudio del Río Valles en San Luis Potosí (Santacruz de León y Aguilar-Robledo, 2009), donde se realiza el cálculo del caudal ambiental con el método de Tennant y el estudio realizado en el Río Acaponeta en Nayarit, México (De la Lanza *et al.*, 2012) donde el cálculo se realiza a través del análisis de registros de flujos de series de tiempo. La metodología de simulación del hábitat requiere información más detallada en términos de datos hidrológicos, hidráulicos y biológicos como puede observarse en el estudio realizado en la Cuenca baja del Río Duero, México (Armas-Vargas *et al.*, 2017).

Aunque en la cuenca del Río Grande de Comitán no se tienen registros de estudios de determinación de caudal ambiental, sí se han realizado estudios de diverso carácter, los cuales comenzaron a generarse a partir de la observación de cambios de coloración y mortandad de fauna en algunos lagos del Parque Nacional “Lagunas de Montebello” en el estado de Chiapas durante la temporada invernal de 2008 y 2009, lo que generó preocupación en la población y el Gobierno del Estado.

Tras ello, los primeros en realizar un diagnóstico del fenómeno fue la Comisión Federal de Electricidad en el año 2012, a través de un estudio de caracterización climatológica, meteorológica

e hidrográfica (CFE, 2012) en la cuenca del Río Grande de Comitán, sin embargo, los resultados no fueron concluyentes.

Posteriormente, se inició un nuevo esfuerzo para comprender el problema de la contaminación en los lagos a través de la apertura de la convocatoria del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua CONAGUA – CONACyT, siendo acreedor del proyecto “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar Montebello” con clave 000000000167603 el Dr. Oscar A. Escolero Fuentes, perteneciente al Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, quien reunió a un grupo interdisciplinario e interinstitucional con la finalidad de llevar a cabo un estudio integral del Sistema Lagunar Montebello, el cual había sido declarado Área Natural Protegida a través del decreto presidencial publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de diciembre de 1959. Durante el periodo de vigencia del proyecto se generó información inédita de la zona, ya que anteriormente era escasa o no existía. Dentro de los trabajos realizados en el área de los Lagos de Montebello se encuentran estudios hidrogeoquímicos (Juárez-Hernández, 2014; Barajas-García, 2017; Alvarado-Velázquez, 2015), que se enfocan en el análisis y evaluación de la presencia de contaminantes en el agua; de suelos (Parra-Carrillo, 2017; López-Rivera, 2017; Martínez-Angeles, 2015), que se orientan a la caracterización de los suelos dentro de la cuenca para comprender el transporte de contaminantes principalmente de origen agrícola; geomorfológicos (Durán-Calderón, 2013; Mora *et al.*, 2016), realizados para determinar las formas del relieve que conforman la cuenca; cartográficos (Bahena-Bahena, 2014) y de agua subterránea (Olea-Olea, 2015; Olea-Olea y Escolero, 2018), dirigidos al estudio de la concentración y transporte de contaminantes en al agua subterránea dentro de la cuenca del Río Grande de Comitán.

1.3 Justificación

Como resultado de los análisis previos realizados en la cuenca de estudio se identificó que el Río Grande de Comitán es la principal fuente de aporte de agua superficial a los lagos de Montebello y que este cuerpo fluvial presenta múltiples afectaciones, siendo las principales la visible reducción de caudales, la fragmentación hidrológica a lo largo del cauce y cambios en la calidad del agua que circula por el río. Por ello, resulta de gran importancia, en este caso, proponer una estrategia de manejo del recurso en la cuenca, a través del establecimiento de un régimen de caudal ambiental

por medio de la determinación del aporte de agua subterránea al escurrimiento superficial en el río y su contribución al caudal ambiental que se requiere en este.

1.4 Hipótesis

En el Río Grande de Comitán se ha observado la reducción del caudal en época de estiaje e incluso se han detectado tramos sin presencia de escurrimiento. Se estima que la contribución de agua subterránea al escurrimiento superficial es muy importante a tal grado que el flujo base en el río en época de estiaje está constituido únicamente por agua subterránea, ya que los ríos que presentan escurrimiento superficial perene -como el Río Grande de Comitán- en condiciones naturales durante la temporada de estiaje (sin lluvias), el flujo dentro del cauce procede de las descargas naturales de agua subterránea. De manera que, si no se lleva a cabo una gestión adecuada de la extracción de agua subterránea para suministro urbano y agrícola, ésta podría eventualmente interceptar las descargas naturales de agua subterránea hacia el río, con lo que se vería reducido su flujo base.

En el análisis del régimen de caudal ambiental se considera particularmente importante el mantenimiento de los requerimientos mínimos para sustentar a las especies de peces que habitan en el río durante sus diferentes etapas de vida. En el caso del Río Grande de Comitán y, particularmente para algunas especies de peces, es muy importante el caudal que mantiene el río durante la temporada de reproducción que tiene lugar en la época de estiaje, durante la cual se considera que los requerimientos mínimos ambientales requeridos por las especies provienen principalmente de las descargas naturales de agua subterránea.

Para determinar cuál es el régimen de caudal ambiental requerido para varias especies de peces seleccionadas será necesario establecer la contribución de agua subterránea al escurrimiento del río a lo largo del año y, por tanto, establecer la importancia de estas aportaciones en las diferentes etapas de vida de las especies seleccionadas, la cual se estima que será crítica en la época de estiaje, ya que no hay lluvias y el escurrimiento disminuye sustancialmente.

1.5 Objetivos

Objetivo general

Analizar la importancia del agua subterránea mediante la cuantificación de su aporte al régimen de caudal ambiental en el Río Grande de Comitán.

Objetivos particulares

- ◆ Determinar el flujo base en diferentes porciones del Río Grande de Comitán.
- ◆ Crear una red de flujo de agua subterránea para comprender la relación del agua subterránea y el agua superficial.
- ◆ Definir el régimen de caudal ambiental en el río.
- ◆ Cuantificar la contribución del flujo base al régimen de caudal ambiental.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Conceptos y definiciones

Escorrentía

La escorrentía es el agua generada por una cuenca en la forma de flujo superficial y por tanto constituye la forma más disponible del recurso. Está constituida por la sumatoria de tres componentes principales: escurrimiento, flujo sub-superficial y descarga de agua subterránea o flujo base (Aparicio, 1997).

Flujo sub-superficial

Está constituido por el flujo lateral desde la zona de humedad del suelo. Luego de la infiltración del agua en el suelo continúa moviéndose en función de los gradientes hídricos, especialmente el gradiente vertical y si se encuentra con una capa de muy baja conductividad hidráulica se produce un flujo lateral el cual culmina con su intercepción por los cauces. Junto con el escurrimiento conforma el llamado flujo rápido (*quick flow*) y que generalmente se considera como escorrentía directa (Custodio y Llamas, 1983).

Flujo base

El flujo base está conformado por el agua que fluye desde el sistema de flujo de agua subterránea hacia los cauces. Esto ocurre cuando los cauces interceptan el agua subterránea desde el nivel freático. El flujo base ocurre siempre que exista una componente del sistema de flujo de agua subterránea susceptible a ser interceptada por el cauce del río (Aparicio, 1997).

Hidrograma

El hidrograma es una representación gráfica de la escorrentía en función del tiempo. Este puede representar la escorrentía para un periodo largo, una serie de eventos o un evento en particular. Por lo general, el análisis de hidrogramas se realiza para un solo evento. El área comprendida bajo un hidrograma es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo en el intervalo de tiempo considerado; obtenido mediante la multiplicación de las unidades del eje horizontal por las del eje vertical (Sánchez, 2012):

$$Q \left(\frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} \right) \times \text{tiempo} = \text{Volumen} \quad (1)$$

Red de flujo

Una red de flujo (Figura 1) es una representación bidimensional esquemática del flujo en un plano mediante líneas de flujo y líneas equipotenciales. Las líneas equipotenciales son la traza de las superficies equipotenciales al ser cortadas por el plano en que se dibuja la red de flujo. El flujo siempre es tridimensional, así que las redes de flujo de dos dimensiones pueden trazarse en un plano horizontal o en un corte vertical. El trazado de una red de flujo debe cumplir estas condiciones:

- Ambas familias de líneas tienen que cortarse perpendicularmente y,
- Los espacios resultantes deben ser “cuadrados” o proporcionados para que se aproximen lo más posible a éstos; un círculo inscrito debería ser tangente a los cuatro lados (Sánchez, 2012).

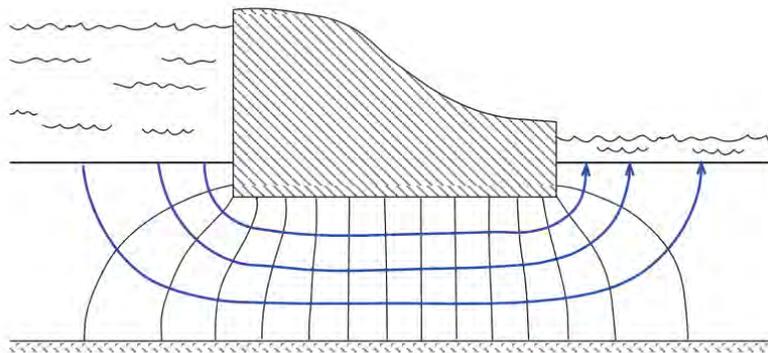


Figura 1. Esquema de una red de flujo (Tomado de Sánchez, 2012).

Modelo lluvia-escurrimiento

Un modelo lluvia-escurrimiento es una representación del comportamiento de las cuencas hidrográficas ante la ocurrencia de una precipitación dada (Rodríguez *et al.*, 2010). En la Figura 2 se muestra la representación de un modelo lluvia-escurrimiento. En la entrada se representa la precipitación en función del tiempo (hietograma) y, según las características de la cuenca, una parte se “pierde” y otra se transforma en escurrimiento, por lo que se obtiene el hidrograma

representativo. Para modelar el proceso de transformación de la lluvia en escurrimiento, se acostumbra a dividirlo en dos partes (Aldama, 2000):

- a) Con los modelos de producción se estima qué parte de la lluvia no se transforma en escurrimiento, es decir, las pérdidas y, por diferencias, qué parte se transforma en escurrimiento.
- b) Con los modelos de transferencia se estima cómo el escurrimiento se desplaza a través de las distintas partes de la cuenca hasta llegar al sitio de interés.

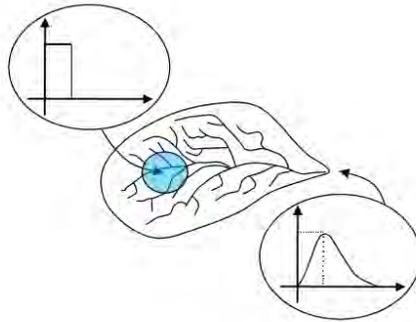


Figura 2. Relación lluvia-escurrimiento para una tormenta elemental (Modificado de Aldama, 2000).

2.2 Modelo HEC-HMS

El modelo HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*) es una herramienta utilizada para simular procesos de lluvia-escurrimiento en sistemas dendríticos de cuencas. Es un software de uso libre y ampliamente evaluado a nivel nacional e internacional (García, 2011; Chu y Steinman, 2009; Gaitán y Nelson, 2008), desarrollado por la USACE (*United States Army Corps of Engineers*). Este programa se puede clasificar como un modelo hidrológico determinístico, de tipo evento y/o distribuido en el cual la cuenca es descrita a través de una serie de elementos interconectados (subcuencas, canales de tránsito, nodos, fuentes, sumideros y derivaciones).

El software HEC-HMS emplea los siguientes sub-modelos para la obtención de un modelo general que transforme la lluvia en escurrimiento en la cuenca bajo estudio (Fleming, 2010):

- Modelo de cuenca
- Modelo meteorológico
- Especificaciones de control
- Datos de entrada

El programa crea una corrida de simulación, combinando los modelos y las especificaciones. El lapso de una simulación es controlado por las especificaciones de control que incluyen: la fecha y hora de inicio, de terminación y un intervalo de tiempo.

Las fases de trabajo del programa son:

- a) Separación de la lluvia neta, es decir, se calcula qué parte de la precipitación va a producir escurrimiento directo.
- b) Cálculo del escurrimiento directo producido por esa lluvia neta.
- c) Suma del escurrimiento directo y el base, si existía previamente. Cálculo de la evolución del escurrimiento base a lo largo del tiempo.
- d) Cálculo de la evolución del hidrograma a medida que escurre a lo largo del cauce.

El modelo permite establecer varias subcuencas, en las cuales realiza los cálculos de las tres primeras fases mencionadas. Luego, suma todos los caudales generados y transitados a lo largo del recorrido y proporciona el hidrograma de salida de la cuenca.

2.3 Caudal ambiental

De acuerdo con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) se define el caudal ambiental como el régimen hídrico que se establece en un río, humedal o zona costera para sustentar ecosistemas y sus beneficios donde hay usos del agua que compiten entre sí y donde los caudales están regulados (Dyson *et al.*, 2003). Además, deberá ser representativo de la variabilidad natural del régimen de caudales del río y habrá de contemplar el correcto funcionamiento de los diversos componentes asociados al ecosistema fluvial, entre los que cabe destacar la flora y fauna propias del mismo, la calidad físico-química de las aguas superficiales y subterráneas, el dinámico equilibrio geomorfológico del sistema o el conjunto de valores sociales, económicos, culturales y paisajísticos del río (Magdaleno-Mas, 2004).

La determinación de un caudal ambiental o ecológico requiere la adopción de diferentes objetivos y escenarios que ayuden a los gestores a decidir sobre el umbral mínimo requerido para el correcto funcionamiento del sistema (Dyson *et al.*, 2003).

De acuerdo con Tharme (2003), se han desarrollado alrededor de 207 distintas metodologías enfocadas al cálculo del caudal ambiental, aplicadas en 44 países. Estas van desde el uso simple de

registros hidrológicos que establecen el mínimo de caudal constante, como propuesta de requerimiento de caudal ambiental, o desde cálculos simples de especificaciones de cierta profundidad que permita un cierto perímetro húmedo en el flujo con la finalidad de asegurar la permanencia de alguna especie de interés económico, hasta las complejas y sofisticadas que relacionan los cambios en las descargas con respuestas en la morfología y ecología del cauce, a partir del análisis de un sistema completamente modificado de su estado natural, y que busca dar opciones para mantener un sistema fluvial completo y sus sistemas de humedales asociados. Toda esta gama de metodologías puede agruparse, de manera general, en seis categorías: hidrológicas, hidráulicas, de simulación de hábitat, holísticas, de técnicas multivariadas y aquellas que, debido a su disparidad en formas de cálculo, son clasificadas como “otras”.

Las evaluaciones de caudal ambiental pueden ser de dos clases (Brown y King, 2003):

- a) Prescriptivas: usualmente dirigidas a objetivos específicos que resultan en recomendaciones de valores de flujo o régimen de caudales para componentes particulares del ecosistema. No consideran la negociación porque el cálculo está orientado a justificar un valor simple y, por otra parte, no cuentan con información suficiente sobre las implicaciones de los resultados, por no considerar otras visiones.
- b) Interactivas: se enfocan en las relaciones entre los cambios provocados en el caudal del río, considerando más de un aspecto de éste. Una vez que dichas relaciones se establecen, la recomendación no se restringe entonces a un simple valor, sino que establece diversos valores y se contemplan sus posibles escenarios, por lo que son susceptibles de establecer negociaciones.

Métodos hidrológicos

Referidos también como metodologías de porcentaje fijo (Cavendish y Duncan, 1986; Milhous *et al.*, 1989). En estos métodos, el caudal ambiental se deduce a partir de datos hidrológicos tratados mediante diversos mecanismos (caudales clasificados, porcentajes del caudal medio, análisis de series temporales, etc.). Pueden incorporar diversas fórmulas e índices hidrológicos, variables propias de la cuenca o consideraciones hidráulicas, biológicas y/o geomorfológicas (Magdaleno, 2004). El más conocido es el método de Tennant o método de Montana, desarrollado por Tennant (1976) y por la US Fish and Wildlife Service (USFWS) (Orth y Maughan, 1981).

Métodos hidráulicos

A partir de las metodologías básicas hidrológicas posteriormente se desarrollaron metodologías que emplean relaciones cuantificables entre cantidad y calidad del recurso, tales como el hábitat y la descarga para el cálculo de los requerimientos del caudal ambiental. Loar *et al.*, (1986) son los primeros en utilizar el término “metodologías de estimación hidráulica” para establecer la relación entre ciertas variables hidráulicas, como perímetro húmedo o profundidad máxima (método de perímetro húmedo). De acuerdo con Tharme (1996) y Dunbar *et al.*, (1998), estas metodologías son las precursoras de las llamadas “metodologías de simulación de hábitat”.

Métodos de simulación de hábitat

También conocidas como “metodologías de modelación de hábitat”. La más común es la llamada “*Instream Flow Incremental Methodology*” (IFIM), basando gran parte de sus resultados en un modelo de simulación de hábitat llamado “*Physical Habitat Simulation System*” (PHABSIM), el cual realiza un análisis detallado de la cantidad y disponibilidad de hábitats físicos dentro del río para especies objetivo, o bien, comunidades de especies bajo escenarios de diferentes descargas, con base en respuestas establecidas en variables hidrológicas, hidráulicas y biológicas. Los cambios observados con relación a la variación de caudal-hábitats físicos son modelados usando datos de profundidad, velocidad, composición del sustrato y temperatura colectados en varias secciones transversales del río en estudio. Las condiciones así simuladas se relacionan con las preferencias o requerimientos de hábitats calculados a partir de curva de preferencias de hábitat (basadas en respuestas de ausencia-presencia o abundancia) y, con ello se obtiene una serie de flujos óptimos como requerimientos de flujo ambiental. Esta metodología ha sido ampliamente utilizada en Estados Unidos de América ya que de manera rutinaria la utiliza la US FISH and Wildlife Service (Armour y Taylor, 1991), reportándose una gran cantidad de casos de aplicación (Stalnaker, 1998).

Métodos holísticos

En 1996 Tharme introduce el término “métodos holísticos” el cual cuenta con apenas 16 metodologías aplicadas hasta ahora en Sudáfrica, Australia, Reino Unido y, recientemente en Costa Rica (Rodríguez, 2007). Estas metodologías surgen basadas en el estudio y comprensión de la complejidad ecológica de los sistemas acuáticos epicontinentales (Ward y Stanford, 1987; Petts, 1989; Hill *et al.*, 1991; Proff *et al.*, 1997). A diferencia de las anteriores, consideran como principio la

observación del sistema fluvial completo, tomando gran auge en Sudáfrica y Australia en donde, a diferencia de Estados Unidos de América, se le da poca importancia a la actividad pesquera en cuerpos de agua dulce, por lo que se pone énfasis en la protección del sistema fluvial completo mediante el reconocimiento de eventos hidrológicos importantes o críticos del patrón de flujo que definen la variabilidad natural y que dan dirección a los principales atributos del ecosistema acuático. La metodología llamada “Building Block Methodology” (BBM) es la más conocida de este grupo y la aplicada con más frecuencia (King et al., 2000).

2.4 La metodología IFIM

La metodología incremental (*Instream Flow Incremental Methodology*: IFIM) se basa en una variedad de aproximaciones que han sido desarrolladas para la evaluación de los efectos que origina la variación de caudales en los cauces (Bovee, 1982). La metodología ha tenido un periodo de expansión, un refinamiento y una evolución. El resultado es una herramienta para la evaluación del hábitat fluvial con un amplio intervalo de aplicaciones.

El método IFIM es una técnica diseñada para evaluar e integrar la naturaleza dinámica del hábitat fluvial, con las prácticas habituales de gestión y manejo del agua (Armour *et al*, 1984). IFIM simula las condiciones hidráulicas del microhábitat, para poder evaluar los efectos que los cambios artificiales del caudal producen en el hábitat de los peces o de los invertebrados. Las variables del hábitat consideradas son la velocidad, la profundidad, el sustrato y la temperatura (Stalnaker, 1980). La velocidad y la profundidad dependen directamente del caudal, mientras que el sustrato y la temperatura son variables de importancia biológica.

Hay que resaltar que IFIM debe considerarse como una herramienta para la gestión del agua, no pretendiendo en ningún momento ser un modelo ecológico. La variable de decisión que proporciona IFIM es el área total de hábitat fluvial utilizable, incluyendo su variación con el caudal y las series temporales de hábitat para cada uno de los estadios vitales de la especie considerada. El método no entrega una solución única, permitiendo evaluar el impacto bajo diversos supuestos. Los pasos básicos para la aplicación de IFIM son los siguientes:

- a) Determinar el alcance del estudio o definir el problema.
- b) Delimitar la zona de estudio y elegir los puntos de muestreo.

- c) Toma de datos morfométricos del cauce.
- d) Simulación.
- e) Interpretación de los resultados.
- f) Determinación del régimen de caudales.

2.5 El modelo PHABSIM

El modelo PHABSIM (*Physical Habitat Simulation*), desarrollado por el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EUA (Bovee y Milhous, 1978) es una colección de métodos implementados en programas de ordenador, que se utilizan para determinar las variaciones que experimenta la disponibilidad de hábitat con el caudal y en función de la morfología del cauce. Los principios en los que se basa PHABSIM son (Bovee, 1982):

- 1) Cada especie tiene un rango de preferencias de las condiciones del hábitat o, de otra forma, tiene unas determinadas tolerancias ante ciertos parámetros del hábitat.
- 2) Los límites de estas preferencias pueden ser determinados para cada una de las especies.
- 3) El área del cauce que posee esas características puede ser cuantificada en función del caudal y de la estructura del cauce.

PHABSIM consta de dos componentes principales: el modelo hidráulico y el modelo del hábitat:

- a) El primero predice la profundidad y velocidad de agua en una sección transversal del cauce a partir de datos reales tomados en el cauce para un determinado caudal circulante. El ajuste del modelo permite predecir el comportamiento del cauce con otros caudales sin necesidad de esperar a que se produzcan realmente. En primer lugar, se calculan los niveles de la superficie del agua y en segundo lugar se realiza una simulación de las velocidades (Figura 3). Esto se hace por aplicación de fórmulas empíricas o por técnicas de regresión, según los casos.

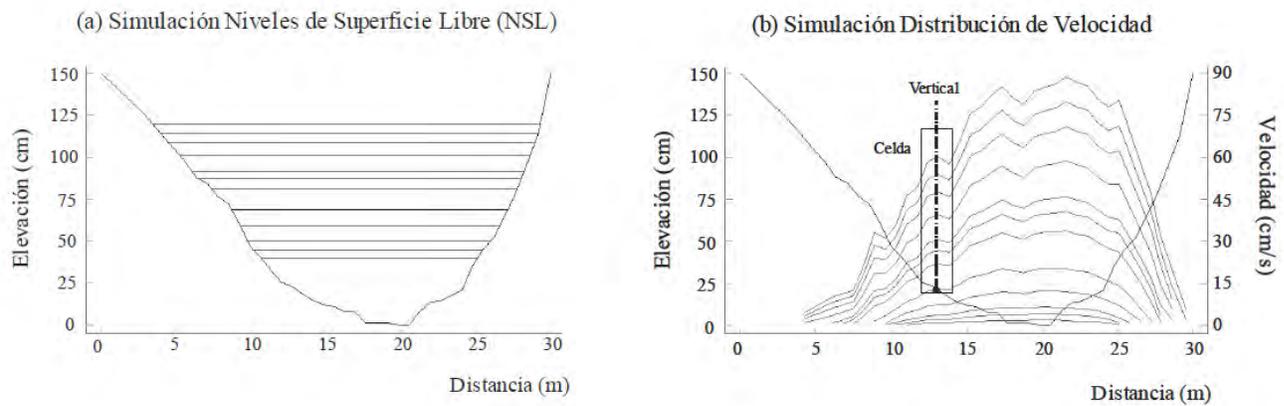


Figura 3. Simulación hidráulica de varios caudales en una sección transversal representativa, dirigida a la evaluación ecohidráulica 1D. a) Niveles de Superficie Libre, que determinan las profundidades de las celdas. b) Distribuciones horizontales de velocidad media en las celdas centradas en las verticales hidrotopográficas (Tomado de Diez-Hernández *et al.*, 2008).

- b) El modelo del hábitat pondera cada celda en que es dividida la sección transversal, utilizando índices que asignan un valor comprendido entre 0 y 1 para cada uno de los parámetros de hábitat considerados (profundidad, velocidad, sustrato y temperatura), indicando cuán adecuados son para la especie considerada. El modelo de hábitat calcula estos valores para diferentes niveles de caudal, obteniendo un índice del área utilizable denominado área ponderada útil (WUA, *Weighted Usable Area*) (Mayo-Rustarazo, 2000).

2.6 Curvas de Preferencia de Hábitat para peces

Una parte vital de un estudio PHABSIM es el conocimiento de lo que proporciona un hábitat favorable para la especie objetivo que se considera. El microhábitat en PHABSIM se define por aquellos parámetros directamente ligados a las condiciones hidráulicas: profundidad, velocidad, sustrato y temperatura. Esta información se grafica en formato univariado dando lugar a las llamadas curvas de idoneidad del hábitat o HSC (*Habitat Suitability Curves*) y se presentan en forma de curvas de probabilidad de uso, cuyo pico representa la condición óptima o máxima idoneidad para un determinado parámetro. Estas funciones se basan en la suposición de que los individuos de una especie tienden a seleccionar áreas dentro del cauce en las que se producen las combinaciones hidráulicas más favorables. No obstante, también utilizan zonas con condiciones menos favorables, pero en estos casos, la probabilidad de uso u ocupación disminuye. También se considera que los

individuos migrarán de las zonas en las que las condiciones sean absolutamente desfavorables (Bovee y Cochnauer, 1977; Fragnoud, 1987; Heggenes, 1990).

De acuerdo con el tipo de información y al tratamiento de los datos usados para generar los criterios, Bovee (1986) sugiere la siguiente clasificación:

Categoría I: Incluye las curvas más generales, en las que se han reagrupado todos los datos disponibles obtenidos en el campo, procedentes de diversas fuentes bibliográficas e incorporando los juicios de profesionales. Las preferencias de hábitat de la especie considerada son aplicables a la totalidad de su distribución geográfica y para todo el ciclo anual. El principal inconveniente de los criterios de esta categoría es que se basan en opiniones en lugar de datos.

Categoría II: Las curvas usan datos recolectados específicamente para estudios PHABSIM. Los criterios se basan en la distribución de frecuencia de los atributos del microhábitat medidos en los lugares utilizados por las especies objetivo. Estas también se llaman curvas de utilización o funciones de uso del hábitat porque representan las condiciones que estaban siendo ocupadas por la especie objetivo cuando se realizaron las observaciones. La ubicación de las especies objetivo puede ser mediante varios métodos: observación directa (desde el banco, buceo de superficie o buceo), video, telemetría, captura física, electropesca o explosivos. Estas curvas sólo son aplicables en el lugar en que se han obtenido los datos.

Categoría III: En la construcción de este tipo de curvas, se tiene en cuenta el hábitat disponible en la zona en que se han obtenido los datos de utilización del hábitat por la especie considerada. Es decir, además de estudiar las preferencias de la especie, se mide la disponibilidad de cada uno de los parámetros considerados en el lugar que ocupan. Eliminando el efecto debido a la disponibilidad (preferencia/disponibilidad), se obtienen unas curvas utilizables en cualquier lugar.

2.7 Interacción río-acuífero

Tradicionalmente los sistemas de aguas superficiales y subterráneos han sido tratados en forma independiente en la mayoría de las investigaciones ecológicas. Por ejemplo, en los estudios de crecidas se considera que la infiltración es una pérdida de agua y en modelos de escurrimiento superficial que los sistemas de agua subterráneas son embalses lineales (Singh, 1995). Mientras que, desde el punto de vista de las aguas subterráneas, la recarga se consideraba como una constante

que debía ser calibrada para cumplir con el balance hídrico (Cirimo y McDonnel, 1997; Delleur, 1999; Peckenpaugh y Dugan, 1983).

A partir de la segunda mitad de la década de los noventa surgió con fuerza el concepto de que los sistemas de agua superficial y subterráneo están interconectados, y que el manejo que se haga sobre uno de ellos afecta al otro (Winter *et al.*, 1998; Woessner, 2000; Sophocleous, 2002; Fernald, 2002; Bencala, 2011).

La interacción entre aguas subterráneas y superficiales en condiciones naturales son complejas; los procesos hidrológicos asociados con los propios cuerpos de agua superficial, como los niveles superficiales máximos estacionales y la evapotranspiración de agua subterránea en los perímetros de cuerpos superficiales son una de las principales causas de la complejidad y de las variaciones dinámicas de las interacciones entre aguas subterráneas y superficiales. Para entenderlas en relación con factores climáticos, de relieve del terreno, geológicos y bióticos, se necesita un marco hidrogeológico robusto y la comprensión de que los cuerpos de aguas superficiales son partes integrales de los sistemas de flujo subterráneo; el agua subterránea interactúa con la superficial en prácticamente todo tipo de paisajes, desde pequeños torrentes, lagos y humedales, hasta grandes valles fluviales y costas.

Las interacciones de las corrientes, lagos y humedales con las aguas subterráneas se ven afectadas por las posiciones de los cuerpos de agua con respecto a los sistemas de flujo de aguas subterráneas, las características geológicas de sus capas y sus entornos climáticos. Por lo tanto, para comprender a fondo la hidrología de estos cuerpos de agua superficial, se deben tener en cuenta el efecto del marco fisiográfico regional (geología y topografía), la configuración del nivel freático local y las características geológicas de los lechos de los cuerpos de agua superficial, tales como la distribución de los tipos de sedimentos con diferentes conductividades hidráulicas y la orientación de las partículas de sedimentos, así como también el efecto del clima en la distribución de la filtración en los lechos de los cuerpos de agua superficial. Estos factores determinarán el tipo de interacción, que puede tener lugar de tres formas básicas: los arroyos obtienen agua de la afluencia de agua subterránea a través del lecho del cauce (corriente receptora, Figura 4A), pierden agua por el flujo de salida hacia los cuerpos de agua subterránea a través del lecho del cauce (corriente aportadora, Figura 5A) o lo hacen de ambas formas, ganando en algunos tramos del río y perdiendo en otros.

Para que las aguas subterráneas se descarguen en una corriente superficial la altitud del nivel freático alrededor de la corriente debe ser mayor que la altitud de la superficie de la corriente de

agua. Por el contrario, para que las aguas superficiales se filtren a las aguas subterráneas, la altitud del nivel freático en las proximidades de la corriente debe ser menor que la altitud de la superficie de la corriente de agua. Las líneas de elevación del nivel freático indican corrientes receptoras cuando apuntan en dirección corriente arriba o ascendente (Figura 4B), e indican corrientes aportadoras cuando apuntan en sentido corriente abajo o descendente (5B) en las proximidades de la corriente.

Las corrientes aportadoras se pueden conectar al sistema de agua subterránea mediante una zona saturada continua (Figura 5A) o se pueden desconectar del sistema de agua subterránea mediante una zona no saturada. Donde la corriente está desconectada del sistema de agua subterránea por una zona no saturada, la capa freática puede tener un montículo discernible debajo de la corriente (Figura 6) si la tasa de recarga a través de la zona no saturada y del lecho es mayor que la tasa de recarga lateral, el agua fluirá lejos del nivel del agua en el montículo. Una característica importante de las corrientes que están desconectadas de las aguas subterráneas es que el bombeo de aguas subterráneas poco profundas cerca de la corriente no afecta el flujo de la corriente cerca de los pozos bombeados.

Por otra parte, en áreas donde se observa la presencia de actividades humanas, las corrientes pequeñas son propensas a canalizar los cauces (es decir, las corrientes se convierten por completo en tuberías, alcantarillas o zanjas de drenaje), lo que provoca la destrucción natural de las corrientes y la fragmentación del hábitat en el sistema acuático (Elmore y Kaushal, 2008). Además, la extracción continua de agua subterránea o el aumento de superficies impermeables dentro de las áreas urbanas disminuyen el flujo de las corrientes y, en algunas regiones, provocan el cese de los flujos, lo que es importante ya que las corrientes con frecuencia se originan como descargas de aguas subterráneas (Winter, 2007; Sharp, 2010). La combinación de estos cambios abióticos generalmente resulta en una comunidad acuática alterada con una riqueza biótica reducida y una mayor abundancia de taxones tolerantes (Morgan y Cushman, 2005)

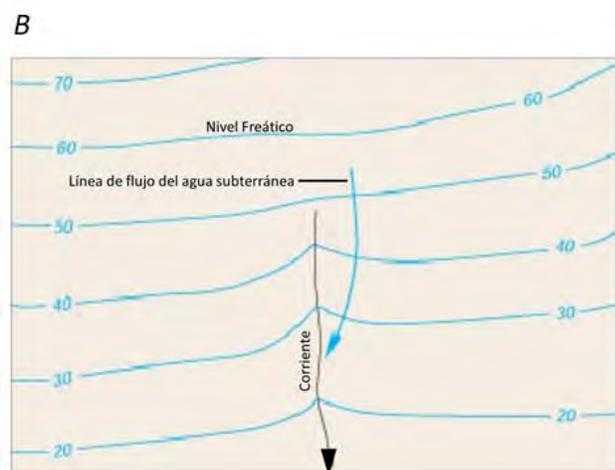
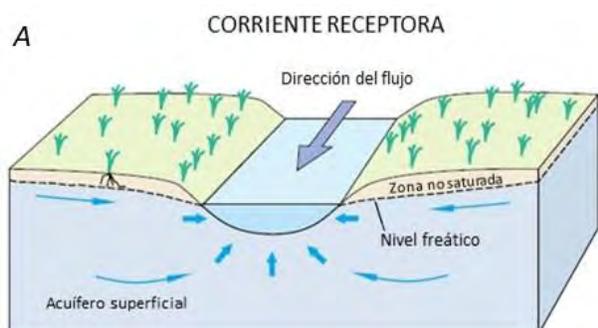


Figura 4. Corriente receptora recibe agua del sistema de agua subterránea (A). Esto se puede determinar a partir de los mapas de líneas de niveles freáticos porque las líneas apuntan en dirección aguas arriba donde cruzan la corriente (B) (Modificado de Winter *et al.*, 1998).

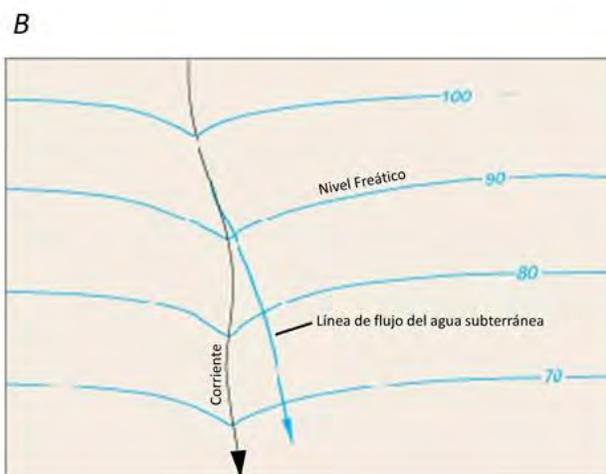
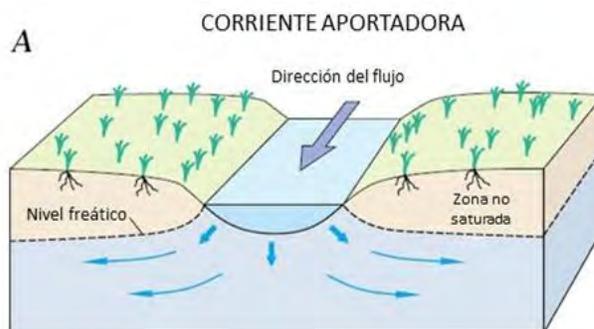


Figura 5. Corriente aportadora aporta agua al sistema de agua subterránea (A). Esto se puede determinar a partir de los mapas de líneas de niveles freáticos porque las líneas apuntan en dirección aguas abajo donde cruzan la corriente (B) (Modificado de Winter *et al.*, 1998).

En algunos entornos, la ganancia o pérdida del flujo puede persistir; es decir, una corriente siempre puede obtener agua de las aguas subterráneas, o siempre puede aportar a las aguas subterráneas. Sin embargo, en otros entornos, la dirección del flujo puede variar mucho a lo largo de una secuencia; algunos tramos reciben agua subterránea y otros pierden agua en el agua subterránea. Además, la dirección del flujo puede cambiar en periodos de tiempo muy cortos como resultado de tormentas individuales que causan una recarga enfocada cerca de los flancos del cauce, picos temporales de inundación que se mueven por el canal o transpiración de agua subterránea por la vegetación corriente abajo cuyas raíces alcanzan el nivel freático.

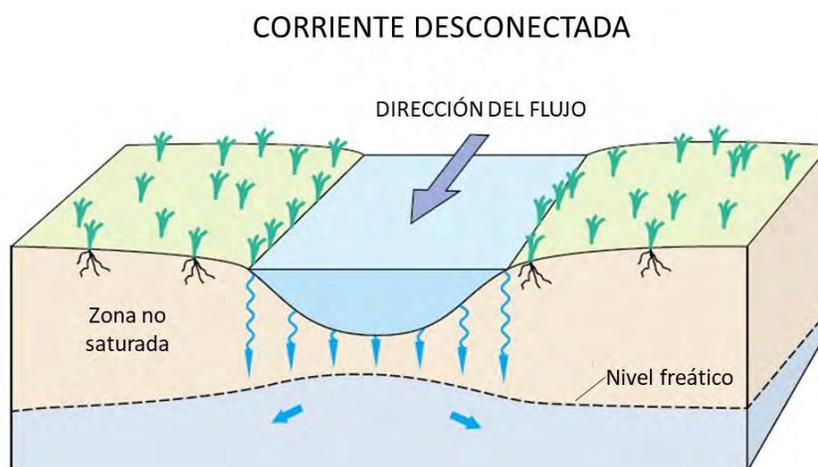


Figura 6. Corrientes desconectadas están separadas del sistema de agua subterránea a través de una zona no saturada (Modificado de Winter *et al.*, 1998).

Incluso en entornos donde las corrientes están aportando principalmente agua hacia el agua subterránea, ciertos tramos pueden recibir entrada de agua subterránea durante algunas temporadas. La proporción de agua de la corriente que se deriva del flujo de entrada del agua subterránea varía a través de las configuraciones fisiográficas y climáticas (Winter *et al.*, 1998).

La relación río-acuífero no sólo es variable a lo largo del curso del río, sino que también en muchos casos, puede presentar variaciones a lo largo del año. En este caso, en los periodos húmedos y épocas de crecida del río, el curso de agua superficial probablemente presente un nivel de lámina de agua superior al del acuífero y proceda a la recarga del mismo, mientras que en los periodos más secos en los que el río fluye con poco caudal, probablemente la mayor parte de éste sea aportado desde el acuífero. Estas variaciones anuales en el comportamiento del río se atribuyen a causas naturales pero la influencia antrópica también puede forzar que se pase de una situación a otra (Vilanova y Jordana, 2008).

Movimiento del agua subterránea y superficial

Suponiendo un sistema en el que el agua subterránea descarga a los ríos. En este sistema se pueden producir flujos subterráneos a diferente profundidad, así como de diferente tamaño y alcance, los cuales se relacionan con diferentes áreas de recarga (Figura 7). Este sistema normalmente es el más dinámico y es el que se manifiesta principalmente en los ríos. También se puede producir un sistema de flujo de alcance regional el cual normalmente cuenta con tiempos de

tránsito mayores, se relaciona con áreas de recarga distantes al punto donde descarga y presentan una inercia más lenta y más constante (Tóth, 1963).

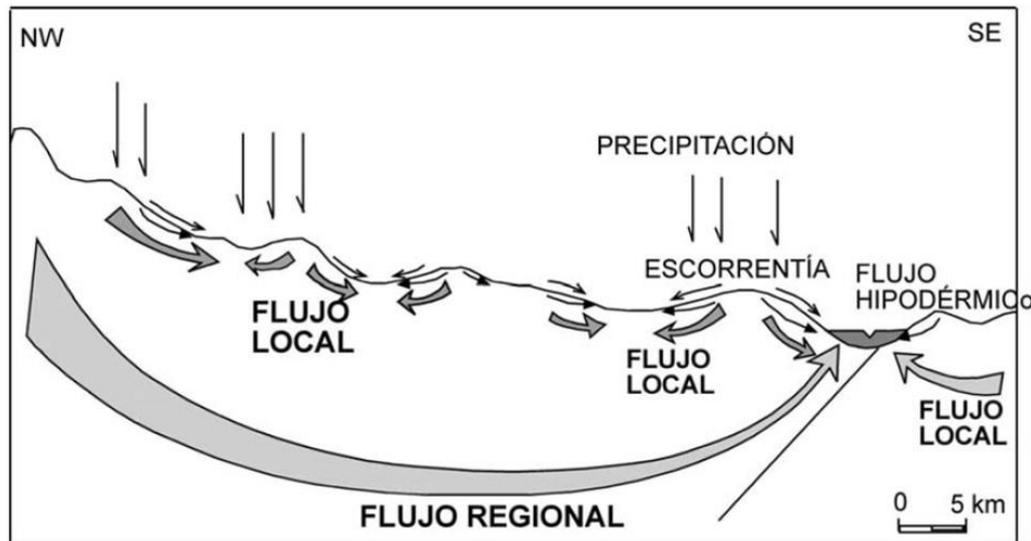


Figura 7. Diferentes sistemas de flujo subterráneo (Modificado de Tóth, 1963).

La gestión del agua del río debe tener en cuenta ambos tipos de sistemas de flujo puesto que el caudal del río principal se verá afectado tanto por acciones que incidan o repercutan sobre el flujo de agua local como sobre el flujo de alcance regional. La cantidad de flujo subterráneo que descarga en un río se puede calcular, para una determinada sección del acuífero, multiplicando el gradiente hidráulico (que se determina a partir de los datos de nivel piezométrico) y de la permeabilidad del acuífero. De esta manera en algunas zonas particulares si el flujo subterráneo regional presenta, por ejemplo, gradientes hidráulicos elevados, éste puede ser cuantitativamente más importante que el flujo local (Vilanova y Jordana, 2008).

Capítulo 3. Área de estudio

3.1 Localización

Este trabajo se llevó a cabo dentro del límite de la cuenca Río Grande de Comitán (RGC), localizada en la porción sureste del estado de Chiapas. El Río Grande de Comitán es el principal afluente de la cuenca, localizada a $90^{\circ} 10' 7.6''$ y $91^{\circ} 39' 41.2''$ de longitud oeste y $16^{\circ} 04' 17.1''$ y $16^{\circ} 25' 30.8''$ de latitud norte, abarcando los municipios de Comitán, La Trinitaria, La Independencia y una pequeña porción de Las Margaritas. La mayor referencia es la ciudad de Comitán de Domínguez localizada a 163 km de Tuxtla Gutiérrez y a 90 km de la frontera con Guatemala, en las coordenadas $16^{\circ} 15' 0''$ norte y $92^{\circ} 07' 57''$ oeste, a una altitud de 1,660 msnm (Figura 8).



Figura 8. Localización del área de estudio. Elaboración propia con datos de INEGI (2007).

3.2 Vías de acceso

Las principales carreteras que conectan con la zona de estudio son: la autopista de cuota 150 México-Veracruz; Carretera Federal 145 D, Córdoba-Minatitlán; Carretera Federal 180 D, Coatzacoalcos-Cárdenas; Carretera Federal 187; Carretera Federal 190, Tonalá-Comitán de Domínguez; Carretera Federal 307, La Trinitaria-Chetumal (Figura 9).

La comunicación por vía aérea se realiza a través de los aeropuertos de Llano San Juan en Ocozocoztla, Francisco Sarabia en Tuxtla Gutiérrez y Corazón de María en San Cristóbal de las Casas, utilizados para destinos nacionales y por medio de los aeropuertos de Palenque y Tapachula para destinos internacionales (SCT, 2000).

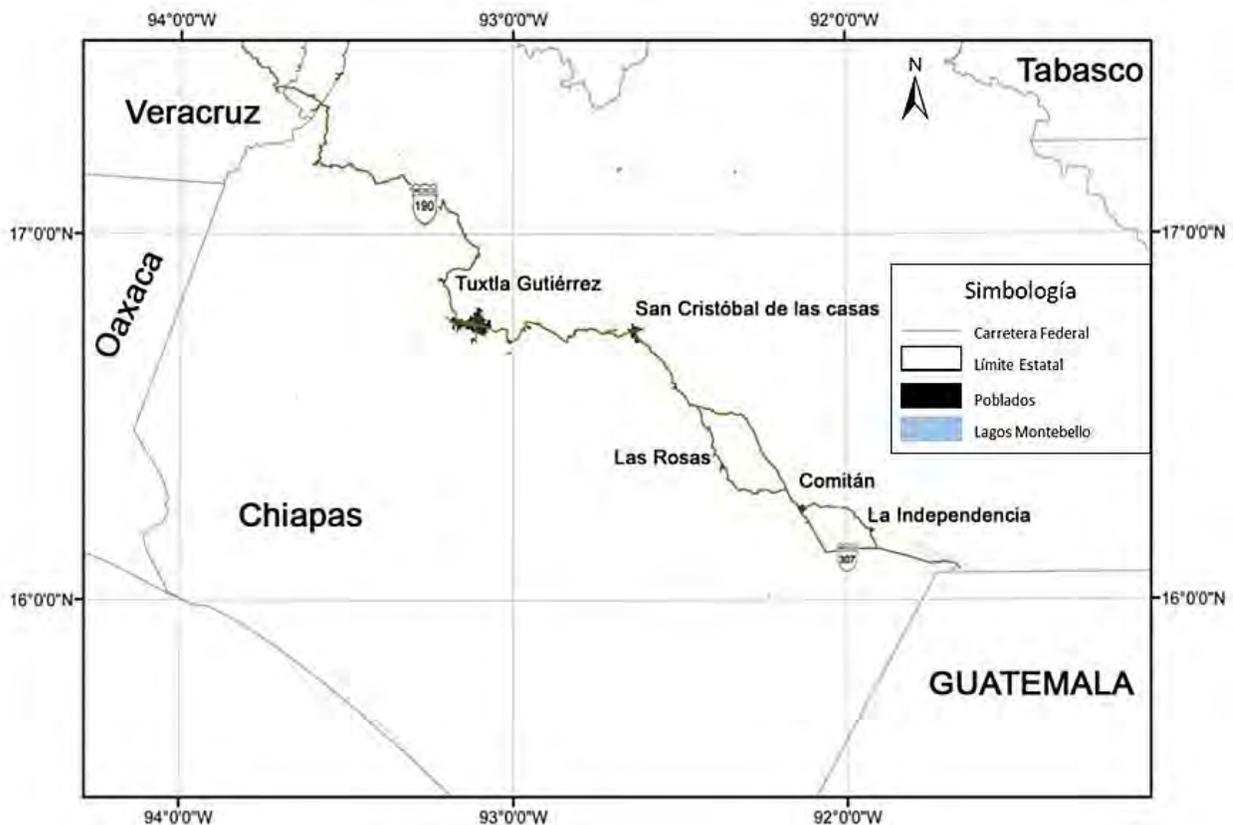


Figura 9. Principales vías de acceso al área de estudio (Modificado de Durán-Calderón 2013).

3.3 Actividades económicas

De acuerdo con INEGI (2010) en la región existe un alto porcentaje de Población Económicamente Activa (PEA). Su fuente de ingresos se debe principalmente a la actividad agrícola, ganadera y pesquera; dentro de la actividad agrícola sus principales productos son maíz, frijol,

tomate rojo (jitomate), chile verde, calabaza, entre otros. Actualmente los municipios de La Trinitaria y La Independencia son líderes en la producción de jitomate a nivel estatal (SAGARPA, 2011). Además de estas actividades también se encuentra el turismo, el cual juega un papel muy importante en el área económica debido a las zonas arqueológicas que se encuentran la región. El 9 de octubre del año 2012 se declaró a este lugar como Pueblo Mágico (SECTUR, 2013).

El Parque Nacional Lagunas de Montebello es una región hidrológica prioritaria con alta riqueza biológica y es reconocido como área para la conservación de las aves (AICA SE-19-Categoría G1 *Dendroica chrysoparia*) y humedal de importancia mundial reconocido como sitio RAMSAR con número 1325 en el año 2003. En él y en las comunidades aledañas habitan grupos étnicos de raíz maya (CONANP, 2007). El parque está conformado por un sistema de lagos intermontanos donde se realizan paseos en balsas, pesca de mojarra y otras actividades que atraen grupos turistas todo el año.

3.4 Geología y geomorfología

La geología que predomina en la cuenca es de origen sedimentario, está constituida principalmente por calizas cretácicas que representan el 62% del total del área, el resto está compuesto por asociaciones de limolitas y areniscas del Terciario superior al Cuaternario y aluviones del Cuaternario (Figura 10) (CONANP, 2007; SGM, 1997), alcanzando espesores máximos de 80 m cerca del Sistema Lagunar Montebello. De acuerdo con el Sistema Geológico Mexicano (SGM) también hay registros de rocas de yeso-conglomerado polimíctico y aluvión, en el límite de la cuenca cerca de la localidad El Triunfo se registra limolita-arenisca y al sureste de la cuenca muy cerca al Sistema Lagunar Montebello existe una extensión de lutita-arenisca.

Estructuralmente el área se encuentra ubicada dentro del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Cabalgaduras (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992; Durán *et al.*, 2014) cuya tectónica está estrechamente relacionada con la interacción entre las placas de Cocos, Norteamérica y Caribe (Guzmán-Speziale y Meneses-Rocha, 2000). Esta región ha estado sujeta a diversos procesos geológicos como son la sedimentación, plegamiento y fallamiento (Padilla-Sánchez, 2007; Arellano-Contreras y Jiménez-Salgado, 2011). Todos estos eventos actuaron en diferentes periodos con distintas direcciones de esfuerzos y generaron el estilo de deformación que conforma el marco tectónico-estructural actual de la región en la que se encuentra el Parque Nacional Lagunas de Montebello. Los planos axiales de

los pliegues principales tienen un rumbo NW y es coincidente con el rumbo de las principales fallas normales ubicadas en los límites norte y sur de la parte central de la cuenca, así como en la zona del nacimiento del Río Grande. Además, se observa una intensa fracturación de las calizas en la zona del Parque Nacional Lagunas de Montebello, cuya evolución geomorfológica ha llevado al desarrollo de un paisaje kárstico a través de la disolución de las rocas calizas (Pérez *et al.*, 2007).

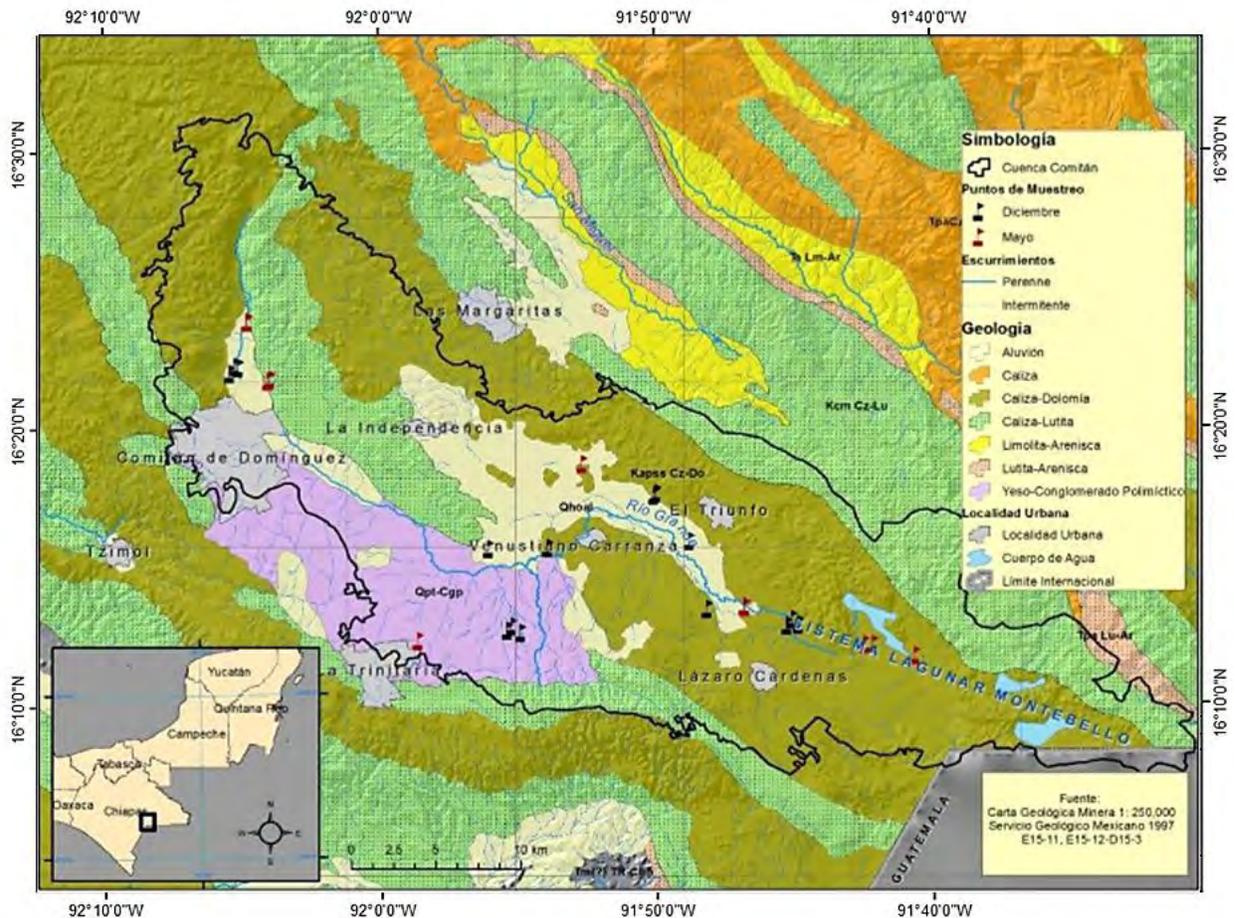


Figura 10. Geología de la cuenca Río Grande (Modificado del Servicio Geológico Mexicano, 1997).

Las principales geoformas del sitio es el sistema kárstico (Figura 11), montañas de plegamiento y planicies. No obstante, el sitio también está conformado por un sistema fluvial, un sistema de pie de monte y sierras (INEGI 2000-1:250 000; Pérez *et al.*, 2007), hacia el Sistema Lagunar Montebello se encuentran lomeríos de poca altura con laderas que tienen una inclinación muy variable (CONANP, 2007).

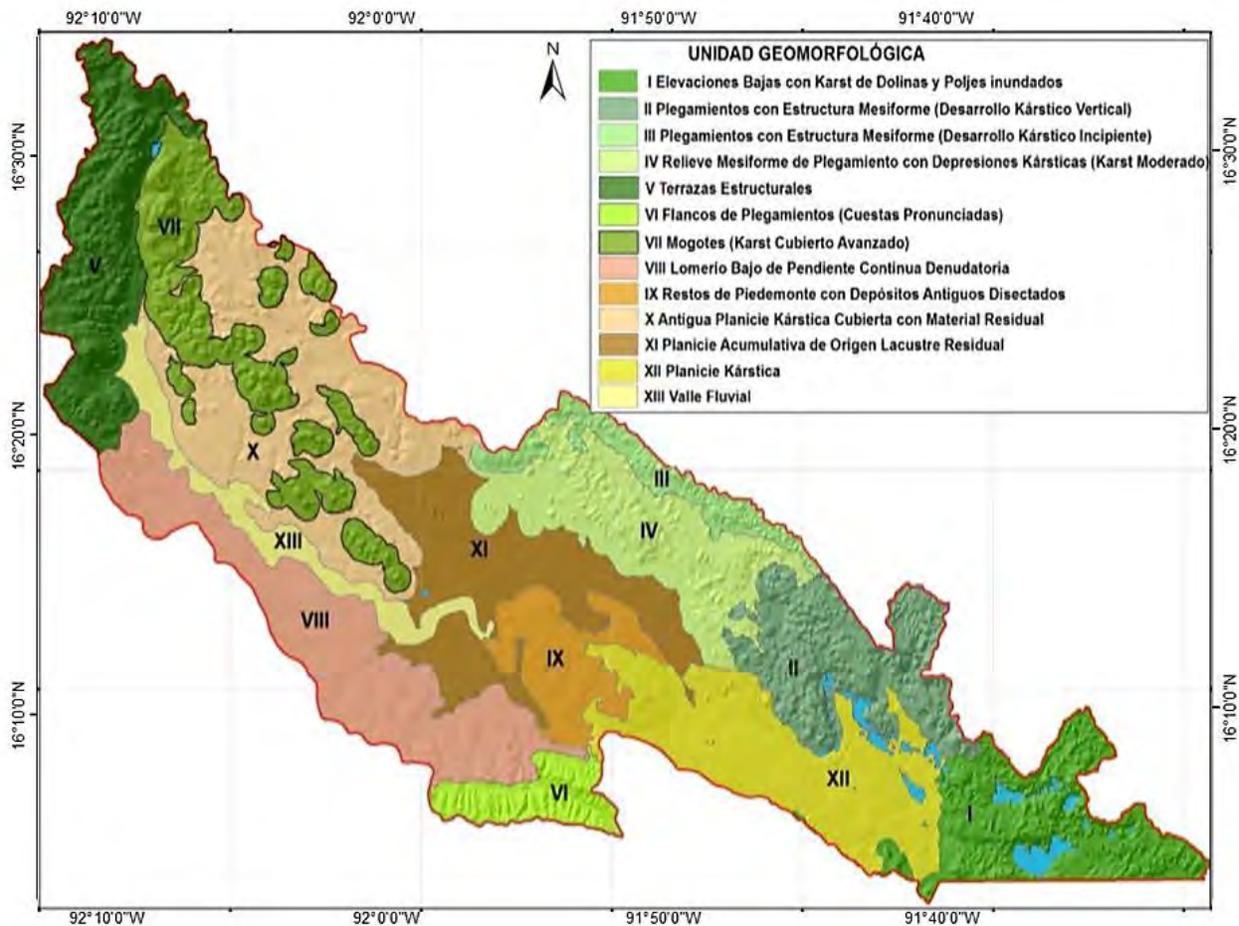


Figura 11. Unidades Geomorfológicas de la Cuenca Río Grande (Modificado de Mora *et al.*, 2016).

3.5 Estratigrafía

En el área de estudio afloran cuatro unidades litoestratigráficas fundamentales (Figura 12): *Grupo Sierra Madre*. Nuttal y Hegwein, 1929 (Salas, 1949) se refirieron a las calizas, en este lugar, como Calizas Sierra Madre. Actualmente se considera como Grupo, incluyendo a las formaciones Cantelhá, Jolpabuchil y Cintalapa (Quezada-Muñetón, 1987). En el área de estudio, el Grupo varía en edad del Aptiano al Santoniano, sin reportar diferencia entre las formaciones que lo comprenden. Está compuesto fundamentalmente por calizas, parcial o totalmente dolomitizadas, de diferentes ambientes de depósito.

Formaciones Ocozocuautila y Angostura. Según el Léxico Estratigráfico Mexicano, ambas formaciones están indiferenciadas a escala 1:250 000 y están compuestas mayormente por calizas y lutitas del Campaniano.

Depósitos Pleistocénicos. Estos depósitos no poseen una nomenclatura estratigráfica establecida. En el área están representados por depósitos tipo conglomerado polimíctico, yeso y limolita.

Aluviones del Cuaternario. Se encuentran representados por aluviones depositados en los lechos de los ríos.

Estratigrafía Regional

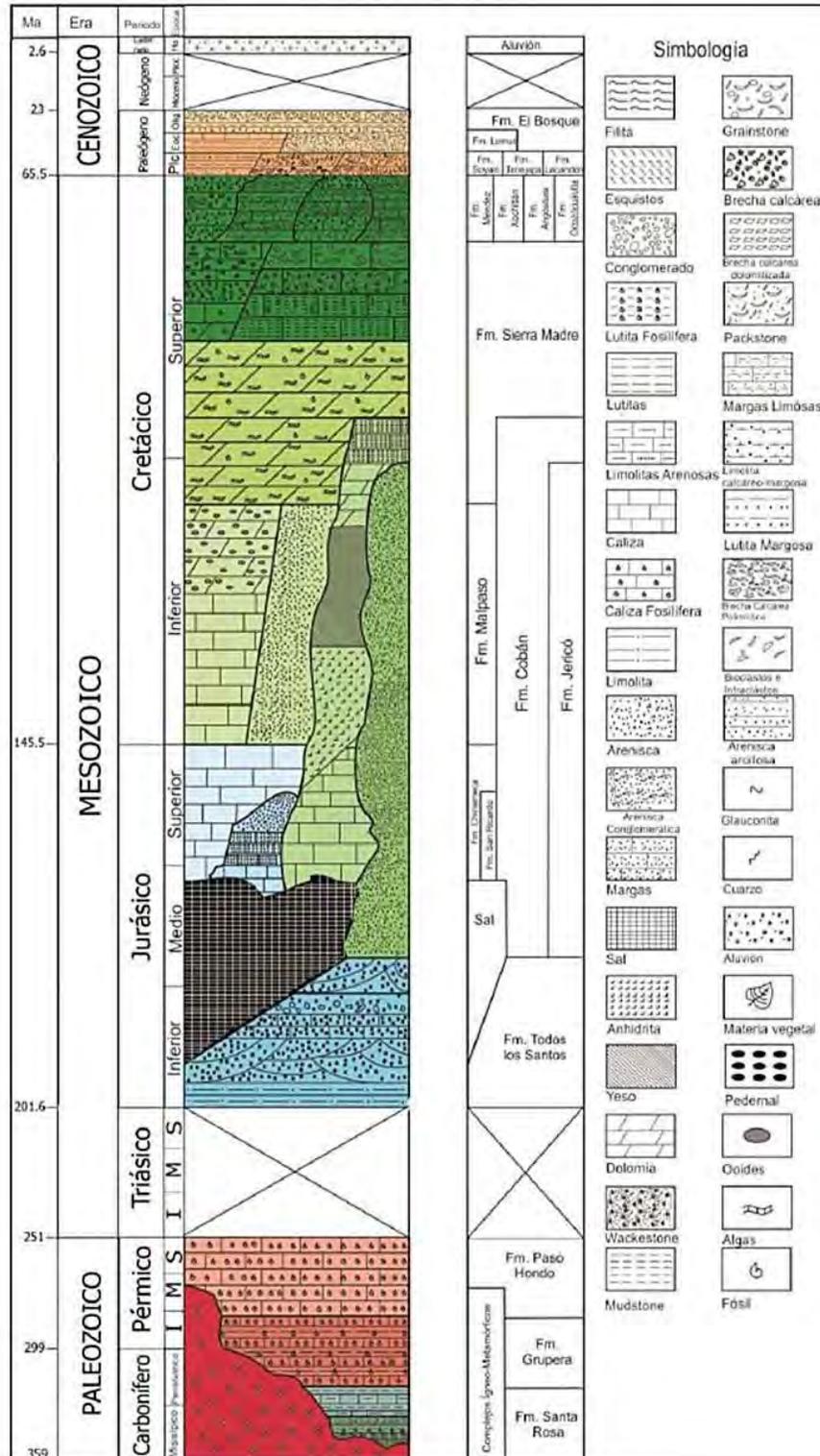


Figura 12. Columna estratigráfica regional del Cinturón Plegado de Chiapas. En el área de estudio afloran las secuencias a partir del Cretácico superior (Modificado de Ortega, 2010).

3.6 Clima

La Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2012) reporta medidas de temperatura y precipitación en un conjunto de estaciones regionales del área de Montebello, Chiapas. Se observa que las temperaturas medias no presentan cambios significativos entre sí, situándose alrededor de los 17.5 °C. En promedio la época más calurosa del año se registra entre los meses de mayo a octubre donde la temperatura varía de 24 a 27°C en la mayor parte de la cuenca y disminuye a 18°C en las zonas más altas.

La precipitación dentro del periodo mayo a octubre se presenta de 900 a 1000 mm en zonas bajas y entre 1000 y 1700 mm en zonas más altas, siendo la zona del Parque Nacional Lagunas de Montebello donde se presentan los valores máximos de precipitación (Figura 13). Los meses más lluviosos son de junio a septiembre, éste último es el mes con los máximos valores de precipitación.

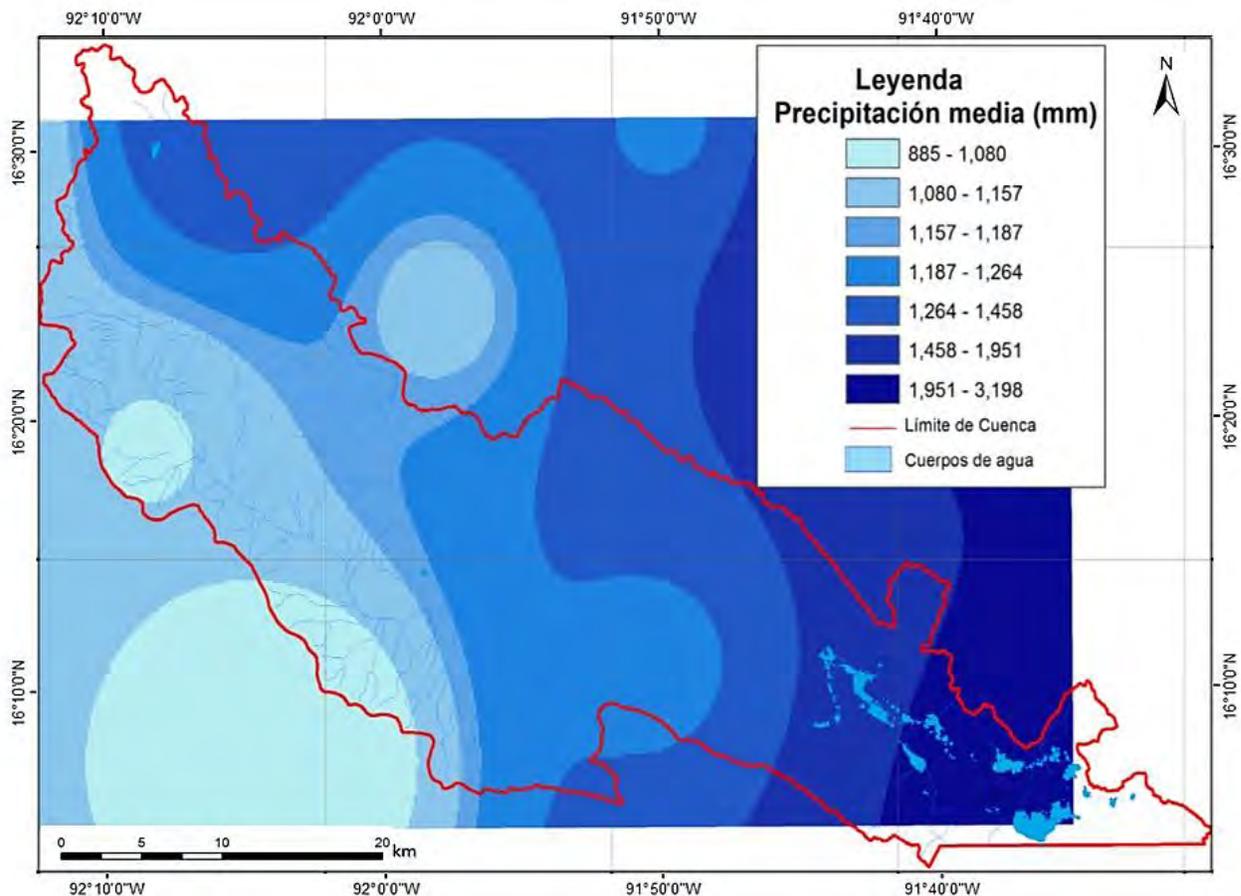


Figura 13. Distribución de la precipitación media anual (CFE, 2012).

La Comisión Nacional del Agua, en su red de estaciones climatológicas, registra una precipitación total de 1512.8 mm en la estación climatológica número 7205 ubicada en la ciudad de Comitán de Domínguez para el periodo del 22 de mayo del 2013 al 22 de mayo del 2014 (Figura 14).

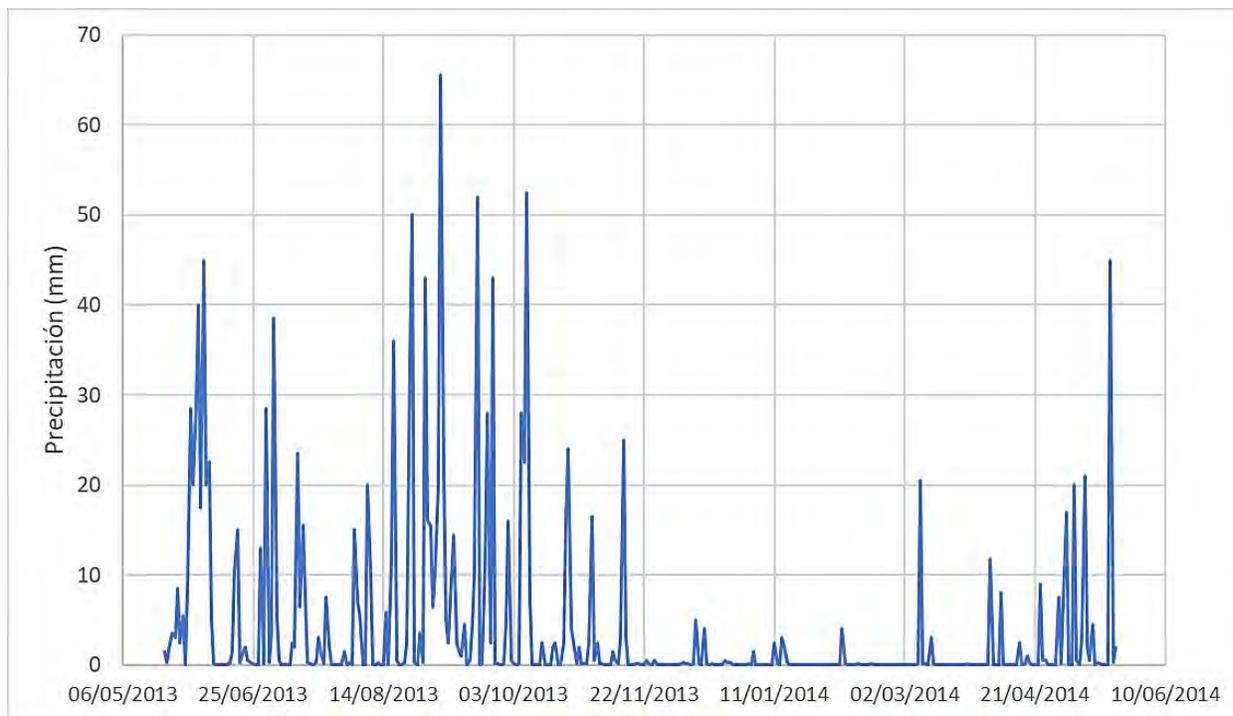


Figura 14. Precipitación registrada en la estación 7205 Comitán de Domínguez para el periodo del 22 de mayo del 2013 al 22 de mayo del 2014. Fuente: CONAGUA (disponible en <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>, accesado el 30 de enero, 2018)

3.7. Hidrología

La cuenca se encuentra dentro de la Región Hidrológica Nacional Grijalva-Usumacinta, la cual está integrada por cuatro subregiones (Alto Grijalva, Bajo Grijalva, Usumacinta, y una parte de la región de Coatzacoalcos) y seis cuencas (Grijalva - Tuxtla Gutiérrez, Grijalva - La Concordia, Grijalva - Villahermosa, Usumacinta, Río Lacantún y Chixoy). La zona de estudio se encuentra entre dos cuencas hidrológicas: la cuenca de los ríos Grijalva - La Concordia y la cuenca del río Lacantún (Figura 15).

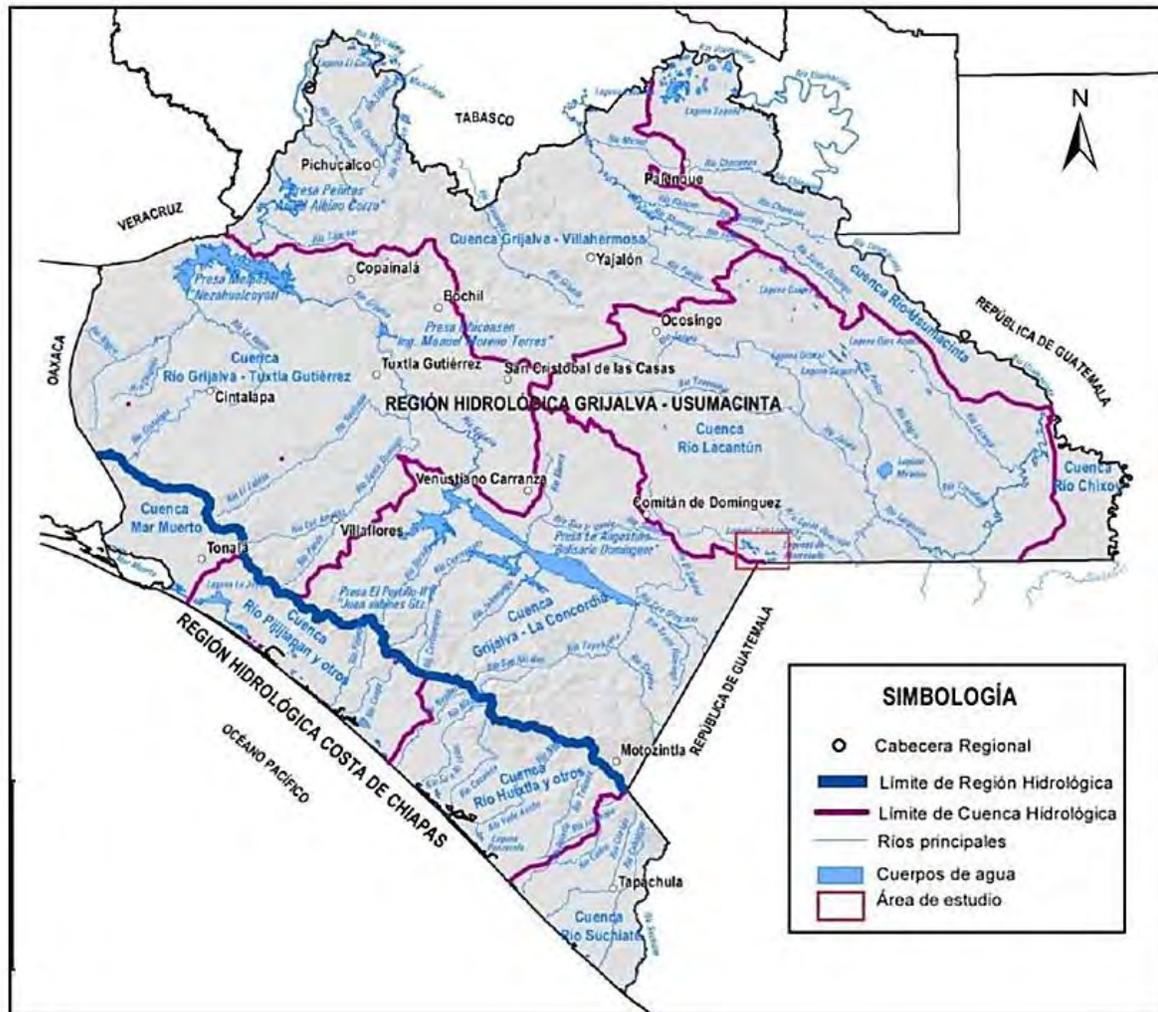


Figura 15. Cuencas hidrológicas del área de estudio (INEGI, 2011).

La cuenca del Río Grande se conforma por diversos cuerpos de agua tales como ríos perennes e intermitentes y lagos (Juárez, 2014). La cuenca tiene una extensión de 810 km² y está conformada por el afluente principal Río Grande que corre de noroeste a suroeste, el cual es alimentado por el lago Juznajab, ubicado en la parte alta de la cuenca al norte del municipio de Comitán de Domínguez (ONCA-CONAGUA, 2007), con una altitud máxima de 2450 msnm y mínima de 1300 msnm (Figura 16). El Río Grande recibe los aportes de corrientes intermitentes durante la época de lluvias y tiene una longitud aproximada de 80,555 m. En su trayecto recorre zonas agrícolas y urbanas hasta desembocar en la zona sureste en el sistema hidrológico Lagos de Montebello, donde se desarrolla un complejo lacustre con alrededor de 60 lagos que se extienden hasta Guatemala (CONANP, 2007). En esta zona de la cuenca se localiza el Área Natural Protegida con carácter de Parque Nacional “Lagunas de Montebello” decretado como tal el 16 de diciembre de 1959. Este Sistema Lagunar

constituye un complejo lacustre de origen kárstico, una parte de los lagos que conforman este sistema se comunican entre ellos a través de inundaciones de sus áreas colindantes, de conductos subterráneos y algunos canales pequeños, principalmente cuando la precipitación es alta, de tal forma que las fuentes que alimentan a los lagos son el agua proveniente de la lluvia y la subterránea (CONANP, 2007).

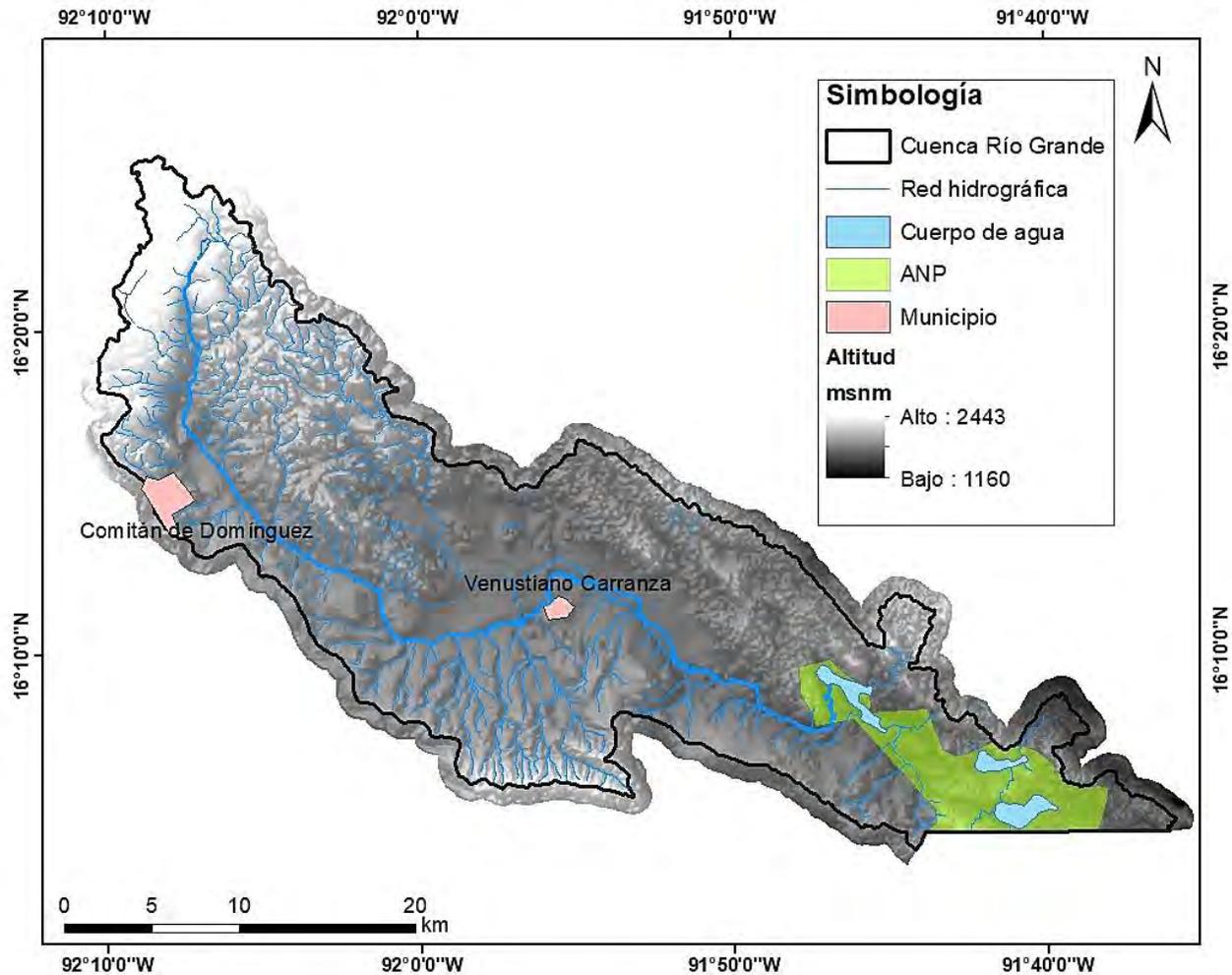


Figura 16. Características hidrológicas de la Cuenca Río Grande. Elaboración propia con datos de INEGI (2007).

3.8 Edafología y Uso de Suelo

Muchos de los suelos que se han desarrollado en la cuenca del Río Grande lo han hecho sobre material calcáreo, sedimentos fluviales y lacustres. INEGI (2004) en la carta a escala 1:250 000 (cartas E15-11, E15-12 y D15-13) se reportan siete grupos: Cambisol (0.52%), Chernozem (8.22%), Feozem (19.8%), Leptosol (24.91%), Luvisol (19%), Planosol (7.8%) y Vertisol (18.6%). El suelo urbano es tan sólo el 1.23% de todo el suelo de la cuenca. Además, Vásquez y Méndez (1994) describen cinco

grupos más, los cuales se encuentren cerca del Parque Nacional Lagunas de Montebello: Acrisoles, Fluvisoles, Gleysoles, Litosoles y Rendzinas. Los Leptosoles son los suelos con mayor extensión dentro de la cuenca ocupando 23,571 ha, mientras que los Cambisoles con 493 ha ocupan una menor superficie. Las características de estos tipos de suelo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Suelos de la cuenca Río Grande de Comitán y sus características de acuerdo con la WRB (2007).

Suelo	Descripción	Material parental	Distribución en climas	Uso y manejo de suelo
Cambisol	Horizonte superficial incipiente, ligera formación de estructura de coloración parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla y la remoción de los carbonatos.	Materiales de textura media a fina derivados de un amplio rango de rocas.	Se distribuye en un amplio rango de climas.	Son buenos suelos para la actividad agrícola
Chernozem	Suelos con una capa superficial gruesa negra rica en materia orgánica. De color oscuro.	Sedimentos eólicos (loess)	Regiones continentales con inviernos fríos y veranos calientes.	Agricultura
Feozem	Horizonte superficial oscuro, rico en humus. Presentan mayor lixiviación	Materiales no consolidados, eólicos	Cálido a fresco, regiones semi-continentales	Agricultura
Leptosol	Suelos someros sobre roca continua, extremadamente gravillosos y/o pedregosos	Varios tipos de roca continua o materiales no consolidados	Todas las zonas climáticas	Pastoreo y conservación de bosques
Luvisol	Alto contenido de arcilla en los horizontes subsuperficiales	Varios: depósitos eólicos, aluviales y coluviales	Zonas templadas hasta subtropicales y tropicales	Agricultura
Planosol	Horizonte superficial de color claro con signos de estancamiento de agua periódico	Depósitos aluviales y coluviales arcillosos	Regiones subtropicales y templadas con una alternancia de estaciones	Pastoreo extensivo
Vertisol	Suelos con alto contenido de arcilla que se mezclan constantemente con arcillas de tipo expansibles. Con formación de grietas cuando se secan	Altos contenidos de arcillas expansibles	Climas tropicales, subtropicales, semiárido a subhúmedo y húmedo, con alternancia estación seca y húmeda	Agricultura

Los principales suelos donde se desarrolla la actividad agrícola son Chernozem, Feozem, Vertisol,

Luvisol, Leptosol y Cambisol. La actividad agrícola en la región es de temporal y de riego con aproximadamente 52.7% del área total (INEGI, 2010).

Capítulo 4. Métodos

4.1 Recopilación de información

Para la realización de este trabajo se realizó una búsqueda bibliográfica, y se seleccionó y compiló información de trabajos previos realizados en el área de estudio. Estos conjuntos de datos obtenidos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Información utilizada en la elaboración de este trabajo

Material	Fuente
<i>Caudales diarios calculados con el registro obtenido de dataloggers de las estaciones de monitoreo Los Riegos, Los Desamparados y Emiliano Zapata para el periodo del 22 de mayo 2013 al 22 de mayo 2014 y El Carrizal para el periodo del 18 de octubre 2014 al 22 de mayo 2014.</i>	Proyecto CONACYT “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello” con clave 00000000167603. Responsable: Dr. Oscar A. Escolero Fuentes.
<i>Valores de Flujo base (m³/s) para el periodo del 22 de mayo del 2013 al 22 de mayo del 2014 de las estaciones de monitoreo Los Riegos, Los Desamparados y Emiliano Zapata y para el periodo del 18 de octubre 2014 al 22 de mayo 2014 en El Carrizal.</i>	Proyecto CONACYT “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello” con clave 00000000167603. Responsable: Dr. Oscar A. Escolero Fuentes.
<i>Datos de elevación de nivel estático medido en norias en las inmediaciones del Río Grande de Comitán durante el mes de noviembre del 2014.</i>	Sandra Mota Covarrubias. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. Tesis de Maestría. En proceso.
<i>Climatología diaria de las estaciones climatológicas de Yashá (7391), Comitán (7205) y Las Margaritas (7104) para el periodo del 22 de mayo del 2013 al 22 de mayo del 2014.</i>	Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 2017. Catálogo de estaciones Climatológicas.
<i>Cuencas y subcuencas</i>	Cuencas: INEGI, 2010 Subcuencas: Alvarado-Velázquez, J. 2015. Evaluación espacial de la contaminación potencial puntual y difusa en la cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 90 p.
<i>Peces representativos del río</i>	Ortiz-Haro, G. A. 2017. Cambios en la estructura de la comunidad íctica a lo largo de un gradiente de perturbación ambiental en el Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. 68 p.
<i>Secciones transversales</i>	Proporcionadas por el Proyecto CONACYT “Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello” con clave 00000000167603. Creadas con Imágenes Lidar resolución 1.5 m. Responsable: Dr. Oscar A. Escolero Fuentes.

4.2 Hidrogramas.

Caudales diarios

Se realizaron los hidrogramas correspondientes a cada una de las estaciones de monitoreo de Los Riegos, Los Desamparados, Emiliano Zapata y El Carrizal, situadas a lo largo del Río Grande de Comitán (Figura 17). Los hidrogramas fueron creados con valores de caudales promedio diarios (m^3) para el ciclo hidrológico de 22 de mayo del 2013 al 22 de mayo del 2014 para las tres primeras estaciones y del 18 de octubre del 2014 al 28 de junio del 2015 para la estación El Carrizal. Para estos mismos periodos se graficó el flujo base en cada una de las estaciones (Figura 18).

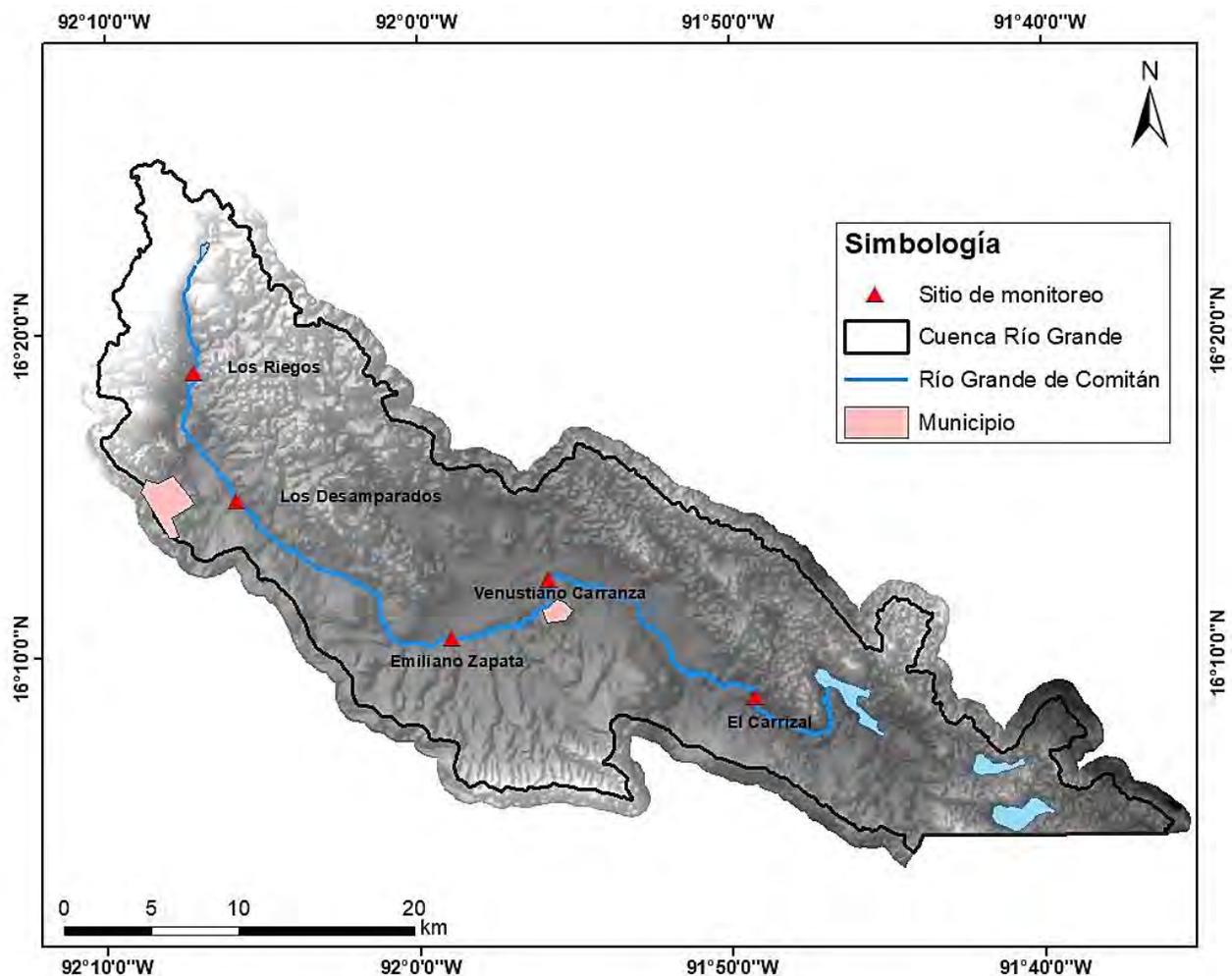


Figura 17. Ubicación de los sitios de monitoreo a lo largo del Río Grande de Comitán. Elaboración propia con datos de INEGI (2007).

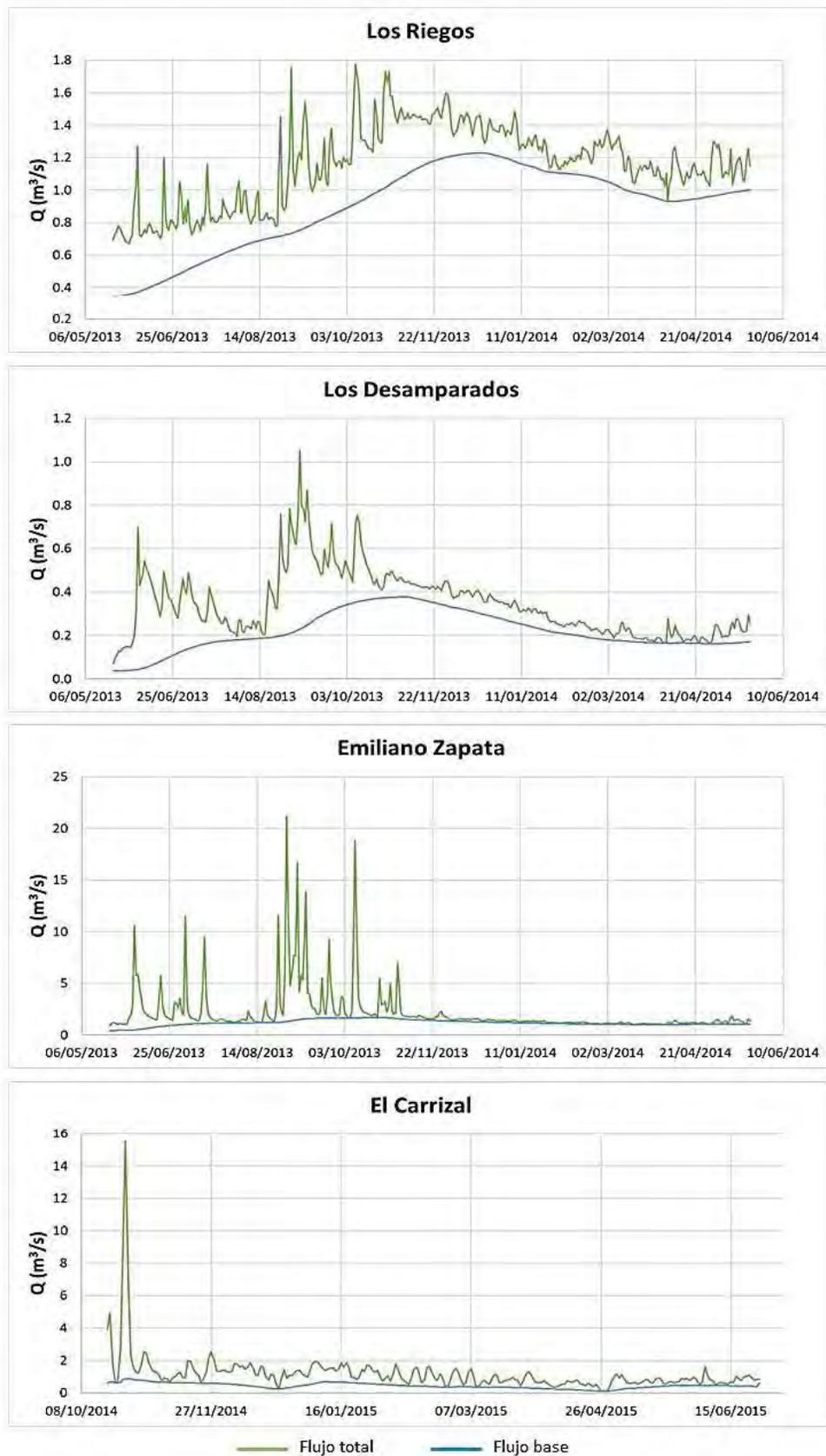


Figura 18. Hidrogramas realizados con valores de caudales promedio diarios registrados con dataloggers y el flujo base para cada uno de ellos.

Modelo HEC-HMS

Debido a la falta de información de caudales diarios en la estación Venustiano Carranza y la disparidad en las fechas del registro diario se decidió realizar una simulación lluvia-escorrentamiento para la obtención de los hidrogramas, utilizando los registros disponibles para la calibración del modelo.

El programa utilizado fue el HEC-HMS el cual está representado por una simulación lluvia-escorrentamiento, es decir, con base en las características de la cuenca y la lluvia registrada en las estaciones climatológicas, se obtiene el hidrograma a la salida de ésta.

Obtención del número de curva

Se basa en mapas de uso de suelo y edafología, que se pueden obtener como capas temáticas de INEGI o CONABIO. Para la obtención del Número de Curva (NC) de la cuenca se consideran las tablas adaptadas de la clasificación de INEGI para edafología y uso de suelo (Domínguez *et al.*, 2008), que se adaptan a cuencas nacionales. Hipotéticamente un NC igual a 1 indica que toda la lluvia se infiltra y un NC de 100 indica que todo escurre (Gaspari *et al.*, 2007).

La clasificación hidrológica de los tipos de suelo se presenta en la Tabla 3. El número de curva se presenta en la Tabla 4.

Tabla 3. Clasificación hidrológica de los tipos de suelo según su permeabilidad (Domínguez *et al.*, 2008).

Clave de clasificación FAO	Suelos	Tipo Hidrológico	Permeabilidad	Propiedades
T	Andosoles	A	Muy Alta	Arenas con poco limo y arcilla (escorrimento mínimo)
Q	Arenosoles			
J	Fluvisoles			
O	Histosoles			
U	Ranker			
X,Y	Calcisoles (antes xerosol y yermasol)	B	Buena	Arenas finas y limos
I,E	Leptosoles (antes litosoles y rendzinas)			
Z	Solonchaks			
D	Podzoles			
F	Ferralsoles			
R	Regosoles			
H	Feozems			
K	Kastanozems	C	Media	Arenas muy finas, limos y bastante arcilla
N	Nitosoles			
C	Chernozems			
-	Alisoles			
A	Acrisoles			
B	Cambisoles	D	Baja	Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escorrimento máximo)
G	Gleysoles			
L	Luvisoles			
V	Vertisoles			
W	Planosoles			
S	Solonetz			
D	Podzoluvisoles			
-	Plintisoles			
-	Lixioles			

Tabla 4. Número de curva según la cobertura de suelo y el grupo hidrológico (Domínguez *et al.*, 2008).

Uso de Suelo y Vegetación (INEGI)		Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
AGRICULTURA (de humedad, de riego, de temporal)	Condición hidrológica mala	72	81	88	91
	Condición hidrológica regular	67	76	83	86
	Condición hidrológica buena	62	71	78	81
ÁREA SIN VEGETACIÓN APARENTE		77	86	91	94
ASENTAMIENTO HUMANO	Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios	82	88	91	93
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
	Residencial 50% o más área impermeable	77	85	90	92
	Residencial 50% o menos área impermeable	61	75	83	87
	Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
	Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
	Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
	Calles y carreteras (pavimentados con cunetas y alcantarillas)	98	98	98	98
	Calles y carreteras de grava	76	85	89	91
	Calles y carreteras de tierra	72	82	87	89
BOSQUE (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, táscate, mesófilo de montaña)	Condición hidrológica mala	45	66	77	83
	Condición hidrológica regular	36	60	73	79
	Condición hidrológica buena	25	55	70	77
CARDONAL		54	71	80	89
CHAPARRAL (ARBUSTOS)		20	48	65	73
CUERPO DE AGUA		100	100	100	100
EROSIÓN		68	79	86	89
MANGLAR		100	100	100	100
MATORRAL (con izotes, con rosetófilos, desértico micrófilo, desértico rosetófilo, espinoso, inerme, subinerme, subtropical)	Condición hidrológica mala	48	67	77	83
	Condición hidrológica regular	34	58	71	78
	Condición hidrológica buena	20	48	65	73
MEZQUITAL		68	79	86	92
NOPALERA		39	61	74	84
PALMAR		45	66	77	83
PASTIZAL (cultivado, halófilo, inducido, natural, natural-huizachal)	Condición hidrológica mala	68	79	86	89
	Condición hidrológica regular	49	69	79	84
	Condición hidrológica buena	39	61	74	80
PLANTACIÓN FORESTAL	Condición hidrológica mala	55	73	82	86
	Condición hidrológica regular	44	65	76	82
	Condición hidrológica buena	32	58	71	78

<i>Continuación Tabla 4</i>					
PRADERA DE ALTA MONTAÑA		30	58	71	78
SABANA		45	66	77	83
SELVA (baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)		45	66	77	83
TULAR		68	79	86	92
VEGETACIÓN HALÓFILA		68	79	100	100
VEGETACIÓN SECUNDARIA		68	79	86	89
Definición de condición hidrológica <i>Suelos agrícolas:</i> Mala: tiene menos del 25% del terreno cubierto Regular: tiene entre 25 y 50% del terreno cubierto Buena: tiene más del 50% del terreno cubierto <i>Uso forestal:</i> Mala: tiene menos del 30% del terreno cubierto Regular: tiene entre 30 y 70% del terreno cubierto Buena: tiene más del 70% del terreno cubierto.					

Para la cuenca de Río Grande de Comitán se realizó la clasificación hidrológica de los tipos de suelo, según su permeabilidad, estableciéndose que el tipo hidrológico de la cuenca es D. De acuerdo con el uso de suelo el número de curva varía de 50 en la estación Los Riegos donde predomina el uso de suelo forestal mientras que en el resto de las estaciones toma un valor de 81 debido al uso de suelo agrícola.

Parámetros iniciales

El propósito de la simulación hidrológica es obtener el hidrograma a la salida de la cuenca considerando la precipitación, aplicando el software HEC-HMS.

- Hietograma representativo de la cuenca: un hietograma es la representación en barras de la variación de la altura de lluvia o de la intensidad de la lluvia en el tiempo (Aparicio, 1997). Con base en el registro de precipitaciones de las estaciones climatológicas, se obtienen gráficas de tiempo y precipitación para observar las temporadas donde ocurrieron las mayores precipitaciones (lluvias) y las menores (secas). Para determinar el hietograma representativo se considera la precipitación diaria de la estación climatológica.
- Hidrograma representativo de la cuenca: para la simulación lluvia-escorrentía se consideran los datos registrados en las cuatro estaciones. Estos hidrogramas medidos, se comparan con los calculados con el modelo para su calibración.

➤ Simulación hidrológica: En el *Hydrologic Modelling System (HMS)*, la cuenca se describe a través de una serie de elementos interconectados (subcuencas, canales de tránsito, nodos, fuentes y sumideros). Para la ejecución del modelo se utiliza la abstracción inicial (I_a), que integra el método del Número de Curva (NC) para la estimación de la precipitación efectiva. Este número indica la valoración de las “pérdidas” en el modelo lluvia-escorrentía, relacionado también con la precipitación antecedente (Arlen, 2000). Emplea el hidrograma triangular del Servicio de Conservación de Suelos para la transformación de precipitación de excesos en escorrentía directa (USSCS, 1957). Para la simulación del caudal a la salida de la cuenca por precipitación, los datos principales de alimentación del modelo son (Fleming, 2010):

- *Área de la cuenca*: Representada en km^2
- *Abstracción inicial (I_a)*: en mm

$$I_a = 0.2 \left(\frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad (2)$$

- *Número de Curva (CN)*
- *Tiempo de Concentración*: observado en los hidrogramas
- *Flujo Base*

Calibración

Para la calibración del modelo se realizó un ajuste a la variable CN y se realizó una simulación para un ciclo hidrológico (22 de mayo 2013 al 22 de mayo 2014) en la estación de Los Riegos; los valores de escurrimiento generados con el modelo fueron comparados con los obtenidos en la estación de monitoreo de Los Riegos. Con ello, se calibraron los parámetros de la cuenca dado que se considera a esta subcuenca (subcuenca Juznajab) -ubicada en la parte superior del río- como no alterada y sin mayor influencia antropogénica, es decir, no se observa sobreextracción de agua o descargas al cauce del río.

Posteriormente, los parámetros calibrados obtenidos en esta subcuenca (Tabla 5), fueron extrapolados al resto de las subcuencas (Figura 19) en las que se encuentran los demás sitios de monitoreo (Los Desamparados, Emiliano Zapata, Venustiano Carranza y El Carrizal) para realizar simulaciones con el software y, de igual manera, compararlas con los datos de escurrimientos

medidos con los dataloggers. Esta calibración se llevó a cabo mediante la simulación lluvia-escurrimiento por cuenca propia.

Tabla 5. Datos de alimentación del modelo HEC-HMS para la cuenca Río Grande de Comitán. (LR= Los Riegos; LD= Los Desamparados; VC= Venustiano Carranza; EC= El Carrizal)

	Área drenada (km ²)	Abstracción inicial (mm)	CN	Tiempo de concentración (min)	Flujo Base
LR	84.15	50.800	50	2880	Constante mensual
LD	53.20	11.916	81	2880	Constante mensual
VC	125.90	11.916	81	2880	Constante mensual
EC	57.75	11.916	81	2880	Constante mensual

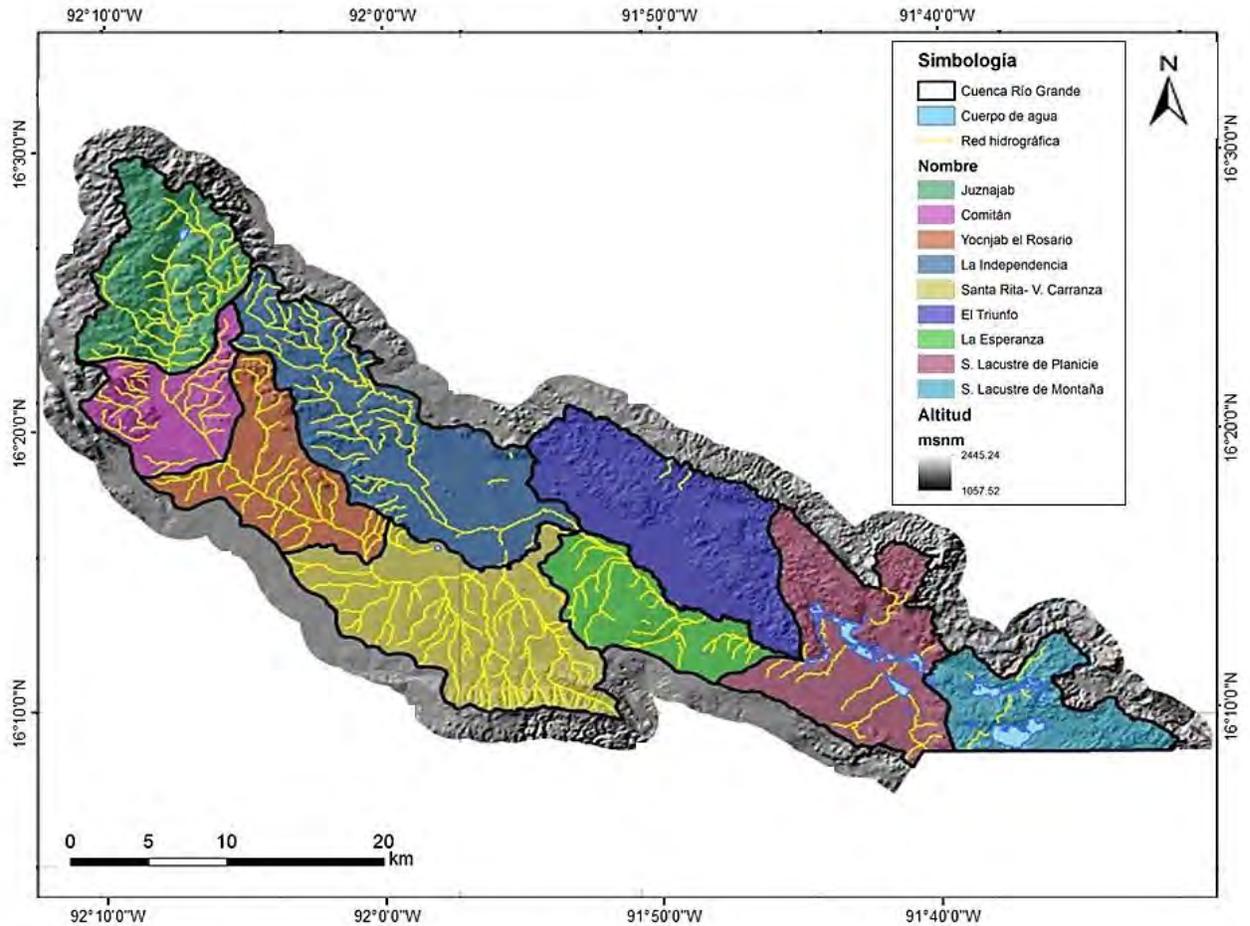


Figura 19. Distribución de las subcuencas dentro de la cuenca del Río Grande de Comitán (Tomado de Alvarado-Velázquez, 2015).

4.3 Flujo base

La separación del flujo base se realizó con base en los hidrogramas obtenidos mediante la simulación lluvia-escorrentamiento utilizando el programa AQUAPAK, el cual ha sido diseñado como complemento del libro “Hidrología de corrientes: una introducción para ecologistas” de Gordon *et al.*, 2004. Este software de licencia libre está disponible en la siguiente liga: <http://www.jacobs.com/natural-resource-management#>. Este programa utiliza un filtro digital recursivo basado en la propuesta de Lyne y Hollick (1979).

Las ecuaciones básicas del filtro son:

$$q_f(i) = \begin{cases} \alpha q_f(i-1) + \frac{(1+\alpha)}{2} [q(i) - q(i-1)] & \text{para } q_f(i) > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (3)$$

De otra forma,

$$q_b(i) = q(i) - q_f(i) \quad (4)$$

Donde:

$q_f(i)$ es la escorrentía directa

$q(i)$ es el flujo total

$q_b(i)$ es el flujo base

α es el parámetro de filtro

Los datos de entrada que requiere el programa son únicamente los valores de caudales medios diarios para la serie de tiempo requerida, en este caso se introdujeron para el periodo del 22 de mayo del 2013 al 22 de mayo del 2014. El programa sugiere de forma predeterminada un parámetro de filtro de 0.925 y un valor de 3 para el número de veces de aplicación del filtro (Figura 20).

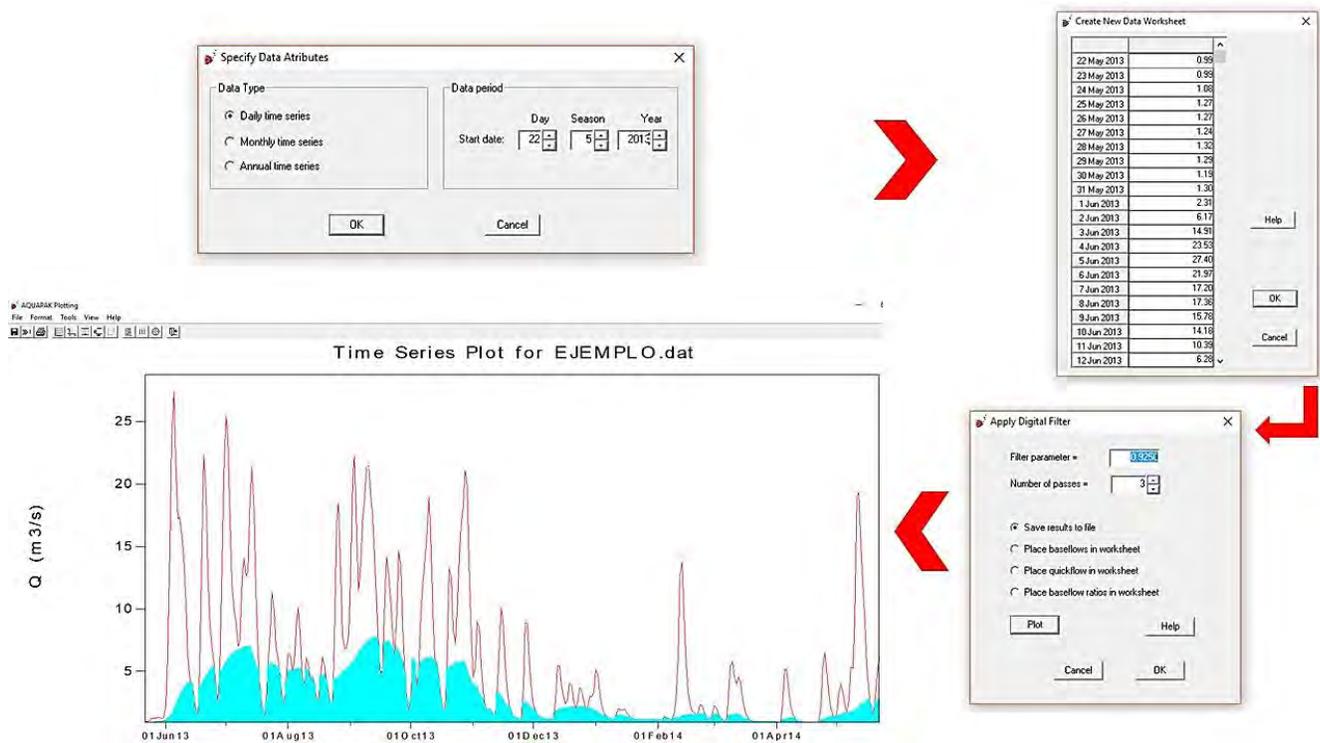


Figura 20. Interfaz del programa AQUAPAK (2004).

4.4 Red de flujo

Con los datos de elevación de niveles estáticos proporcionados se creó la red de flujo utilizando el software Surfer versión 10.7 donde, mediante la interpolación de los niveles medidos en norias situadas en las inmediaciones del río, se crea un mapa de isolíneas que nos indican las zonas de terreno que presentan el mismo valor (líneas equipotenciales). Posteriormente, la herramienta mapa de vectores muestra la dirección del flujo; considerando que éste es perpendicular a las líneas equipotenciales.

4.5 Especies indicadoras

Los peces representativos del río fueron tomados de una tesis previa realizada por Ortiz-Haro (2017), en la cual se llevaron a cabo dos muestreos, uno en temporada de secas (19-24 de abril, 2014) y otro en temporada de lluvias (6-10 de octubre, 2014). El muestreo se realizó desde el sitio Los Riegos hasta El Carrizal, ubicado cerca del Parque Nacional Lagunas de Montebello. En cada sitio se realizó un muestreo que consistió en la aplicación de dos métodos de pesca: electropesca y nasas, seleccionando de dos a tres transectos (subsitos). Los individuos capturados fueron identificados hasta nivel de especie, contados y liberados *in situ*. En cada sitio de muestreo se midieron las

siguientes variables de microhábitat: velocidad de corriente, caudal y tipo de sustrato (Ortiz-Haro, 2017) (Tabla 6).

Tabla 6. Características de los sitios muestreados en el Río Comitán, Chiapas, México. Secas (s); lluvias (II); arcilla (AR); rocas (RC); cama de roca (CR); grava (GR); limo (LI); cantos rodados (CA). Modificado de Ortiz-Haro, 2017.

Sitio	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Sustrato inorgánico (%)
Los Riegos	0.29 (s) 0.24 (II)	1.26 (s) 0.49 (II)	AR (80) RC (15) CR (5)
Los Desamparados	0.09 (s) 0.26 (II)	1.09 (s) 2.23 (II)	LI (95) CR (5)
Emiliano Zapata	0.24 (s) 0.50 (II)	1.55 (s) 3.29(II)	CA (80) AR (10) RC (10)
Venustiano Carranza	0.28 (s) 0.57 (II)	1.25 (s) 2.54 (II)	AR (90) CA (5) RC (5)
El Carrizal			AR (90) RC (10)

Se colectaron 596 ejemplares durante las dos temporadas de muestreo, registrándose una riqueza total de 12 especies y una subespecie distribuidas en seis familias (Tabla 7), de las cuales *Poeciliopsis hnlickai* y *Poecilia mexicana* son los primeros registros de estas especies para la zona. Otra familia bien representada es Profundulidae, del subgénero Tlaloc con dos especies nativas y endémicas de la zona; una de ellas (*Profundulus candalarius*), catalogada como casi amenazada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). En el sitio de Emiliano Zapata no se registra ninguna especie durante las dos temporadas de muestreo (Ortiz-Haro, 2017).

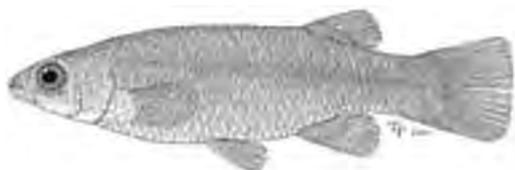
Tabla 7. Riqueza de especies registradas en el Río Grande de Comitán, Chiapas. Temporada de secas (19-24 de abril, 2015) y lluvias (6-7 de octubre, 2015). La información taxonómica y de distribución está basada en Miller (2009) y Fishbase.org. Tomado de Ortiz-Haro, 2017.

Familia	Especie	Nombre común	Distribución
Characidae	<i>Astyanax aeneus</i> (Günther)	Pepesca	Nativo
Cichlidae	<i>Oreochromis</i> sp	-	Introducido
Cyprinus	<i>Cyprinus carpio</i> (Linnaeus)	Carpa común	Introducido
Pimelodidae	<i>Rhamdia guatemalensis</i> (Günther)	Juil descolorido	Nativo
Poeciliidae	<i>Poecilia mexicana</i> (Steindachner)	Topote del Atlántico	Nativo
	<i>Poeciliopsis gracilis</i> (Heckel)	Guatopote jarocho	Nativo
	<i>Poeciliopsis hnlickai</i> (Meyer y Vogel)	Guatopote de Ixtapa	Nativo
	<i>Poecilia reticulata</i> (Peters)	Guppy	Introducido
	<i>Poecilia</i> sp.	-	-
Profundulidae	Subgénero Tlaloc		
	<i>Profundulus candalarius</i> (Hubbs)	Escamudo de Comitán	Nativo
	<i>Profundulus</i> aff. <i>candalarius</i>	-	Nativo
	<i>Profundulus labialis</i> (Günther)	Escamudo bocón	Nativo

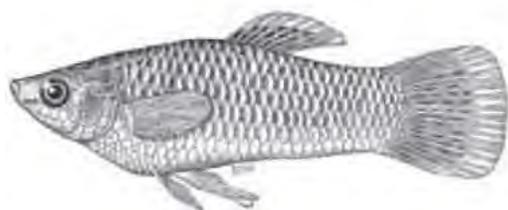
De este conjunto de especies se seleccionaron cinco especies nativas y características de la región (Tabla 8). Algunas especies de peces seleccionadas se observan en la Figura 21. Estas cinco especies seleccionadas en general son especies relativamente pequeñas; las especies de las familias *Profundulidae* y *Poeciliidae* tienen longitudes máximas estándar de 7 y 9 cm respectivamente (Miller *et al.*, 2009; Soto-Galera, 2006; Lyons *et al.*, 2000), mientras que la familia *Pomelidae* representada por la especie *Rhamdia guatemalensis* es la mayor, con 30 cm de longitud estándar máxima (Miller *et al.*, 2009; Soto-Galera, 2006).

Tabla 8. Especies de peces seleccionadas para cada tramo.

Sitio	Especies
Los Riegos	<i>Profundulus candalarius</i> y <i>Profundulus aff. candalarius</i>
Los Desamparados	<i>Profundulus candalarius</i> y <i>Profundulus aff. candalarius</i>
Venustiano Carranza	<i>Poecilia mexicana</i> y <i>Poecilia reticulata</i>
El Carrizal	<i>Poecilia mexicana</i> y <i>Rhamdia guatemalensis</i>



Profundulus candalarius Hubbs. 45 mm LP, efluente y zanja del río Lagartero en la ciénega Lagartero (cuenca del río Grijalva), Huehuetenango, Guatemala.



Poecilia mexicana Steindachner. 59 mm LP, río Tamesí cerca de Tampico, Tamps.



Rhamdia guatemalensis (Günther). 126.2 mm LP, nacimiento del río Cosalapa, Ver.

Figura 21. Imágenes de especies de peces representativas de cada familia (Miller *et al.*, 2009).

4.6 Secciones transversales

Se seleccionaron cuatro tramos a lo largo del Río Grande de Comitán para realizar la simulación de hábitat en cada uno de ellos de acuerdo con Payne *et al.*, (2004), quienes sugieren alrededor de 1.5 secciones transversales por kilómetro de tramo de río. De esta manera, se tomaron cuatro tramos: Los Riegos, Los Desamparados, Venustiano Carranza y El Carrizal (Figura 22), tomando como punto de referencia los sitios de monitoreo, donde durante el proyecto CONACYT se realizaron aforos en cada uno de éstos, obteniendo así los parámetros físicos caudal, velocidad y pendiente en el cauce. Las características de cada tramo se muestran en la Tabla 9.

Las secciones transversales creadas a un lado y otro de los sitios de monitoreo, carecían de parámetros físicos, por lo que para obtenerlos se introdujeron al programa WinxPro (Hardy *et al.*, 2005) el cual analiza los datos de la sección transversal del cauce para generar parámetros geométricos e hidráulicos, utilizando los parámetros físicos medidos en los aforos para la calibración del programa.

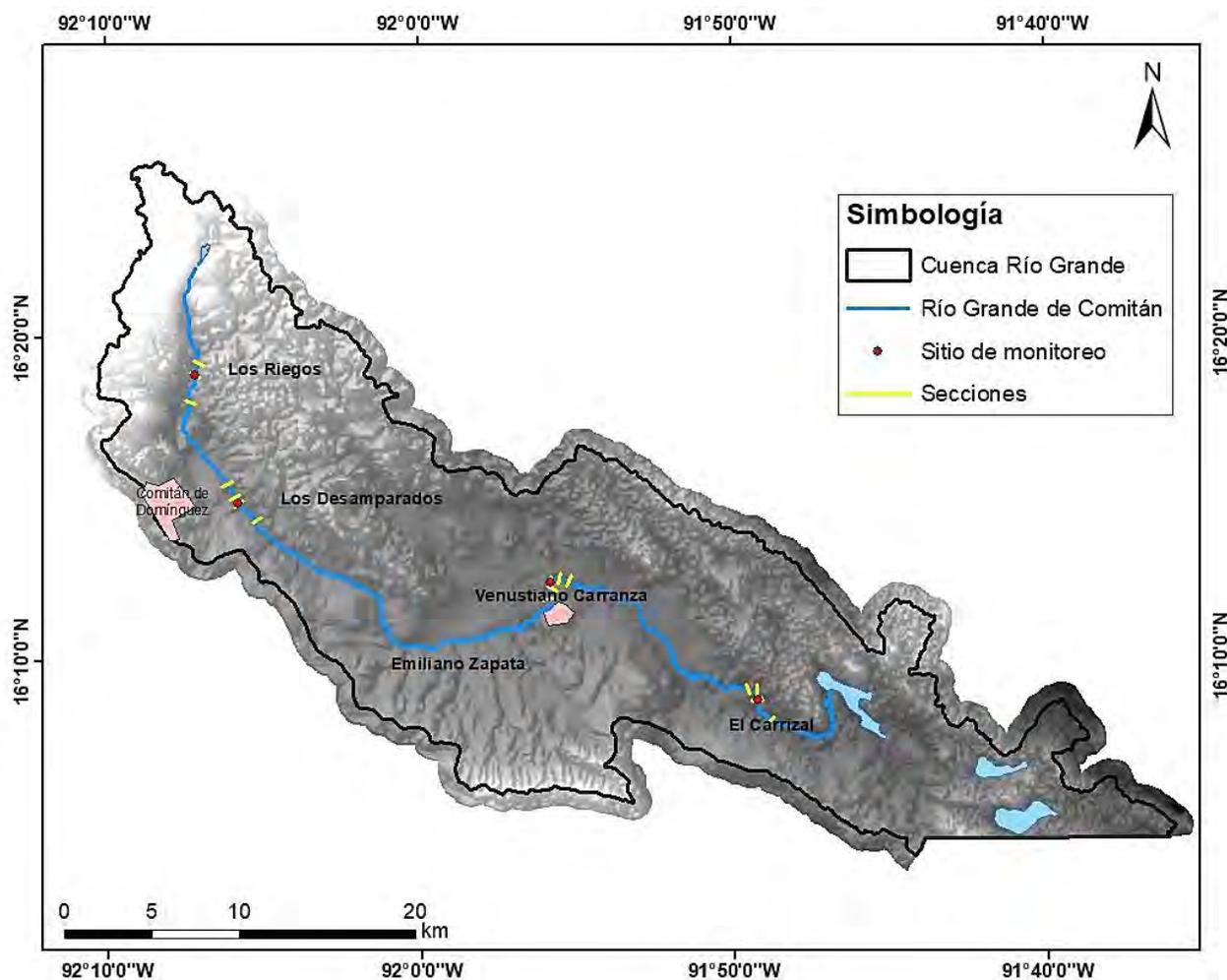


Figura 22. Ubicación de los tramos y las secciones transversales a lo largo del Río Grande de Comitán.

Tabla 9. Características físicas de los sitios de aforo a lo largo del Río Grande de Comitán.

Estación	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)	Pendiente (m/m)	Coefficiente de rugosidad de Manning
Los Riegos	0.25	0.43	0.005	0.064
Los Desamparados	0.22	0.07	0.001	0.246
Venustiano Carranza	0.9	0.36	0.0008	0.045
El Carrizal	1.5	0.54	0.001	0.013

El trasfondo teórico para analizar los datos de la sección transversal del canal se deriva de las ecuaciones básicas de continuidad, momento y energía de la mecánica de fluidos. Específicamente, el flujo de la corriente en una sección transversal se calcula utilizando la forma simplificada de la

ecuación de continuidad donde la descarga es igual al producto de la velocidad y el área de flujo transversal. El cálculo del área de la sección transversal es estrictamente un problema de geometría; se determina ingresando profundidades incrementales de agua a una sección transversal del canal, definida por pares de distancia-elevación. Además del área de sección transversal, el ancho superior, el perímetro mojado, la profundidad media y el radio hidráulico se calculan para cada incremento de nivel de agua.

4.7 Curvas de preferencia de hábitat (III)

Para estimar la disponibilidad de cada variable de microhábitat (profundidad, velocidad de corriente, tipo de sustrato y temperatura) (Tabla 10), se calculó la representatividad de cada transecto (i) como su aporte porcentual en longitud (RT_i), respecto del total de los transectos muestreadas. Luego, para cada transecto y de acuerdo con el intervalo de valores de cada variable de microhábitat, se establecieron clases (j), se estimó la frecuencia de cada clase (F_j) y se calculó la frecuencia ponderada multiplicando F_j por la representatividad del transecto respectivo (RT_i). El índice de disponibilidad para cada clase " j " (I_{dj}) se estimó como el cociente entre la suma de todos los valores de $F_j \times RT_i$ en todos los transectos y la suma de $F_j \times RT_i$ para todas las clases en todos los transectos (Vargas *et al.* 2010).

Tabla 10. Características físicas de los tramos donde se llevó a cabo el muestreo de peces.

LOCALIDAD	TRAMO (m)	LARGO acumulado (m)	PROFUNDIDAD (m)	VELOCIDAD (m/s)	CAUDAL (m ³ /s)	TEMPERATURA (°C)	SUSTRATO
inicio	0	0	-	-	-		-
Los Riegos	7196	7196	0.50	0.26	0.87	19.8	arcilla
Los Sabinos	3810	11006	0.50	0.16	1.17	19.4	cama de roca
Los Desamparados	5178	16184	0.30	0.17	1.66	20.8	limo
Venustiano Carranza	27270	43454	0.66	0.42	1.89	24.2	arcilla
El Carrizal	18553	62007	0.40	0.60	2.00	22.7	arcilla

Nota: Los valores de profundidad corresponden a los obtenidos durante el aforo y los valores de caudal, temperatura y sustrato a los medidos durante el muestreo de peces realizado por Ortiz-Haro (2017).

Para estimar el uso de microhábitat, se utilizó el índice de uso (I_{uj}) para cada clase “j” definido como el cociente entre el número de individuos asociados a una determinada clase “j” y el número total de individuos en el tramo muestreado (Tabla 11). Finalmente, con los datos obtenidos del uso y disponibilidad de cada una de las variables de microhábitat, se procedió a calcular el índice de preferencia de microhábitat (C_j) de acuerdo con la siguiente fórmula (Bovee *et al.*, 1998):

$$C_j = \frac{I_{uj}}{I_{dj}} \quad (5)$$

Tabla 11. Número de individuos muestreados por tramo (Tomado de Ortiz-Haro, 2017).

Especie	Los Riegos	Los Sabinos	Los Desamparados	Venustiano Carranza	El Carrizal	TOTAL
<i>Profundulus candalarius</i> (escamudo de Comitán)	98	75	4	0	0	177
<i>Profundulus</i> aff. <i>candalarius</i>	10	14	4	0	0	28
<i>Poecilia mexicana</i> (Topote del Atlántico)	0	0	0	3	144	147
<i>Poecilia reticulata</i>	0	0	0	142	34	176
<i>Rhamdia guatemalensis</i>	0	0	0	0	3	3

4.8 Simulación de hábitat

Una vez obtenidas las secciones transversales con sus respectivos parámetros y las curvas de preferencia para cada una de las especies de peces seleccionadas, se introducen al modelo PHABSIM. Como primer paso se introdujeron los datos hidrotopográficos del tramo seleccionado (Figura 23):

	ID	Length	Upstream WF	Bank W	Bank V	SZF	N	beta/D50	Slope
1	0.000	0.000	0.500	1.000	1.000	27.610	0.000	0.000	0.00200

Figura 23. Interfaz del modelo PHABSIM donde se introducen los datos hidrotopográficos de las secciones.

- ID: número identificativo de la sección
- Length: distancia desde la sección ala previa abajo en metros
- Upstream WF (*Weighting Factor*): factor de ponderación de las secciones en la evaluación del hábitat total del tramo
- Left Bank WF y Right Bank WF: incorpora el efecto del curso del curso del subtramo entre dos secciones consecutivas
- SZF (*Stage of zero flow*): cota mínima de la sección que actúa de control hidráulico.
- N: coeficiente de rugosidad de Manning de la sección
- Slope: pendiente hidráulica (m/m).

Una vez introducidos estos datos para cada sección del tramo se introdujo su información hidrométrica (Figura 24):

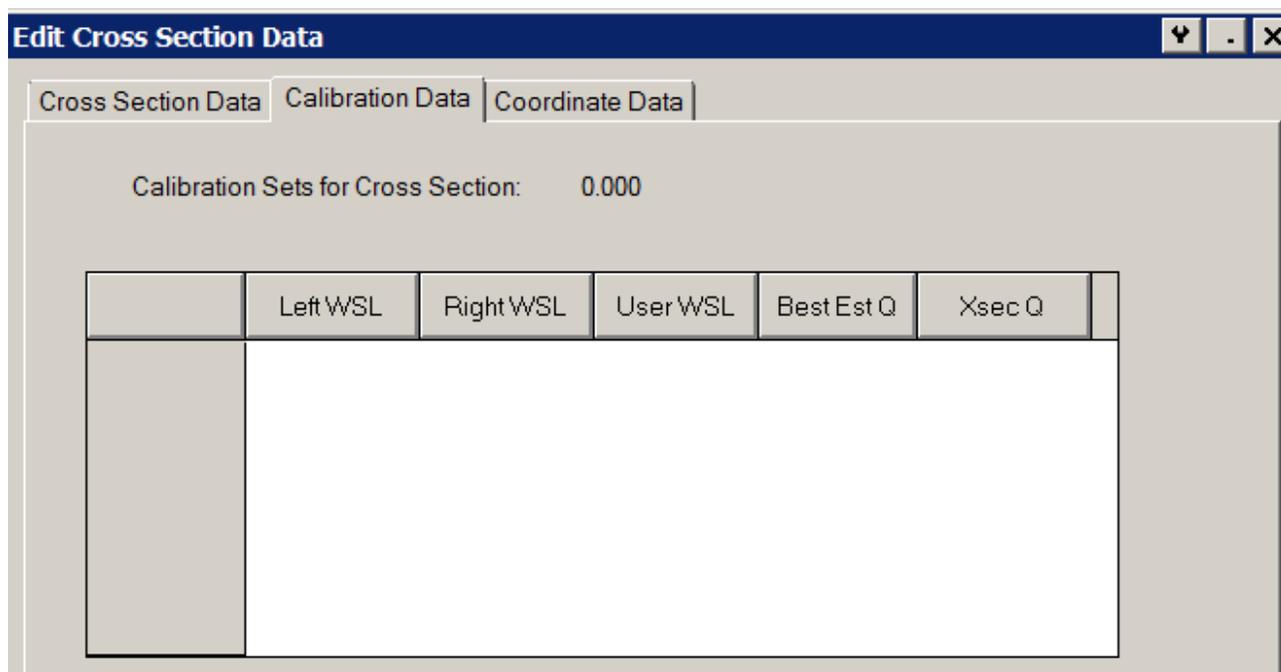


Figura 24. Interfaz del modelo PAHBSIM donde se introducen los datos hidrométricos de cada sección.

- Left WSL (*Water Surface Level*): nivel de agua en orilla izquierda de la sección (m)
- Righth WSL: nivel de agua en la orilla derecha (m)
- User WSL: nivel de agua de cálculo en la sección
- Best Est Q: caudal circulante en cada sección.

Por último, se introdujo la información topográfica e hidrométrica de la sección respectiva (Figura 25):

Cross Section	X	Y	Z	CI	N	Vel @ 2.13	Vel @ 3.94	Vel @ 7.08
0.000		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			
		0.000	0.000	0.000	0.000			

Figura 25. Interfaz del modelo PHABSIM donde se introduce la información topográfica e hidrométrica de cada sección.

- X: coordenada horizontal (x) en metros
- Z: coordenada vertical (z) en metros
- Y: coordenada longitudinal
- CI (*Channel Index*): material del lecho del cauce, codificado de modo coherente con la curva de preferencia utilizada
- N: Coeficiente de rugosidad de Manning
- Vel@: velocidad media medida

Este procedimiento se repitió para cada una de las secciones de cada tramo.

Como segundo paso, se introdujeron los criterios con significación biológica (velocidad, profundidad, sustrato y temperatura) para cada especie objetivo (Figura 26):

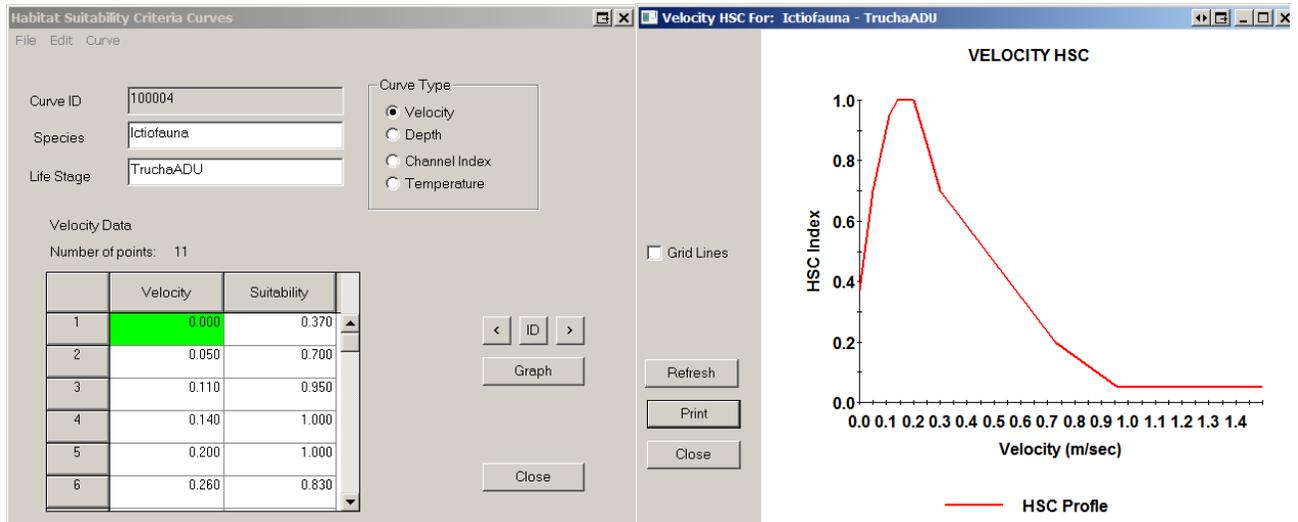


Figura 26. Interfaz del modelo PHABSIM donde se introducen las curvas de preferencia de hábitat para cada especie.

- Curve ID: número identificador de la curva
- Species: nombre del organismo
- Life Stage: estadio vital

Como último paso se establecieron los intervalos de caudales de simulación y se implementaron los modelos de simulación de superficie libre (NSL) y velocidad. Sobre estas predicciones previas se cimentó la evaluación del microhábitat acuático que dio lugar a la simulación del hábitat. Durante esta última se evaluó la idoneidad de cada celda para un estadio vital de una especie por aplicación de sus preferencias. La superficie de cauce representada por cada celda es ponderada por un coeficiente de conformidad ($C_{i,s}$), que refleja la idoneidad de la combinación de estructura física y condiciones hidráulicas, que se producen en la celda para la especie en cuestión. El modelo determina así el "área ponderada útil" (WUA , *weighted usable area*), que para una celda viene dada por:

$$WUA_i = C_{i,s} \cdot A_i \quad (6)$$

Donde:

$C_{i,s}$ es el índice de conformidad de la combinación de características de la celda i -sima para la especie considerada (este índice es único para cada estadio vital de cada especie; la misma especie tiene diferentes índices para cada estadio freza, alevines, etc.)

A_i es la superficie asignada a la celda

Este cálculo se realiza para cada una de las celdas y para cada caudal circulante. El área ponderada útil para el tramo representado por el transecto y para un caudal Q viene dada por:

$$WUA = \sum_{i=1}^n WUA_i \quad (7)$$

de tal forma, que el área ponderada útil del tramo es única para cada caudal, para cada estadio y para cada especie.

La aplicación del método entrega valores de WUA en m^2 por 1000 m lineales de cauce. Los pares de valores WUA/caudal se representan gráficamente, obteniéndose unas gráficas que muestran la variación de la habitabilidad con respecto a los caudales circulantes en cada uno de los transectos.

Capítulo 5. Resultados

5. 1 Esguerrimiento

La simulación lluvia- esguerrimiento realizada con el modelo HEC-HMS para el ciclo hidrológico del 22 de mayo del 2013 al 22 de mayo del 2014, muestra que los valores de caudales máximos generados difieren ampliamente con aquellos registrados durante el aforo en cada uno de los sitios de monitoreo (Figura 27). Durante la temporada de lluvias, de mayo a octubre, las variaciones en los valores máximos de caudal entre los simulados con HEC-HMS y los registrados son debido al desbordamiento del agua cuando ésta rebasa la capacidad del cauce, mientras que las variaciones de caudales medios y bajos durante la temporada de secas en los meses de noviembre a abril se deben principalmente a las extracciones de agua para uso humano. Debido a esto, se calibró el modelo únicamente para los caudales medios y bajos (Figura 28), asumiendo que los dataloggers se limitan a registrar el tirante de agua que el cauce puede almacenar, causado por la dispersión lateral del agua cuando ésta rebasa la profundidad del cauce durante un evento extremo de lluvia.

En los resultados también se observa un caudal creciente conforme se avanza a la zona de descarga del río. Los desfases que se observan en Los Desamparados y Emiliano Zapata demuestran que existe un volumen de agua que de alguna forma ha sido sustraída del cauce ya sea de manera natural, mediante el flujo de agua subterráneo hacia otros cuerpos de agua o por influencia antrópica a través de la extracción de agua subterránea o directamente del cauce para diversas actividades.

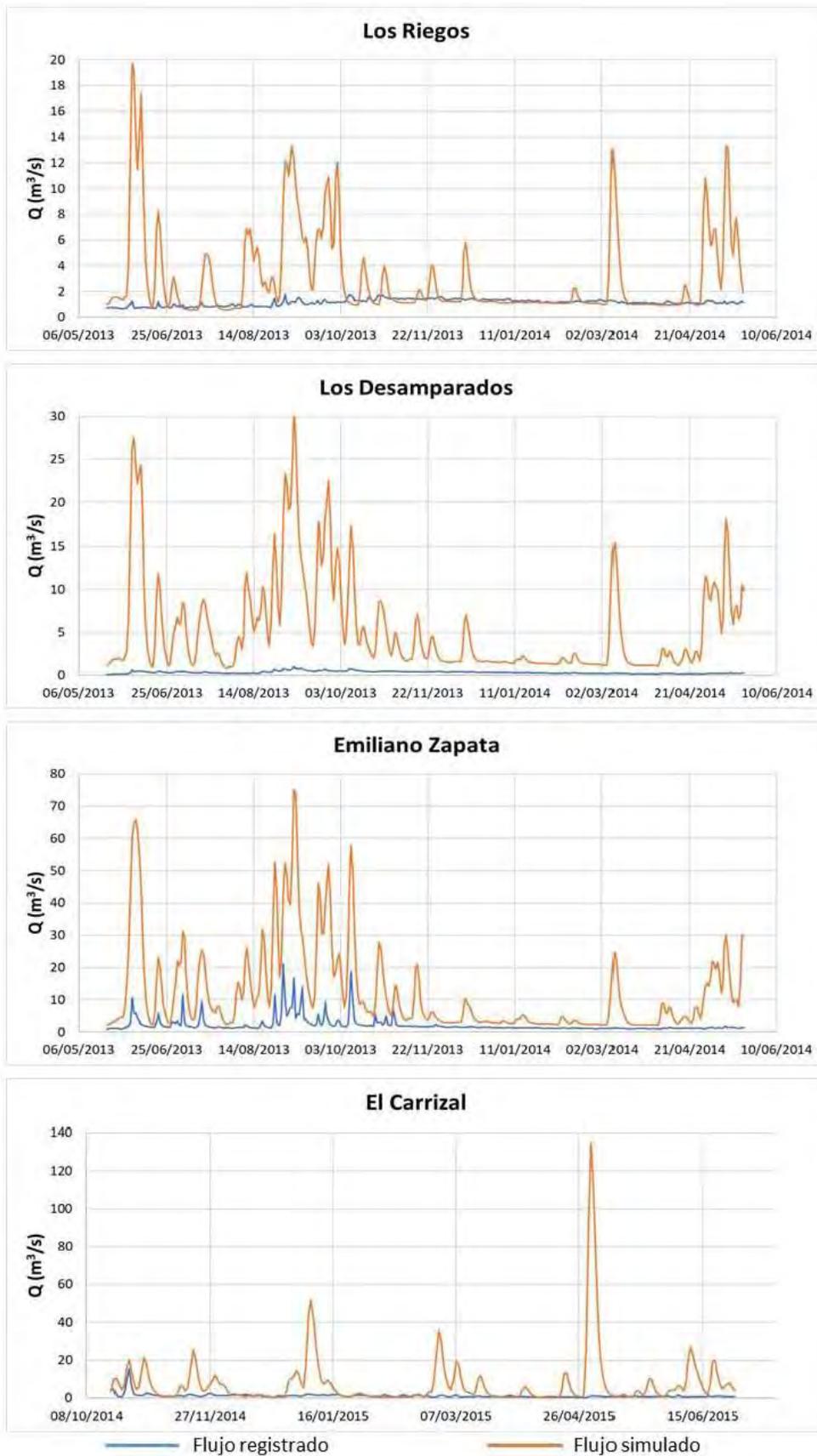


Figura 27. Escorrentamiento registrado y simulado con HEC-HMS.

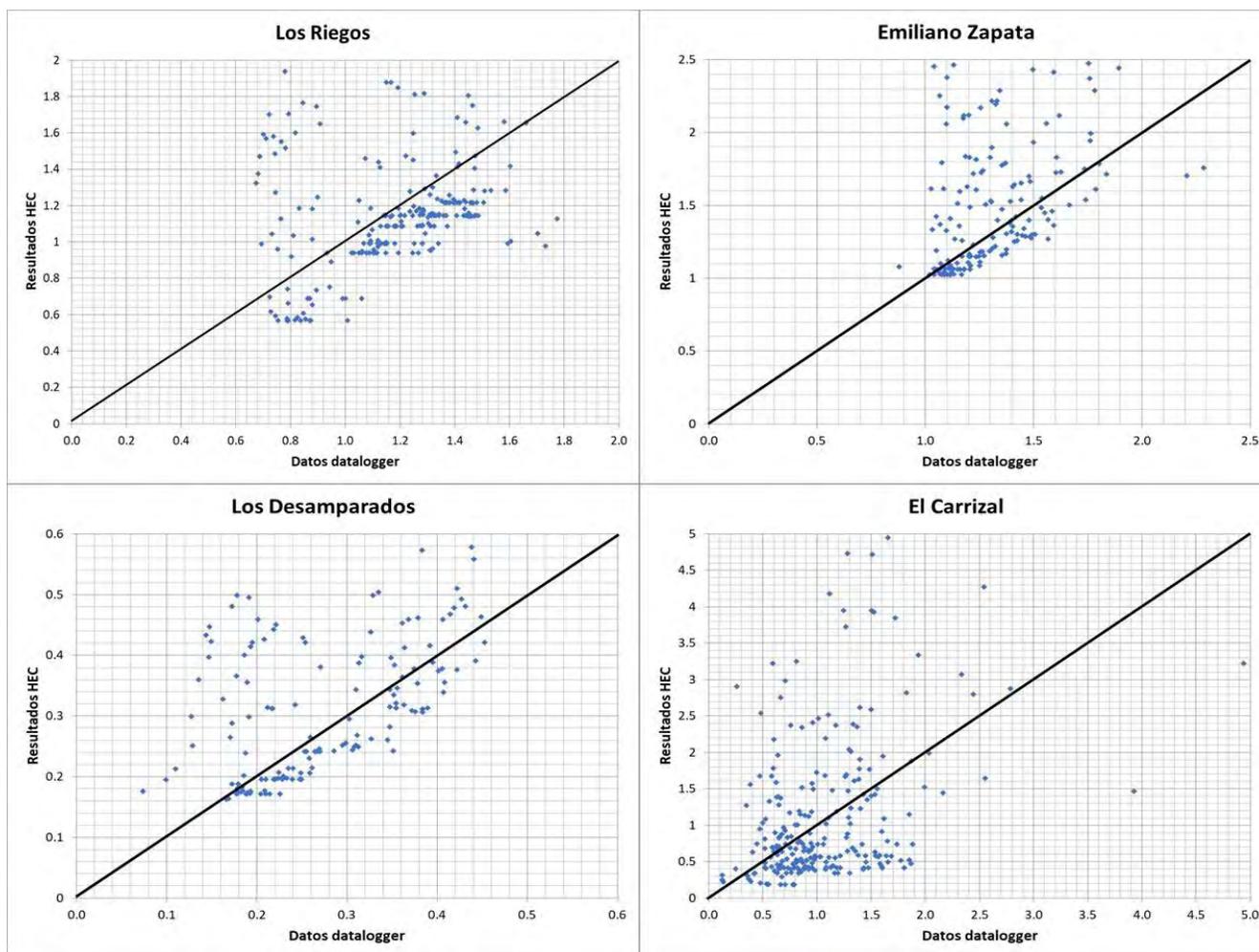


Figura 28. Gráficas de calibración para caudales medios y bajos de las cuatro estaciones de monitoreo.

Una vez comparados y calibrados los resultados simulados, se obtuvieron los valores de escurrimiento para cada uno de los cuatro sitios donde se realiza la simulación de hábitat (Los Riegos, Los Desamparados, Venustiano Carranza y El Carrizal) para el mismo periodo (22 de mayo, 2013 al 22 de mayo, 2014), a través de escurrimiento por cuenca acumulada (Figura 29). Los caudales máximos varían desde 20 m³/s en Los Riegos hasta 130 m³/s en El Carrizal, mientras que los caudales mínimos son más constantes con valores entre 1 y 5 m³/s.

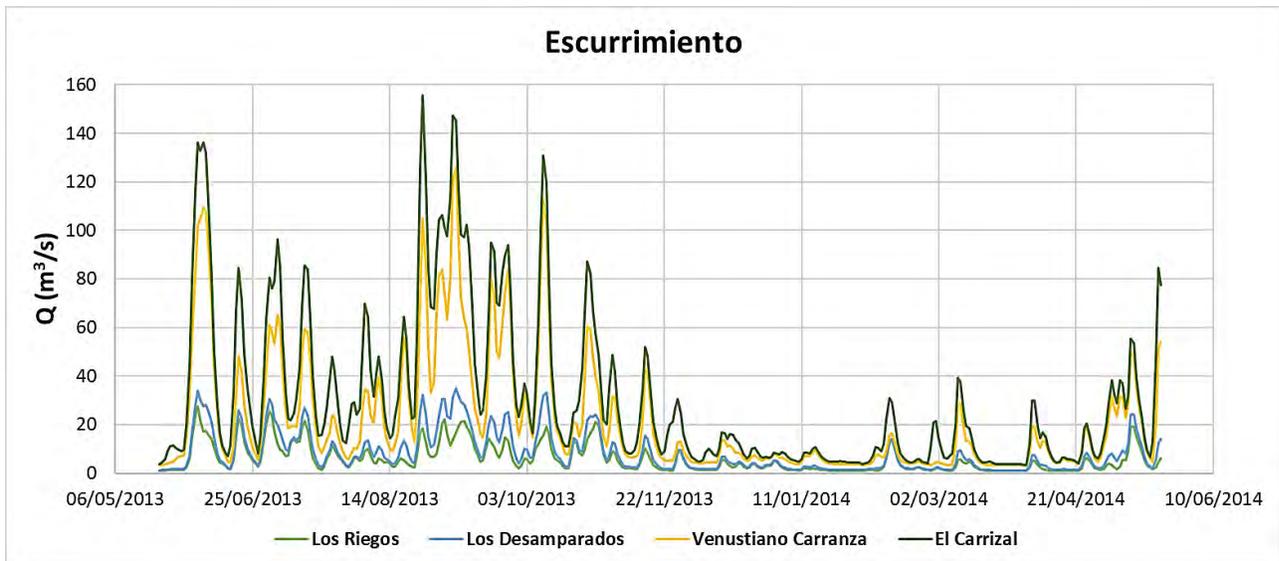


Figura 29. Esgurrimiento acumulado en cada una de las estaciones a simular.

5.2 Flujo Base

La separación de flujo base realizada a los hidrogramas obtenidos de la simulación lluvia-esgurrimiento se muestra en la Figura 30. En ellos se puede observar que aproximadamente una tercera parte del esgurrimiento total corresponde a flujo base, con valores máximos durante la temporada de lluvias de 7 m³/s en Los Riegos a 40 m³/s en El Carrizal y mínimos de 0.9 a 3 m³/s respectivamente, durante la temporada de estiaje.

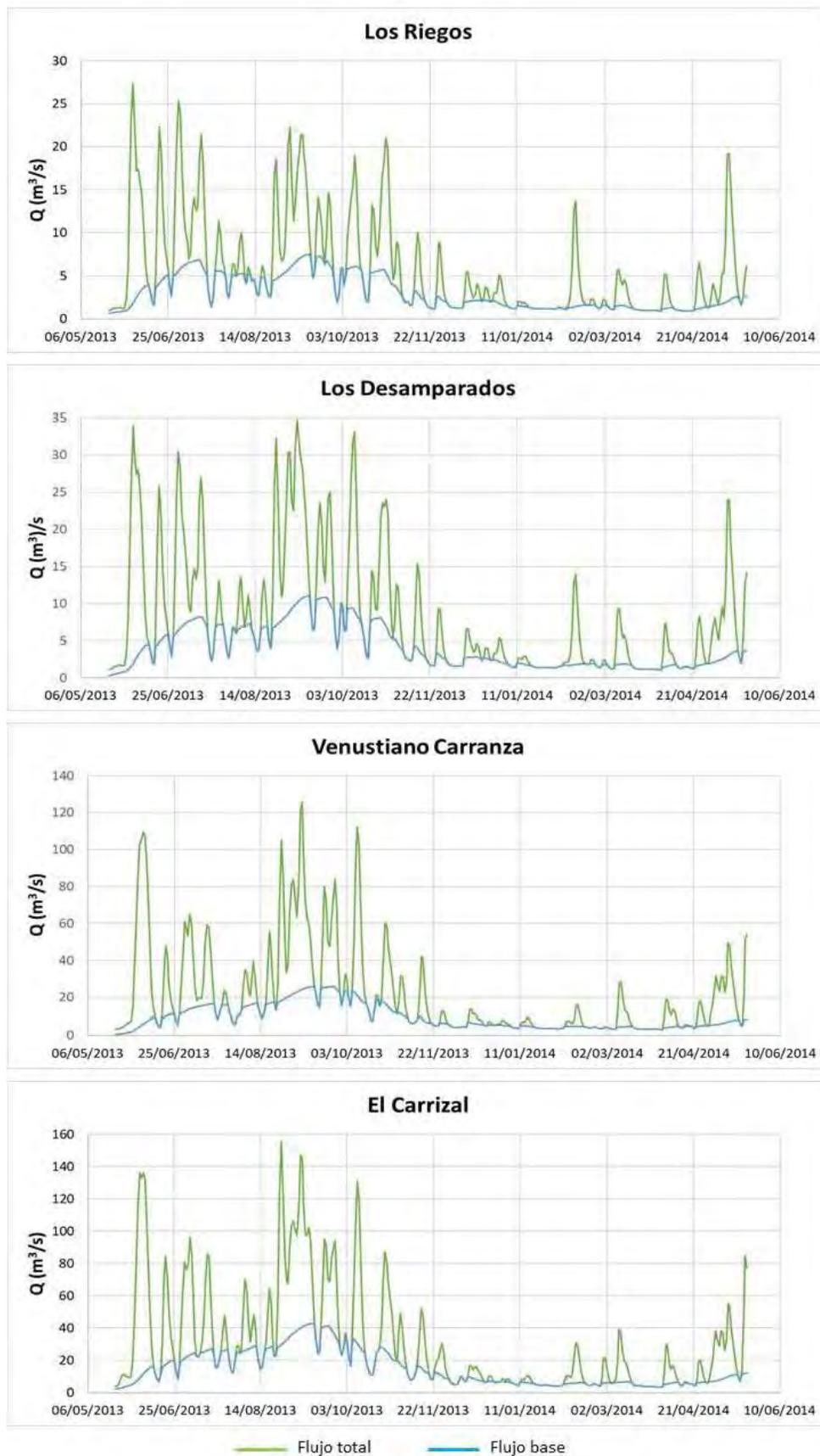


Figura 30. Separación de flujo base en las cuatro estaciones de monitoreo.

5.3 Relación río-acuífero

La red de flujo realizada para el área de estudio (Figura 31) muestra que el flujo local de agua subterránea durante el final de la temporada de lluvias tiene una dirección SW-NE, alimentando de esta forma al Río Grande de Comitán, por lo que se considera a éste un río receptor.

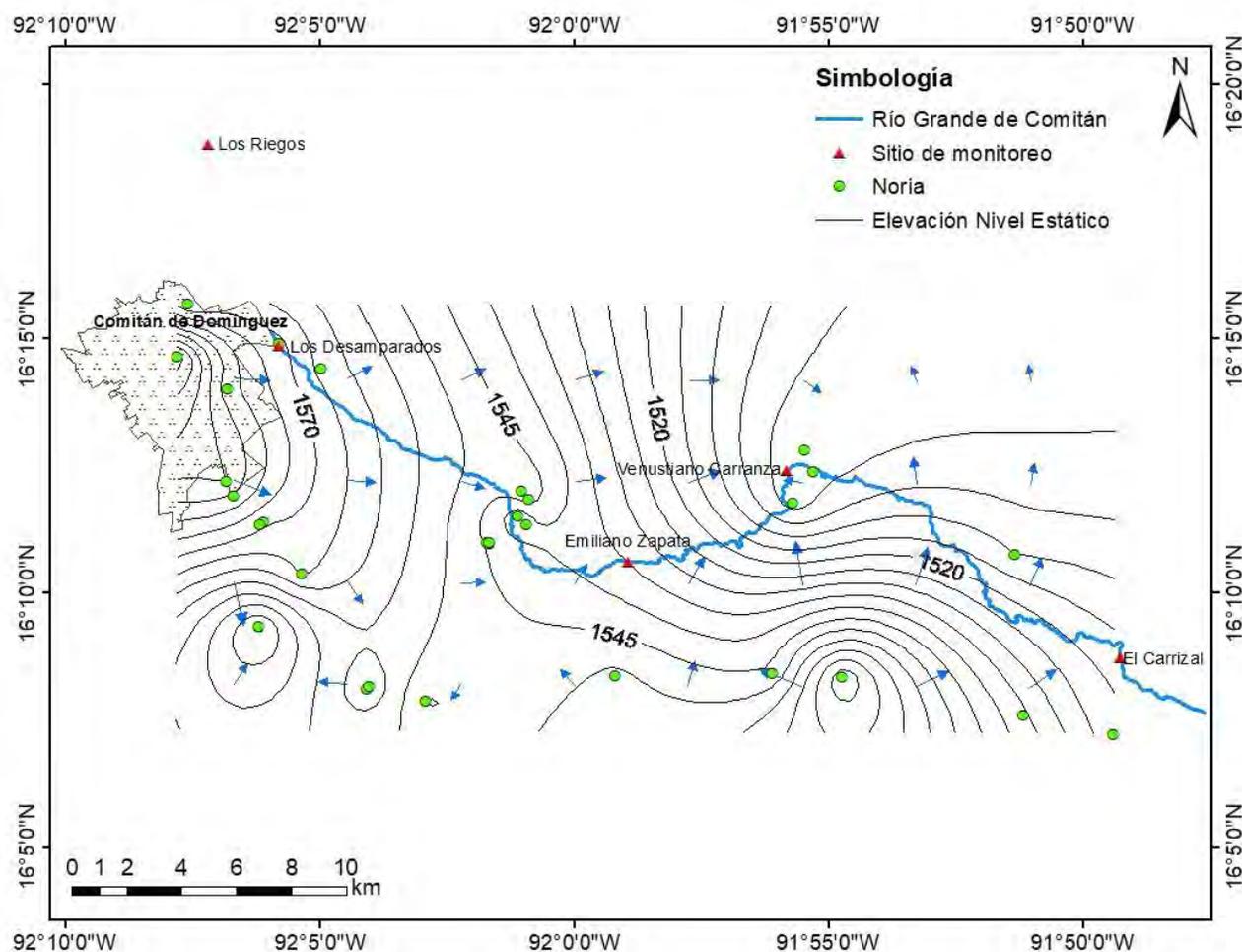


Figura 31. Red de flujo del área de estudio. Elaboración propia con datos de norias de Sandra Mota Covarrubias (Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. Tesis de Maestría. En proceso)

5.4 Régimen de Caudal Ambiental

Curvas de preferencia

Las curvas de preferencia realizadas para cada una de las especies seleccionadas muestran que estas especies tienden a preferir profundidades menores a 0.6 m, velocidades de 0.1 a 0.5 m/s, sustratos más variados desde cama de roca hasta arcillas y temperaturas alrededor de los 22 °C (Figura 32).

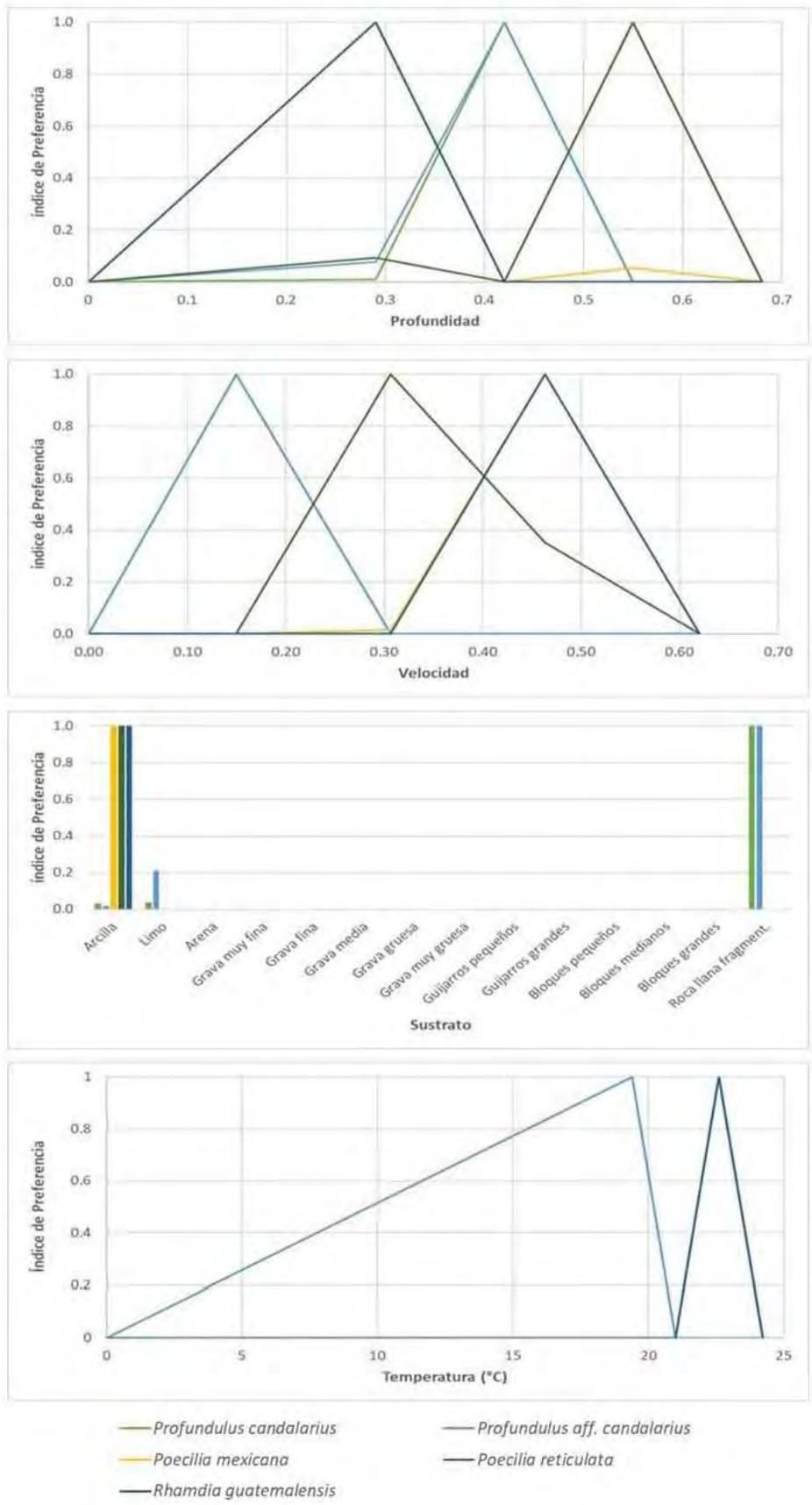


Figura 32. Curvas de preferencia de hábitat para las especies seleccionadas.

Simulación de hábitat

La aplicación del método nos entrega valores de área ponderada útil (WUA) en m^2 por 1000 m lineales de cauce. Los pares de valores WUA/caudal se representan gráficamente, obteniéndose unas gráficas que muestran la variación de la habitabilidad con respecto a los caudales circulantes en cada uno de los transectos. En la Figura 33 se observan los resultados para las especies seleccionadas por tramo; las especies de la familia Profundulidae maximizan su hábitat con caudales de entre 0.5 y 1.5 m^3/s en Los Riegos y entre 0.5 y 6 m^3/s en Los Desamparados, mientras que las especies de la familia Poeciliidae en el tramo Venustiano Carranza lo hacen con caudales de entre 2 y 20 m^3/s . En el Carrizal las especies *Poecilia mexicana* y *Rhamdia guatemalensis* muestran un máximo aprovechamiento de hábitat en caudales de 0.5 m^3/s hasta alrededor de los 40 m^3/s . Estos resultados nos indican que, además del caudal óptimo representado por el valor máximo de hábitat en las curvas WUA, existen otros picos de menor magnitud que están asociados a los requerimientos de hábitat de las especies en sus diferentes estadios de vida.

Para la familia Profundulidae Velázquez-Velázquez (2007) reporta un periodo de reproducción de enero a junio, cesando por completo al inicio de las lluvias y el aumento de caudal en los arroyos; para familia Poeciliidae, Vargas y de Sostoa (1996) indican que el periodo de reproducción ocurre entre los meses de mayo a octubre, iniciando en este último un periodo de reposo. De la especie *Rhamdia guatemalensis*, Chávez *et al.* (1989) observaron en Tabasco que esta especie tiene un periodo reproductivo que abarca los meses de mayo a septiembre, seguido de un periodo de reposo de octubre a abril-mayo, mientras que Schmitter-Soto (1998) menciona que las poblaciones que se encuentran en Quintana Roo se reproducen de marzo a junio o julio.

De acuerdo con lo reportado con respecto a los ciclos de vida de cada familia, en la Tabla 12 se muestra el régimen de flujo ambiental propuesto y el régimen de flujo regulado que corresponde al observado, para contrastar las diferencias.

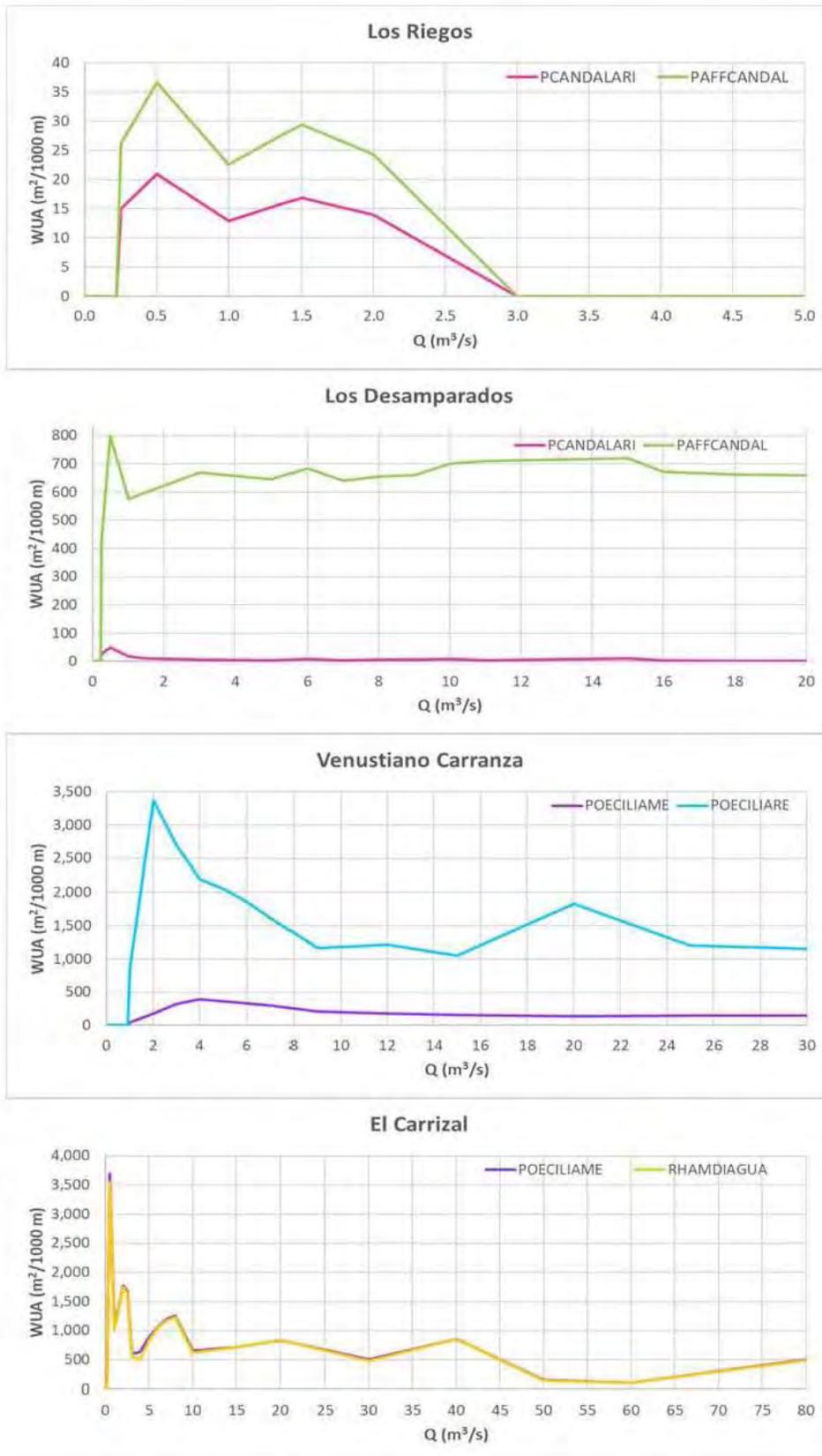


Figura 33. Curvas WUA obtenidas en cada tramo para las especies seleccionadas (PCANDALARI= *Profundulus candalarius*; PAFFCANDAL= *Profundulus* aff. *Candalarius*; POECILIAME= *Poecilia mexicana*; POECILIARE= *Poecilia reticulata*; RHAMDIAGUA= *Rhamdia guatemalensis*).

Tabla 12. Régimen de caudal ambiental propuesto.

		Los Riegos											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Requerimiento mínimo (m ³ /s)		1.5						3					
Caudal observado (m ³ /s)		1.7	3	2	2	6	11	10	6	12	10	4	3

		Los Desamparados											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Requerimiento mínimo (m ³ /s)		0.5						3					
Caudal observado (m ³ /s)		2	3	3	3	10	14	13	11	20	14	6	3

		Venustiano Carranza											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Requerimiento mínimo (m ³ /s)		4				20						4	
Caudal observado (m ³ /s)		4	6	7	8	27	40	29	33	59	35	14	7

		El Carrizal											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Requerimiento mínimo (m ³ /s)		8				40						8	
Caudal observado (m ³ /s)		6	10	10	10	34	55	43	56	80	45	22	9

	Reproducción
	Reposo
	Meses con flujo crítico
	Mes con flujo favorable

Los requerimientos mínimos son propuestos con base en el análisis comparativo de la ocupación de hábitat con los caudales observados, los flujos óptimos obtenidos con la simulación de hábitat y las etapas de vida reportadas para las especies.

5.5 Contribución del Flujo Base al Régimen de Caudal Ambiental

Los valores promedio mensuales graficados (Figura 34) para cada una de las estaciones muestra que el porcentaje de flujo base con respecto al flujo total es bajo en la temporada de lluvias (junio a octubre), mientras que en la temporada de estiaje el flujo base tiende a ser mayor, teniendo valores máximos en el mes de enero, donde éste constituye casi el total del escurrimiento (99%).

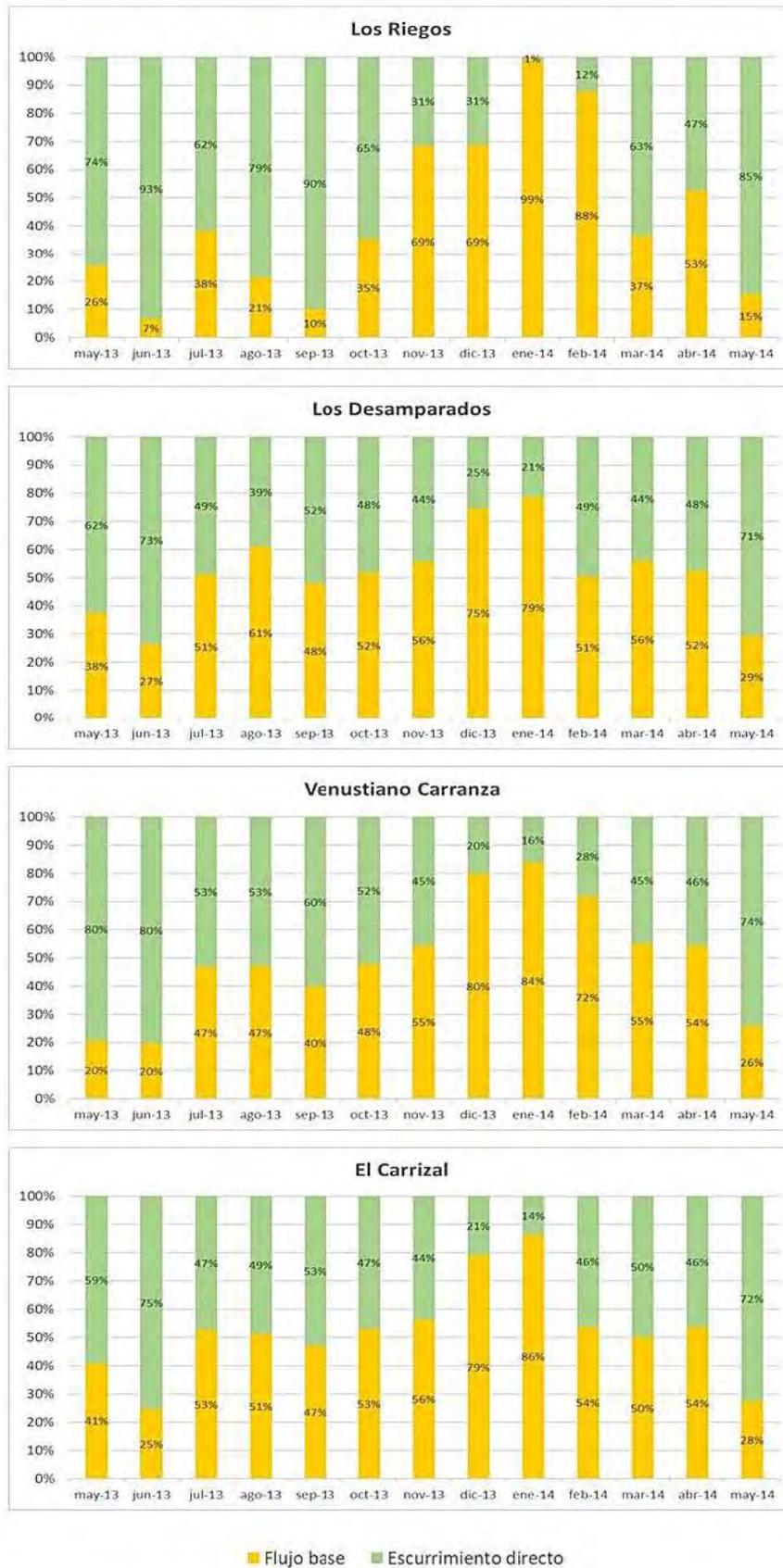


Figura 34. Porcentaje de escurrimiento directo y flujo base a lo largo del Río Grande de Comitán, Chiapas.

Capítulo 6. Discusión de resultados

En este trabajo se aplicó una modelación hidrológica empleando el programa de licencia libre HEC-HMS y AQUAPAK para la caracterización de la dinámica lluvia-escorrentamiento y la separación del flujo base del escurrimiento total y un modelo hidrobiológico de simulación de hábitat (PHABSIM) para la determinación del régimen de caudal ambiental. Con los resultados obtenidos es posible decir que la interacción río-acuífero debe ser tomada en cuenta en el cálculo del caudal ambiental ya que tiene una variación estacional; en los periodos de estiaje éste depende en gran parte de las descargas de agua subterránea. Por lo tanto, el concepto de caudal ambiental se convierte en un tema que debe integrar el agua subterránea y no únicamente el agua superficial.

La comprensión de la importancia del agua subterránea en el caudal ambiental contribuye a una mejor gestión del recurso dentro de la cuenca del Río Grande de Comitán, ya que en este trabajo se estableció que a lo largo de su transcurso desde el nacimiento hasta la zona de descarga el río recibe aportaciones de un sistema local de agua subterránea, al menos durante el comienzo de la temporada de estiaje, aproximadamente en el mes de octubre como lo demuestra la red de flujo creada con los datos de las norias.

La mayoría de los sitios estudiados en el Río Grande de Comitán presentan un severo deterioro ambiental derivado de las acciones antropogénicas que se desarrollan en las áreas más próximas al río (extracción de agua, agricultura intensiva, depositación de residuos sólidos y líquidos, entre otros), así como de la fuerte influencia de la ciudad de Comitán (principalmente aportes de aguas residuales de zonas urbanas e industriales) y de otros poblados asentados en la cuenca (Ortiz-Haro, 2017; Alvarado-Velázquez, 2015; Barajas-García, 2007). Estas actividades tienden a disminuir los caudales circulantes y a afectar la calidad del agua, impactando fuertemente a las comunidades biológicas, incluyendo a los peces. Algunos de estos peces son indicadores de las condiciones de conservación del ecosistema, de acuerdo con su distribución a lo largo del río, como se observa en el sitio Emiliano Zapata donde durante ambas estaciones (lluvias y estiaje) no se reporta la captura de ningún individuo, debido probablemente a que este sitio se encuentra ubicado en la zona con mayor actividad agrícola lo que, de acuerdo con Ortiz-Haro (2017) genera un aporte importante de sedimentos, además de agroquímicos que pudieran estar afectando la calidad del agua. Aunado a esto, el sitio se ubica aguas abajo de la descarga de agua residuales provenientes de la laguna de

oxidación de la ciudad de Comitán, lo que genera una alta concentración de nutrientes y la afectación de la disponibilidad de oxígeno disuelto en el sitio (Barajas-García, 2007).

Las características físicas (morfología, caudal y velocidad) del sitio Emiliano Zapata son muy parecidas a las del sitio Venustiano Carranza; ambos se encuentran relativamente cercanos en una región de baja pendiente y con temperaturas similares, es decir, presenta condiciones físicas del hábitat parecidas. Por lo tanto, es posible que el sitio Emiliano Zapata bien podría albergar las mismas especies que aquellas ubicadas en Venustiano Carranza, sin embargo, el efecto de la calidad del agua crea ambientes no aptos para los individuos propiciando la migración de éstos a otros sitios.

Los requerimientos de hábitat físico para las especies varían a lo largo de las estaciones y responden a la etapa de vida en la que se encuentran. Por lo tanto, la disminución de los caudales circulantes puede reducir el hábitat disponible para el desarrollo de las especies en cada una de estas etapas.

Las especies seleccionadas en el río están representadas por tres familias: *Profundulidae*, *Poeciliidae* y *Pomelidae*. De éstas, las dos primeras se distribuyen en la parte alta y media del río donde las temperaturas son más frías, los cauces más estrechos y caudales bajos y rápidos, mientras que la familia *Pomelidae* se distribuye únicamente en la parte baja, cerca de la zona de descarga del río y donde se tienen temperaturas más cálidas, cauces más amplios y caudales altos y lentos debido a la baja pendiente del lecho (Figura 35). Así, los periodos de reproducción de la familia *Profundulidae* exigen caudales sin crecidas mientras que las familias *Poeciliidae* y *Pomelidae* exigen caudales mayores para su reproducción. Por ello, si se requiere que los caudales ambientales circulantes sean mínimos, han de fluctuar de unas estaciones del año a otras.

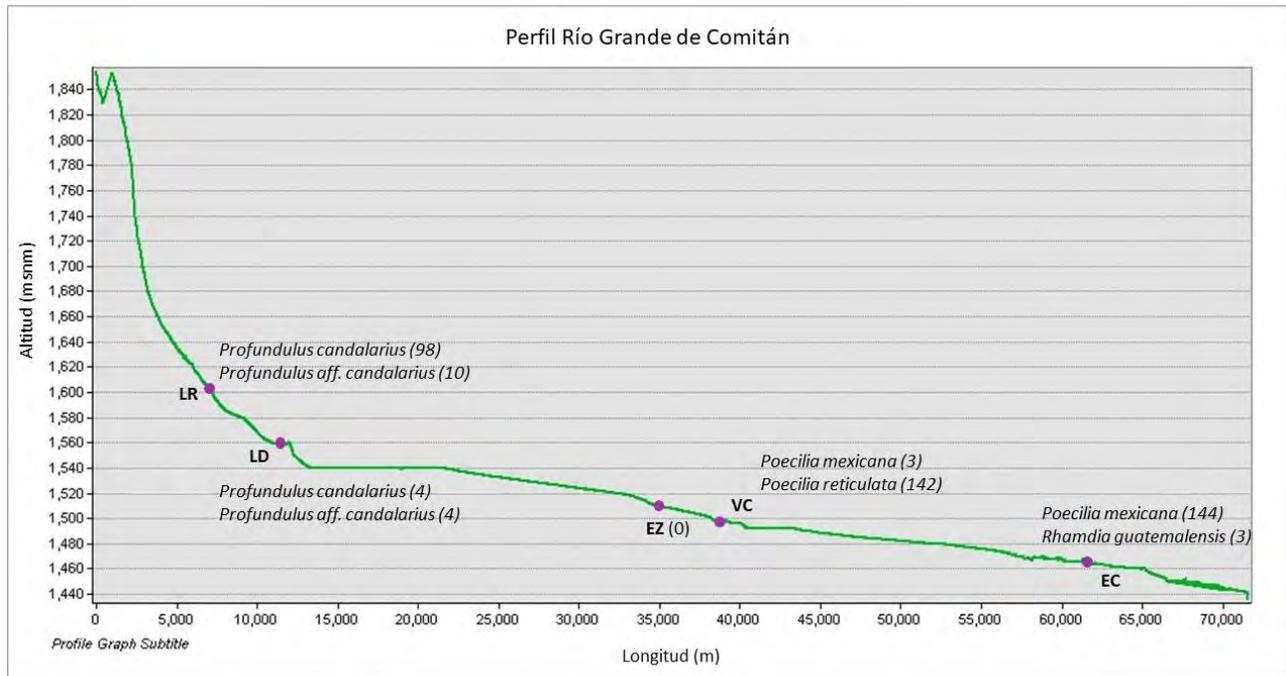


Figura 35. Distribución de las especies seleccionadas en los sitios de monitoreo a lo largo del Río Grande de Comitán. El número entre paréntesis representa la cantidad de individuos capturados en ese sitio. Gráfica realizada con datos de INEGI (2007) y los datos de las especies son tomados de Ortiz-Haro (2017).

Se necesita, entonces, definir un régimen de caudales ambientales con el fin de proteger el hábitat fluvial en todas las etapas de desarrollo de las especies acuáticas. Los flujos mínimos propuestos representan una recuperación de los flujos en temporada de estiaje cuando los flujos regulados están cerca o por debajo de los flujos ambientales. Las familias Poeciliidae y Pimelodidae prefieren flujos más altos como en los meses de mayo a octubre, mientras que la propuesta ambiental generalmente es más baja que el flujo regulado excepto por el mes de mayo, cuando el flujo regulado es menor que el propuesto.

El flujo total en el Río Grande de Comitán varía también con respecto al clima y las aportaciones de agua subterránea a lo largo del ciclo hidrológico y en diferentes porciones de éste. La cuantificación del flujo base al río en un principio se pretendió realizar mediante el uso de las fórmulas de Darcy, sin embargo, debido a una estimación errónea de los valores de conductividad hidráulica de los materiales del subsuelo, se obtuvieron valores anuales muy inferiores a aquellos registrados *in situ*. Debido a esto, se decidió utilizar el programa AQUAPAK, con el cual se obtuvieron valores de flujo base más comparables con los registrados. Los resultados indican que durante la temporada de lluvias el flujo subterráneo constituye aproximadamente una tercera parte del flujo

total mientras que, en la temporada de estiaje, debido a que no hay lluvias, el flujo total corresponde al aportado por las corrientes de agua subterránea.

De acuerdo con los requerimientos de caudal ambiental propuesto para cada una de las estaciones, en la Figura 36 se observa que el flujo base en la temporada de lluvias (junio a octubre) en los sitios Los Riegos y Los Desamparados está por encima del requerimiento ambiental de las especies, es decir, el requerimiento mínimo está cubierto por las aportaciones de agua subterránea, mientras que en los sitios Venustiano Carranza y El Carrizal el flujo base tiende a estar por debajo del requerimiento, sin embargo, el flujo requerido es aportado por el escurrimiento directo producido por las lluvias.

Durante la temporada de estiaje únicamente en la estación Los Desamparados el flujo mínimo requerido por las especies está por debajo del caudal aportado por el flujo base, es decir, éste cubre las necesidades de hábitat en temporada de estiaje. En Venustiano Carranza el flujo base coincide con el caudal ambiental propuesto, por lo que se recomienda mantener como mínimo ese caudal durante toda la temporada pues disminuirlo podría producir impactos negativos en las especies. Durante el mes de noviembre el requerimiento supera ligeramente el escurrimiento total del cauce, sin embargo, la especie probablemente se adecúe a las nuevas condiciones debido a los cambios en su propio requerimiento para su desarrollo. Este sitio es el que se encuentra en mejor estado ya que los requerimientos ambientales están cubiertos la mayor parte del año. En Los Riegos y El Carrizal el flujo base está por debajo del requerimiento ambiental.

Los meses críticos para las especies son enero en El Carrizal y diciembre en Los Riegos y Los Desamparados, durante los cuales los requerimientos ambientales superan el escurrimiento del cauce, es decir, los requerimientos ambientales en estos meses no se cubren. Una de las causas de esta circunstancia son las extracciones de agua para el riego; las zonas aledañas al río están cubiertas de una gran variedad de cultivos siendo los principales jitomate y maíz. De este último, hay una variedad que se cultiva bajo el régimen hídrico de riego que tiene un ciclo agrícola que va de otoño a invierno (SAGARPA, 2015) y que, por lo tanto, requiere continuamente del recurso en este periodo.

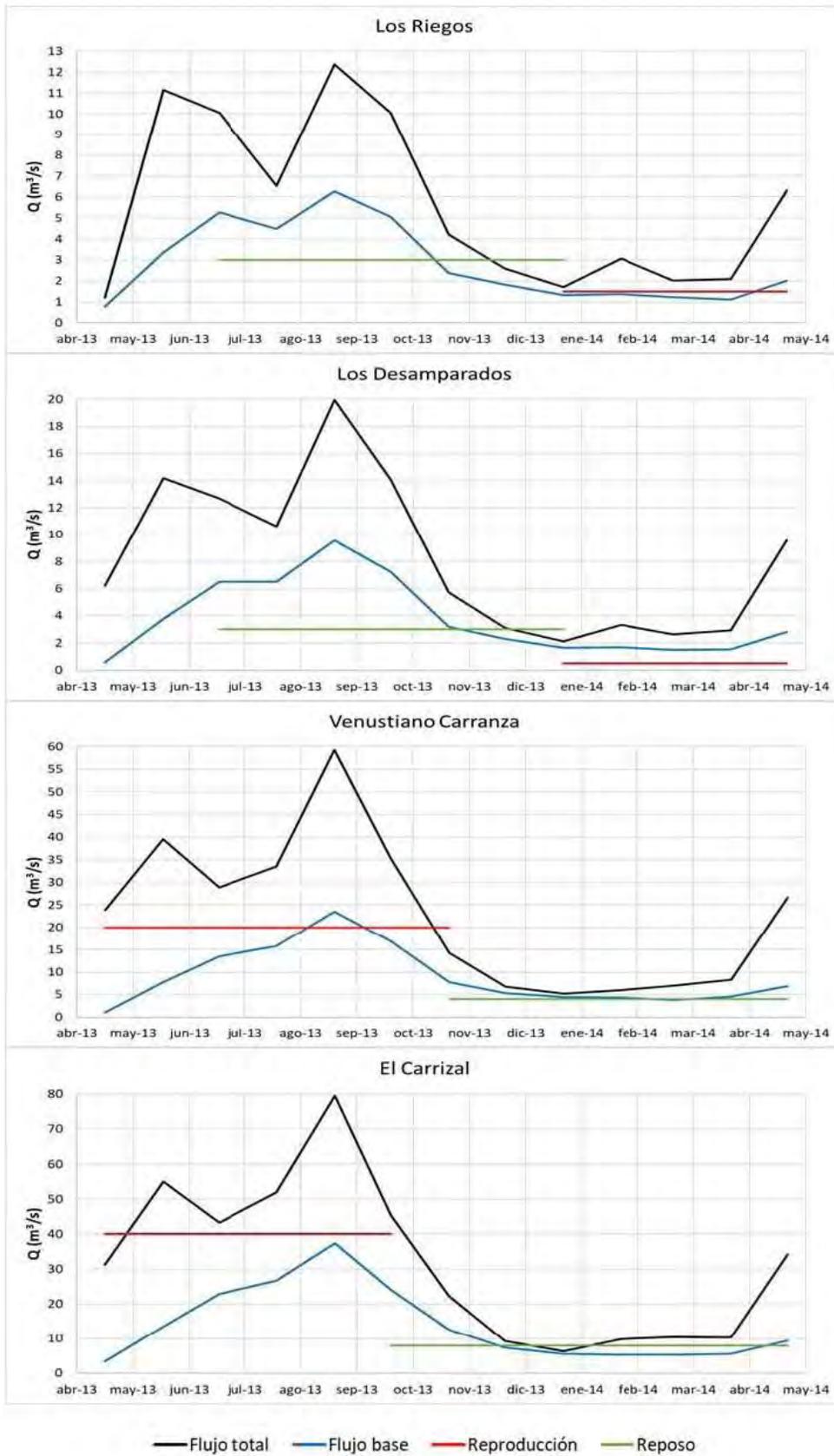


Figura 36. Variación de los flujos observados en el Río Grande de Comitán y los requerimientos ambientales para las diferentes etapas de vida de las especies de peces.

Capítulo 7. Conclusiones

- El flujo total en el cauce fluvial está conformado por dos componentes: el escurrimiento directo y el flujo base. Durante la temporada de lluvias ésta genera gran cantidad de escurrimiento directo, sin embargo, cuando ésta cesa, el caudal circulante en el cauce proviene de los aportes del agua subterránea.
- Las actividades socioeconómicas que se desarrollan en la cuenca requieren continuamente del recurso hídrico, siendo principalmente para el suministro agrícola y urbano de la región. Las extracciones continuas de aguas superficiales y subterráneas, principalmente durante la temporada de estiaje, disminuyen los caudales circulantes en el cauce provocando la reducción del hábitat para las diferentes especies de peces que componen el sistema fluvial.
- Durante la temporada de estiaje el flujo aportado por el agua subterránea constituye gran parte del flujo total en el cauce, siendo enero el mes con mayor porcentaje de flujo base.
- El Río Grande de Comitán es un río receptor; una parte del flujo subterráneo es percibido por el río y otra fluye a través del subsuelo continuando su transcurso hacia el noreste de la cuenca.
- El caudal ambiental es altamente sensible a las variaciones de flujo base, principalmente en la temporada de estiaje ya que en algunos sitios el flujo base constituye el requerimiento mínimo por lo que disminuir el flujo implica la alteración del hábitat.
- Las consideraciones ambientales no sólo del agua superficial sino también del agua subterránea permite una gestión integral del recurso mediante el establecimiento de un esquema de aprovechamiento del agua subterránea que respete el flujo base y el caudal ambiental.
- La relación entre el flujo base y el requerimiento ambiental puede ser usado como un indicador de la gestión ambiental, de esta manera si la relación es del 100% puede decirse que se está haciendo una buena gestión del recurso porque además de abastecer la demanda humana de agua, las especies tienen las condiciones óptimas para desarrollarse. Un ejemplo de una buena gestión del agua es el sitio Venustiano Carranza, donde el requerimiento ambiental coincide con el flujo base durante la temporada de estiaje.

Referencias

- Aldama, 2000. Hidrología de avenidas. Conferencia Enzo Levi. Ingeniería Hidráulica en México 15 (3), 5-46.
- Alvarado-Velázquez J. 2015. Evaluación espacial de la contaminación potencial puntual y difusa en la Cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 90p
- Aparicio, M. F. 1997. Fundamentos de hidrología de superficie. México: Limusa. 302 p.
- Arellano-Contreras, U. y Jiménez-Salgado, E. 2011. Evaluación Geológico-Estructural del complejo volcánico el Chichonal, Chiapas, como fuente de energía alterna (resumen) en Memorias del XIX Congreso anual, Los Humeros Puebla, México, Asociación Geotérmica Mexicana, 23 p.
- Armas-Vargas, F., Escolero, O., García de Jalón, D., Zambrano, L., González del Tánago, M., y Kralisch, S. 2017. Proponiendo el caudal ambiental basado en la simulación del hábitat físico para cinco especies de peces en la Cuenca baja del Río Duero, México. *Hidrobiológica*, 27 (2): 185-200
- Armour, C. L., Fisher, R. J., y Terrel, J. W. 1984. Comparison of the use of the Hábitat Evaluation Procedures (HEP) and the Instream Flow Methodology (IFIM) in aquatic analyses. U. S. Fish Wildl. Serv. FWS/OBS-84/11. 30 pp.
- Armour, C.L. y J.G. Taylor, 1991. Evaluation of the instream Flow incremental methodology by U.S. Fish and Wildlife Service field users. *Fisheries* 16(5):36-43
- Arumí, J. L., Rivera, D., Muñoz, E. y Billib, M. 2012. Interacciones entre el agua superficial y subterránea em la región del Bío Bío de Chile. *Obras y Proyectos* 12, 4-13.
- Bahena-Bahena, J. 2014. Cartografía temática de la Cuenca Hidrográfica del Sistema Lagunar de Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Guerrero. 88 p.
- Barajas-García, F. A., 2017. Análisis de nutrientes en río, pozos y norias de la cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. 114 p.
- Bencala, K. E. 2011. Stream-Groundwater Interactions. In: Peter Wilderer (ed.) *Treatise on Water Science 2*, Academic Press, Oxford: 537-546.

- Bovee, K. D. 1982. A Guide to Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildlife Service. Washington. 248 pp.
- Bovee, K. D. 1982. A Guide to Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildlife Service. Washington. 248 pp.
- Bovee, K. D. 1986. Development and Application of Habitat Suitability Criteria for Use in The Instream Flow Incremental Methodology, US Fish and Wildlife Service Instream Flow Information Paper No. 21.
- Bovee, K. D. y Cochnahuer, T. 1977. Development and evaluation of weighted criteria probability-of-use curves from instream Flow assessment. Instream Flow Information Paper 3. FWS/OBS-77/63. Biological services Programm, United States Fish and Wildlife Service.
- Bovee, K. D. y Milhous, R. T., 1978. Hydraulic simulation in Instream Flow studies: theory and techniques. Instream Flow Information Paper No. 5. U.S. Fish and Wildlife Service, FWS/OBS-78/33.
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., Taylor, J. y Henriksen, J. 1998. Stream hábitat analysis using the instream Flow incremental methodology, 131 pp. Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004, United States Geological Survey Fort Collins.
- Brown, C. y J. King, 2003. Environmental flows: Concepts and Methods. En R. Davis y R. Hirji (eds.) *Water Resource and Environment* Technical Note 1. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.
- Brown L. R., Gray R. H., Hughes R. M. y Meador M. R. 2005. Introduction to effects of urbanization on stream ecosystems. *Am Fish Soc Symp* 47:1–8
- Brown L. R., Cuffney T. F., Coles J. F., Fitzpatrick F., McMahon G., Steuer J., Bell A. H. y May J. T. 2009. Urban streams across the USA: lessons learned from studies in 9 metropolitan areas. *J N Am Benthol Soc* 28(4):1051–1069
- Cavendish, M. G. y M.I. Duncan, 1986. Use of the instream Flow incremental methodology: a tool for negotiation. *Environmental Impact Assessment Review* 6:347-363.
- Chávez, M. O., Mattheeuws, A. E. y Pérez, M. H. 1989. Biología de los Peces del Río San Pedro en Vista para Determinar su Potencial para la Piscicultura. INIREB. Xalapa, Veracruz, México.

- Chu, X., y Steinman, A., 2009. Event and continuous hydrological modelling with HEC-HMS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135 (1), 119-124.
- Cirno, C. P. y McDonnell, J. J. 1997. Linking the hydrologic and biogeochemical controls of nitrogen transport in near-stream zones of temperate-forested catchments: a review. *Journal of Hydrology* 199(1-2), 88-120.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). 2012. Estudio para conocer la calidad el agua de las Lagunas de Montebello, Chiapas, Tomo I: Hidrometeorología, Reporte Técnico. Subdirección de Proyectos y Construcción. 615 p.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). 2007. Programa de conservación y manejo: Parque Nacional Lagunas de Montebello. Ed. SEMARNAT. México: 197 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA). Disponible: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos>
- Córdoba, R. y A. Iza. 2007. Environmental flows and water reform in Central America: Challenge and Opportunities for their implementation. *Proceeding of 10th International Riversymposium and Environmental Flows Conference*. Brisbane Australia.
- Custodia, E. y Llamas, M. R. 1983. Hidrología Subterránea. Omega. 2350 p.
- Daily, G. C. 2001. Ecological forecasts. *Nature* 411:245-245.
- De la Lanza Espino, G., J. L. Carbajal Pérez, S. A. Salinas Rodríguez y J. E. Barrios Ordóñez. 2012. Medición del caudal ecológico del río Acaponeta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo. *Investigaciones Geográficas* 78: 62-74. DOI:10.14350/rig.35269
- Delleur, J. W. 1999. *The Handbook of Groundwater Engineering*. CRC Press. Boca Raton. Florida.
- Diez Hernández, J. M. y Martínez de Azagra Paredes, A., 2008. Desarrollo de un modelo de velocidad complementario para la evaluación ecohidráulica del hábitat fluvial. Avances en Recursos Hidráulicos No. 17. Universidad de Colombia. Medellín, Colombia. 3-15 pp. Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=145016896001>

- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2012. NMX-AA-159-SCFI-2012. Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. Diario Oficial de la Federación. México, D.F. Septiembre 2012. 96 p.
- Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., y Méndez, A. B. 2008. Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. Instituto de Ingeniería. UNAM. México, D.F. 100 p.
- Dunbar M.J., A. Gustard, M.C. Acreman y C.R. Elliot. 1998. Review of Overseas Approaches to Setting River Flow Objectives. Environment Agency R&D Technical Report W6B (96)4. Institute of Hydrology: Wallingford, U.K.
- Durán, C. L., Escolero, O. F., Muñoz, E. FM., Castillo, M. C. S. y Rodríguez, G. S. R. 2014. Cartografía geomorfológica a escala 1:50 000 del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas (México): *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66 (2), 263-277.
- Durán-Calderón J. I. 2013. Análisis geomorfológico del Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Geológica. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D. F.
- Dyson, M., Bergkamp, G. y Scanlon, J., (eds) 2003. Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. Tr. José María Blanch. San José, C.R.: UICN-ORMA. 125 pp.
- Elmore A. J. y Kaushal S. S. 2008. Disappearing headwaters: patterns of stream burial due to urbanization. *Ecol Soc Am* 6(6):308–312
- Fernald, A. 2002. Groundwater/Surface Water Interactions. New Mexico Annual Water Conference Proceedings. WRRRI: 46th Proceedings, 323, 49-57.
- Fleming M. J., 2010. Hydrologic Modelling System HEC-HMS. Quick Start Guide. V.3.5p: Washington D C. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Technical Report, 52p.
- Fragnoud, E. 1987. Preferences d’habitat de la truite fario (*Salmo trutta fario*, L. 1758) en riviere. (Quelques cours d’eau du Sud-Est de la France). Tesis doctoral. Laboratoire d’HYDROECOLOGIE QUANTITATIVE. CEMAGREF. Lyon. 435 pp.
- Gaitán, R. D., y Nelson, J., 2008. Computation of changes in the runoff régime of the Lake Santa Ana Watershed (Zacatecas, México). *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 13 (2), 155-167.

- García de Jalón, L., D. 1998. El Régimen Ecológico de caudales: bases y criterios para su aplicación en los ríos españoles. Simposio sobre la Gestión Ecosistémica del Agua: una apuesta por la vida. Zaragoza. Septiembre 1998.
- García, L. P. 2011. Simulación del escurrimiento de la cuenca del río Tecolutla generado por tormentas severas bajo escenarios de cambio climático. Xalapa, México. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana. 33 p.
- García-Rodríguez, E.; R. González-Villela, P. Martínez-Austria, J. Athala-Molano y G. Paz-Soldán. 1999. *Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudal de reserva ecológicos en México*. CNA-IMTA. México. 190 pp.
- Gaspari, J., Senisterra, E., y Marlats, M. 2007. Relación precipitación-escorrentía y número de curva bajo diferentes condiciones de uso de suelo. Cuenca modal del sistema serrano de La Ventana, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias* 39(1), 21-28.
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J. y Nathan, R. J. 2004. *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. 2nd Edition. Wiley. England. 448 p.
- Guzmán-Speziale, M. y Meneses-Rocha, J. J. 2000. The North America-Caribbean plate boundary west of the Motagua-Polochic fault system: a fault jog in Southeastern Mexico: *Journal of South American Earth Sciences* 13, 459-468.
- Hardy, T., Panja, P. y Mathias, D. 2005. WinXSPRO, A Channel Cross Section Analyzer, User's Manual, Version 3.0. General Technical Report RMRS-GTR-147. United States Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, Colorado. 94 p.
- Heggenes, J. 1990. Habitat utilization and preferences in Brown trout (*Salmo trutta*) and juvenile Atlantic salmon (*S. Salar*) in streams. Dr. Philos. Thesis, Department of Nature Conservation Agricultural University of Norway, AS & Freshwater Ecology and Inland Fisheries Laboratory Zoological Museum. University of Oslo, Norway.
- Hernández-Magaña, A. E. 2015. Microorganismos en agua como indicadores del proceso de degradación de la cuenca del Río Grande de Comitán-Lagos de Montebello, Chiapas, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. 85 p.
- Hill, MT.; W.S. Platts y R.L. Beschta. 1991. Ecological and geomorphological concepts for instream and out-of-channel flow requirements. *Rivers* 2(3):198-210.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2007. Conjunto de datos vectoriales Red hidrográfica 1:50 000. Edición 2.0. Subcuenca RH30GI-R. Comitán, Chiapas, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2010. Anuario Estadístico de Chiapas.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. Carta hidrológica de aguas superficiales 1:250 000.
- Juárez-Hernández, E. L. 2014. Análisis hidrogeoquímico de la cuenca del Río Grande de Comitán. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 108 p.
- King, J.M., R.E. Tharme, M.S. de Villiers (eds.). 2000. *Environmental Flow Assessments for Rivers: Manual for the Building Block Methodology*. Water Research Commission: Pretoria, South Africa.
- Konrad, C. P. y Booth, D. B. 2005. Hydrologic changes in urban streams and their ecological significance. *Am Fish Soc Symp* 47:157-177.
- Loar, J.M; M.J. Sale y G.F. Cada. 1986. Instream Flow needs to protect fishery resources. Water Forum '86: World Water Issues in Evolution. Proceedings of ASCE Conference. Long Beach, California, 4-6 August.
- López-Rivera, S. 2017. Uso de fertilizantes nitrogenados en la cuenca del Río Grande de Comitán, ¿La lixiviación representa un problema ambiental? Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. 116 p.
- Lyne, V. D. y Hollick, M. 1979. Stochastic time-variable rainfall runoff modelling. *Hydrology and Water Resources Symposium*, Institution of Engineers Australia, Perth: 89-92.
- Lyons, J., Gutiérrez-Hernández, A., Díaz-Pardo, E., Soto-Galera, E., Medina-Nava, M. y Pineda-López, R. 2000. Development of a preliminary index of biotic integrity (IBI) based on fish assemblages to asses ecosystem condition in the lakes of central Mexico. *Hidrobiología* 418: 57-72.
- Magdaleno-Mas, F., 2004. Caudales ecológicos: conceptos básicos, métodos de cálculo y nuevas interpretaciones. Centro de estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX. Ministerio de Fomento. *Ingeniería Civil* 135/2004. España.
- Martínez-Angeles, M. 2015. Caracterización de los suelos de la cuenca del Río Grande, como soporte para entender la dinámica de contaminantes que llegan al Sistema Lagunar de

- Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Universidad Nacional Autónoma de México. 139 p.
- Mayo Rustarazo M., 2000. Determinación de Regímenes de Caudales Ecológicos Mínimos. Adaptación del Método IFIM-PHABSIM y Aplicación a los Ríos Españoles. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. España. 686 p.
 - Milhous, R.T.; M.A. Urdike y D.M. Schneider, 1989. *Physical Habitat Simulation System Reference Manual-Version 2*. Instream Flow Information Paper 26. USDI Fish and Wildlife Services, Biology Report 89(16). Washington, D. C. 403 p.
 - Miller, R. R., Minckley, W. L. y Norris, S. M. 2009. Peces dulceacuícolas de México. Primera edición: 2009. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.
 - Mora, P. L., Bonifaz, R. y López-Martínez, R. 2016. Unidades geomorfológicas de la cuenca del Río Grande de Comitán, Lagos de Montebello, Chiapas-México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68 (3) 337-394 pp.
 - Morgan R. P. y Cushman S. F. 2005. Urbanization effects on stream fish assemblages in Maryland, USA. *J N Am Benthol Soc* 24(3): 643–655
 - Olea-Olea, S. y Escolero, O. A. 2018. Nutrients load estimation to a lake system through the local groundwater Flow: Los Lagos de Montebello, México. *Journal of South American Earth Sciences* 84 (2018) 201-207. Publicado online 26 Marzo 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.03.016>
 - Ortega, F. 2010. Provincia Petrolera Cinturón Plegado de Chiapas. Informe Interno, Pemex Exploración y Producción. Ciudad de México, México. 33 p.
 - Ortega-Gutiérrez, F., Mitre, S. L., Roldán, Q. J., Aranda, G. J. J., Morán, Z. D., Alaniz, A. S. y Nieto, S. A. 1992. Carta Geológica de la República Mexicana, 1:2 000 000: Washington, Williams & Heinz (Mapa), Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, mapa con texto explicativo, 78 p.
 - Orth, D. J. y Maughan, E. 1981. Evaluation of the Montana Method for Recommending Instream Flows in Oklahoma Streams. En: *Proceedings of the Oklahoma Academy of Science* 61. 62-66.

- Ortiz-Haro, G. A. 2017. Cambios en la estructura de la comunidad íctica a lo largo de un gradiente de perturbación ambiental, en el Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas. Universidad Nacional Autónoma de México. 68 p.
- Padilla-Sánchez, R. J., 2007. Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LIX (1), 19-42.
- Parra-Carrillo, L. A. 2017. Caracterización física del suelo y su relación con la infiltración de agua en 2 parcelas agrícolas en la cuenca del Río Grande de Comitán, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura Unidad Ticomán. Instituto Politécnico Nacional. 82 p.
- Payne, T. R., Eggers, S. D. y Parkinson, D. B. 2004. The Number of Transects Required to Compute a Robust PHABSIM Habitat Index. *Hydroécol. Appl.* Tome 14 (1). 27-53 pp.
- Peckenpaugh, J. M. y Dugan, J. T. 1983. Hydrogeology of parts of the Central Platte and Lower Loup Natural Resources Districts. Nebraska. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigation. Report 83-4219, 100 pp.
- Pérez, L. H., Pérez L. G. y Pérez L. M. 2007. Caracterización y diagnóstico del río Grande del Comitán, Estado de Chiapas en la Región Frontera Sur, Comité de Cuenca Río Grande Lagunas de Montebello, México.
- Petts, G.E. 1989. Perspectives for ecological management of regulated rivers. Pp. 3-24. En J.A. Gore y G.E. Petts (eds.) *Alternatives in Regulated River Management*. CRC Press, Florida.
- Postel, S. y R. Brian, 2010. Ríos para toda la vida. La gestión del agua para las personas y la naturaleza. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, The Nature Conservancy*. México, D. F. 277 p
- Proff, N.J. y J.D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K.L. Prestgaard, B.D. Richter, R.E. Sparks y J.C. Stromberg. 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience* 47 (11): 769-784.
- Quezada-Muñeton, J. M., 1987. El Cretácico Medio-superior, y el límite Cretácico superior-Terciario Inferior en la Sierra de Chiapas. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 34(1), 3-97.

- Rodríguez, C. 2007. Determinación de una metodología para estimar el caudal de compensación en los ríos de Costa Rica con base en dos estudios de caso. Taller internacional de compensación (ambiental) en sistemas regulados por proyectos hidroeléctricos. San José, Costa Rica.
- Rodríguez, L. Y. y Marrero, D. L., 2010. Metodología para la simulación hidrológica de eventos extremos máximos en ausencia de datos hidrométricos a escala horario. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 19 (4), 53-59.
- Roy A. H., Dybas A. L., Fritz K. M. y Lubbers H. R. 2009. Urbanization affects the extent and hydrologic permanence of headwater streams in a midwestern US metropolitanarea. *J. N. Am Benthol Soc* 28(4), 911-928
- Sánchez, S. R. 2012. Hidráulica Subterránea: principios básicos. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España. 13 p.
- Santacruz de León, G. y M. Aguilar-Robledo. 2009. Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiológica* 19 (1), 25-32.
- Schmitter-Soto, J. J. 1998. Catálogo de los peces continentales de Quintana Roo. El Colegio De la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. 2001. *Monitor Agroeconómico del Estado de Chiapas, México*. Recuperado el 15 de enero de 2015, de <http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/pablo/Documentos/monitor%20estados/Chiapas.pdf>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2015. Agenda Técnica Agrícola de Chiapas. Segunda edición. 254 p.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). 2000. Programa de Trabajo 2012. Disponible en: http://www.sct.gob.mx/fileadmin/migrated/content_uploads/PT-SCT-2012.pdf consulta: 20/03/2018
- Secretaría de Turismo (SECTUR). 2013. Diagnóstico de competitividad y sustentabilidad turística del Pueblo Mágico: Comitán de Domínguez. Chiapas, México. 26 p.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1997 – 1:250 000; issuu.com/inesachiapas/docs/plan_de_gestion_de_la_cuenca_del_rio

- Servicio Geológico Mexicano (SGM). 2012. Atlas de peligros de la ciudad de Comitán, Estado de Chiapas, México.
- Sharp J. M. Jr. 2010. The impacts of urbanization on groundwater systems and recharge. *Aqua Mundi* 1,51–56
- Singh, V. P. 1995. *Computer model of watershed hydrology*. Water Resources Publications.
- Smith R. F. y Lamp W. O. 2008. Comparison of insect communities between adjacent headwater and main-stem streams in urban and rural watersheds. *J N Am Benthol Soc* 27(1), 161–175
- Sophocleous, M. 2002. Interaction between groundwater and surface water. The state of the Science. *Hydrogeology Journal* 10, 52-67.
- Soto Galera, E. 2006. Ictiofauna de los corredores biológicos Sierra Madre del Sur y Selva Maya Zoque. Instituto Politécnico Nacional. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. Y026. México D. F.
- Stalnaker, C. B. 1980. The use of habitat structure preferenda for establishing Flow regimes necessary for maintenance of fish habitat. En: (Warn, J.V. y Stanford, J. A. eds.) *The ecology of regulated streams*. Plenum Publishing Corporation. 321-337 pp.
- Stalnaker, C.B. 1982. Instream Flow assessments come of age in the decade of the 1070's. In Mason W.T. and S. Iker (eds.) *Research on Fish and Wildlife Habitat*, EPA-600/8-82-022. Office of Research and Development. US Environmental Protection Agency: Washington, D.C. 119-142 pp.
- Stalnaker, C.B. 1998. The Instream Flow Methodology. In Blazkova S.; C. Stalnaker and O. Novicky (eds.) *Hydroecological Modelling. Research, Practice, Legislation and Decisión-making*, Report by US Geological Survey, Biological Research Division and Water ResearchInstitute, Fort Collins, and Water Research Institute. Praha, Czech Republic. VUV: Praha, 9-11.
- Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and relates environmental resources. *Fisheries* 1(4):6-10.
- Tharme, R.E. 1996. Review of International Methodologies for the Quantification of the Instream Flow Requirements of Rivers. Water law review final report for policy development

for the Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria. Freshwater Research Unit, University of Cape Town, South Africa.

- Tharme, R.E. 2003. A global perspective on environmental Flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental Flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19, 397-441.
- Tóth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater Flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 68(16), 4795-4812.
- Trihey, E.W. y C.B. Stalnaker, 1985. Evolution and application of instream Flow methodologies to small hydropower developments: an overview of the issues. In: White, R.G. and R.H. Hamre (eds.) Proceedings of the Symposium on Small Hydropower and Fisheries, Olson. United States Geological Survey (USGS). 2000. Aurora, Colorado.
- Vargas, M. J. y De Sostoa, A. 1996. Life history of *Gambusia holbrooki* (Pisces, Poeciliidae) in the Ebro delta (NE Iberian peninsula). *Hidrobiología* 341: 215-224
- Vargas, P. V., Arismendi, I., Lara, G., Millar, J. y Peredio, S. 2010. Evidencia del solapamiento de micro-hábitat entre juveniles del salmón introducido *Oncorhynchus tshawytscha* y el pez nativo *Trichomycterus areolatus* en el río Allipén, Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 45 (2), 285-292.
- Velázquez-Velázquez, E. 2007. Monografía de *Profundulus hildebrandi* Miller, 1950. Pez endémico de Chiapas. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. 35 p.
- Vilanova, E. y Jordana, S., 2008. Guía metodología para la determinación de los caudales ambientales. Capítulo de aguas subterráneas. Tomo II: Ejemplos de interacción masas de agua superficial-subterránea en diferentes casos específicos. Instituto Geológico y Minero de España. 35 p.
- VOOS, K.A. 1981. Simulated use of the exponential maximum likelihood technique in developing suitability of use functions for fish habitat. Doctoral dissertation Utah State University. Colorado, USA.
- Ward, J.V. y J.A. Stanford. 1987. The ecology of regulated streams: past accomplishments and directions for future research. In: Craig. J.F. and J.B. Kemper (eds.) *Regulated Streams: Advances in Ecology*. Plenum Press: New York. 391-409 pp.

- Winter, T. C. 1976. Numerical simulation analysis of the interaction of lakes and ground water. Geological Survey, Professional Paper 1001, 45 p.
- Winter, T. C. 1999. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal* 7, 28-45.
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L. y Alley, W. M. 1998. Ground Water and Surface Water a Single Resource. United States Geological Survey. Denver, Colorado. Circular 1139, 79 p.
- Winter T. C. 2007. The role of ground water in generating streamflow in headwater areas and in maintaining base flow. *J Am Water Resour Assoc* 43(1), 15–25
- Woessner, W. W. 2000. Stream and fluvial plain groundwater interactions: rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water* 38(3), 423-429.
- World Comission on Dams (WCD). 2000. Dams and Development. A New Framework for Decision-making. The report of the World Commission on Dams. Earthscan Publications: London.