



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**“ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO  
EN LOS TUXTLAS, VERACRUZ”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS**

**(BIOLOGÍA AMBIENTAL)**

**P R E S E N T A**

**BIÓL. DULCE MARÍA MORENO MIRANDA**



**DIRECTOR DE TESIS: DR. FRANCISCO JAVIER ÁLVAREZ  
SÁNCHEZ**

**MÉXICO, D.F.**

**2010**



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

OFICIO FCIE/DEP/486/09

ASUNTO: Oficio de Jurado

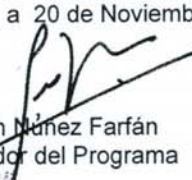
**Dr. Isidro Ávila Martínez**  
**Director General de Administración Escolar, UNAM**  
**Presente**

Me permito informar a usted que en la reunión ordinaria del Comité Académico del Posgrado en Ciencias Biológicas, celebrada el día **26 de octubre de 2009**, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de **MAESTRA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS (BIOLOGÍA AMBIENTAL)** del (la) alumno (a) **MORENO MIRANDA DULCE MARIA** con número de cuenta **400051224** con la tesis titulada **"ESTIMACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO EN LOS TUXTLAS, VERACRUZ."**, realizada bajo la dirección del (la) **DR. FRANCISCO JAVIER ALVAREZ SANCHEZ**:

Presidente: M. EN C. MA. JULIA CARABIAS LILLO  
Vocal: DR. OSCAR ARNOLDO ESCOLERO FUENTES  
Secretario: DR. FRANCISCO JAVIER ALVAREZ SANCHEZ  
Suplente: DRA. SILVIA CASTILLO ARGUERO  
Suplente: DR. JORGE LOPEZ BLANCO

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

**Atentamente**  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D.F., a 20 de Noviembre de 2009.

  
Dr. Juan Muñoz Farfán  
Coordinador del Programa

JNF/DCRV/ASR/grf\*

## **Agradecimientos**

Al Posgrado en Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada durante los estudios de posgrado.

Al Programa de Apoyo a Estudios de Posgrado de la UNAM.

Al Comité Tutoral, integrado por el Dr. Manuel Maass Moreno, la M. en C. Julia Carabias Lillo y el Dr. Javier Álvarez Sánchez, por sus valiosas aportaciones durante la realización de este trabajo.

Muy especialmente al Dr. Jorge López Blanco, quien fungió como Tutor invitado, ya que su ayuda, disposición y comentarios enriquecieron este trabajo.

A los miembros del jurado de examen, el Dr. Oscar Escolero Fuentes y en especial a la Dra. Silvia Castillo Argüero, por la revisión y los comentarios al documento.

A la Red Mexicana de Estudios Ecológicos a Largo Plazo (Red Mex-LTER), en especial a los integrantes del proyecto de Ecohidrología, de donde nació la inquietud de este trabajo y por todo el apoyo durante la realización del mismo.

## *Agradecimientos*

A la Universidad Nacional Autónoma de México, nuestra máxima casa de estudios.

Al Dr. Javier Álvarez, por el apoyo y la amistad, que me ha brindado siempre.

A Irene Sánchez Gallén y a Silvia Castillo Argüero, su apoyo, sus comentarios, su amistad, son inigualables.

A la Dra. Guadalupe Barajas, por ser una excelente maestra y amiga.

A Lyliana Rentería y a Luz María Aranda, por su gran ayuda y sus atenciones.

A todo el personal de la Estación de Biología Tropical "Los Tuxtlas".

A todos con los que he convivido día con día y he compartido tiempo y espacio en el laboratorio de Ecología, Jorge, Zenón, Eduardo, Hugo, Beto, Yuriana, Isael, Eunice, Esthela, Nelly, Wendy, Irenita, Julio, Marcela, Edgar, Iván, Víctor, Nancy y muchísimos más.

A Marco Antonio Romero, un verdadero *ángel guardián* en el mundo de la computación.

A las nuevas generaciones del taller y del *lab*, por que sigan por este apasionante mundo de la Ecología.

A Ernesto, Oswaldo, Omar y a mí querido Diego, por todo lo compartido, aprendido, bebido, bailado y sobre todo lo que nos hemos reído...aún en los *momentos en los que no he estado*.

A aquellos que han llegado *para quedarse* y hacernos la vida más divertida, Carlos (*Primo!*), Wolke (*fabelhaft!*), Héctor, Eunice e Isela (*Reinitas!*), Mari...

A Virginia, Jennifer, Janet, Camelia, Chavela, Denisse y muy especial a Deborah, porque los momentos vividos con ustedes serán un maravilloso y muy divertido recuerdo. *Las recordare siempre!*

A Iván Chirino, ser tu amigo es grandioso y por que compartir una *Carolus contigo* es toda una aventura!

A Dany, por que sigas presente, hoy mañana y siempre.

A José Luis (*Pacha!*) y Alberto (*muñeco!*), *mis cuates for ever!*

A los *príncipes*, Edgar (*Bunbury!*) y Javier, ojalá sigamos contando con su compañía.

A Imuris, Rocío y especialmente Edith (*mi Roomi!*), por los increíbles viajes por Brasil, Jamaica, Colombia y...Acapulco (mil y un recuerdos!) y porque le dieron a mi vida un paraíso de amistad, experiencias, vivencias y mucha diversión.

A Lorena Noemí (*à nouveau tu es avec moi!*), por ser a través de los años, un increíble apoyo y una gran amiga.

A Juan Carlos Peña, jefe, compañero, colega y muy buen amigo, porque visualicemos seguir trabajando juntos y sigamos adelante siempre.

A Zaharina, por esas salidas nocturnas y porque el *salir de cacería*, jamás será lo mismo con nadie más.

A las *princesas*, Lizbeth y Gabriela, su tiempo, sus consejos, su amistad, lo vivido, lo contado, lo soñado, *ah!*...y por compartir el título nobiliario... *somos lo máximo princess!*

A los que siguen siendo amigos a pesar de las distancias y los rumbos diferentes, a todos aquellos que vamos dejando, a los que sólo escuchan pero te dicen mil palabras con la mirada, a los que se quedan por tan sólo un momento, a todos los que de una u otra manera contribuyen, ayudan y apoyan a cumplir metas en la vida, a los que nos acompañan por el camino, porque sin ellos, nada sería lo mismo.

*Gracias!*

Si deseamos la continuidad de la vida como la conocemos, es necesaria la creación de una nueva cultura que reconozca y respete el valor del agua. De esta nueva cultura dependerá la supervivencia de las futuras generaciones y especies del planeta.

*Lynn Margulis.*

Produce una inmensa tristeza pensar que la naturaleza habla mientras que el género humano no escucha.

*Victor Hugo.*

*A mis padres Víctor Manuel y Marilú*

*A mi hermana Mariposa*

*Por su compañía, su apoyo y su cariño*

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	
1.1	Recurso agua .....	10
1.2	Condición del recurso agua en México .....	11
1.3	Ciclo hidrológico .....	13
1.4	Balance hídrico .....	15
1.5	Cuenca hidrográfica .....	17
<b>II.</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	
2.1	Eco-hidrología .....	19
2.2	Estudios a largo plazo .....	21
2.3	Los Tuxtlas, Veracruz .....	23
2.3.1	Localización geográfica .....	23
2.3.2	Clima .....	24
2.3.3	Suelo .....	25
2.3.4	Vegetación .....	27
2.3.5	Hidrología .....	28
2.3.6	Aspectos socioeconómicos .....	30
<b>III.</b>	<b>OBJETIVOS</b>	
3.1	Objetivo general .....	31
3.2	Objetivos específicos .....	31
<b>IV.</b>	<b>MÉTODOS</b>	
4.1	Delimitación de la cuenca .....	32
4.2	Obtención del balance hídrico .....	36
4.3	Estimación del balance hídrico en zonas no conservadas.....	38
<b>V.</b>	<b>RESULTADOS</b>	
5.1	Delimitación de la cuenca .....	41
5.2	Balance hídrico .....	43
5.3	Estimación del balance hídrico en zonas no conservadas .....	45
<b>VI.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	
6.1	Cuencas hidrográficas .....	50
6.2	Dinámica hidrológica .....	52
6.3	El cambio de uso de suelo y la dinámica hidrológica .....	55
<b>VII.</b>	<b>PERSPECTIVAS</b> .....	59
<b>VIII.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	61
	<b>LITERATURA CITADA</b> .....	62
	<b>ANEXO</b> .....	68



## RESUMEN

El agua es un recurso indispensable para el desarrollo social y económico, además de intervenir en gran medida en la dinámica funcional de los ecosistemas. Por ello, el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas constituye una dimensión apropiada para evaluar los procesos físicos, ecológicos y sociales que intervienen en una región determinada.

En el marco de una propuesta de investigación de la Red Mexicana de Estudios Ecológicos a Largo Plazo (Red MEX-LTER), se delimitó una cuenca hidrográfica para utilizarla como unidad de estudio. Dicha cuenca se encuentra dentro de la región de Los Tuxtlas al sur del estado de Veracruz. Utilizando Sistemas de Información Geográfica y considerando parámetros morfográficos se determinó que la extensión de la cuenca es de 84 km<sup>2</sup>, está formada por suelos de origen volcánico y el tipo de vegetación es una selva alta perennifolia. En la cuenca, las lluvias son muy abundantes (4,399 mm anuales) lo que genera una entrada constante de agua al sistema.

Al realizar la estimación del balance hídrico se utilizó el método Thornthwaite-Mather, en el cual se analizan varios componentes del ciclo hidrológico comparando las ganancias y las pérdidas de agua de un lugar y un periodo determinados, que en el caso de nuestro estudio fue de 23 años para la propia estación climatológica de la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas, y de 42 años para las siete estaciones de mayor influencia a la cuenca delimitada. Los resultados indican una disponibilidad adecuada de agua durante diez meses al año y sólo un pequeño déficit en el mes de mayo, siendo este mes el que presenta los menores valores de escorrentía (37 mm) llegando a ser hasta de 417 mm en el mes de diciembre.

Debido al intenso cambio de uso de suelo al que está sometida la región, se realizó una estimación del balance hídrico con el método de los polígonos de *Thiessen*, con el objeto de analizar de forma más completa la cuenca y poder realizar un análisis general de la condición del recurso hídrico para las zonas en las que no se contaba con información climatológica. Dichas zonas son no conservadas, por lo que se esperaría que la dinámica del agua se vea alterada si la presión de deforestación continúa.

## **ABSTRACT**

Water is an indispensable resource for social and economic development, as well as intervening heavily on the functional dynamics of ecosystems. Therefore, the hydrological functioning of ecosystems is an appropriate level for assessing the physical, ecological and social factors involved in a particular region.

As part of a research project of the Mexican Long Term Ecological Research Network (Red MEX-LTER), a watershed was outlined like a study' unit. The basin is in Los Tuxtlas area at southern Veracruz State. Using Geographic Information Systems and considering morphographic parameters, we found that the river length is 84 km<sup>2</sup>, has volcanic soils and the main vegetation type is a tropical rain forest. In the basin, rainfall is abundant (4.399 mm per year) which generates a constant flow of water into the system.

To estimate the water balance the Thornthwaite-Mather method was used, which analyze several components of the hydrological cycle by comparing the gains and losses of water from one place in a certain period, that in the case of our study was 23 years from their own weather station of the Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas, and 42 for the seven stations of greater influence in the enclosed basin. Results indicate accurate water availability for ten months and only a small deficit in May; this month presented the lowest runoff values (37 mm) reached up to 417 mm in December.

Due to the intense land use changes which govern the region, an estimate of the water balance with the method of Thiessen polygons was performed, in order to analyze the watershed and to conduct a general analysis of the water resources condition for the areas where there were no weather information. These areas are not preserved, as would be expected that water dynamics will be affected if deforestation continues.

## **I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Recurso agua.**

El agua es un elemento indispensable para el desarrollo de la vida en la Tierra. A lo largo de la historia de nuestro planeta, las sociedades humanas se han establecido en sitios próximos a cuerpos de agua (ríos, lagos o mares) lo que les ha permitido sostener tanto los aspectos de su vida cotidiana, como sus principales actividades productivas (agricultura, ganadería, pesca, industria, comercio, entre otras), así como el transporte de mercancías y de personas. El ser humano, a través de estos procesos productivos, ha ido desarrollando técnicas cada vez más eficientes para apropiarse de los recursos que la naturaleza le brinda, compitiendo de manera muy exitosa por el agua disponible en el ambiente (Naiman 1996, Daily 1997).

Además, el agua es un elemento que provee servicios de provisión y de regulación en los ecosistemas (*Millennium Ecosystem Assessment* 2005), dado que es el vehículo obligado de procesos ecológicos básicos como la transpiración, la germinación, la absorción y circulación de nutrientes (Aber y Melillo 1991). Por sus propiedades físicas y químicas controla, por mucho, la dinámica funcional de los ecosistemas (Aber y Melillo 1991), además de ser un recurso indispensable para el desarrollo social y económico (Daily *et al.* 1997). Es por ello que el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas constituye un medio apropiado para evaluar dichos ecosistemas en términos de los procesos físicos, ecológicos y sociales que determinan la cantidad, calidad y temporalidad del paso del agua a través de un área o región determinada (Maass 2006).

La superficie terrestre consta de 510 millones de km<sup>2</sup>, su cubierta de agua es de 362 millones de km<sup>2</sup> (70%), comprendiendo los océanos abiertos 325 millones de km<sup>2</sup>. El total de agua es de 1.5 billones de km<sup>3</sup>, de los cuales el 97% está contenida en los océanos, es decir, es salina, y sólo el 2.5% es agua dulce de la cual casi el 70% está inamovible concentrada en diversos componentes congelados y en la humedad del suelo. El almacén en agua subterránea es del 30.8% y menos del 0.3% es agua superficial contenida en ríos, lagos y humedales. La parte

atmosférica comprende el 0.001% (200,000 km<sup>3</sup>) y este mismo porcentaje es el que se encuentra disponible para el mantenimiento de los ecosistemas y los seres humanos (Carabias y Landa 2005, Agua 2009).

Otro de los beneficios del agua es su gran alcalinidad que proporciona la capacidad de convertir el bióxido de carbono en carbonato y bicarbonato, por lo que los océanos (además de otros cuerpos de agua) son grandes e importantes sumideros de carbono (Agua 2009).

## **1.2. Condición del recurso agua en México.**

Nuestro país, con una extensión de 1,959,248 km<sup>2</sup> de superficie continental (INEGI 2008), cuenta con 11,122 km de litoral, 15,000 km de lagunas costeras y 29,000 km<sup>2</sup> de cuerpos de agua interiores (Carabias y Landa 2005). La mayor parte de estos recursos se localiza en ríos (68.2%), seguida de presas (17.8%), acuíferos (11.7%) y lagos y lagunas (2.3%) (Arriaga *et al.* 2000).

En relación a la precipitación total, ésta es de 1,511 km<sup>3</sup>, sin embargo, el agua que se precipita, escurre y almacena no está distribuida físicamente de manera homogénea en el territorio, ni en las diferentes épocas del año (Carabias y Landa 2005). En el norte y en algunas regiones del centro del país, la precipitación es escasa y está sujeta a sequías recurrentes; estas zonas son las árida y semiárida caracterizadas por matorrales xerófilos y pastizales (Carabias y Landa 2005). En las planicies costeras y sierras del Pacífico, centro del Golfo de México y noroeste de Yucatán, la precipitación es media, presentándose los climas subhúmedos con bosques tropicales caducifolios y subcaducifolios, y en las zonas húmedas se encuentran los bosques tropicales perennifolios, presentes en la parte húmeda del Golfo de México y en la vertiente del Pacífico en Chiapas, al sur del país (Carabias y Landa 2005).

La diversidad de ecosistemas de agua dulce en el país está distribuida en ríos, lagos, humedales y acuíferos. Existen 37 ríos principales, de los cuales 19 drenan al Océano Pacífico y al Golfo de California y 12 al Golfo de México; de los lagos, existen 70 con extensiones que varían entre 1,000 y más de 10,000 ha, cubriendo un

área de 370,891 ha, siendo el de Chapala el mayor de ellos. Con relación a las lagunas costeras, existen 137 lagunas costeras y según la Convención Ramsar, están registrados 54 humedales con una superficie de 5,115,393 ha (Arriaga *et al.* 2000).

El volumen de agua que durante cierta época del año escurre por un tramo específico de una corriente superficial o que está almacenado en un reservorio en una región, se conoce como la disponibilidad natural de agua. En nuestro país la disponibilidad media total es de 476 km<sup>3</sup>, siendo por habitante (con datos para el año 2004), de 4,547 m<sup>3</sup> anuales. Estos valores describen a México como un país con baja disponibilidad de agua (Carabias y Landa 2005).

En relación al deterioro de los recursos hídricos, el impacto de las actividades humanas sobre los cuerpos de agua y sobre sus regímenes hídricos se expresa en alteraciones en la cantidad (derivación de aguas superficiales o extracción de aguas subsuperficiales), en la calidad (contaminación por descargas o ingreso de fertilizantes a mantos freáticos y aguas superficiales) y en la alteración de la temporalidad natural en la cual ocurren los flujos de entrada y salida de agua del sistema (construcción de bordos y presas) (Cunningham *et al.* 2003).

Así mismo, la contaminación de los cuerpos de agua es producto, principalmente, de las descargas de aguas residuales sin tratamiento que pueden ser de tipo doméstico, industrial, agrícola, pecuario o minero (Carabias y Landa 2005). Por lo que se refiere a la presión sobre el recurso, esto provoca problemas de sobreexplotación en cuencas y acuíferos: de los 653 acuíferos identificados, 102 están sometidos a sobreexplotación, lo que ocasiona que la reserva de agua subterránea disminuya a un ritmo de 6 km<sup>3</sup> cada año. Además, esta sobreexplotación también ocasiona contaminación por daños a la calidad del agua, sobre todo por intrusión salina y migración de agua fósil inducida por efectos de bombeo (Carabias y Landa 2005).

La administración de este recurso hídrico en nuestro país, se realiza al considerar regiones delimitadas no por cuestiones geográficas e hidrológicas, sino que las cuencas hidrográficas se encuentran agrupadas

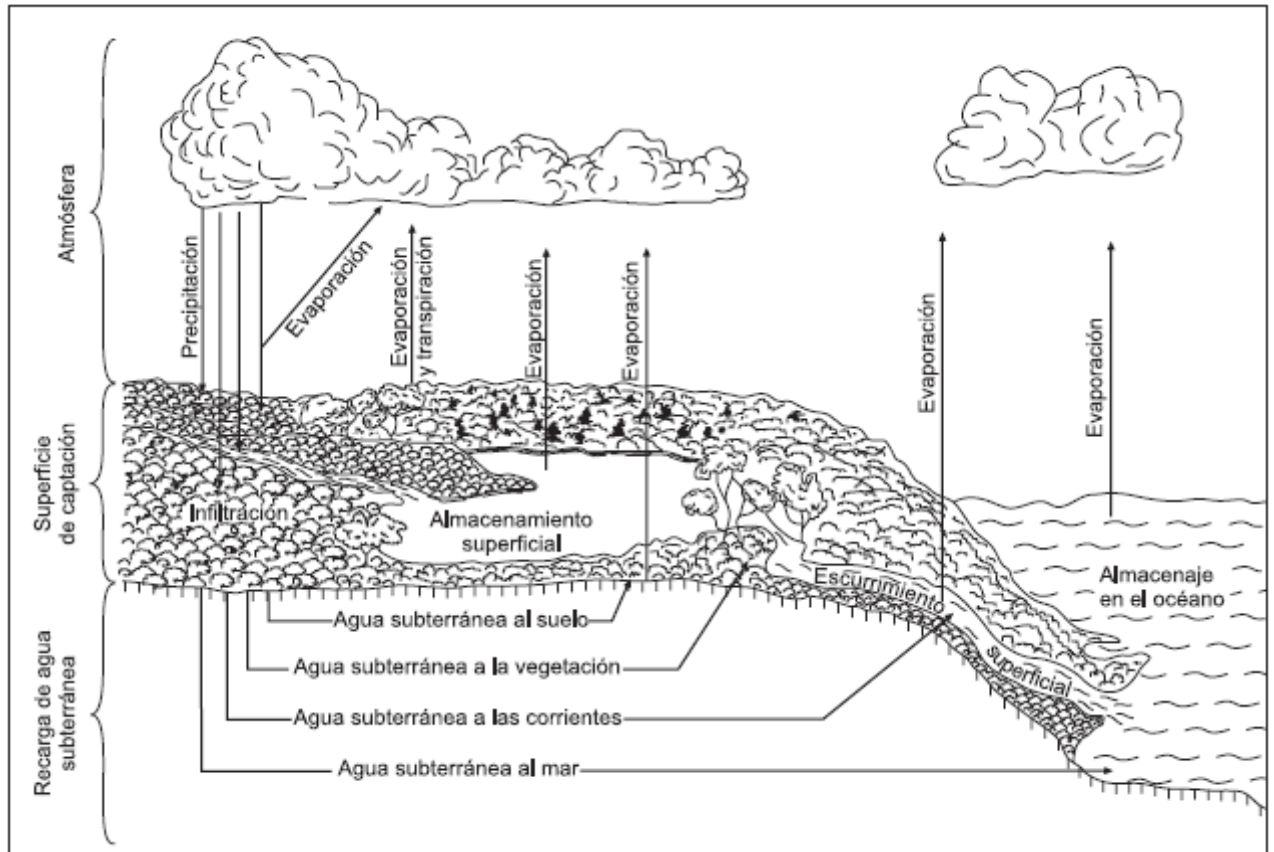
de manera práctica en regiones que tienen como finalidad una mejor gestión y administración territorial (Carabias y Landa 2005, CNA 2006).

### **1.3 Ciclo hidrológico.**

El agua en la naturaleza no permanece estática, sino que presenta una dinámica en la que se definen varias etapas o fases: precipitación, evaporación, intercepción, infiltración, percolación, escurrimiento y recarga subterránea. (Sánchez-Vélez 1987, Maderey 2005).

El ciclo hidrológico a escala global (Figura 1), es el proceso de recirculación de agua que se concibe como un sistema cerrado, compuesto por diferentes trayectorias a través de las cuales se mueve y transforma el agua en cualquiera de sus tres estados. Estos procesos ocurren en la atmósfera, litosfera e hidrosfera renovando los recursos hídricos del planeta (Sánchez-Vélez 1987).

La atmósfera contiene al agua en forma de vapor que proviene casi en su totalidad del agua evaporada del mar. Esta humedad es transportada por los diversos sistemas de vientos hacia los continentes en donde se precipita en forma líquida, sólida o de condensación (rocío o escarcha). Durante la precipitación, el agua puede iniciar su retorno hacia la atmósfera, ya que durante su caída puede evaporarse y una parte de ella no llega al suelo; por otra parte, al caer sobre las plantas, queda interceptada en las superficies vegetales desde donde una parte se evapora y también regresa a la atmósfera o, escurre hacia el suelo y se infiltra, de ésta, una parte puede caer sobre superficies líquidas (ríos, lagos, lagunas, presas, mares, etc.), y otra correrá por la superficie terrestre dando lugar al escurrimiento superficial o escorrentía que llega a los cauces de los ríos y, a través de éstos, al mar (Maderey 2005).



**Figura 1.** Ciclo hidrológico (Tomado de Maderey 2005).

Una parte de la lluvia que se precipita en la tierra se evapora directamente desde el suelo y otra, por infiltración, satisface la humedad del suelo y cuando lo satura produce el flujo tanto superficial como subsuperficial que también llega a los cauces de los ríos y por percolación llega a los mantos de agua subterráneos y alimenta el caudal base de los ríos. Es importante mencionar que la mayor parte de los movimientos subterráneos del agua son muy lentos (Maderey 2005).

Otra parte del ciclo es la que recorre el agua desde el suelo y es absorbida por las raíces de las plantas y, por el proceso de transpiración vegetal, vuelve a la atmósfera en forma gaseosa. En el caso de los animales, de alguna manera pueden participar dentro del ciclo hidrológico, ya que toman parte del agua y la expulsan; así, cualquiera que sea la fase del ciclo hidrológico que se considere, siempre al final se tendrá el retorno a la atmósfera por evaporación (Maderey 2005).

Es importante mencionar que los fenómenos hidrológicos no ocurren aislados, sino que se relacionan con los factores ambientales que se encargan de acelerar o detener, a diferentes niveles, la frecuencia y desarrollo de los eventos que forman parte del ciclo hidrológico. Por ello, el ciclo del agua está condicionado a las características de orografía, geología, tipos y estados en los que se encuentra el suelo, las características de la cobertura vegetal y las condiciones climáticas propias de cada región (Hutjes *et al.* 1998).

#### **1.4 Balance hídrico.**

El balance hídrico es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresan a un sistema y los que salen del mismo, en un intervalo de tiempo determinado. Se refiere al balance entre la ganancia de agua por precipitación, menos la pérdida de agua por evapotranspiración, escurrimiento y considerando además el cambio en la humedad del suelo (Dunne y Leopold 1978); por ello, es una herramienta muy útil en el análisis de los problemas de agua en una región determinada.

Al obtener el balance hídrico de una región se puede llevar a cabo una evaluación sobre la condición hídrica, es decir el comportamiento de la dinámica del agua en dicha región (Jujnosvky 2006). Además, el obtener el balance de las entradas y salidas de agua de un sistema, aporta las bases para el seguimiento a largo plazo de parámetros eco-hidrológicos en una unidad de estudio como son las cuencas hidrográficas (Caylor *et al.* 2005, Piña 2007).

El balance hídrico se establece para un lugar y un periodo dados, por comparación entre los aportes y las pérdidas de agua de ese lugar y para ese período. Los aportes, son aquellos debidos a la precipitación y al riego. Las pérdidas se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la transpiración de las plantas, lo cual se conoce como evapotranspiración; las dos magnitudes se evalúan en cantidad de agua por unidad de superficie, pero se traducen generalmente en alturas de agua en milímetros (Dunne y Leopold 1978).



Al ser estas dos magnitudes físicamente homogéneas, se les puede comparar calculando ya sea su diferencia (precipitación menos evaporación), o su relación (precipitación sobre evaporación). El balance es evidentemente positivo cuando la diferencia es positiva o la relación superior a uno. Se elige una u otra expresión en función práctica o de facilidad frente a los diversos obstáculos que se pudieran encontrar en el muestreo o estudio. El escurrimiento a partir de una unidad de superficie se contará en las pérdidas. Por otro lado, la infiltración se considera como una reserva en forma subterránea o de agua capilar en el suelo (Burgos 1999).

En este estudio, para obtener el balance hídrico, se utilizó el método modificado por Thornthwaite–Mather (1955) ya que puede ser usado en un amplio rango de suelos y tipos de vegetación; contabiliza las ganancias de agua por lluvia o riego y las pérdidas por evaporación, escorrentía, drenaje profundo y la variación del almacenamiento de agua en el suelo, además de analizar diversos componentes que se consideran primarios y secundarios. Dentro de los primeros se incluyen: precipitación, escurrimiento, evapotranspiración real, drenaje (también denominado escorrentía); y los secundarios son: interceptación por dosel, retención de agua por el mantillo, aporte por rocío, precipitación efectiva, evapotranspiración potencial y almacén de agua en troncos (Dunne y Leopold 1978).

El método de Thornthwaite–Mather utiliza dos variables, la temperatura del aire y la precipitación mensual. La primera se usa como un índice de la energía disponible para la evapotranspiración asumiendo que dicha temperatura se relaciona con los efectos de la radiación neta, y que la energía disponible se comparte en proporciones iguales entre el calor atmosférico y la evapotranspiración.

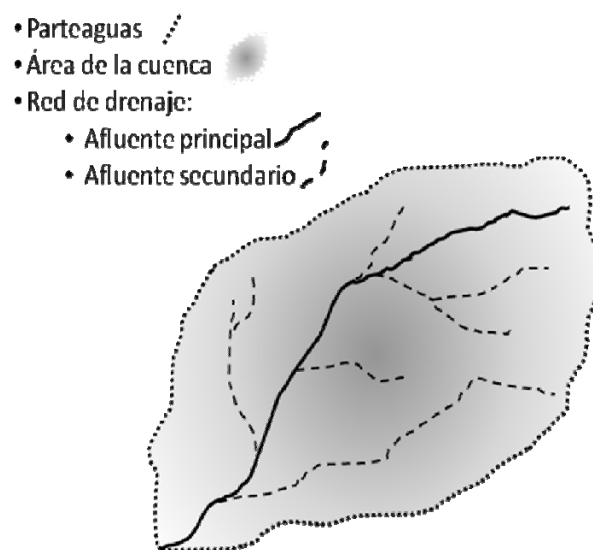
Es importante mencionar que la vegetación y sus características estructurales y fisiológicas, tienen un efecto relevante sobre la redistribución de los flujos hídricos. Por ejemplo, en la parte aérea del ecosistema, los flujos dependen de las características del dosel; sin embargo, este método no contempla los diferentes tipos de vegetación,

pero proporciona una descripción básica de la hidrología de un lugar, así como los patrones espaciales resultantes que pueden utilizarse en la planeación de la distribución de los recursos hídricos en un determinado lugar (Ataroff 2002).

### 1.5 Cuenca hidrográfica.

En el estudio de los ecosistemas nos enfrentamos al problema de que estos no presentan límites bien definidos, por lo que para tener una mejor apreciación y control de las interacciones que se llevan a cabo en él, se ha utilizado el concepto de cuencas hidrográficas como criterio para definir la unidad de manejo del agua o del suelo (Maass y Cotler 2007).

Una cuenca hidrográfica es el espacio geográfico conformado por el relieve, que a su vez establece unidades del paisaje que, debido a su topografía, contiene los escurrimientos de agua que drenan a un punto común conduciéndola hacia un área determinada (Figura 2) (Carabias y Landa 2005, Cotler *et al.* 2007).



**Figura 2.** Componentes fisiográficos de una cuenca hidrográfica.

Así, al ser las cuencas unidades geomorfológicas superficiales y estar delimitadas y definidas por límites llamados “parteaguas” desde los cuales escurren aguas superficiales, ello permite aislar de manera más eficiente los flujos de entrada de agua al ecosistema, lo cual permite tener

un mejor conocimiento de lo que ocurre con las salidas (Cotler *et al.* 2007).

Más aún, las cuencas hidrográficas tienen un carácter jerárquico y anidado en el que una gran cuenca (digamos de miles de km<sup>2</sup>) está formada por subcuencas más pequeñas (de unos cuantos km<sup>2</sup>), las que a su vez están conformadas por otras cuencas aún más pequeñas (de varias hectáreas), lo que permite trabajar a diferentes escalas espaciales dependiendo de los objetivos y alcances de los programas de manejo (Maass y Cotler 2007).

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar en tres tipos: exorreicas, las cuales se caracterizan por descargar su escorrentía superficial hacia el mar; endorreicas, que drenan hacia un cuerpo de agua interior, como un lago, y las arréicas, las cuales presentan un drenaje superficial que se infiltra antes de encontrar un cuerpo colector. También pueden ser diferenciadas en subcuencas o cuencas de orden inferior, y se pueden reconocer zonas caracterizadas por una función primordial (cabecera-captación y transporte-emisión) o por su nivel altitudinal (cuenca alta, media y baja) (Cotler *et al.* 2007).

En relación a la dinámica del ciclo hidrológico en una cuenca, donde se lleva cabo un equilibrio entre los valles y las montañas, hay factores que tienen un carácter medianamente permanente como son la forma de la cuenca, su relieve y litología, y otras variables como la precipitación media y su cobertura vegetal (Sánchez-Vélez 1987).

La interacción que existe entre el medio físico y los componentes bióticos como la vegetación, en el interior de una cuenca, conforman ecosistemas y paisajes que son aprovechados, manejados y, desafortunadamente, alterados por el hombre; por lo que una cuenca hidrográfica, reúne todas las condiciones para utilizarla como unidad de planeación en un contexto espacial y permita establecer programas de estudio y de solución a problemas complejos, como el manejo de los recursos naturales dentro de lo que se conoce como unidades hidrológicas (Berelson *et al.* 2004, Pineda *et al.* 2005).

## II. ANTECEDENTES

### 2.1 Eco-hidrología.

La integración entre ecología e hidrología se puede centrar en estudiar y entender el ciclo hidrológico y los diversos componentes y procesos de los ecosistemas (distribución, estructura y función), es decir, los efectos de los factores bióticos (componentes de la vegetación: raíces, tallos y hojas, etc.) y abióticos (tipo de suelo, clima, etc.) en el ciclo del agua. Todo ello con la finalidad de obtener mayor detalle en la información de la influencia que tienen las comunidades de plantas y animales en dicho ciclo y en sus diversos componentes (Janauer 2000, Rivera *et al.* 2008).

De esta manera, a la eco-hidrología la podemos entender como la disciplina integrativa que busca describir los mecanismos hidrológicos que subyacen a los patrones y procesos ecológicos más importantes. El papel que juega la dinámica clima-suelo-vegetación-relieve y sus interacciones en diferentes ecosistemas a diversas escalas, establece una estrecha relación funcional con el agua, presentando propiedades y características complejas relacionadas en una región, debido a que el clima y el suelo determinan la dinámica de la vegetación ejerciendo un importante control en el balance hídrico, el cual interviene en la retroalimentación de agua a la atmósfera (Rodríguez-Iturbe 2000, Gerten *et al.* 2003).

Las variaciones interanuales de precipitación y los escurrimientos relacionados con las diferencias geomorfológicas (relieve) de una región, intervienen en la distribución geográfica de los diversos tipos de vegetación, afectando el balance energético de los ecosistemas terrestres y con ellos la dinámica hidrológica (Hutjes *et al.* 1998, Gerten *et al.* 2004).

La regulación de los flujos de agua y energía a escala local, regional y global juegan un papel determinante, por lo que las modificaciones sobre la superficie terrestre, tales como cambios a gran escala de la cobertura vegetal (composición, estructura y distribución) y en el uso del suelo, terminan modificando al clima y el funcionamiento de los ecosistemas naturales (Piña 2007). Por lo tanto, se puede reconocer la importancia del papel de la vegetación en el balance de agua, además de la interrelación y retroalimentación entre la biósfera terrestre y el ciclo del agua

dentro de una gran variabilidad espacio-temporal y heterogeneidad hidrogeológica (Arnold *et al.* 2000).

Los cambios en la cobertura vegetal consecuencia de las diferentes prácticas de manejo en los cambios de uso de suelo, no sólo tienen impacto sobre el almacén de agua en los suelos, sino que se reflejan en el consumo de agua por transpiración, en la recarga de acuíferos y en las variaciones de las condiciones climáticas, modificando el comportamiento de los sedimentos, contaminantes y el amortiguamiento a los eventos climáticos extremos, así como los aspectos faunísticos o las unidades de paisaje a diferentes escalas (Arnold *et al.* 2000, Janauer 2000, Pascual 2000).

Las unidades de paisaje son aquellas que se estructuran de acuerdo a una composición de características o rasgos naturales que hace que sean distinguibles claramente unas de otras donde los componentes físico-biológicos del medio forman un conjunto de interrelaciones e interdependencias distinguibles al ojo humano, por ello son la base territorial que permiten evaluar los recursos naturales y su manejo al estudiar su distribución en las zonas funcionales de una cuenca, lo que permite inferir la importancia de cada una de ellas como los servicios ambientales (tales como la recarga de agua), así como su fragilidad intrínseca y su vulnerabilidad ante la presión antrópica (Cotler y Priego 2004).

Hay que enfatizar que el papel de los bosques y selvas no se pueden subestimar, ya que, aunque cubren el 6% de la superficie del planeta captan casi el 50% de la lluvia, y debido a su compleja estructura interceptan el agua de manera muy eficiente deteniendo entre otras cosas la erosión del suelo. Por otra parte, la gran cantidad de mantillo permite una lenta filtración y la adecuada recarga de acuíferos. Un bosque no perturbado, por ejemplo, capta el 35% del agua de lluvia, con tala moderada baja al 20% y hasta 12 % en plantaciones de diversos tipos (Manson 2004).

## **2.2 Estudios a largo plazo.**

La grave problemática ambiental generada tanto por las altas tasas de crecimiento demográfico y de pobreza extrema, como por la aplicación de políticas de desarrollo mal orientadas y la acelerada disponibilidad de tecnologías de gran impacto ambiental, han colocado bajo presión creciente a diversos ecosistemas y a su

diversidad biológica; por ello una respuesta necesaria y de gran impacto positivo, sería mejorar las capacidades de los países para promover programas de desarrollo sustentable, detener los procesos degradantes y mejorar los niveles de conservación ambiental (Red Mex-LTER 2009).

La mayoría de los estudios ecológicos se han realizado en áreas relativamente pequeñas y durante periodos cortos de experimentación, pero los fenómenos en la naturaleza se suceden en escalas espaciales y temporales muy diferentes, los cuales pueden abarcar miles de hectáreas y cientos de años (Jardel *et al.* 2008).

Las investigaciones ecológicas a largo plazo son aquellos estudios orientados a la realización de monitoreos continuos en un mismo sitio, partiendo de un objetivo único, bien definido, y que emplean una metodología estandarizada (Red MEX-LTER 2009). En la actualidad varios países incluyendo el nuestro cuentan con una red propia como la Red Mexicana de Estudios Ecológicos a Largo Plazo (Red MEX-LTER), creada en el 2004 con la misión de realizar investigación ecológica a escalas espaciales y temporales amplias.

El objetivo de los estudios a largo plazo es la escala de investigación por arriba de los 1,000 km<sup>2</sup> (Maass y Cotler 2007) para que de esta manera se incluyan tanto áreas forestales, como agropecuarias, urbanas y turísticas, que se consideren las dimensiones necesarias de los sistemas ecológicos para poder cumplir con el objetivo central de la investigación como es elaborar una propuesta de manejo de ecosistemas orientada a propiciar un manejo sustentable de los recursos y servicios hidrológicos (Piña 2007).

En proyectos de manejo integrado de cuencas, es muy importante el seguimiento a largo plazo de parámetros hidrológicos claves, pues ello permite verificar, de manera integral, el desempeño de las prácticas de manejo implementadas y adecuar el esquema propuesto siguiendo un modelo adaptativo, como uno de los objetivos de la investigación ecológica a largo plazo, entender y predecir los efectos de las intervenciones humanas sobre los ecosistemas para orientar la toma de decisiones sobre diferentes estrategias y alternativas de manejo (Holling 1978).

El diseño de estudios a largo plazo de los ecosistemas genera resultados prácticos y contribuciones significativas al conocimiento y entendimiento de los procesos ecológicos y sociales y sus interacciones, facilitan la descripción de la

variabilidad natural y permiten establecer las condiciones básicas de los sistemas ecológicos. Esto es fundamental para nuestra capacidad de discernir entre las respuestas a la perturbación de aquellas que resultan de causas naturales (Jardel *et al.* 2008).

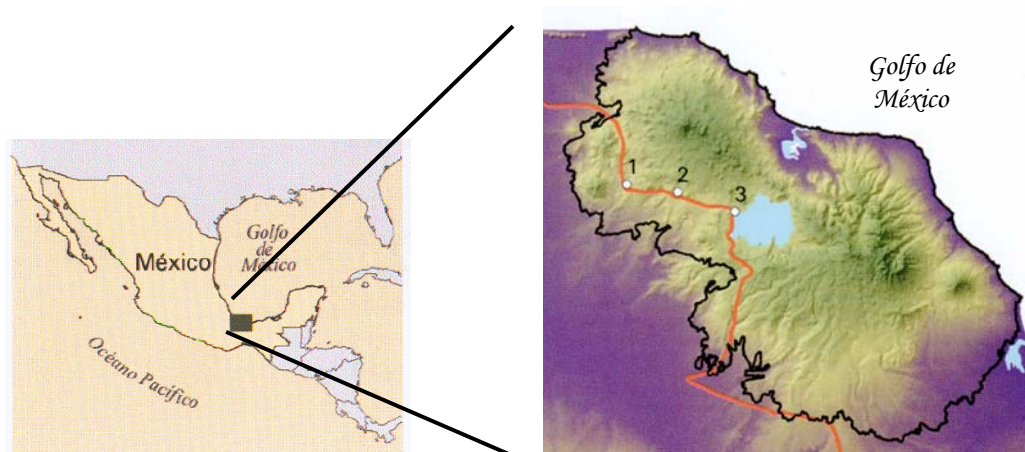
A raíz de lo anterior, surge como propuesta de investigación por parte de la Red MEX-LTER dentro del área temática patrones y control de la dinámica del agua, carbono y nutrientes en los ecosistemas, el proyecto: “*Demandas hidrológicas en ecosistemas naturales de México: Fase 1*”, que tiene como objetivo implementar un protocolo de investigación similar entre 10 grupos de investigación, distribuidos en México, cubriendo ecosistemas que van desde áridos y semiáridos hasta tropicales, incluyendo sistemas costeros ([www.mexlter.org.mx](http://www.mexlter.org.mx)).

El proyecto de la Red MEX-LTER permitirá establecer una comparación sistemática y cuantitativa de variables climáticas e hidrológicas entre los diferentes ecosistemas a nivel nacional utilizando el enfoque de cuenca, para conocer el funcionamiento hidrológico e identificar los requerimientos hidrológicos de los ecosistemas naturales que les permite mantener una integridad funcional y con ello, aportar servicios ecosistémicos a la sociedad (Maass 2006). Esta tesis forma parte de este proyecto, el cual se encuentra dentro de la modalidad de redes básicas del CONACYT y se tiene contemplado el incluir todos los ecosistemas presentes en nuestro país. Por ello el sitio de investigación que engloba a la selva húmeda, objetivo de esta tesis se encuentra en la región de Los Tuxtlas, que se localiza en la planicie costera del Golfo de México, al sur del estado de Veracruz.

## **2.3 Los Tuxtlas, Veracruz.**

### **2.3.1. Localización geográfica.**

La región de Los Tuxtlas (Figura 3), es una serie de montañas de origen volcánico ubicada entre los 18°05' y 18°45' de latitud norte y 94°35' y 95°30' de longitud oeste. Su altitud va desde sobre el nivel del mar (s.n.m.), elevándose hasta poco más de los 1700 m s.n.m. y cuenta con una extensión cercana a los 3,300 km<sup>2</sup> (Gonzalez-Soriano *et al.* 1997, Guevara *et al.* 2004).

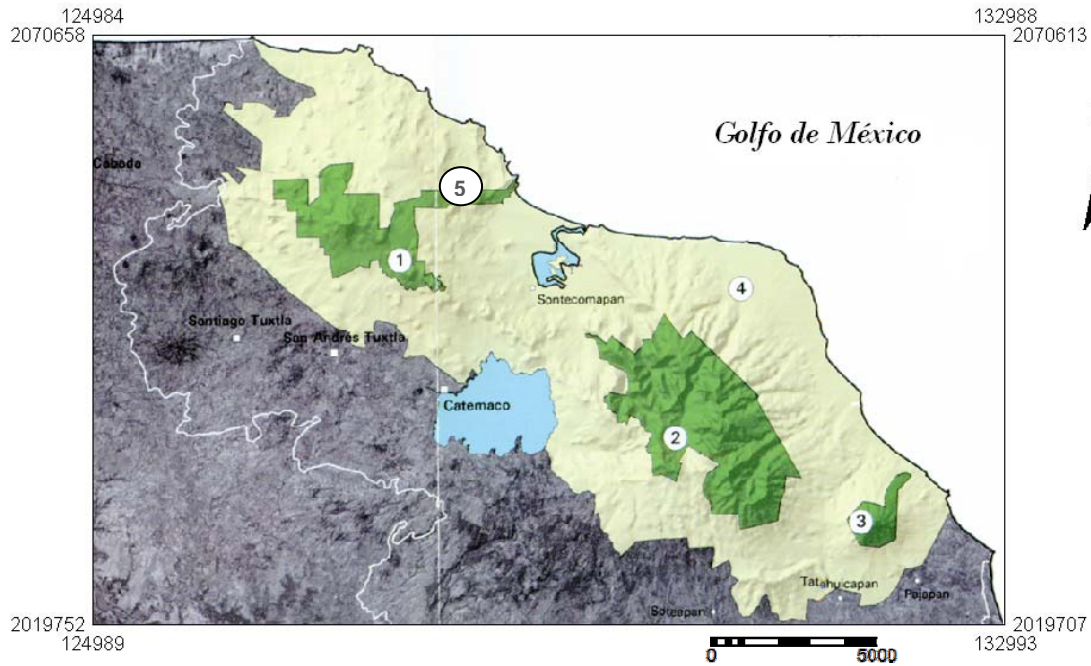


**Figura 3.** Ubicación geográfica de la región de Los Tuxtlas (Tomado de Guevara *et al.* 2004). **1.** Santiago Tuxtla **2.** San Andrés Tuxtla **3.** Catemaco.

La región forma parte de la Reserva de la Biosfera de Los Tuxtlas, decretada en noviembre de 1998 y que posee una superficie total de 155,122 hectáreas (ha) (1,551 km<sup>2</sup>) e incluye tres zonas núcleo (Figura 4): Volcán San Martín Pajapan (1,883 ha), Volcán Santa Marta (18,031 ha) y Volcán San Martín Tuxtla con 9,805 ha (Laborde 2004a, CONANP 2009). Por su extensión y localización es de vital importancia, ya que representa uno de los últimos reductos de selva húmeda en nuestro país.

Dentro de la Reserva se encuentra la Estación de Biología Tropical “Los Tuxtlas” de la UNAM, ubicada en 18°34’ y 18°36’ latitud norte y 95°04’ y 95°09’ longitud oeste. Establecida en 1968, cuenta con una extensión actual de 644 ha (Figura 4).





**Figura 4.** Reserva de la Biosfera “Los Tuxtlas” (Tomado de Guevara *et al.* 2004; escala 1:250,000). **1.** Zona Volcán San Martín Tuxtla **2.** Zona Volcán Santa Marta **3.** Zona San Martín Pajapan **4.** Zona de amortiguamiento **5.** Estación de Biología Tropical “Los Tuxtlas” de la UNAM.

### 2.3.2 Clima.

La sierra de Los Tuxtlas constituye una barrera que origina alteraciones en las condiciones climáticas del estado. El clima corresponde al grupo de climas cálidos húmedos (Af[m], Am, Aw) con una temperatura máxima de 32.2° C, la cual se presenta principalmente en el mes de mayo, mientras que la mínima es de 16.4°C en el mes de enero, con una media de 24.3°C (Soto y Gama 1997).

En la zona se observa un gradiente de humedad muy marcado, debido a su situación con respecto a los vientos húmedos provenientes del Golfo de México y al efecto de barrera que ejerce la propia sierra (Soto y Gama 1997). La precipitación promedio anual es de 4,725 mm y la del mes más seco es mayor de 60 mm; aunque llueve todo el año es posible distinguir una época de lluvias, de junio a febrero, y otra de secas, de marzo a mayo. El mes más seco es generalmente mayo y los más húmedos van de agosto a noviembre (Sommer *et al.* 2003). La mayor concentración de lluvia ocurre en el verano, aunque es importante mencionar que la región se ve afectada por la presencia de dos tipos de perturbaciones atmosféricas a lo largo del año, los ciclones tropicales (responsables de aportaciones considerables de humedad a la zona) y los “nortes” (masa de aire frío provenientes del norte de los

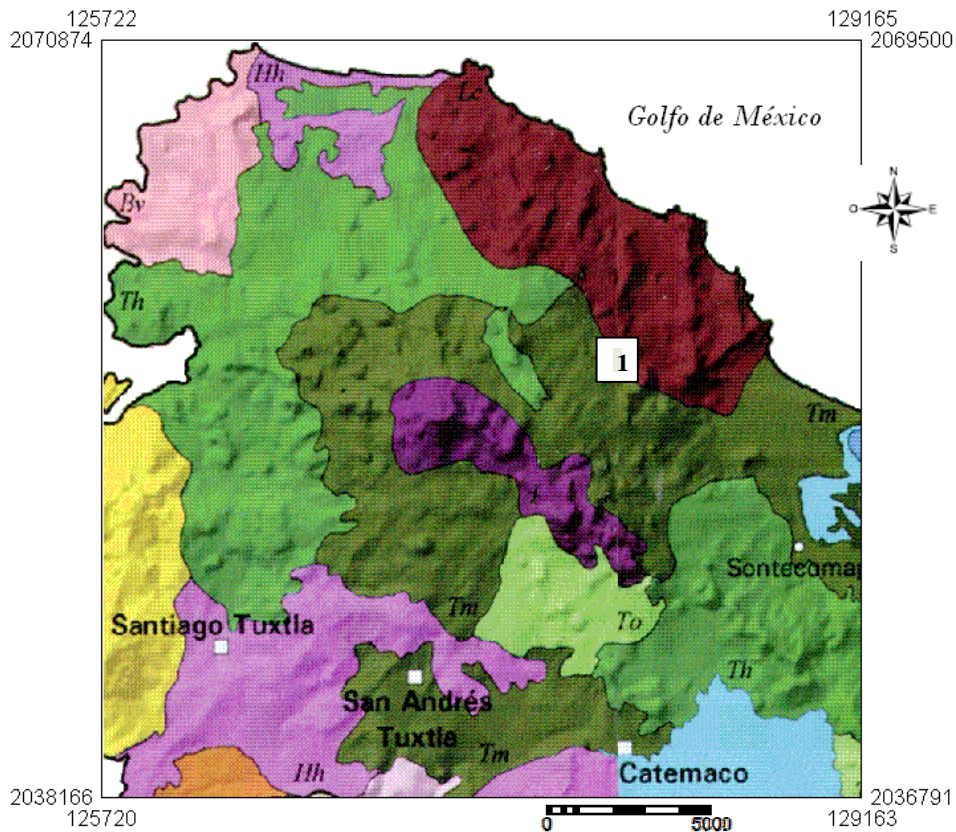
Estados Unidos y sur de Canadá), que aportan aproximadamente el 15% del total de la precipitación anual por la presencia de lluvia invernal y ocasionan que la temperatura descienda hasta los 10°C (Soto y Gama 1997).

### **2.3.3 Suelo.**

En Los Tuxtlas existe una gran variedad de tipos de suelo, determinada principalmente por el origen volcánico de la región, la alta diversidad geomorfológica, las condiciones climáticas, los distintos tipos de vegetación y la edad geológica (Campos 2004); el terreno se encuentra cubierto de andesitas originadas por lavas basálticas, así como sedimentos de arcillas y areniscas (Martín Del Pozzo 1997).

Los principales tipos de suelo (Figura 5) son: Acrisoles, Andosoles, Cambisoles, Feozem, Gleysoles, Lixisoles, Luvisoles, Nitosoles, Regosoles y Vertisoles (Sommer *et al.* 2003, Campos 2004). Son suelos jóvenes que corresponden a una zonación altitudinal que va desde la parte más alta (550 m s.n.m.) hasta la más baja (200 m s.n.m.) (Sommer *et al.* 2003), poseen una estructura que va de fina a masiva compacta, con textura limosa en el horizonte superior y arcillosa a mayor profundidad, con un porcentaje de arena del 10% y una porosidad del 40% (Flores-Delgadillo *et al.* 1999). Tienen buena aireación y el balance de agua es adecuado, lo que propicia una fuerte actividad biológica que descompone en forma rápida la hojarasca, lo que a su vez genera altos contenidos de nitrógeno; el pH varía entre 6.8 y 6.2 (Flores-Delgadillo *et al.* 1999). En general, no se presentan problemas de erosión y el drenaje del sitio es eficiente. El contenido de humedad varía, entre otros factores, con la profundidad de raíces, la cual es de 60% en los primeros 40 centímetros de profundidad (Sánchez-Gallén *et al.* 2003). Todo esto da como resultado una disponibilidad de agua en la zona radicular de 350 mm.

La fertilidad de los suelos en los alrededores del volcán San Martín Tuxtla es muy alta, sin embargo, en gran parte de esta región se ha removido la cubierta forestal original para dar lugar a potreros y campos agrícolas, lo que ocasiona problemas de compactación y erosión (Campos 2004).



**Figura 5.** Tipos de suelo presentes en la zona de estudio (Tomado de Campos 2004; escala 1: 250,000). **1.** Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas (UNAM).  
 ■ (Lc) Luvisol crómico ■ (Tm) Andosol mólico ■ (Th) Andosol húmico  
 ■ (I) Litosol ■ (To) Andosol órtico ■ (Hh) Feozem háplico ■ (Bv) Cambisol vértico

### 2.3.4 Vegetación.

La flora de la región pertenece al Reino Biogeográfico Neotropical, siendo el punto más al norte de selva tropical lluviosa en el continente (González-Soriano *et al.* 1997).

La región se encuentra cubierta principalmente por selva alta perennifolia (Miranda y Hernández 1963), aunque existen algunas variantes entre los que se encuentran nueve tipos de vegetación: bosque caducifolio, encinar, manglar, sabana, selva alta perennifolia, selva baja perennifolia, selva mediana subcaducifolia, pinar y vegetación costera (Sousa 1968, **En:** González-Soriano *et al.* 1997), además de grandes áreas cubiertas de cultivos (principalmente árboles frutales) y pastizales para ganadería (Castillo-Campos y Laborde 2004).

En la estructura de la vegetación se pueden observar tres estratos arbóreos: árboles emergentes con alturas de 30 a 35 m y con diámetros a la altura del pecho (DAP) de 40 a 80 cm; el estrato medio o subdosel con árboles de menos de 20 m de altura, y el sotobosque donde se ubica el 75% de los individuos (Bongers *et al.* 1988, Pennington y Sarukhán 1998).

Como se mencionó, en la Sierra de los Tuxtlas existe una extensión de 160,507 ha de diferentes pastizales inducidos o sembrados para fines ganaderos conocidos como potreros. La apertura de estos generalmente presenta como antecedente un campo agrícola, cultivos de maíz alternado con frijol, chile, arroz, cacahuate o piña, aunque recientemente se han creado potreros talando directamente la selva (Castillo-Campos y Laborde 2004). Tienen estructura y composición florística muy heterogénea, estrechamente relacionadas con la frecuencia y abundancia de los árboles remanentes, los cuales están aislados en el potrero, siendo parte de las cercas vivas o de la selva de galería. Estos árboles atraen pájaros y murciélagos frugívoros que dejan caer en su vecindad semillas y frutos, con lo cual se enriquece la composición florística del potrero con especies de árboles y arbustos provenientes de la selva y el acahual (Guevara *et al.* 2004).

### **2.3.5 Hidrología.**

La región posee un extenso y complejo sistema hidrológico debido al origen tectónico-volcánico, al relieve montañoso y a la abundante precipitación anual (Figura 6); forma parte de las cuencas de los ríos Coatzacoalcos y Papaloapan que están entre las de mayor volumen de descarga del país (Vázquez *et al.* 2004). Además, el comportamiento de los principales cuerpos de agua sigue estrechamente las variaciones climáticas, particularmente del régimen pluvial (Torres Orozco *et al.* 1997).

En la sierra se pueden identificar tres vertientes (aquellas que recogen las aguas que vierten en un mismo cuerpo de agua): 1) Vertiente sureste, que forma parte de la cuenca del Río Coatzacoalcos, donde desembocan algunos de los ríos y arroyos que descienden del volcán Santa Marta. 2) Vertiente continental, que inicia al sur del volcán Santa Marta y es a la que pertenece el lago de Catemaco. 3) Vertiente norte y noreste, que desemboca al Golfo de México, formando parte estas

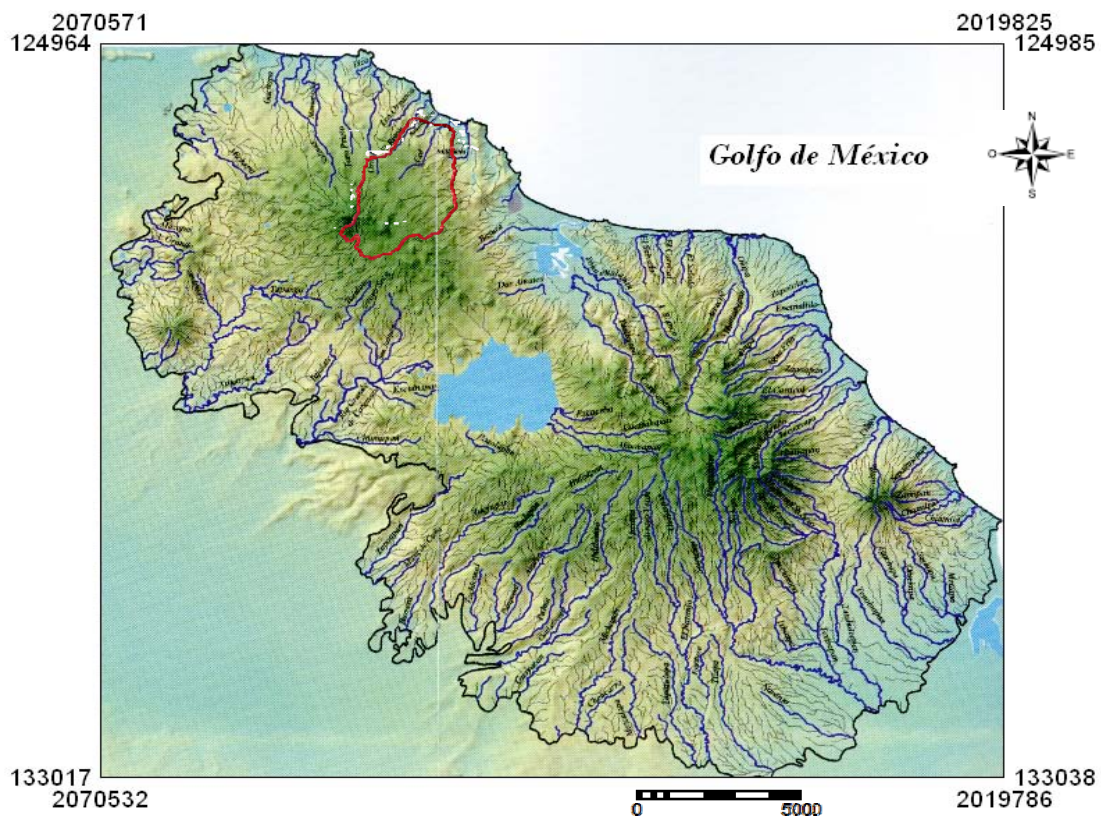


dos últimas de la subcuenca del Papaloapan (Vázquez *et al.* 2004), es en ésta última vertiente donde se encuentra el sitio de estudio (Figura 6).

En relación a la red hidrológica, la zona montañosa tiene una red de drenaje radial determinada por las características topográficas. En el volcán Santa Marta es muy abundante y poco ramificada, con cauces profundos que drenan rápidamente en la vertiente del Golfo (Vázquez *et al.* 2004).

En la vertiente del volcán San Martín Tuxtla (vertiente norte–noreste), hay ríos que nacen en las partes altas pero son intermitentes, por el tipo de suelo que es muy poroso. En las partes medias (300–400 msnm) se vuelven permanentes, con caudales muy variables, que dependen de la precipitación en las partes altas, desembocando finalmente en el Golfo. En esta zona son muy frecuentes los cuerpos de agua asociados a cráteres siendo en esta zona donde se encuentran el 80% de los lagos de agua dulce de la región (Vázquez *et al.* 2004).

En la vertiente continental, la red es más jerarquizada, ya que está organizada en cauces que recorren caudales de cuencas más extensas, algunos de estos ríos cruzan las ciudades de San Andrés Tuxtla y Santiago Tuxtla (Vázquez *et al.* 2004).



**Figura 6.** Ríos perennes e intermitentes de la región de los Tuxtlas (Tomado de Guevara *et al.* 2004; escala 1: 250,000). Cuenca de estudio.

El principal cuerpo de la región de estudio es la Laguna Escondida, la cual desemboca en el Golfo de México. Se encuentra en las inmediaciones del límite norte de los terrenos de la Estación de Biología de la UNAM y es un área donde se percibe el impacto de las actividades humanas. Es un cuerpo de agua permanente que es alimentado durante todo el año por un riachuelo que desemboca en su parte meridional, por lo que no sufre fluctuaciones considerables en su nivel a través del año. Drena por el norte a través de un cauce que desemboca finalmente al Golfo. El segundo cuerpo de agua es la laguna de Zacatal, que es temporal, ya que se vacía durante las épocas de secas (finales de abril a mayo), pero en las épocas de lluvia (julio) se vuelve a inundar (Torres Orozco *et al.* 1997).

### **2.3.6 Aspectos socioeconómicos.**

La región de Los Tuxtlas está conformada por ocho municipios: Santiago Tuxtla, San Andrés Tuxtla, Catemaco, Hueyapan de Ocampo, Soteapan, Mecayapan, Pajapan y Tatahuicapan, cubriendo una extensión de 4,330 km<sup>2</sup>; tiene una población de 351,315 habitantes en el año 2000 (81 hab. por km<sup>2</sup>), siendo el de mayor extensión el de San Andrés Tuxtla además de contener una gran parte de ésta (68.9%), en el interior de la sierra (Laborde 2004b). en la región la propiedad de la tierra es principalmente de tipo ejidal, aunque con situaciones irregulares; en segundo lugar pertenece al régimen de propiedad privada siendo la mayoría ranchos ganaderos (Laborde 2004b).

Como se menciona anteriormente, la región se encuentra inmersa en la Reserva de la Biósfera de Los Tuxtlas, sin embargo, la creación de ésta Área Natural Protegida, creó conflictos sobre todo de carácter agrario debido a que la población se siente ajena a la Reserva (Paré y Fuentes 2007).

La situación actual, resultado de una zonificación (y un asentamiento) irregular ha tenido diversas consecuencias: deficiencia en términos de la conservación de la biodiversidad, cierre de oportunidades de amplia participación social, ambiente de confrontación de diversos ejidos, rechazo de algunos casos hacia las iniciativas de reconversión productiva y, particularmente, rechazo hacia

las iniciativas de investigación vinculadas con la biología y en general con el medio ambiente (Paré y Fuentes 2007).

Nuestra zona de estudio se encuentra localizada en la Región Hidrológica No. 28 perteneciente al municipio de San Andrés Tuxtla, enmarcado en la Región Golfo Centro No. X según la clasificación de la Comisión Nacional del Agua (Figura 7). Cuenta con una extensión de 105,300 km<sup>2</sup> y tiene un escurrimiento superficial medio de 106,539 hm<sup>3</sup> siendo la segunda con mayor escurrimiento en el país (CNA 2006).



**Figura 7.** Regiones Hidrológico-Administrativas (CNA 2006; escala 1:250,000).

### **III. OBJETIVOS**

#### **3.1 General**

Obtener el balance hídrico en una cuenca enmarcada en la región de Los Tuxtlas, Veracruz.

#### **3.2 Específicos**

- Realizar la delimitación de una cuenca en la región de Los Tuxtlas, que incluya a la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas y su área de influencia, a través de la recopilación y el análisis de información cartográfica y digital.
- Estimar, de manera general, la dinámica hidrológica de la cuenca delimitada, a través del balance hídrico.
- Analizar la información disponible y generada sobre la cuenca para realizar una estimación de la dinámica hidrológica en zonas no conservadas de la cuenca.



## **IV. MÉTODOS**

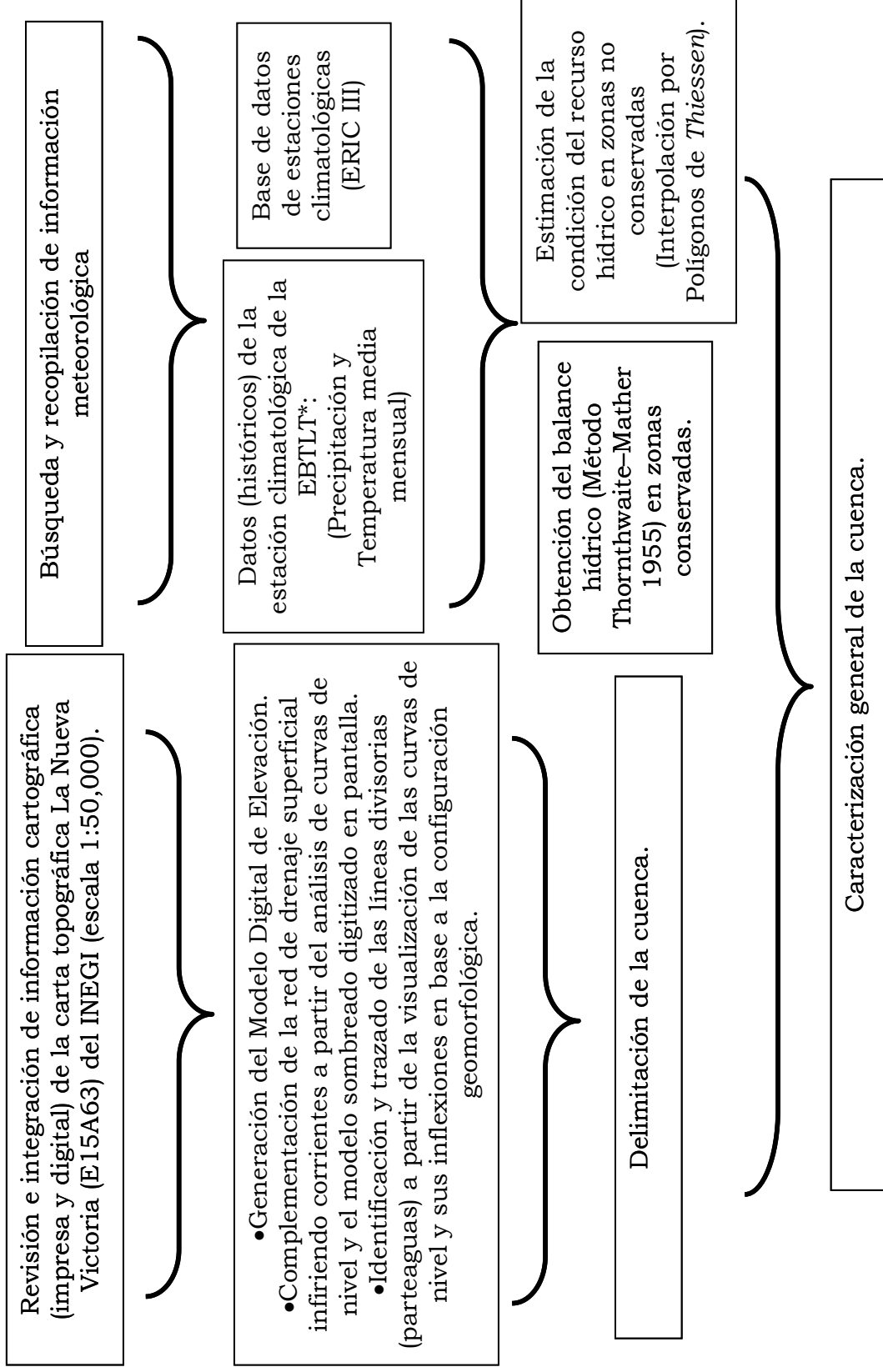
### **4.1 Delimitación de la cuenca.**

La región de Los Tuxtlas, Veracruz, uno de los diez sitios de investigación de la Red Mex-LTER en nuestro país, no cuenta con una cuenca delimitada para fines de estudios ecológicos a largo plazo. Por ello, en este trabajo se realizó la delimitación de dicha cuenca en la escala determinada por la metodología establecida por la Red (1:50,000), para lo cual se consideró como un criterio inicial que incluyese el área de mayor influencia para la Estación de Biología Tropical “Los Tuxtlas” de la UNAM, ya que esto aportaría beneficios posteriores para poder trabajar en este sitio sobre todo para investigaciones con enfoque ecosistémico.

En la actualidad una cuenca delimitada geográficamente, es considerada una unidad integral de estudio que nos permite realizar análisis ecológicos. Para realizar estas tareas hoy en día se cuenta con importantes herramientas analíticas, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la percepción remota (PR), los cuales facilitan la integración de la información, posibilitan su visualización, modelamiento y análisis, optimizándola para una mejor toma de decisiones de los fenómenos que ocurren sobre la superficie terrestre (Cotler *et al.* 2007).

Los criterios establecidos por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para la delimitación de cuencas hidrográficas, son las que se utilizaron para la realización de este trabajo, siguiendo además los lineamientos metodológicos establecidos por la propia Red Mex-LTER (Esquema 1).

La delimitación de la cuenca hidrográfica se realizó a partir de criterios topográficos (geomorfológicos) e hidrográficos (red de drenaje superficial), dejando de lado criterios como tamaño, uso del suelo, grado de contaminación y/o características administrativas (Cotler *et al.* 2007).



**Esquema 1.** Metodología del trabajo de investigación (\*Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas).

Se utilizaron como base mapas topográficos (vectoriales y digitales) proporcionados por el INEGI, cuya información fue posteriormente procesada utilizando diversos Software como: ArcView GIS 3.2 e ILWIS 3.4.

Los criterios y métodos que se consideraron son: combinar técnicas manuales–digitales (utilizando SIG), así como datos cartográficos digitalizados en pantalla para verificar variables topográficas e hidrográficas y hacer una revisión de la red hidrográfica y de drenaje superficial, a partir del análisis de las curvas de nivel, el Modelo Digital de Elevación (MDE) e información de la carta topográfica vectorial.

Los pasos metodológicos para la obtención de los límites de la cuenca fueron (Esquema 1):

**1.** Generación del modelo digital de elevación a partir de las curvas de nivel y la elaboración de un modelo sombreado del relieve.

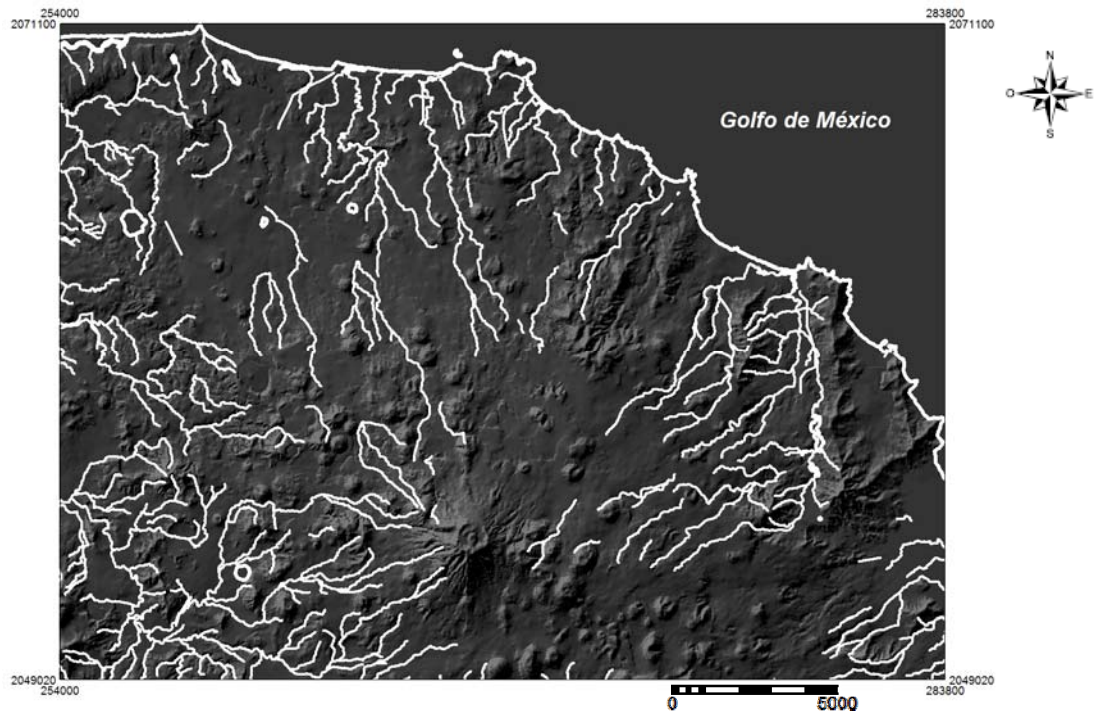
**2.** Integración y revisión de la red hidrográfica y las curvas de nivel a escala 1:50,000 de la carta topográfica La Nueva Victoria (E15A63) del INEGI.

**3.** Complementación e incremento de la red de drenaje superficial infiriendo corrientes a partir del análisis de las curvas de nivel y el modelo sombreado, digitizado en pantalla.

**4.** Identificar y trazar las divisorias de aguas a partir de la visualización de las curvas de nivel, la hidrografía y modelos sombreados del relieve.

Es decir, trazar los parteaguas sobre las inflexiones de las curvas de nivel de máxima altura relativa en la zona límite entre laderas de exposición opuesta, separando a los diferentes sistemas hidrográficos junto con sus áreas de drenaje a través de su configuración geomorfológica (Figura 8).

**5.** Obtención del mapa final de la cuenca hidrográfica para la región norte–noreste de Los Tuxtlas en la zona del volcán San Martín Tuxtla. La información se generó con el programa ILWIS 3.4.



**Figura 8.** Modelo digital de elevación y red hidrológica, utilizados en el trazo de los parteaguas para la delimitación de la cuenca (Escala 1:50,000).

Los materiales utilizados en dicha delimitación se describen a continuación:

**a) Conjunto de datos vectoriales:** Curvas de nivel y red hidrográfica, los cuales se derivan de la digitación de la carta topográfica La Nueva Victoria E15A63 a escala 1:50,000 (INEGI 2007). Con las curvas de nivel se generó un MDE en formato de celdas (*raster*) utilizando un método de interpolación de tipo lineal dentro de un SIG (ILWIS 3.4).

**b) Mapas con información digital:** Ríos, cuerpos de agua y MDE. Los MDE son una representación digital de una porción de la superficie terrestre conformados por bases de datos geográficos que describen las diferencias en el relieve de una cuenca y se elaboran en un SIG mediante interpolación de un conjunto de datos de altitud, de tal manera que, con una cierta resolución, cada porción de la cuenca recibe un cierto valor de altitud. Del MDE de una cuenca se puede derivar el trazado de cauces y parteaguas (Berelson 2004).

#### **4.2 Obtención del balance hídrico.**

Charles Thornthwaite (1948) propuso un método para estimar el potencial de evapotranspiración a partir de datos de la temperatura media. El método fue modificado por Thornthwaite y Mather (1955) para hacer uso en un amplio rango de suelos y tipos de vegetación; de esta manera puede realizarse el balance hídrico de la región de estudio, donde se obtienen o calculan los siguientes parámetros (Dunne y Leopold 1978):

$$\mathbf{BH} = \mathbf{Pp} - \mathbf{EVT} - \mathbf{Esc} - \mathbf{\Delta HS}$$

Dónde:

**BH**= balance hídrico

**Pp**= precipitación

**EVT**= evapotranspiración potencial

**Esc**= escurrimiento

**ΔHS**= cambio en la humedad del suelo

1. *Precipitación mensual.* Se utiliza el promedio de la precipitación mensual de un número determinado de años con los datos de las estaciones climatológicas con mayor influencia en la zona de estudio.

2. *Evapotranspiración potencial (EVT) mensual.* Si no se tiene es

$$E_t = 1.6 \left[ \frac{10T_a}{I} \right]^a$$

necesario obtenerla por medio de la fórmula por lo que se requieren los datos de temperatura media mensual, obtenida de la estación con mayor influencia en la zona de estudio y aplicar la siguiente fórmula:

**T<sub>a</sub>** = Media mensual de temperatura del aire (°C).

$$I = \text{Índice de calor anual} = \sum_{i=1}^{12} \left[ \frac{T_{ai}}{5} \right]^{1.5}$$

**i**=1

$$\mathbf{a} \text{ (Constante)} = 0.49 + 0.0179 \mathbf{I} - 0.0000771 \mathbf{I}^2 + 0.000000675 \mathbf{I}^3$$

**3. Déficit de la precipitación** (deficiencia de agua de lluvia). Resulta de restar la EVT potencial a la precipitación. Los números negativos demuestran un déficit y los positivos que hay más entrada de lluvia con respecto a la pérdida.

**4. Déficit acumulado.** Es decir de un mes a otro, consiste en sumar el déficit del mes actual con el del mes anterior.

**5. Humedad de suelo.** Está en relación con el tipo de suelo, la capacidad de retención de agua del mismo y de la profundidad de las raíces en él, ya que son ellas las que llevan a cabo la absorción de agua. Se obtiene con una relación logarítmica del agua que es retenida en el suelo y el déficit que se ha ido acumulando de la precipitación (falta de agua); se puede determinar con la ecuación de una recta. Hay que considerar que en determinado momento no hay suficiente humedad por lo que la capacidad de retención del suelo de absorber agua está disminuida.

**6. Cambio en la humedad del suelo.** Se encuentra en relación con el tipo de suelo, la capacidad de retención de agua del mismo y de la profundidad de las raíces en el suelo, ya que son ellas las que llevan a cabo la absorción de agua; se obtiene con una relación logarítmica del agua que es retenida en el suelo y el déficit que se ha ido acumulando de la precipitación (falta de agua). Hay que considerar que en determinados momentos y lugares no existe capacidad en el suelo de absorber agua por lo que la humedad puede llegar a ser nula. En la fórmula es aquella del mes actual menos la del mes anterior.

**7. Evapotranspiración actual.** Es la que las plantas realmente son capaces de evaporar y se obtiene restando a la precipitación el cambio de humedad del suelo. Esto no se cumple cuando la EVT potencial es mayor o la EVT actual la sobrepasa; es decir, los valores no pueden ser mayores por lo que se consideran los mismos de la EVT potencial.

**8. Déficit de humedad del suelo.** Es la EVT potencial menos la actual, ya que es mayor la potencial y la cantidad de agua en el suelo no es suficiente para abastecer al suelo con la que necesitan las plantas.

**9. Exceso de agua en el suelo.** Se obtiene restando a la precipitación la EVT potencial menos el cambio de humedad que ocurre en el suelo.

**10.** *Agua que está disponible para escurrir proveniente del exceso de agua anterior.* Se obtiene sumando el exceso de agua a la que es retenida en el suelo el mes anterior.

**11.** *Escorrentía.* Es el exceso de agua en el suelo por lo que es la que está disponible para escurrir; se obtiene restando la precipitación menos la EVT potencial, menos el cambio de humedad que sucede en el suelo. De este exceso de agua, hay alguna que está disponible para escurrir y se obtiene sumando el exceso de agua y la que es retenida en el suelo del mes anterior.

**12.** *Agua retenida.* Es la mitad de la que esta disponible para escurrir y es la que no va a escurrir sino que se queda almacenada en el suelo.

#### **4.3 Estimación del balance hídrico en zonas no conservadas.**

La importancia de contar con datos puntuales de un sitio determinado proporciona exactitud y precisión en los resultados que pueden ser repetidos en diversos estudios; sin embargo, en nuestro sitio de estudio nos enfrentamos al hecho de que no contamos con estaciones climatológicas que nos proporcionen dichos datos, sino sólo con cartografía, información digital o bases de datos; por ello la intrapolación es una herramienta útil, para obtener información donde no existen herramientas o datos, sobre todo en distintos usos del suelo.

Existen diversos métodos para obtener información sobre la hidrología de una región, es decir el balance hídrico en zonas en las cuales la información meteorológica es escasa o incluso inexistente. En el área de estudio cobra doble importancia, ya que la mayor parte de la zona está bajo una fuerte presión de cambio de uso de suelo por deforestación para convertir áreas de vegetación en pastizales para actividades ganaderas.

A continuación, se enlistan los tres métodos utilizados de intrapolación para determinar el balance hídrico en zonas donde no se cuenta con información:

##### **a. Precipitación estandarizada.**

Consiste en el análisis de la precipitación media mensual histórica de las estaciones circundantes a la zona de estudio. Desarrollado en 1993 por McKee y colaboradores, es un índice normalizado que permite estudiar diferentes escalas de tiempo y es recomendado para registros a largo plazo; sin embargo sólo se aconseja utilizarla cuando la distribución de las estaciones en la cuenca es bastante uniforme. Es una representación del número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico; así, puede deducirse que registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes correspondiente darán valores positivos, lo que representa condiciones de humedad, mientras que registros de precipitación inferiores al promedio histórico del mes correspondiente arrojarán valores negativos, lo que indica un déficit de humedad (Maderey 2005).

#### **b. Capacidad de campo.**

Se refiere a la cantidad relativamente constante de agua (contenido de humedad) que contiene un suelo saturado después de un tiempo determinado de drenaje, cuando ya no puede absorber más agua de forma natural de la lluvia, es decir después de que el agua por la fuerza de gravedad ha sido drenada. Dicho drenaje ocurre por la transmisión del agua a través de los poros formados por la penetración de la raíces con diámetros mayores a 0.05 mm, (pero puede presentarse en poros que van de 0.03 y 1 mm de diámetro) (Sánchez 2004, Maderey 2005).

#### **c. Polígonos de Thiessen.**

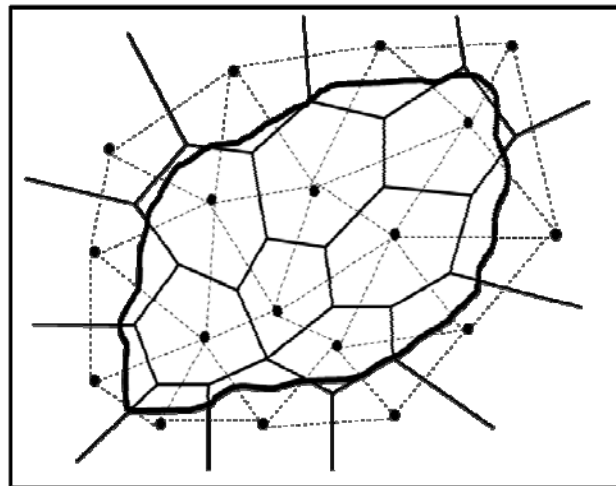
Son uno de los métodos de interpolación más simples, basado en la distancia geométrica que existe entre un punto y el más cercano a dicho punto, en este caso estaciones meteorológicas cercanas. Se crean al unir puntos entre sí, trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos y así, designan su área de influencia (Figura 9). Es una



de las funciones básicas en los SIG, ya que fueron creados para el análisis de datos meteorológicos (estaciones pluviométricas) (Sánchez 2004).

En el procedimiento, la red poligonal se traza formando los polígonos mediante las perpendiculares en el punto medio a los segmentos que unen cada dos estaciones (Figura 9). Se supone que cada estación es representativa del área del polígono que la encierra, de manera que los datos de la superficie limitada por cada polígono es la que se registra en la estación meteorológica correspondiente (Maderey 2005).

Este método se utilizó en este trabajo de investigación, para conocer la dinámica hidrológica de la cuenca de estudio en las zonas donde no existe información disponible (Figura 9).



**Figura 9.** Polígonos de *Thiessen* en una cuenca imaginaria.

- Estaciones climatológicas
- Delimitación de cuenca
- ◻ Polígonos que demarcan zona de influencia de las estaciones.

## **V. RESULTADOS**

### **5.1 Delimitación de la cuenca.**

La delimitación de la cuenca de estudio se realizó mediante el programa ILWIS 3.4, utilizando las curvas de nivel y el modelo digital de elevación (MDE) obtenidos en el INEGI.

Se delimitó una cuenca con una extensión de 84 Km<sup>2</sup> lo que equivale a 8,400 hectáreas (Figura 10). Por las características topográficas de la cuenca se considera de tipo exorreica, es decir, cuenta con desembocadura al Golfo de México, a través del Río Máquinas que cuenta con una longitud de 6 km (6,022.31 m), y su principal afluente concluye en una laguna costera, los afluentes secundarios son varios ríos, principalmente intermitentes (tributarios o secundarios) que confluyen al Río Máquinas.

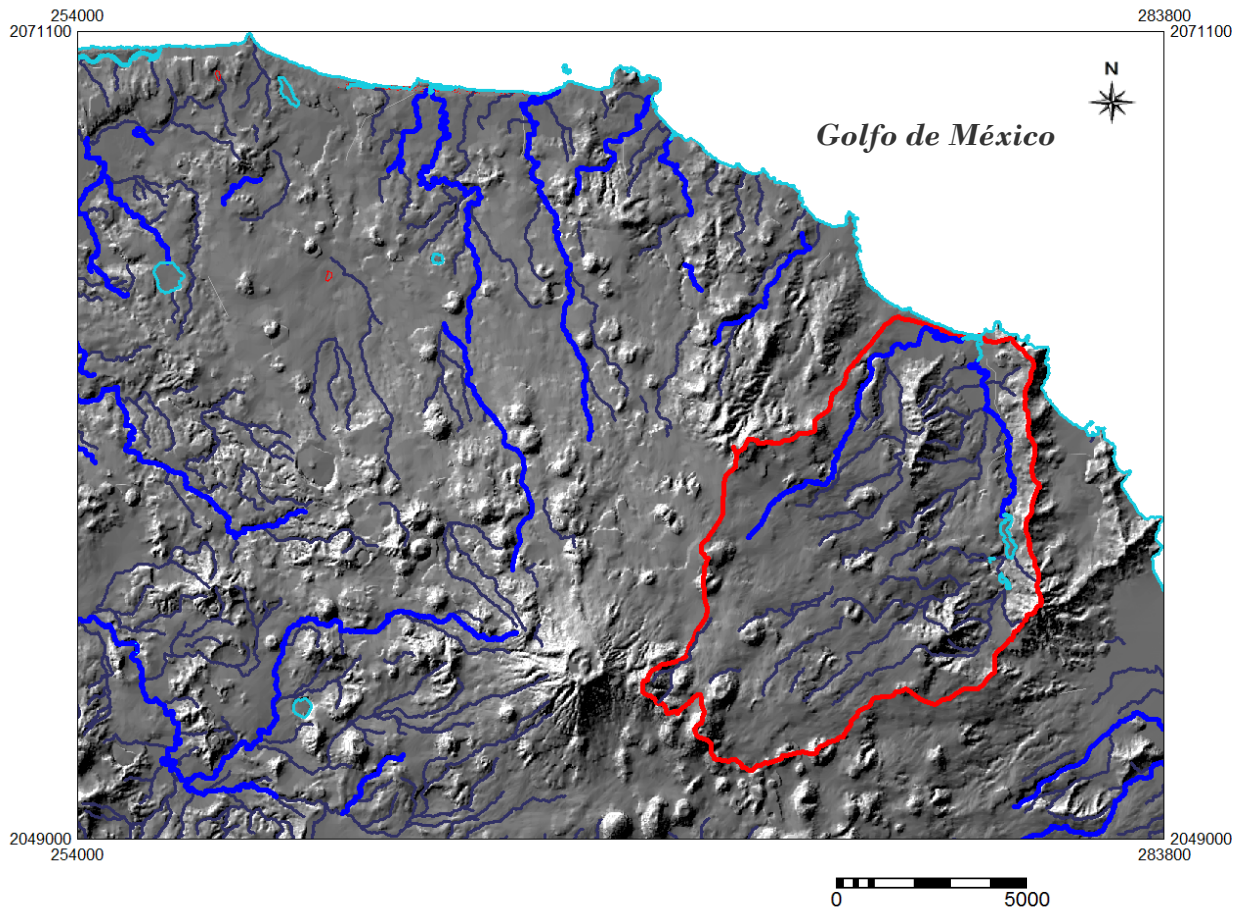
El patrón de drenaje es de tipo dendrítico. Este tipo, es aquél que presenta ramificación de la hidrología en forma de árbol desarrollado por ríos en forma aleatoria. Ocurre en partes altas donde la roca madre ofrece relativa resistencia a la erosión y al intemperismo; por el tipo de drenaje también puede decirse que la pendiente no es muy pronunciada y la permeabilidad relativamente baja.

El perímetro de la cuenca es de 42.39 km (42,387.92 m), con un ancho (perfil transversal) de 9 km (9,006 m) y una longitud de 13.62 km (13,625.19 m). En relación a los rangos de altitud (por las características del relieve), éstos van desde el nivel del mar (desembocadura de la cuenca) hasta 1,380 m s.n.m. que es el punto más alto de la cuenca. Estos datos se obtuvieron basándose en el manual para la caracterización de cuencas de Martínez–Rivera (2008).





Las principales localidades encontradas en el interior son: Laguna Escondida, Lázaro Cárdenas, Miguel Hidalgo y Costilla, Úrsulo Galván, Adolfo Ruíz Cortines, La Rosita, La Piedad, El Guayabal, Dos de Abril y Montepío, donde desemboca el principal afluente (Río Máquinas). Todas ellas, cuentan con menos de 1,000 habitantes.

Considerando los datos de Sánchez *et al.* (2003), los datos de la profundidad de los suelos de la cuenca van desde los 20 cm hasta 1 metro, resultando en un factor muy variable, además de que la profundidad de raíces llega hasta aproximadamente los 40 cm; siendo esta parte del suelo la más porosa.

En relación al cambio de uso de suelo, la principal actividad es la ganadería, por lo que la zona sufre una fuerte deforestación por la conversión de la vegetación primaria en pastizales (Laborde 2004). La superficie cubierta por vegetación primaria (selva húmeda) es 39.53% es decir una extensión de 33.21 km<sup>2</sup> (3,321 ha), mientras que la correspondiente a pastizales es de 50.79 km<sup>2</sup> (5,079 ha) siendo un 60.46% de pastizales.



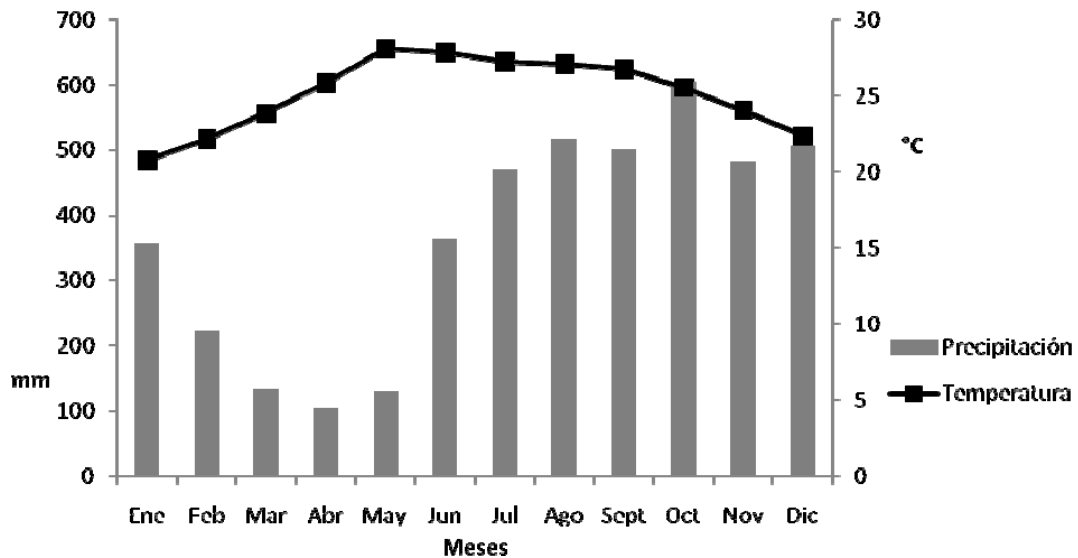
**Figura 10.** Delimitación de la cuenca con la hidrología de la región de estudio sobre el modelo digital de elevación (1:50,000).

-  Ríos principales
-  Ríos secundarios
-  Cuerpos de agua
-  Delimitación de la cuenca

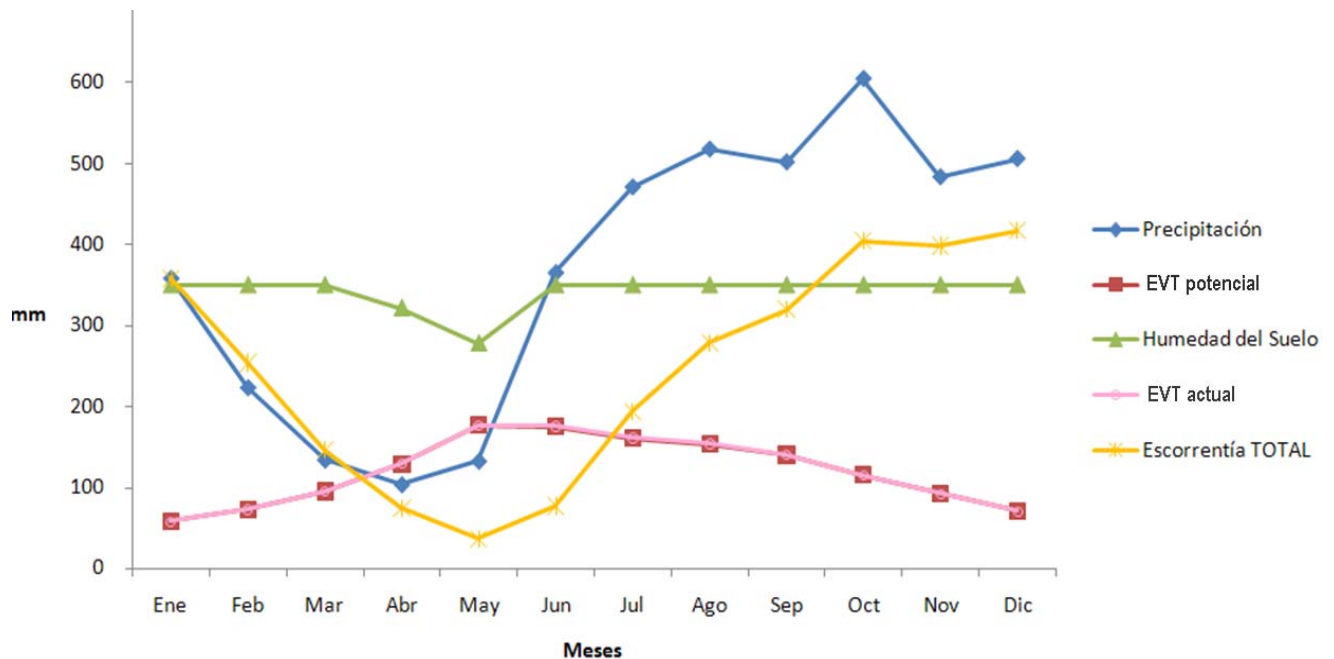
## 5.2 Balance hídrico.

Para la estimación del balance hídrico, se obtuvieron los datos históricos de las bases de datos de la estación meteorológica de la propia Estación de Biología Tropical “Los Tuxtlas”, que cuenta con un registro de 1982 a 2005, proporcionando datos de precipitación y temperatura. Para las siete estaciones climatológicas de mayor influencia a la cuenca, se obtuvieron datos comprendiendo el periodo de 1961 a 2003.

En la figura 11 se muestra el climograma para la estación de Biología los Tuxtlas donde se registra una temperatura máxima de poco más de 28°C en el mes de mayo, el cual es también el segundo mes con menor precipitación (117 mm). Es por ello, que es en este mes donde se observa un déficit de humedad en el suelo, como se muestra en la figura 12 con los componentes del balance hídrico en un ciclo anual. Los componentes del balance hídrico se muestran en la tabla 1.



**Figura 11.** Climograma para la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas, Veracruz.



**Figura 12.** Balance hídrico para la zona conservada de la cuenca delimitada de Los Tuxtlas, Veracruz.

En dicho balance, se registra la mayor precipitación en el mes de octubre con 605 mm y la menor en el mes de abril con 103 mm. La humedad del suelo, determinada por el tipo de suelo (composición y textura) y la vegetación, principalmente con la profundidad de raíces y la cobertura, es constante en casi todo el año con 350 mm, a excepción de los meses de abril y mayo (322 y 278, respectivamente). Lo anterior provoca que la humedad que se vaya acumulando en el suelo durante la temporada de lluvias (que va de junio hasta enero), y empiece a disminuir desde este mes hasta principios de abril. Esto se conjunta con el ligero aumento de la evapotranspiración durante abril y mayo; dichos valores de evapotranspiración actual y potencial son iguales en todo el curso del año, teniendo un intervalo que va de 58 mm en enero, hasta 175 mm en el mes de junio, muy cercano al valor del mes más seco (mayo) con 174 mm.

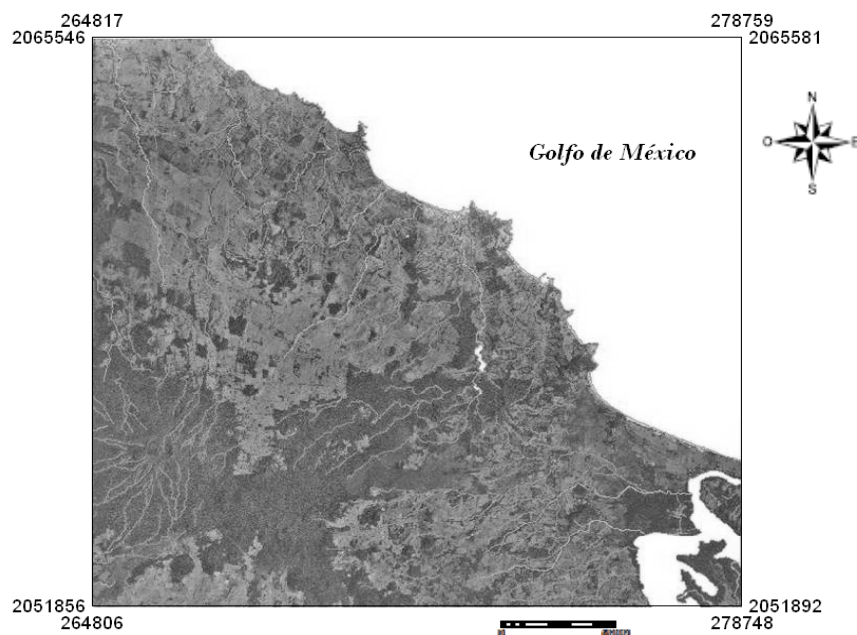
En relación a la escorrentía, ésta presenta una disminución muy marcada en el mes de mayo (37 mm), debido a que en estos días la mayor evapotranspiración por el aumento de temperatura provoca una mayor pérdida de agua que supera los ingresos por precipitación, ya que ésta es la menor en todo el año. Así, puede considerarse que los momentos más críticos para la

zona de Los Tuxtlas son los meses de abril y mayo, lo que coincide con la temporada de secas (nivel mínimo que alcanzan los cuerpos de agua debido a la escasez de precipitaciones); es decir, son dos meses con un marcado déficit de humedad, tanto en el ambiente como en lo que se refiere a la almacenada en el suelo.

### 5.3 Estimación del balance hídrico en zonas no conservadas.

En la Figura 13 se muestra la ortofoto, la cual es una presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre en el que todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico. Combina además las características de detalle de una fotografía aérea con las propiedades geométricas de un plano (INEGI 2009); pertenecientes al año 2000, se aprecia la cobertura vegetal de la región de Los Tuxtlas, así como las zonas deforestadas por el intenso cambio de uso de suelo a pastizales en varios ranchos ganaderos.

Por lo anterior es de gran importancia conocer los diversos componentes del balance hídrico para las zonas en las que no se cuenta con datos generados por estaciones climatológicas.



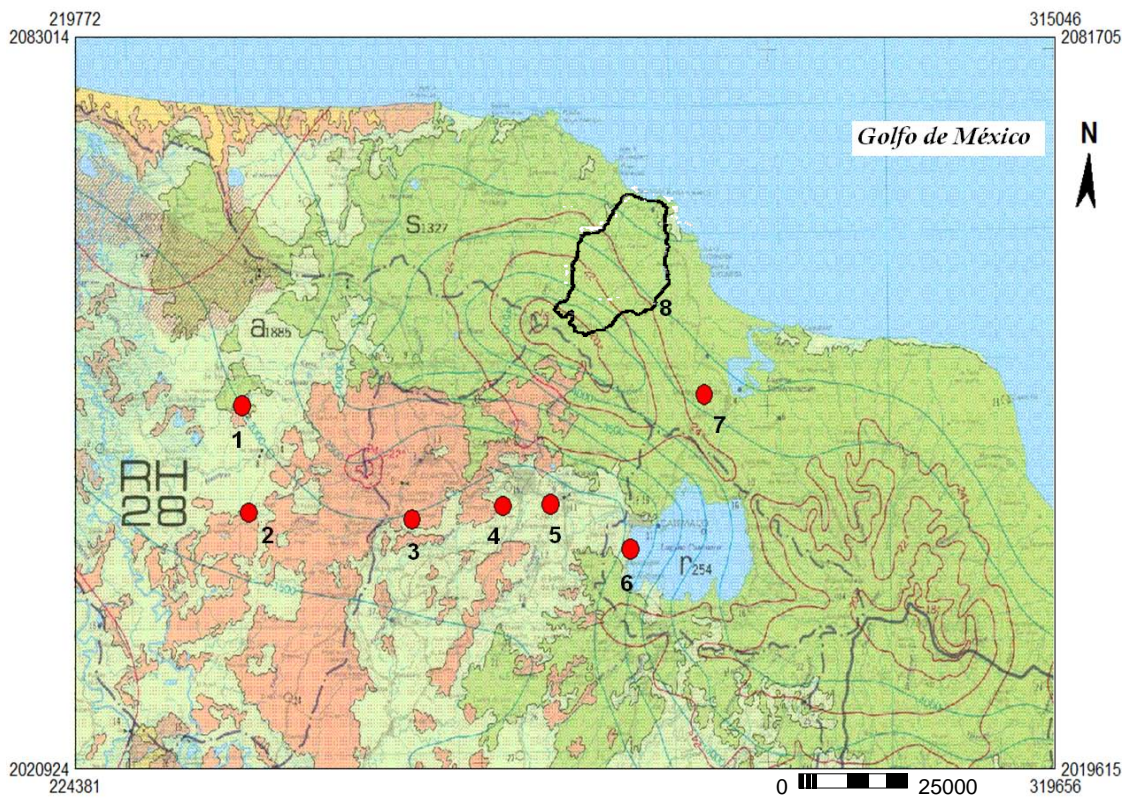
**Figura 13.** Ortofoto de la región de Los Tuxtlas (INEGI 2000; Escala 1:20,000).

**Tabla 1.** Componentes del Balance Hídrico (mm).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	ANUAL
<b>Precipitación (Pp)</b>	358	223	134	103	132	365	471	518	502	605	483	506	<b>4,399</b>
<b>Temperatura (T)</b>	20.73	22.14	23.82	25.79	28.07	27.81	27.18	27.03	26.73	25.47	24.04	22.33	<b>25.10</b>
<b>EVT Potencial (EVTp)</b>	58	73	95	129	174	175	161	154	140	115	92	70	<b>1,439</b>
<b>Déficit Pp (Pp-EVTp)</b>	300	150	39	-26	-45	190	310	364	362	490	391	436	
<b>Déficit Acumulado Pp</b>	0	0	0	-26	-71	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Humedad del Suelo</b>	350	350	350	322	278	350	350	350	350	350	350	350	<b>340</b>
<b>Cambio de humedad suelo</b>	0	0	0	-28	-44	72	0	0	0	0	0	0	
<b>EVT Actual</b>	58	73	95	129	174	175	161	154	140	115	92	70	<b>1,439</b>
<b>Déficit de humedad suelo</b>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Exceso de agua en suelo</b>	300	150	39	2	0	118	310	364	362	490	391	436	
<b>Agua disponible para escorrentía</b>	717	508	293	149	74	155	387	557	640	810	796	834	
<b>Escorrentía total</b>	358	254	146	74	37	78	194	279	320	405	398	417	<b>2,961</b>
<b>Balance hídrico</b>	-59	-104	-108	-72	-37	40	116	85	42	85	-7	19	<b>0</b>



En la figura 14 se puede observar el mapa con la ubicación de las estaciones climatológicas más cercanas al sitio de estudio, aquellas que tienen una mayor influencia a la cuenca delimitada (Anexo 1), observándose claramente que en el interior de la cuenca no se cuenta con ninguna estación, con excepción de una estación meteorológica de un programa de bachillerato que se encuentra en la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas. Las distancias (en línea recta) varían desde 43.25 km (estación Tres Zapotes), hasta 11.43 km (estación Sontecomapan).



**Figura 14.** Ubicación de las estaciones climatológicas (INEGI 2000, Carta de Regiones Hidrológicas Administrativas; Escala 1:250,000).

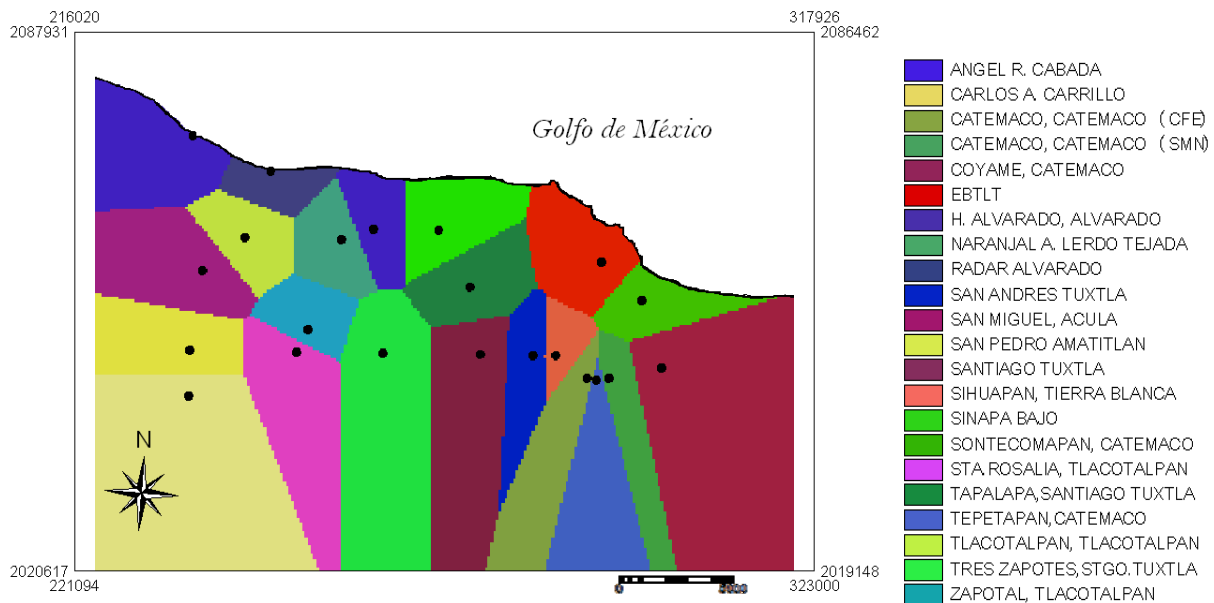
1. Ángel R. Cabada
2. Tres Zapotes
3. Santiago Tuxtla
4. San Andrés Tuxtla
5. Sihuapan
6. Catemaco
7. Sontecomapan
8. Estación de Biología Tropical los Tuxtlas.  Delimitación de la cuenca.

Sin embargo, para estimar la dinámica hidrológica de las zonas no conservadas, se realizó considerando 22 estaciones climatológicas localizadas en un cuadrante que incluyera a la cuenca delimitada, utilizando los Polígonos de Thiessen (Figura 15); éstos resultan sumamente útiles ya que consideran la



distribución de la lluvia y los polígonos no cambian a menos que se agreguen más estaciones climatológicas (Hinojosa 2001).

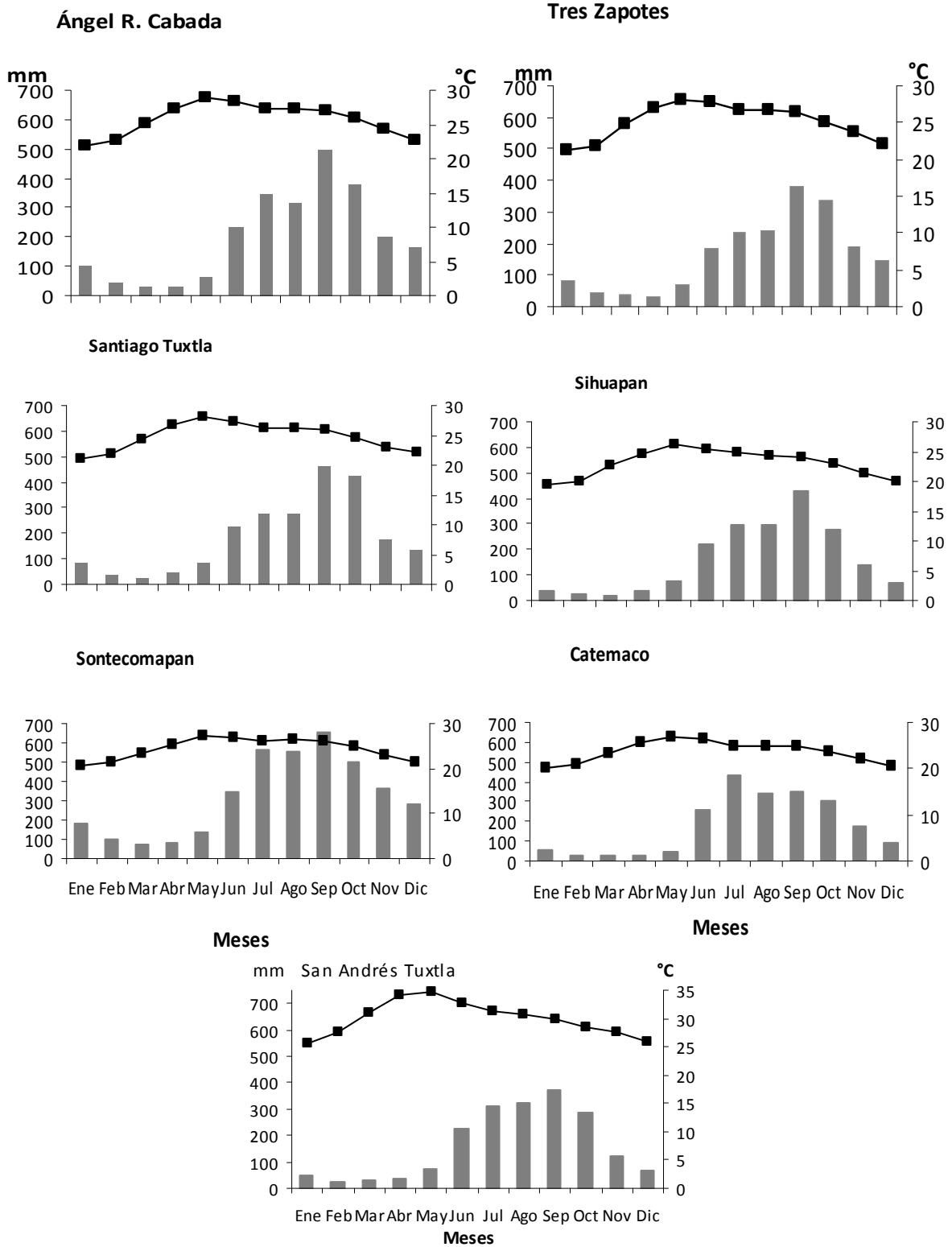
En la figura 15 se puede observar de color rojo el polígono con el área de influencia que tiene la Estación de Biología Tropical “Los Tuxtlas”, y que por lo tanto sería el que más representaría el comportamiento al interior de la cuenca que hemos estudiado, donde se resalta la importancia de la falta de información para la zona de estudio.



**Figura 15.** Polígonos de *Thiessen* (Escala 1:250,000). En color rojo se muestra el que corresponde a la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas.

En la figura 16, se muestran los climogramas basados en datos de precipitación y temperatura de las siete estaciones más cercanas (Anexo 1), con la finalidad de conocer la distribución de la precipitación y la temperatura.

En relación a la precipitación, es mayor en los meses de septiembre como denominador común en seis de las siete localidades analizadas; la excepción es la localidad de Catemaco que presenta la mayor lluvia en julio. La temperatura promedio mensual varía en el rango de 20 a 30°C, sin embargo la localidad de San Andrés Tuxtla presenta en mayo, una temperatura de hasta 34.60°C. Sihuapan registra 19.4 °C en enero, siendo la menor temperatura (Figura 16).



**Figura 16.** Climogramas (Precipitación ■ Temperatura ■ ).

## **VI. DISCUSIÓN**

Un estudio eco-hidrológico es un diagnóstico integrado, donde se analizan los componentes bióticos y abióticos que conforman un paisaje: cantidad e intensidad de la precipitación (eventos extremos), tipo de suelo (textura, tipo, profundidad de raíces, etc.), relieve (inclinación) y el cambio que se ejerce sobre el uso de suelo; para esto último es necesario conocer las características de la vegetación (composición y distribución), ya que además tiene un primordial papel en la dinámica y el balance de agua (Cressa 2003, Gerten *et al.* 2004, Hutjes *et al.* 1998).

Los cambios en la vegetación serán en gran parte responsables de la respuesta en los cambios en la dinámica hidrológica de un lugar determinado, por lo que el presente trabajo tuvo como finalidad realizar el balance hídrico de una cuenca recién delimitada en una selva tropical húmeda en la costa del Golfo de México y realizar una primera caracterización al analizar la dinámica hidrológica, considerando diversos parámetros físicos y biológicos.

### **6.1 Cuencas hidrográficas.**

En la actualidad, la transformación y el deterioro de los ecosistemas por diversas actividades agropecuarias, están generando altas tasas de deforestación, procesos intensos de degradación de suelos y pérdida de biodiversidad, entre otros, que tienen impactos sobre la cantidad, calidad y temporalidad del recurso agua; este problema constituye, hoy en día, uno de los principales limitantes del desarrollo humano y supervivencia de los ecosistemas (Pineda *et al.* 2005).

Durante la última década se ha fortalecido y extendido el manejo integral de cuencas hidrográficas en México, ya que es un instrumento que proporciona un espacio geográfico para el planeamiento del manejo eficiente y gestión de los servicios ambientales, entre los cuales se encuentra el agua, para resolver diversos problemas ambientales y

mejorar la calidad de vida de la población (Berelson *et al.* 2004, Bocco 2004, Pineda *et al.* 2005, Devito *et al.* 2005).

En México, se han llevado a cabo múltiples esfuerzos para elaborar divisiones hidrográficas considerando parámetros principalmente geográficos (topográficos e hidrográficos). Sin embargo, en nuestro sitio de estudio, no se contaba con una cuenca hidrográfica delimitada con criterios naturales que tuviera como finalidad investigaciones no sólo de índole ecológico sino incluso social, por lo que resultaba imperante contar con esta herramienta.

Al realizar esta delimitación, se busco además homogeneizar criterios biológicos y ecológicos que sirvan de base para futuras investigaciones, brindar un puente entre las distintas instituciones académicas y dependencias gubernamentales e incluso organizaciones sociales involucradas en el manejo de la región (UNAM, Instituto de Ecología, A.C., Universidad Autónoma de Veracruz, CONANP, etc.), así como brindar una base estandarizada de datos de diversas cuencas a nivel nacional para todo tipo de usuarios y fortalecer las capacidades locales y regionales (Red Mex-LTER).

Para realizar una primera caracterización de nuestra cuenca, nos basamos en datos históricos obtenidos en campo (estaciones climatológicas para la determinación de variables y poder estimar el balance hídrico), y los derivados de la percepción remota (cobertura vegetal, relieve, hidrografía, y realizar la delimitación hidrográfica). En el caso del análisis de los sitios donde no existe información, se utilizó un modelo que considerara las propiedades del sitio así como las variables que habrían de incluirse para evaluar el presupuesto hídrico (Red Mex-LTER) y realizar en un futuro una estimación más certera.

Analizando los resultados, nuestra cuenca tiene una extensión aproximada de 84 km<sup>2</sup>, con un porcentaje de 39.53% de vegetación conservada (33.21 km<sup>2</sup>) incluyendo las 640 ha que corresponden a la Estación de Biología de la UNAM, y un 60.46% de pastizales (50.79 km<sup>2</sup>); ello refleja las altas tasas de deforestación que se han registrado en la zona, que se estiman en 4.3% anual (Guevara *et al.* 2004). Si las

cifras continúan así, los problemas de disminución de humedad en el suelo, que ahora solo se presentan en uno o dos meses del año, como lo demuestra el resultado del balance hídrico, las consecuencias pueden agravarse llegando a modificar el balance en otras épocas del año.

Existen otros problemas adicionales; por ejemplo en una escala temporal, los límites de algunas cuencas en sus desembocaduras pueden llegar a variar debido a la época del año, a la modificación antrópica de la red de drenaje e incluso, a la presencia de algún fenómeno meteorológico extraordinario como un huracán, por lo que la erosión, el arrastre de sedimentos, el aumento del caudal en los ríos, etc., se verían acrecentados (Bruijnzeel 2004, Bocco 2004). En este sentido, los ciclones tropicales son responsables de aportes considerables de humedad por un aumento de la precipitación en el mes de septiembre y en menor proporción en el mes de octubre. Hasta el año de 1994, se tenían registrados 41 ciclones que han incidido en el estado de Veracruz, entrando dos de ellos por Los Tuxtlas (Soto y Gama 1997); el anticipar estos tipos de eventos, considerando que existen varios ríos de gran flujo en la zona y que diversas localidades están asentadas en las inmediaciones de dichos cauces, resulta de gran importancia.

Todo lo anterior debe considerarse según la división de la cuenca, es decir, en la parte alta, media o baja, ya que todo en el interior e incluso aún al exterior de la cuenca esta interconectado, por lo que los problemas no se limitan a pequeñas escalas sino que incluso puede llegar a modificarse el clima local y regional (Grace y Skaggs 2006, Devito *et al.* 2005, Bruijnzeel 2004).

## **6.2 Dinámica hidrológica.**

Para poder estudiar la dinámica hidrológica de una región determinada, en nuestro caso en Los Tuxtlas, Veracruz, es necesario utilizar el balance hídrico, ya que nos permite conocer las propiedades y variables de las entradas (precipitación) y salidas de agua (evapotranspiración) y los cambios en el almacén de agua en el suelo de un sistema

determinado (Dunne y Leopold 1978). Calcular las pérdidas por la evapotranspiración real a través de valores de temperatura y precipitación, resultan ser un indicador de los cambios en el funcionamiento hidrológico de un sistema, tanto en el suelo como en la vegetación, dichas pérdidas dependen del uso del suelo y la presencia de humedad en el mismo (Devito *et al.* 2005, Pascual 2000). Es importante remarcar que aunque no se determinaron en este trabajo, también cuando sea posible se deben considerar las reservas de agua y extracciones por las actividades del hombre (*J. Vose, Comunicación personal*).

Al realizar la estimación del balance hídrico, es importante considerar la capacidad de campo (cantidad de agua en el suelo que está disponible para las plantas) la cual puede ser afectada por factores como la temperatura del aire (importante por ser la responsable de evaporar el agua), el tipo de suelo y la profundidad de raíces. La capacidad de campo está relacionada también con la disponibilidad de agua, la cual está determinada por la porosidad en las zonas superficiales del suelo y la textura del mismo; todo lo anterior se refleja en la retención de humedad en el suelo, la infiltración a capas más profundas y, finalmente, en la recarga de los mantos freáticos (Devito *et al.* 2005, Dunne y Leopold 1978). El balance hídrico obtenido en esta tesis a una escala (1:50,000), cobra doble importancia por estar inmerso en la zona de mayor recarga en el país.

Siendo la precipitación pluvial un elemento vital en el desarrollo de animales y plantas, su suministro suele ser benéfico y sólo excepcionalmente perjudicial, tanto por exceso como escasez (Hinojosa 2001), y la distribución de la precipitación puede llegar a ser más importante que la cantidad de lluvias en determinadas zonas (Caro 2004).

En la región de los Tuxtlas, la presencia de precipitación se ve acrecentada en la zona noreste, debido al efecto de los vientos que llevan humedad proveniente del Golfo de México, y al efecto de sombra

de lluvia propiciado por el relieve de la Sierra Madre Oriental en la zona, con altitudes que van hasta los 1,700 m.

La temporada de “nortes” que se presenta en los meses de noviembre a enero, provoca una entrada constante y abundante de agua, aunado a una disminución de la temperatura y un aumento de la velocidad del viento. Como consecuencia, se genera una disminución en la evapotranspiración y una recarga en la humedad de suelo que será muy útil para la temporada de febrero a mayo, que corresponde a la época de secas.

La importancia de la evapotranspiración potencial (cantidad de agua que puede regresar a la atmósfera suponiendo que el agua disponible no sea un factor limitante), radica en que explica la demanda de agua para ser utilizada y podría estar disponible para los diversos componentes del ecosistema (McCabe 2007). Cuando la precipitación es escasa, es decir, menor que la evapotranspiración potencial, como ocurrió en Los Tuxtlas en el periodo de abril-mayo, provoca que la evapotranspiración actual sea igual a la precipitación mas la cantidad de agua contenida en el suelo, por lo que esta decrece de forma tal que el suelo se seca, provocando que el agua sea más difícil de remover y esté menos disponible para la evapotranspiración actual (McCabe 2007). Por el contrario, cuando la precipitación es muy abundante (como fue el caso en nuestra zona de estudio en el periodo de junio a diciembre), la evapotranspiración actual se iguala a la potencial habiendo mas humedad en el suelo que puede llegar a superar la capacidad de almacenaje del suelo; así, el agua en exceso eventualmente estará disponible para escorrentía.

El déficit de humedad es afectado por diversos factores como el tipo de suelo, la cantidad de materia orgánica en el suelo (que a su vez puede afectar la cantidad de agua) (Hossne y Salazar 2004), la radiación solar que determina la temperatura y la presencia de mantillo. En la zona de Los Tuxtlas la temperatura varía desde los 10°C hasta los 35°C dependiendo de la altitud, estando la primera presente a partir de los 1,200 m s.n.m. y la segunda en la región suroeste que corresponde a la

más continental. La temperatura más alta se presenta en el mes de mayo que a su vez es el mes con menor precipitación (Soto y Gama 1997), el mantillo tiende a acumularse en mayor proporción entre marzo y mayo (Álvarez-Sánchez y Guevara 1993), y como la temporada de mayor sequía es muy corta (abril-mayo), se esperaría que no existiese en la región déficit de humedad (Sánchez-Gallén; Guzmán-Moreno, *Comunicación personal*), sin embargo la diferencia en la entrada de agua por precipitación y la que está disponible para escurrir es de un poco más de 100 mm, por lo que existe un pequeño déficit en el mes de mayo; será necesario considerar de manera cuantitativa estos datos para estudios a futuro.

Sin embargo, si bien ello no repercute en condiciones de sequía para la zona, si tiene relevancia en cuestiones de recarga de mantos freáticos y flujos de escorrentía, por lo que deberá conocerse con mayor detalle los datos como la recarga de acuíferos subterráneos, el flujo saturado y no saturado e incluso determinar los mecanismos principales del transporte de solutos (Grace y Skaggs 2006).

Los resultados de escurrimiento y de evapotranspiración real para la zona de estudio están entre los más altos del país (escorrentía casi 3,000 mm y alrededor de 1,450 mm de evapotranspiración), comparándolos con el promedio anual de 2,000 a 4,000 mm y de 900 a 1,300 mm, de escurrimiento y evapotranspiración, respectivamente (CONABIO, en una escala 1:1,000,000). Nuestros datos a una escala mucho más grande (1:50,000), podrían proporcionar información con mayor detalle sobre el funcionamiento hidrológico.

### **6.3 El cambio de uso de suelo y la dinámica hidrológica.**

Al considerar a la cuenca como la unidad física básica en la regulación del agua (Maass 2003, **En:** Manson 2004), muchos de los patrones que se observan en ella dependen de su relieve, pendiente, tamaño, ubicación geográfica y tipo de suelo; además, los ecosistemas boscosos dentro de ellas, juegan un papel importante en la regulación de los patrones hídricos (Manson 2004). El papel de la cubierta vegetal en la



dinámica hidrológica es primordial, ya que influye en la infiltración de agua que está estrechamente ligada con el suelo, dado que las raíces de las plantas (e incluso los animales propios del suelo), forman poros proporcionándole al agua la oportunidad de pasar a través de ellos, contribuyendo a la recarga de agua subterránea (Caro 2004).

En diversos estudios se plantea que la cobertura vegetal es una variable importante en la respuesta hidrológica de las cuencas, ya que al existir una disminución de la cobertura de vegetación se produce un aumento del escurrimiento a las partes bajas de la cuenca (Caro 2004); incluso se ha encontrado que las respuestas en las cuencas de primer orden, los cambios en la dinámica hidrológica son dominados por la vegetación en un 80 a 85% (Cressa 2003).

Los cambios a gran escala del uso del suelo como la deforestación combinado por la desviación original de los ríos y el rápido aumento en los niveles de agricultura, han distorsionado gravemente la hidrografía natural de numerosos paisajes (Hutjes *et al.* 1998). El aumento en los flujos de los ríos debido a la deforestación puede ser de hasta 200%, por lo que esta agua se escapa de la cuenca en lugar de recargar los mantos acuíferos. La remoción de vegetación particularmente en las partes altas de la cuenca, interrumpe la captación de agua y detiene la carga de los acuíferos lo que provoca que exista menos agua disponible para la época de secas y aumente el ciclo de sequías e inundaciones (Bruijnzeel 2004).

Los tipos de vegetación, los diversos estratos y la arquitectura propia de cada individuo, utilizan diversas cantidades de agua (Grace y Skaggs 2006). Para nuestro sitio de estudio en Los Tuxtlas existen 400 especies arbóreas, mas o menos 1,000 ha de vegetación intacta (Sánchez-Gallén, *en preparación*), y se ha reportado que resulta en una gran complejidad estructural de la selva, el reconocer estratos en la vegetación (Bongers *et al.* 1988); todo ello resulta en una gran heterogeneidad.

Por lo anterior, se podría esperar que la dinámica hidrológica tendiese a mantener condiciones de equilibrio. Sin embargo, como se ha

mencionado anteriormente, en la región existe un intenso cambio de uso de suelo (deforestación causada por la gran demanda de pastizales para alimentar ganado), por lo que la cantidad de agua que es liberada a la atmósfera por evapotranspiración es muy grande, como consecuencia de las elevadas temperaturas y la radiación solar (Gerten *et al.* 2004), ya que no existe vegetación que proteja el principal almacén que es el suelo, y el agua se pierde con mayor facilidad.

Para estimar la capacidad de campo se deben considerar los tipos de suelo; y como en una gran parte de la extensión de nuestra cuenca la cobertura vegetal original ha sido reemplazada por pastizales, pueden incluso observarse diversos tipos de suelo.

Los cambios por la remoción de la cobertura vegetal y la consecuente exposición continua de los suelos desnudos a precipitaciones intensas, la desaparición gradual de la fauna edáfica y los incrementos de áreas ocupadas por materiales impermeables, tales como caminos y asentamientos, contribuyen a disminuir gradualmente las oportunidades de infiltración del agua de lluvia (Bruijnzeel 2004). Además, la compactación producida por el paso de ganado provoca una disminución en la porosidad lo que genera un aumento de la escorrentía, y si la compactación ocurre en zonas más profundas el principal problema es la disminución en la velocidad de infiltración (Hossne y Salazar 2004, Bruijnzeel 2004). Lo anterior, modifica la cantidad de agua contenida en el suelo saturado y que podría pasar a través de los poros formados por las raíces de las plantas.

Como resultado, la respuesta de las cuencas a la lluvia se hace más pronunciada y los incrementos en los caudales durante los eventos de precipitación en la época de lluvias, pueden ser tan grandes que llegan a impedir la recarga de las reservas de agua del suelo y subsuelo que alimentan y mantienen el flujo base, teniendo como consecuencia inevitable la disminución de caudal en épocas secas a pesar de que la evaporación reducida asociada al desmonte del bosque debería de haber producido flujos básicos más altos (Bruijnzeel 2004). Por otra parte, se pueden modificar los patrones de precipitación a través de la regulación

de clima local o incluso regional ya que la remoción de cobertura de la selva por pastizales de color mas claro aumenta el albedo (Manson 2004).

En el estudio de cuencas, es importante considerar la escala, ya que ésta puede ser pequeña y temporal como al analizar la dinámica de agua en el perfil del suelo, media como en los patrones anuales de cada ecosistema, o grande en el contexto del cambio climático; ya que existen impactos eco-hidrológicos en diferentes escalas espacio-temporales (Hutjes *et al.* 1998, Maass y Cotler 2007).

Por ello, es necesario considerar un modelo adaptativo a las condiciones de cada sistema, además de tener una perspectiva si el manejo es a corto o largo plazo, considerando el probable problema de enfrentarse a la escasez de datos (Maass y Cotler 2007), ya sea porque estén incompletos o que en ocasiones sean sitios donde solo se cuente con cartografía y datos históricos y no de estaciones climatológicas disponibles, como fue nuestro caso.

Los resultados demuestran escasez de la información disponible ya que, al realizar los polígonos de *Thiessen*, la zona de influencia de la cuenca de estudio se encontraría bajo un mismo tipo de clima (es decir mismos parámetros de temperatura y precipitación), lo cual desde luego no es realista pues como se ha mencionado hay un importante área con cambios de uso del suelo. Además, la extensión del área es demasiado grande para estimar las condiciones de precipitación y temperatura, y cómo se modificaría de manera particular la dinámica hidrológica.

Otro de los problemas que se presentan en la zona de estudio y que no deben dejarse de lado, es que los dueños de los potreros utilizan constantemente herbicidas que arrojan contaminantes a los ríos y cuerpos de agua. Por otra parte, la disponibilidad de agua es sobrepasada en numerosas ocasiones por la extracción de las reservas (mantos freáticos) (Escolero 2008), lo cual está vinculado fuertemente a las variaciones climáticas, por lo que es necesario considerar este factor en todo proceso de planeación del uso del recurso, pues la idea de realizar estudios a otras áreas de la cuenca con usos del suelo diferente,

es generar información para lograr un correcto manejo y conservación del paisaje.

En el mediano plazo será necesario aumentar los esfuerzos de investigación para establecer los efectos sobre las partes bajas de la cuenca, dado el depósito de sedimentos producidos por el cambio de uso del suelo (Bruijnzeel 2004).

## **VII. PERSPECTIVAS**

En el largo plazo, este tipo de estudios contribuye a generar conocimiento sobre la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, así como coadyuvar al establecimiento de criterios para el manejo y conservación de los mismos.

Los registros de las diferentes variables ambientales (precipitación, temperatura máxima y mínima, evaporación, radiación solar) u otros eventos climáticos (heladas, sequías), son extremadamente escasos y no confiables. Sólo recientemente la cantidad de datos confiables ha alcanzado un punto que permite su uso y análisis con diferentes propósitos en combinación con los Sistemas de Información Geográfica, lo que ha hecho posible la interpolación de datos ambientales para aquellas áreas donde la información climática es escasa o incluso inexistente (Téllez *et al. en preparación*).

Si bien existe un acervo importante de datos y equipo para desarrollar las tareas descritas en este trabajo, aún faltan datos básicos a escalas de resolución regional y local, y no siempre existen todos los especialistas que se requieren para aportar información oportuna a los tomadores de decisiones. Por ello el empleo de SIG en las modelaciones, facilita la generación de distintos escenarios que dan una mejor concepción de los procesos hidrológicos, por lo que su uso en el futuro se recomienda ampliamente.

La combinación de información cartográfica relevante (suelos: geología y litología, datos climáticos, vegetación: tipos y uso del suelo), así como de los elementos para obtener el balance hídrico y un estudio

detallado del conjunto suelo-vegetación, son necesarios para una interpretación más completa. Esto permitirá establecer la dinámica de evolución de los usos del suelo y correlacionarla con su impacto en el régimen hídrico, ya que las modificaciones en la cobertura vegetal y los impactos que el cambio de uso de suelo tiene sobre los patrones de escurrimiento y las cuestiones de parámetros ecohidrológicos se encuentran cambiados por alteraciones en la estructura y composición de la vegetación.

En nuestro país, el mal manejo del agua puede provocar una severa crisis acrecentada por las altas tasas de deforestación y la pérdida de los servicios hidrológicos proporcionados por los bosques y selvas del país, por lo que la modelación hidrológica es una herramienta fundamental en el manejo, planeación y aprovechamiento de los recursos hídricos, ya que muestran de forma cuantificable los puntos o causas de posibles problemas que pueden afectar una región desde el punto de vista del recurso hídrico.

Existen otros parámetros y variables que deberán ser importantes considerar a futuro para seguir caracterizando de forma integral la cuenca delimitada. Entre los principales están: el contenido de materia orgánica en el suelo, la interceptación de precipitación por el dosel, la velocidad de infiltración y la recarga de mantos subterráneos y la micromorfología de los suelos, la cual se ve afectada por la porosidad.

Por todo lo anterior, será necesario también, realizar la caracterización de la biodiversidad de la cuenca (fauna y flora), así como la caracterización socioeconómica, donde deberán analizarse la demografía, las actividades productivas, la importancia de la propiedad de la tierra y la información sobre el consumo y percepción de los usuarios en la cuenca sobre el recurso agua, además del cambio de uso de suelo y las prácticas de manejo, entre otros. Todo lo anterior, forma parte de los objetivos a futuro del proyecto de Ecohidrología de la Red Mex-LTER.

## VIII. CONCLUSIONES

- La cuenca delimitada en el área de influencia de la Estación de Biología de Los Tuxtlas, Veracruz, cuenta con una longitud de 13.62 km y en su parte más ancha con 9 km, abarcando una extensión de 84 km<sup>2</sup>. Ello la ubica en el rango de cuenca de tamaño pequeño teniendo un drenaje de tipo dentrítico.

- El sitio presenta una gran variedad de relieves siendo generalmente pronunciados, ya que la altitud va desde el nivel del mar hasta los 1,300 m.

- El balance hídrico indica una humedad casi constante al suelo de 350 mm, con un mes en el que disminuye a niveles de 278 mm ya que es en este mes (mayo) en que la evapotranspiración es mayor al presentarse las mayores temperaturas.

- Los niveles de agua disponible para escorrentía son aproximadamente del 50%, lo que parece indicar que probablemente la otra mitad alimentará los mantos freáticos de la región.

- El porcentaje de 39.5% de vegetación conservada y un 60.5% de pastizales en el interior de la cuenca, confirman las altas tasas de deforestación que ha tenido la zona.

- En la parte alta de la cuenca, se espera que la disponibilidad de agua sea correcta, debido a una adecuada capacidad de campo, todo como resultado de la cobertura de vegetación conservada.

- En las zonas no conservadas, la falta de información disminuye la posibilidad de realizar balances hídricos más específicos, sin embargo, al presentarse altas tasas de deforestación se estima que la evapotranspiración y el escurrimiento aumentarían, modificando la disponibilidad de agua en el suelo.

## LITERATURA CITADA

- ABER, J. D y J. M. MELILLO. 1991. *Terrestrial Ecosystems*. Saunders, Orlando, Florida, E.U. 429 pp.
- AGUA. 2009. *Centro Virtual de Información del Agua*. ([www.agua.org.mx](http://www.agua.org.mx); Revisada el 2 de octubre del 2009).
- ÁLVAREZ-SANCHEZ, J. y S. GUEVARA.1993. *Litterfall dynamics in a Mexican lowland tropical rain forest*. *Tropical Ecology* 34(2):127-142.
- ARNOLD, J.G., R.S. MUTTIAH, R. SRINIVASAN y P.M. ALLEN. 2000. *Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin*. *Journal of Hydrology* 227: 21–40.
- ARRIAGA, L., J.M. ESPINOZA, C. AGUILAR, E. MARTINEZ, L. GÓMEZ y E. LOA (Coordinadores). 2000. *Regiones terrestres prioritarias de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. (CONABIO). México.
- ATAROFF, S. M. 2002. *Precipitación e Intercepción en Ecosistemas Boscosos de los Andes Venezolanos*. *ECOTROPICOS* 15(2): 195–202.
- BERELSON, W.L., P.A. CAFFREY, J. y D. HAMERLINK. 2004. *Mapping Hydrologic Units for the National Watershed Boundary Dataset*. *Journal of the American Water Resources Association*. 40(5): 1231–1246.
- BOCCO, G. 2004. *Cartografía y Sistemas de Información Geográfica en el Manejo Integrado de Cuencas*. **En:** Helena Cotler (Compilador). *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. (Segunda Edición). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México D.F. 267 pp.
- BONGERS F., J. POPMA, J. MEAVE y J. CARABIAS. 1988. *Structure and Floristic composition of lowland rain forest of The Tuxtlas, México*. *Vegetatio* 74: 55–80.
- BRUIJNZEEL, L. A. 2004. *Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?* *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104:185–224.
- BURGOS, T.A. 1999. “*Dinámica Hidrológica del Bosque Tropical Seco de Chamela, Jalisco, México*”. Tesis de Maestría. UNAM.
- CAMPOS, C. A. 2004. *El Suelo*. **En:** Guevara S., J. Laborde y G. Sánchez-Ríos. (Eds.). *Los Tuxtlas. El Paisaje de la Sierra* Instituto de Ecología de Ecología, A.C. y Unión Europea. Xalapa, Ver. Pp. 181–193.

- CARABIAS, J. y R. LANDA. 2005. *Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de recursos hídricos en México*. UNAM, El Colegio de México, Fundación Gonzalo Río Arronte. 220 pp.
- CARO, C. A. 2004. *Modelación y cuantificación del efecto de la vegetación en la respuesta hidrológica de cuencas*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. 16 pp.
- CASTILLO-CAMPOS, G. y J. LABORDE. 2004. *La vegetación*. **En:** Guevara S., J. Laborde y G. Sánchez-Ríos. (Eds.). *Los Tuxtlas. El Paisaje de la Sierra*. Instituto de Ecología de Ecología, A.C. y Unión Europea. Xalapa, Ver. Pp. 231-267.
- CAYLOR, K. K., S. MANFREDA y I. RODRIGUEZ-ITURBE. 2005. *On the coupled geomorphological and ecohydrological organization of river basins*. *Water Resources* 28: 69-86.
- CONAGUA. 2006. *Comisión Nacional del Agua*. 2006. ([www.cna.gob.mx](http://www.cna.gob.mx), Revisada el 2 de octubre del 2009).
- CONANP. 2009. *Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas*. ([www.conanp.gob.mx](http://www.conanp.gob.mx), Revisada el 2 de octubre del 2009).
- COTLER, H., A. GARRIDO, R. MONDRAGÓN y A. DÍAZ. 2007. *Delimitación de cuencas hidrográficas de México, escala 1:250,000*. INEGI-INE-CONAGUA. México. 35 pp.
- COTLER, H. y A. PRIEGO 2004. *El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala*. **En:** Helena Cotler (Compilador). *El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. (Segunda Edición). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México D.F. Pp. 66-74.
- CRESSA, C. 2003. *Comparación entre estudios realizados en sub-cuencas y cuencas hidrográficas de Venezuela*. *ECOTRÓPICOS* 16 (2): 64-74.
- CUNNINGHAM, W., M.A. CUNNINGHAM y B. WOODWORTH. 2003. *Environmental Science. A Global Concern*. McGraw-Hill. New York. 646 pp.
- DAILY, G. C. 1997. *Nature's services. Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington, D. C. 392 pp.
- DAILY, G.C., S. ALEXANDER, P.R. EHRLICH, L. GOULDER, J. LUBCHENCO, P.A. MATSON, H.A. MOONEY, S. POSTEL, S.H. SCHNEIDER, D. TILMAN y G.M. WOODWELL. 1997. *Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems*. *Issues in Ecology* 2:1-16.
- DEVITO, K, I. CREED, T. GAN, C. MENDOZA, R. PETRONE, U. SILINS y B. SMERDON. 2005. *A framework for broad-scale classification of*



- hydrologic response units on the Boreal Plain: is topography the last thing to consider?* Hydrological Processes 19:1705–1714.
- DUNNE, T. y L. LEOPOLD. 1978. *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman and Company. New York. 818 pp.
- ESCOLERO, F. O. 2008. *Vinculación entre los tomadores de decisiones y los científicos*. Instituto de Geología. UNAM.
- FLORES-DELGADILLO, I. SOMMER CERVANTES, J. R. ALCALÁ MARTÍNEZ, J. ÁLVAREZ-SÁNCHEZ. 1999. *Estudio morfogenético de algunos suelos de la región de Los Tuxtlas, Veracruz, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 16 (1): 81–88.
- GERTEN D., S. SCHAPHOFF, U. HABERLANDT, W. LUCHT y S. SITCH. 2004. *Terrestrial vegetation and water balance—hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model*. Journal of Hydrology 286:249–270.
- GONZÁLEZ-SORIANO, E. 1997. *La vegetación*. **En:** González-Soriano, E., R. Dirzo, R. C. Vogt, (Eds.) 1997. *Historia Natural de Los Tuxtlas*. UNAM. México. Pp. 61–85.
- GRACE, J. M. y R. W. SKAGGS. 2006. *Water Balance of Drained Plantation Watersheds in North Carolina*. Hydrology and Management of Forested Wetlands. 58–67.
- GUEVARA, S., J. LABORDE y G. SÁNCHEZ-RÍOS. 2004. *Los Tuxtlas. El paisaje de la sierra*. Instituto de Ecología de Xalapa, A.C. y Unión Europea. Xalapa, Veracruz. 288 pp.
- HOLLING, C. S. 1978. *Adaptative Environmental Assessment and Management*. Wiley. London, UK.
- HOSSNE, A. y J. SALAZAR. 2004. *Límites de consistencia y sus implicaciones agrícolas en un suelo ultisol de sabana del estado Monagas, Venezuela*. Agronomía Costarricense 28 (1): 69–80.
- HUTJES, R. W. A., P. KABAT, S. W. RUNNING, W. J. SHUTTLEWORTH, C. FIELD, B. BASS, M. F. DA SILVA DIAS, R. AVISSAR, A. BECKER, M. CLAUSSEN, A. J. DOLMAN, R. A. FEDDES, M. FOSBERG, Y. FUKUSHIMA, J. H. C. GASH, L. GUENNI, H. HOFF, P. G. JARVIS, I. KAYANE, A. N. KRENKE, C. LIU, M. MEYBECK, C. A. NOBRE, L. OYEBANDE, A. PITMAN, R. A. PIELKE SR., M. RAUPACH, B. SAUGIER, E. D. SCHULZE, P. J. SELLERS, J. D. TENHUNEN, R. VALENTINI, R. L. VICTORIA y C. J. VÖRÖSMARTY. 1998. *Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle*. Journal of Hydrology. Volumes 212:1–21.
- INEGI. 2008. *Instituto Nacional de Estadística e Información Geográfica*. ([www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx), Revisada el 2 de octubre del 2009).

- INIFAP. 2006. *Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Veracruz, (Periodo 1961-2003)*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Xalapa, Veracruz. 298 pp.
- JARDEL, E., M. MAASS, A. CASTILLO, R. GARCIA B., L. PORTER, J. SOSA R. y A. BURGOS. 2008. *Manejo de Ecosistemas e Investigación a Largo Plazo*. Ciencia y Desarrollo 34. Pp. 30–37.
- JANAUER, G. A. 2000. *Ecohydrology: fusing Concepts and scales*. Ecological Engineering 16:9–16.
- JUJNOSKY, J. 2006. *Servicios ecosistémicos relacionados con el recurso agua en la Cuenca del Río Magdalena, Distrito Federal, México*. Tesis de maestría. UNAM. México.
- LABORDE, J. 2004a. *La Reserva de la Biósfera*. **En:** Guevara S., J. Laborde y G. Sánchez-Ríos. (Eds.). *Los Tuxtlas. El Paisaje de la Sierra* Instituto de Ecología de Ecología, A.C. y Unión Europea. Xalapa, Ver. Pp. 271–281.
- LABORDE, J. 2004b. *Los habitantes*. **En:** Guevara S., J. Laborde y G. Sánchez-Ríos. (Eds.). *Los Tuxtlas. El Paisaje de la Sierra* Instituto de Ecología de Ecología, A.C. y Unión Europea. Xalapa, Ver. Pp. 61–79.
- McCABE, G. J. y S. L. MARKSTROM. 2007. *A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface*. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia. 12 pp.
- MADEREY, R. L. 2005. *Principios de Hidrogeografía: Estudio del Ciclo Hidrológico*. Serie Textos Universitarios. Número 1. Instituto de Geografía, UNAM.
- MAASS, J.M. 2006. *Demandas hidrológicas de los ecosistemas naturales en México: Fase 1*. (Coordinador). Propuesta de Investigación por parte de la Red Mexicana de Investigación Ecológica de Largo Plazo. 34 pp.
- MAASS, J. M. y H. COTLER. 2007. *Protocolo para el manejo de ecosistemas en cuencas hidrográficas*. **En:** Cotler H. (Comp.). *El manejo integral de cuencas en México: estudios y reflexiones para orientar la política ambiental* (Segunda Edición). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México D.F.
- MANSON, R. H. 2004. *Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques en México*. Madera y Bosques 10 (1): 3–20.
- MARTÍN DEL POZZO, A. L. 1997. *Geología*. **En:** González Soriano, E., Dirzo, R. y Vogt, R. C. (Eds.) *Historia Natural de Los Tuxtlas*. Universidad Nacional Autónoma de México. pp. 26–31.

- MARTINEZ-RIVERA, L. M. 2008. *Caracterización de la cuenca*. Manual del curso: Manejo de Cuencas. Centro Universitario de la Costa Sur. Autlán de la Grana, Jal. Universidad de Guadalajara. 21 pp.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. 2005. *Ecosystem and Human Well-Being. Synthesis*. Island Press. Washington, D. C.
- MIRANDA F., y HERNÁNDEZ E. 1963. *Los tipos de vegetación de México y su clasificación*. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 28, 29–72.
- NAIMAN, R. J. 1996. *Water, society and landscape ecology*. Landscape Ecology 11 (4):193–196.
- PARE, LUISA y TAJÍN FUENTES. 2007. *Gobernanza ambiental y políticas públicas en Áreas Naturales Protegidas: lecciones desde Los Tuxtlas*. Instituto de Investigaciones Sociales. UNAM. México, D.F. 263 pp.
- PASCUAL, A. J. 2000. *La influencia de los usos del suelo en las variaciones de la evapotranspiración real en áreas antropizadas*. Departamento de Geografía, Universidad de Valencia. 7 pp.
- PENNIGTON, T. D. y J. SARUKHAN. 1998. *Árboles tropicales de México*. Universidad Nacional Autónoma de México–Fondo de Cultura Económica. México. 521 pp.
- PINEDA, R., M.A. DOMINGUEZ, L. HERNANDEZ y E. VENTURA. 2005. *Microcuencas y Desarrollo Sustentable*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. pp 227.
- PIÑA, P. P. 2007. *Regionalización eco-hidrológica de la cuenca del río Cuitzmala, Jalisco*. Tesis de Maestría. UNAM. México.
- RED Mex-LTER. 2009. *Red Mexicana de Estudios Ecológicos y a Largo Plazo*. ([www.mexlter.org.mx](http://www.mexlter.org.mx), Revisada el 2 de octubre del 2009).
- RIVERA, M., V., M. MAASS, J. A. BENÍTEZ, C. CORONADO, J. I. EUAN, E. GODÍNEZ, H. GONZÁLEZ, J. HERRERA, L.M. MARTÍNEZ, N. MERCADO, M. PÉREZ, V. M. REYES, E. RODRÍGUEZ y D. S. VALDÉS. 2008. *Eco-hidrología y demandas de agua en México*. Ciencia y Desarrollo. Volumen 34. Pp. 25–29.
- RODRÍGUEZ-ITURBE, I. 2000. *Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics*. Water Resources Research. Vol. 36(1): 3–9.
- SÁNCHEZ, F.J. 2004. *Medidas puntuales de permeabilidad*. Universidad de Salamanca, 11 pp. (<http://web.usal.es/javisan/hidro>, Revisada el 2 de octubre del 2009).
- SÁNCHEZ-GALLÉN, I., J. ÁLVAREZ-SÁNCHEZ, P. GUADARRAMA CHÁVEZ. 2003. *Distribución y productividad de raíces*. **En:** Álvarez-Sánchez, J. y Naranjo García E. (Eds.). *Ecología del suelo en la selva*

- tropical húmeda de México*. Instituto de Ecología, A. C., Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM. Xalapa, México. 69-78 pp.
- SÁNCHEZ-GALLÉN, I. *La diversidad vegetal mediada por los hongos micorrizógenos arbusculares, en parches de vegetación remanente, de una selva húmeda*. Tesis de doctorado. En preparación.
- SÁNCHEZ-VÉLEZ A., 1987. *Conceptos Elementales de Hidrología Forestal, agua, cuenca, vegetación*. Universidad Autónoma de Chapingo. División de Ciencias forestales. 150 pp.
- SOMMER-CERVANTES, I., L. FLORES-DELGADILLO y M. GUTIÉRREZ-RUIZ. 2003. *Caracterización de los suelos de la Estación de Biología Tropical Los Tuxtlas*. **En:** Álvarez-Sánchez, J. y Naranjo García E. (Eds.). *Ecología del suelo en la selva tropical húmeda de México*. Instituto de Ecología, A. C., Instituto de Biología y Facultad de Ciencias, UNAM. Xalapa, México. 17-67 pp.
- SOTO, M. y L. GAMA. 1997. *Climas*. **En:** González-Soriano, E., Dirzo, R. y Vogt, R. C. (Eds.). *Historia Natural de Los Tuxtlas*. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp 7-23.
- TELLEZ, O., M. A. HUTCHINSON, H. A. NIX y P. JONES. *El desarrollo de una base de datos climática para México*. En preparación.
- TORRES-OROZCO, R. E., C. JIMENEZ-SIERRA, J.L. BUEN, E. ABAD y A. PÉREZ-ROJAS. 1997. *Limnología*. **En:** González-Soriano, E., R. Dirzo, R. C. Vogt, (Eds.) 1997. *Historia Natural de Los Tuxtlas*. UNAM. México. Pp. 33-41.
- VAZQUEZ, H., G., E. DIAZ-PARDO, A. GUTIÉRREZ-HERNÁNDEZ, I. DOADRIO- VILLAREJO y A. DE SOSOTA. 2004. *Los Ríos y los Lagos*. **En:** Guevara S., J. Laborde y G. Sánchez-Ríos. (Eds.). 2004 *Los Tuxtlas. El paisaje de la sierra*. Instituto de Ecología de Ecología, A.C. y Unión Europea. Xalapa, Ver. Pp. 201-229.

**Anexo.**

Datos de estaciones climatológicas de mayor influencia a la cuenca de estudio en Los Tuxtlas, Veracruz (Bases de datos ERIC III; e INIFAP 2006 para el periodo 1961–2003).

**Ángel R. Cabada.**

Clave: 11. Ubicación: 95.28° 18.38' Altitud: 15 m s.n.m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	99.1	44.9	32.5	33	61.1	233.7	348.7	315.9	495.6	380.9	204.5	165.4	2415.3
Temperatura media	22	22.7	25.1	27.4	28.9	28.4	27.4	27.4	27.1	25.9	24.3	22.7	25.8

**Catemaco.**

Clave: 22. Ubicación: 95.06° 18.25' Altitud: 375 m s.n.m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	59.2	29.4	25.2	31.9	43.9	253.3	432.8	337.8	347.5	304.1	174.1	90.5	2129.7
Temperatura media	20	20.9	23.4	25.6	27	26.3	24.9	24.7	24.8	23.5	22.2	20.7	23.7

**Tres Zapotes, Santiago Tuxtla.**

Clave: 189. Ubicación: 95.27° 18.27' Altitud: 26 m s.n.m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	85.2	45.8	37.5	31.2	70.8	187.2	232.6	241.9	383.6	335.4	194	146.9	1992
Temperatura media	21.2	21.9	24.7	26.9	28.2	27.8	26.7	26.8	26.5	25.2	23.7	22.1	25.1

**Santiago Tuxtla.**

Clave: 161. Ubicación: 95.18° 18.27' Altitud: 271 m s.n.m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	80.9	40.8	23.9	42.8	84.4	228.6	276.8	277.7	462.3	424.8	177.2	131.2	2251.5
Temperatura media	21.1	22	24.4	26.8	28	27.3	26.3	26.1	25.9	24.5	23.1	22.1	24.8

**Sihuapan, San Andrés Tuxtla.**

Clave: 302. Ubicación: 95.11° 18.27' Altitud: 345 m s.n.m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	40.9	25.7	19.4	38.9	74.9	219.3	299.4	297.2	430.7	279.4	140.9	70.1	1936.8
Temperatura media	19.4	20.1	22.7	24.6	26.2	25.5	24.8	24.4	24.1	23	21.4	20	23

**Sontecomapan.**

Clave: 294. Ubicación: 95.03° 18.32' Altitud: 33 m s.n.m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	184.5	97.5	74.1	80.3	135.4	345.8	564.2	556.1	657.7	501.9	366.5	280.5	3844.5
Temperatura media	20.6	21.3	23.4	25.5	27.1	27	26.2	26.3	26	24.8	23.1	21.5	24.4

**San Andrés Tuxtla.**

Clave: 146. Ubicación: 95.13° 18.27' Altitud: 323 m s.n.m.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación	50.9	23.9	31.8	38.9	72.6	227.3	313.1	326.2	370.1	288.7	119.3	70.0	1933.0
Temperatura media	25.5	27.5	31.1	34.1	34.6	32.6	31.3	30.7	29.8	28.4	27.5	25.9	29.9