



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS
TROPICALES HUMEDAS.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

ISRAEL IZANAMI VÁZQUEZ COLUNGA

TUTOR:

DR. AGUSTÍN BREÑA NARANJO

INSTITUTO DE INGENIERÍA

México D.F., MARZO 2016



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón

Secretario: Dr. Pedrozo Acuña Adrián

Vocal: Dr. Breña Naranjo José Agustín

1 er. Suplente: Dr. Pozos Estrada Óscar

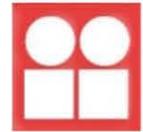
2 d o. Suplente: Dr. Hernández Espriú José Antonio

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:
Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ AGUSTÍN BREÑA NARANJO

AGRADECIMIENTOS



RESUMEN

El equilibrio hidrológico que existe en una cuenca es dependiente, en gran medida de la recarga de las aguas subterráneas y su posterior uso y/o extracción. En regiones con infraestructura hidráulica limitada o nula es necesario tener estimaciones confiables de la recarga de agua subterránea y su variabilidad para fines de planeación y gestión del agua, especialmente en áreas con problemas de estrés hídrico. El caudal base (aportación de agua subterránea con respecto al caudal total) que contribuye al caudal total en una cuenca es muy importante, ya que es un buen indicador de la cantidad y/o volumen aprovechable en un arroyo o río durante la época de estiaje. En regiones húmedas, varios estudios han demostrado que la recarga de un acuífero es una aproximación muy cercana al gasto base de una cuenca.

En la literatura, existen diversos métodos ampliamente conocidos para la estimación del gasto base, aunque existen pocos estudios para climas tropicales y en particular para México donde son inexistentes. El presente trabajo utiliza algunos métodos de estimación del gasto base (valores mínimos, filtros digitales y análisis de curvas de recesión) y la recarga en cuencas tropicales húmedas en México basados en la separación de hidrogramas.

Este estudio presenta una metodología simple pero confiable para estimar la recarga en regiones húmedas tropicales (precipitación media anual > 1000 mm) de la República Mexicana (Sierra Madre de Chiapas y Sierra Madre Oriental).

A partir de datos de hidrometría se obtuvieron los siguientes valores:

Para la Sierra Madre de Chiapas, la recarga anual obtenida con el método de valores mínimos se situó entre 175 ± 128 mm en años secos y 1997 ± 489 mm en años húmedos. Para el filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.925$, la recarga tuvo valores entre 115 ± 65 mm en años secos y 1675 ± 963 mm en años húmedos. Para el filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.90$, este valor estuvo entre 132 ± 73 mm en años secos y 1842 ± 1079 mm en años húmedos. Finalmente, mediante un análisis de recesión de hidrogramas los valores se situaron en 72 ± 33 mm para años secos, y 1863 ± 551 para años húmedos.

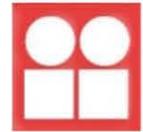




De igual forma, para la Sierra Madre Oriental, el método de valores mínimos proporcionó valores de la recarga anual entre 85 ± 26 mm en años secos y 703 ± 122 mm en años húmedos. El filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.925$ dio valores entre 72 ± 19 mm en años secos y 619 ± 98 mm en años húmedos y el filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.90$ dio valores entre 79 ± 21 mm en años secos y 644 ± 101 mm en años húmedos. Asimismo, con el análisis de recesión de hidrogramas los valores se situaron en 96 ± 33 mm para años secos y 716 ± 132 para años húmedos.

Finalmente, los valores obtenidos están dentro del rango de la recarga estimada por la CONAGUA. Los resultados obtenidos para estas cuencas de estudio demuestran que la recarga en regiones húmedas tropicales puede ser estimada mediante datos hidrométricos. Este trabajo concluye que estas metodologías representan una alternativa viable en comparación con otros métodos para la estimación de la recarga a nivel de cuenca mediante métodos más sofisticados como lo son los modelos numéricos y/o el uso de trazadores.





ABSTRACT

The hydrological balance that exists in a watershed is largely dependent on the recharge of groundwater and its subsequent use and/or extraction. In regions with hydraulic infrastructure limited or null, is necessary to have reliable estimates of groundwater recharge and his variability for the management of this resource, especially in areas with water stress issues. The percentage of base flow that contributes to the total flow in a river is very important, because it is a good indicator of the quantity and / or available volume in a stream or river during the dry season. In humid regions, several studies have indicated that the recharge in an aquifer is equivalent to the base flow of the basin.

In the literature, there are several methods widely known for estimating the base flow, although there are few studies for tropical climates, and in particular for Mexico where they are nonexistent. The present study uses some methods of base flow estimation (minimum values, digital filters and recession curve analysis) and recharge in humid tropical basins in Mexico, based on the separation of hydrographs.

This study presents a simple but reliable for estimating recharge in humid tropical regions of Mexico (Sierra Madre de Chiapas and Oriental) methodology. Using hydrometric data, the following results were obtained:

For the Sierra Madre of Chiapas, the annual recharge obtained with minimum values was situated between 175 ± 128 mm in dry years and 1997 ± 489 mm in wet years. For digital filter with a parameter $\alpha = 0.925$, recharging had values between 115 ± 65 mm in dry years and 1675 ± 963 mm in wet years. For digital filter with a parameter $\alpha = 0.90$, this value was between 132 ± 73 mm in dry years and 1842 ± 1079 mm in wet years. With the analysis of hydrograph recession, values were at 72 ± 33 mm for dry years and 1863 ± 551 for wet years. On the other hand, for the Sierra Madre Oriental, the minimum values method gives values of annual recharge from 85 ± 26 mm in dry years and 703 ± 122 mm in wet years. The digital filter with $\alpha = 0.925$ parameter gave values situated between 72 ± 19 mm in dry years and 619 ± 98 mm in wet years, and the digital filter with a parameter $\alpha = 0.90$ gave values between 79 ± 21 mm in dry years and 644 ± 101 mm in wet years. With the analysis

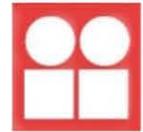




of hydrograph recession, values were at $96 \pm 33\text{mm}$ for dry years and 716 ± 132 for wet years.

Finally, the values obtained, especially in the Sierra Madre of Chiapas, are within the range estimated by the CONAGUA recharge. The methodology used in these basins shows that recharge in humid tropical regions could be estimated by hydrometric data. This represents a viable alternative compared to other methods of estimating recharge (numerical modeling, experimental studies).

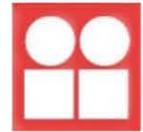




CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	iii
1. CAPÍTULO I.....	1
1.1 Estimaciones globales del almacenamiento de agua	1
1.2 Antecedentes	2
1.2.1 Tipos de recarga	2
1.2.2 ¿Cómo se estima la recarga?.....	2
1.2.3 Rangos de aplicación de las diversas técnicas de estimación de la recarga de acuerdo a distintas escalas (temporal, espacial, flujo hidrológico)	4
1.2.4 Estimación de la recarga a nivel global	6
1.2.5 Estimación de la recarga a nivel de cuenca.....	8
1.2.6 Estudios de recarga en México	9
1.3 Gasto Base y su aproximación a la recarga de agua subterránea	10
1.4 Justificación y objetivos.....	11
2. CAPÍTULO II.....	12
2.1 Registros hidrométricos y climáticos.....	12
2.2 Metodología para la estimación de la recarga	14
2.2.1 Método HYSEP	15
2.2.2 Filtro digital recursivo.....	16
2.2.3 Análisis de curvas de recesión.....	21
2.3 Relación entre la recarga y, la fisiografía y climatología de una cuenca	25
2.4 Generalidades de la zona de estudio	28
2.4.1 Geología	31
2.4.2 Geohidrología.....	36





2.4.3	Comparación recarga estimada contra estudios de la CONAGUA.....	38
3.	CAPÍTULO III.....	41
3.1	Estimación de la recarga	41
3.2	Validación de resultados	56
3.3	Relación entre la recarga, el clima y la fisiografía de una cuenca	59
3.4	Mapas de recarga e Índice de gasto base	69
4.	CAPÍTULO IV	71
5.	BIBLIOGRAFÍA	74







1. CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Estimaciones globales del almacenamiento de agua

El presente trabajo estima la recarga de agua subterránea, recurso de vital importancia. A continuación (Tabla 1.1) se muestran diferentes estimaciones globales del almacenamiento de agua, de la cual se puede identificar la cantidad que representa este apartado de la totalidad de agua disponible para su uso.

Tabla 1.1 Estimaciones de las diferentes formas de almacenamiento de agua a nivel global (expresada como lamina de almacenamiento sobre la totalidad de la superficie terrestre)

Fuente de los datos	Lvovitch (1970)	Baumgartner and Reichel (1975)	Korzun et. al. (1978)
Océanos	2686	2643	2624
Glaciares/Capas de hielo	47.1	54.7	47.2
Agua subterránea total	117.6	15.73 (excluyendo la antártica)	45.9
Agua subterránea activa*	7.84	6.98	-
Humedad del suelo	0.161	0.120	0.0323
Lagos	0.451	0.248	0.346
Ríos	0.00235	0.00212	0.00416
Atmosfera	0.0274	0.0255	0.0253

* El almacenamiento activo corresponde a aquel que no está permanentemente almacenado en el subsuelo (ej. un sistema de agua subterránea con salidas naturales como manantiales y ríos).





1.2 Antecedentes

1.2.1 Tipos de recarga

Existen dos mecanismos principales de recarga: directo e indirecto. Los mecanismos de tipo directo consisten en el volumen de agua que entra a la zona saturada (acuífero) provocado por la precipitación o el deshielo, la contribución de acuíferos adyacentes, así como ciertas actividades humanas (principalmente riego). La recarga directa se caracteriza por su alta variabilidad espacial debido a la heterogeneidad del medio poroso el cual permite el flujo de manera variada y no uniforme.

En los mecanismos de recarga de tipo indirecto se incluyen a los procesos de infiltración en cauces y planicies de inundación como consecuencia de una avenida, este tipo de recarga ocurre principalmente en climas áridos y cuyos cauces presentan un régimen intermitente, donde el nivel freático de un acuífero suele estar por debajo del fondo del cauce.

1.2.2 ¿Cómo se estima la recarga?

Existen diversas técnicas para cuantificar la recarga. La elección de esta depende de ciertas consideraciones (tipo de clima, escala espacial y temporal de la zona de estudio). Según Scanlon y Healy (2002), las técnicas para la estimación de la recarga se subdividen en varios tipos dependiendo de los datos con los que se cuenta: información proveniente de fuentes de agua superficial (ríos y lagos), información proveniente de la zona no saturada (humedad del suelo) e información proveniente de la zona saturada (acuífero).

Adicionalmente, el balance de aguas subterráneas supone el método más común de todos; debido a que este no se ve obstaculizado por las presuposiciones en cuanto a los mecanismos que definen el balance, se puede aplicar sobre una amplia gama de escalas espaciales y temporales. (Scanlon y Healy, 2002). Tindall y Kunkel (1990) describen la aplicación de este método.

De esta forma se tiene que para datos obtenidos en ríos y lagos se utilizan: la separación del gasto base de un hidrograma (Halford y Mayer, 2000), los trazadores de calor (Ronan et al. 1998), las mediciones con infiltrómetros (Taniguchi and Fukuo, 1993) y los modelos





numéricos (Singh, 1995).

Para datos obtenidos en la zona no saturada se utilizan los lisímetros (Young et al., 1996), la modelación numérica del flujo no saturado (ecuación de Richards) (Roman et al., 1996), diversos trazadores que abundan naturalmente en el medio poroso no saturado (cloro) (Phillips 1994), trazadores históricos (^3H) o aplicados (^{36}Cl) (Forrer et al. 1999). Por último, para la zona saturada se tiene el método de la fluctuación del nivel freático de un acuífero (Healy y Cook, 2002) así como el uso de diversos trazadores (ambientales- $\text{Cl}/^{14}\text{C}$ e históricos- $^3\text{H}/^3\text{He}$ /Clorofluorocarbonos) (Cook et al., 2001).

Los métodos químicos ambientales permiten estimar la tasa de recarga mediante el balance en el terreno de un trazador natural conservativo (Lerner et al., 1990). El ion cloruro es por sus características (ausencia de intercambio con el medio, estabilidad química, alta solubilidad, origen conocido y medida relativamente fácil y precisa) el trazador más empleado, especialmente en regiones áridas y semiáridas (Hendrickx y Walter, 1997).

Tabla 1.2 Técnicas apropiadas para estimar la recarga según el clima de la región de estudio (Scanlon et al., 2002).

Zona hidrológica	Técnica	
	Climas áridos y semi-áridos	Climas húmedos
Agua Superficial	Balance hídrico en el cauce Infiltrómetros Trazadores de calor Trazadores isotópicos Modelación de la cuenca	Balance hídrico en el cauce Infiltrómetros Descarga del gasto base Trazadores isotópicos Modelación de la cuenca
Zona no saturada	Lisímetros Plano de flujo cero Ley de Darcy Trazadores Modelos numéricos	Lisímetros Plano de flujo cero Ley de Darcy Trazadores Modelos numéricos
Zona Saturada	Trazadores Modelos numéricos	Fluctuaciones del nivel freático Ley de Darcy Trazadores Modelos numéricos





1.2.3 Rangos de aplicación de las diversas técnicas de estimación de la recarga de acuerdo a distintas escalas (temporal, espacial, flujo hidrológico)

Como se describió anteriormente, existen diversas técnicas para cuantificar la recarga dependiendo de la zona donde se obtuvieron los datos, asimismo estas técnicas tienen un rango de aplicación.

Las ilustraciones 1.1, 1.2, 1.3 muestran distintos rangos que han sido discutidos previamente, por lo cual proporcionan un buen indicio de la aplicación de estos para cada técnica. Las modelaciones numéricas generalmente pueden ser utilizadas para estimar cualquier rango en las tasas de recarga, sin embargo, la fiabilidad de estas estimaciones debe ser evaluada en términos de la incertidumbre asociada a los parámetros de cada modelo.

Cabe destacar, que el límite superior de las tasas de recarga mencionadas para las distintas técnicas generalmente refleja las tasas observadas en diferentes estudios, y puede que no refleje con exactitud el verdadero límite superior para la técnica empleada.

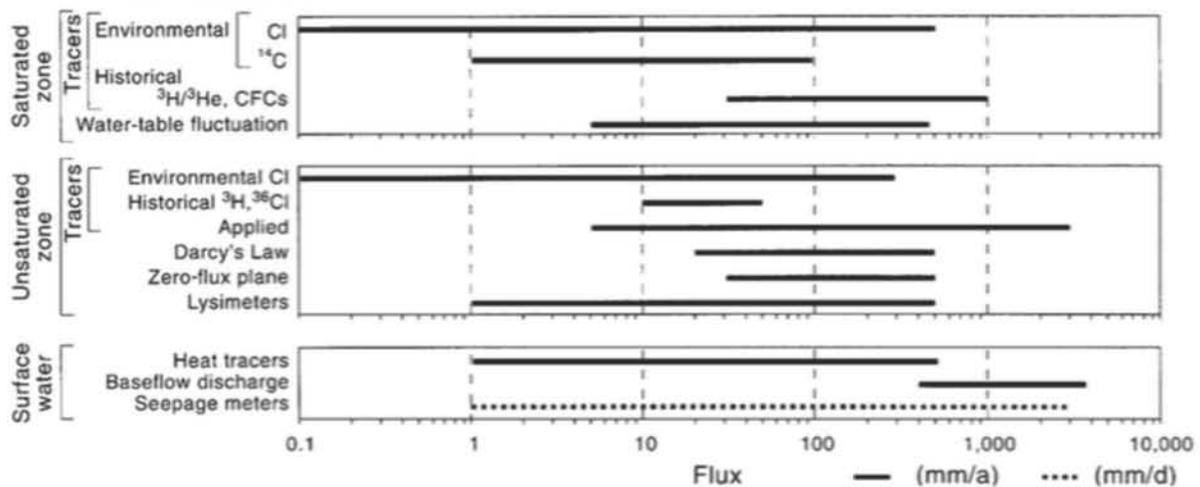


Ilustración 1.1 Rangos para estimar la recarga según la técnica empleada y según la escala (flujo hidrológico). Fuente: Scanlon et al. (2002)





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

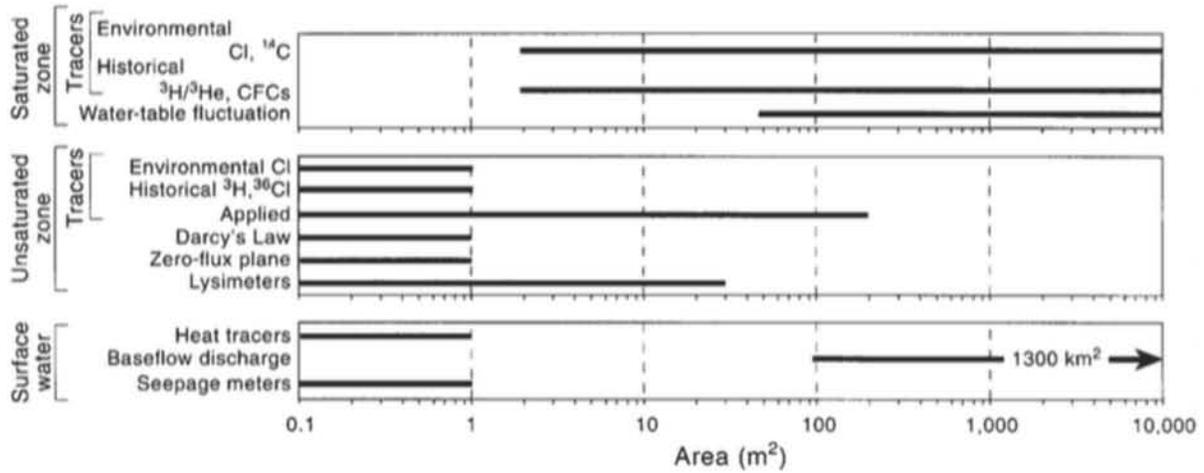


Ilustración 1.2 Rangos para estimar la recarga según la técnica empleada y según la escala espacial. Fuente: Scanlon et al. (2002)

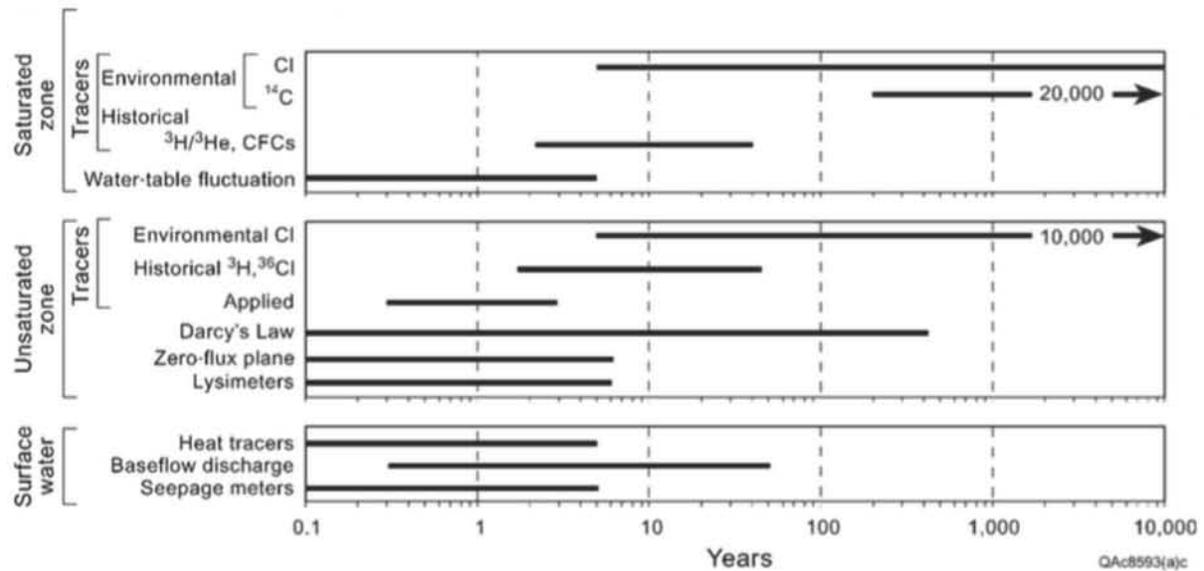


Ilustración 1.3 Rangos para estimar la recarga según la técnica empleada y según la escala temporal. Fuente: Scanlon et al. (2002)





1.2.4 Estimación de la recarga a nivel global

A nivel global, la recarga de los acuíferos es vital para estimar la tasa de renovación de agua subterránea, ya que este constituye el principal factor limitante para el uso sostenible de este recurso. En comparación con los recursos hídricos provenientes de las aguas superficiales, las aguas subterráneas son menos vulnerables a la contaminación, y su uso está menos restringido por las variaciones climáticas estacionales e interanuales.

Hasta la fecha, existen pocos estudios enfocados a estimar la recarga de aguas subterráneas a nivel global. Por ejemplo, Doll y Fiedler, (2008) estimaron el promedio de la recarga directa media anual a escala global utilizando el modelo hidrológico distribuido WGHM (WaterGAP Global Hydrology Model) con una resolución espacial de 0.5° por 0.5° y con datos de precipitación diarios.

El modelo de recarga de aguas subterráneas se modificó para las regiones semi-áridas y áridas, en función de estimaciones independientes de la recarga difusa de acuíferos, las cuales conducen a una estimación no sesgada en estas regiones.

En la ilustración 1.4 se puede observar que la recarga en la zona tropical húmeda de México varía desde 100 hasta 1000 mm/año.

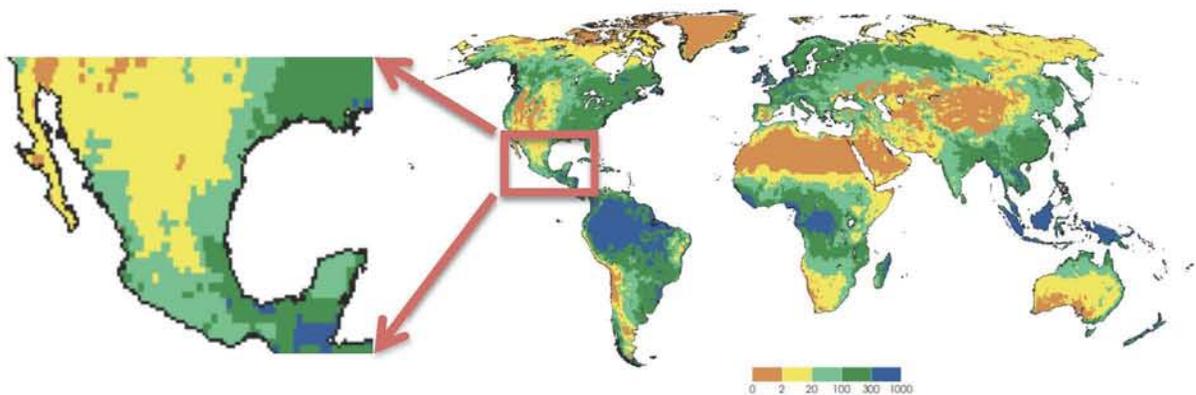


Ilustración 1.4 Promedio de la recarga de agua subterránea para el periodo 1961-1990 (mm/año) estimado por Doll y Fiedler (2008)

Posteriormente, Wada y otros (2010), en un estudio enfocado en la sobre-explotación global de los acuíferos, llegaron a estimar indirectamente la recarga media anual utilizando el modelo hidrológico PCR-GLOBWB, este modelo estima los flujos entrantes y salientes





en la superficie terrestre de forma espacialmente distribuida.

De esta manera, para cada celda con una escala espacial de 0.5° por 0.5° y para valores diarios de precipitación, evaporación y derretimiento de la nieve, el almacenamiento de agua en la zona no saturada y en la capa de agua subterránea adyacente se estimó teniendo en cuenta el intercambio de flujos verticales entre ambas capas, así como entre la capa superior y la atmósfera.

En dicho trabajo, se puede ver que la recarga media anual en las regiones húmedas tropicales de México se sitúa entre 20 y 1000 mm/año (Ilustración 1.5).

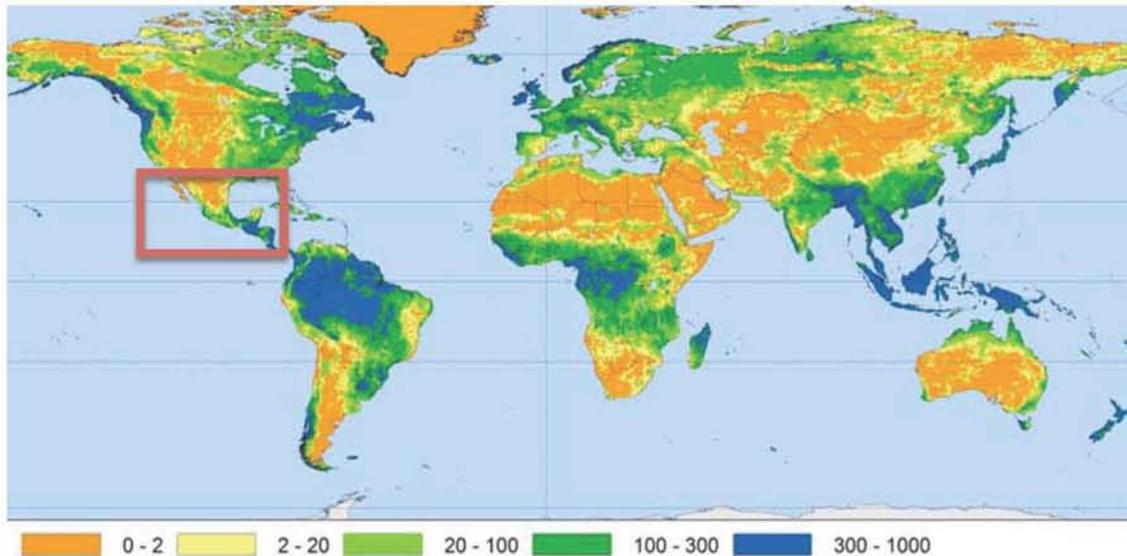


Ilustración 1.5 Estimación de la recarga de agua subterránea (mm/año) mediante el modelo PCR-GLOBWB (Wada et al., 2010)





1.2.5 Estimación de la recarga a nivel de cuenca

Sin embargo, cuando se requiere tener estimaciones de la recarga a una mayor resolución, o por ejemplo, a la escala de una cuenca, los modelos a gran escala pierden su utilidad. En este caso, la metodología más recomendable para tener una aproximación de la recarga consiste en estimar el gasto base.

A pesar de que este método puede ser aplicado en la mayoría de cuencas hidrológicas localizadas en regiones húmedas y cuyos acuíferos poseen niveles piezométricos someros durante la mayor parte del año (Scanlon et al., 2002), la mayoría de estudios de estimación de recarga con datos hidrométricos han sido llevado a cabo en Estados Unidos (Gebert et al., 2007; Gebert et al., 2011, Warren et al., 2011).

Por ejemplo, para este último estudio (Warren et al., 2011) fueron empleadas 123 estaciones de aforo con registros diarios continuos para el período 1970-1999.

Asumiendo que la magnitud del gasto base (Q_b) fue similar a la recarga, se obtuvo un mapa de la recarga anual en la mayor parte del estado de Wisconsin (Ilustración 1.6).

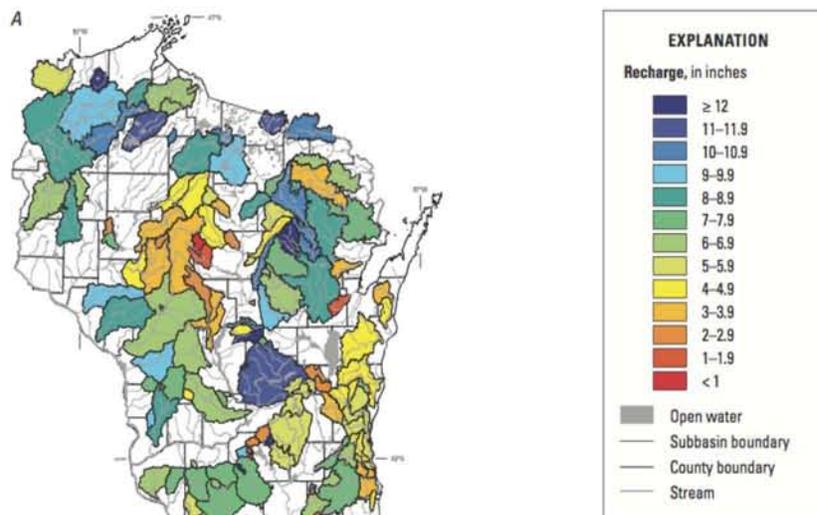
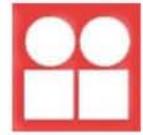


Ilustración 1.6 Recarga media anual para el estado de Wisconsin (Warren et al., 2011)





1.2.6 Estudios de recarga en México

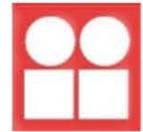
En México existe muy poca información referente a la estimación de la recarga de aguas subterráneas. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene a disposición del público general diversos estudios de disponibilidad media anual de agua subterránea (donde se incluye la recarga). Esta información se divide por estado y por acuífero (Ilustración 1.7).

La metodología utilizada por la CONAGUA para la estimación de la recarga natural es mediante el cálculo de la infiltración por precipitación, la infiltración en cauces y el flujo subterráneo horizontal, mientras que la recarga inducida se obtiene con datos de riego en zonas agrícolas. La recarga total se consideró como la suma de ambos tipos de recarga. La estimación de estos parámetros se realiza mediante el método (anteriormente descrito) que establece la NOM (Norma Oficial Mexicana) para calcular la disponibilidad de aguas subterráneas. Esta norma ha sido preparada por un grupo de especialistas provenientes de la iniciativa privada, instituciones académicas, asociaciones de profesionales, organismos de los Gobiernos de los Estados y Municipios y de la CONAGUA.



Ilustración 1.7 Clasificación de los acuíferos en México. Fuente: CONAGUA.





1.3 Gasto Base y su aproximación a la recarga de agua subterránea

Generalmente, el gasto base (como parte del gasto total) es atribuido a la descarga de agua subterránea (U.S. Geological Survey, 1989). Aunque el gasto base no es la recarga, en algunas ocasiones es considerado como una aproximación de la misma cuando la salida del flujo de agua subterránea, la evapotranspiración de la vegetación, así como algunas otras pérdidas del agua subterránea en la cuenca se consideran mínimas (condiciones presentes en las zonas tropicales húmedas).

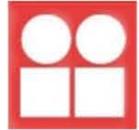
Cuando el gasto base se usa como una aproximación de la recarga, es referida como “recarga efectiva” (Daniel, 1996), “recarga base” (Szilagyi et. al., 2003) o “recarga observable” (Holtschlag, 1997), con el conocimiento previo de que probablemente representa una cantidad menor de la recarga real del acuífero.

Cuando se considera que el gasto base es igual a la recarga, se asume principalmente que el gasto base es igual a la descarga de agua subterránea, y que esta descarga es aproximadamente igual a la recarga. Con este supuesto, se tiene implícito que las consideraciones anteriores (evapotranspiración, flujo base, etc.) son mínimas, si estas condiciones son encontradas en el sitio de estudio, el gasto base puede proveer una estimación razonable de la recarga para periodos de tiempo largos (1 año o más) (Dennis et. al., 2005).

Finalmente, aunque diferentes métodos de separación de gasto base proporcionarán diferentes resultados, es importante notar que diversos estudios (Scanlon et. al., 2002), Dennis et. al, 2005), (Szilagyi et. al., 2003), (Holtschlag, 1997) entre otros, han demostrado una que esta hipótesis puede usarse para la obtención de la recarga, debido a los buenos resultados obtenidos.

Particularmente en el estudio realizado por Dennis y otros, se comparó el gasto base con la recarga medida por lisímetro en la zona de estudio para un periodo de 8 años, y para un periodo de 34 años respectivamente (en este último se utilizaron estaciones climáticas, estaciones hidrométricas y observaciones de sitio) encontrando valores similares.





1.4 Justificación y objetivos

El presente trabajo de investigación estudia la recarga media anual en acuíferos para cuencas localizadas en climas tropicales húmedos (Oaxaca, Chiapas y Veracruz). Se emplearon 3 métodos de separación de gasto base (Hysep, filtro digital y mediante un análisis de recesión de hidrogramas) para estimar la recarga.

De la misma manera, se compara su variabilidad temporal y espacial en función de ciertas características climatológicas y fisiográficas de cada cuenca, obteniendo de esta forma aquellas que tienen una mayor relación con la recarga, y que permiten estimar este parámetro de una forma indirecta.





2. CAPÍTULO II

METODOLOGÍA Y ZONA DE ESTUDIO

2.1 Registros hidrométricos y climáticos

En México, la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) pone a disponibilidad del público el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) del cual se pueden consultar los datos hidrométricos, almacenamiento de presas y flujo de sedimentos suspendidos. A través de esta base de datos se obtuvieron los escurrimientos medios diarios de las estaciones hidrométricas correspondientes a cada cuenca de estudio (Tablas 2.1 y 2.2).

Tabla 2.1 Estaciones hidrométricas en la Sierra Madre de Chiapas

Clave de la estación	Nombre de la estación	Área (km ²)
22028	Niltepec	103.24
22026	Zanatepec	265.91
22018	Ostuta	476.48
23013	Jesus	53.54
23009	Pijjiapan	208.17
23020	Huhuetan	328.59
23015	Cacaluta	164.00
23012	Novillero	285.14
23021	Tablazón	45.00
23008	Huixtla	378.87
23016	Cintalapa	242.72
23022	San Nicolás	128.10
23019	Despoblado	236.38
23017	Coapa	113.94





Tabla 2.2 Estaciones hidrométricas en la Sierra Madre Oriental

Clave de la estación	Nombre de la estación	Área (km ²)
26277	Los Hules	1459.05
26286	El cardón	586.09
26289	Terrerillos	1724.95
27001	Martínez de la torre	1642.74
28125	Carrizal	1507.57
28040	El tejar	3553.9
28111	Ídolos	385.187
26248	Tempoal	5329.04

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) a través del sistema CLICOM (Climate Computing Project) proporcionó datos de precipitación y evaporación potencial en uno o varios puntos localizados dentro de las cuencas de estudio. Las observaciones son diarias, y representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM. Cada una de las diferentes estaciones del país contienen diferentes periodos de registros, pero se pueden encontrar datos desde 1920 y en varios casos hasta el 2010.

Tabla 2.3 Precipitación y evaporación potencial media anual en las cuencas de estudio de la Sierra Madre de Chiapas

Nombre de la cuenca	Precipitación (mm/año)	Evaporación (mm/año)
Niltepec	1346.30	2197.90
Zanatepec	1556.60	2107.22
Ostuta	1210.46	2073.70
Jesus	1305.00	2011.80
Huixtla	2905.78	1462.30
Despoblado	2629.13	1470.60
Cintalapa	2266.12	1570.70
Pijjiapan	1915.74	1536.80
San Nicolas	2080.43	1610.00
Cacaluta	2339.70	1492.30
Novillero	2499.00	1619.80
Tablazón	2466.00	1616.30
Coapa	2410.00	-
Huhuetan	2895.21	1514.00





Tabla 2.4 Precipitación y evaporación potencial media anual en las cuencas de estudio de la Sierra Madre Oriental

Nombre de la cuenca	Precipitación (mm/año)	Evaporación (mm/año)
Terrerillos	1394.7	1185.3
Martínez de la Torre	1720.1	1199.3
El Tejar	1703.3	1400.7
Ídolos	932.8	1482.3
Carrizal	1019.1	1458.5
Tempoal	1127.1	1407
Los Hules	1389.7	1313.1
El Cardón	1199.5	1349.8

2.2 Metodología para la estimación de la recarga

Las regiones húmedas se caracterizan por niveles freáticos poco profundos ya que por lo general los acuíferos se encuentran a su máxima capacidad y el agua subterránea es generalmente descargada a través de pérdidas de evapotranspiración y del gasto base. La recarga difusa (proveniente de la precipitación) es dominante y las tasas de recarga en estas regiones son a menudo limitadas por la capacidad de los acuíferos para almacenar y transmitir agua (Scanlon et al., 2002), procesos que también están fuertemente afectados por la geología del subsuelo.

La recarga media anual en estas cuencas fue estimada mediante el método de separación de hidrogramas, el cual supone que, en acuíferos someros, el gasto base drenado por una cuenca es equivalente a su recarga total (Arnold et al., 1999; Scanlon et al., 2002; Delin et al., 2007).

La separación del hidrograma anteriormente se realizaba de forma manual mediante dos métodos ampliamente utilizados: el método de la recesión del gasto base (Olmsted y Hely, 1962) y los métodos de ajustes de curvas (Pettyjohn y Henning, 1979) pero la variación en las estimaciones y el error derivado del método manual provocaba incoherencias en este tipo de métodos, a la vez que demandaba bastante tiempo para su estimación. Para realizar la separación de los hidrogramas se utilizaron tres métodos: HYSEP basado en la técnica de mínimos locales, el método de separación mediante un filtro digital recursivo (FDR) y un análisis de curvas de recesión.





2.2.1 Método HYSEP

HYSEP (<https://water.usgs.gov/software/HYSEP/>) (Sloto y Crouse, 1996) es un programa computacional del United States Geological Survey (USGS) que puede ser usado para separar el gasto total en gasto base y gasto directo..

Este método consiste en un algoritmo que calcula sistemáticamente las líneas de conexión entre los puntos más bajos del hidrograma de caudales con lo cual es posible separar las componentes de gasto base y gasto directo.

La duración del escurrimiento superficial se calcula a partir de la relación empírica:

$$N = 0.827A^{0.2} \quad (2.0)$$

Donde N es el número de días después de que cesa el escurrimiento superficial, y A es el área de drenaje de la cuenca en kilómetros cuadrados (Aparicio, 1992).

El intervalo de 2N utilizado para separar un hidrograma es el número entero impar entre 3 y 11 más cercano a 2N (Pettyjohn y Henning, 1979). Es decir, si se tuviera un área de drenaje de una cuenca de 153 km², el intervalo 2N a utilizar sería 5, que es el número entero impar más cercano al valor real de 2N (4.52), donde N es igual a 2.26.

La separación del hidrograma comienza en un intervalo (2N*día) antes del inicio de la fecha seleccionada para el comienzo de la separación y termina un intervalo (2N*día) después del final de la fecha seleccionada para mejorar la precisión al principio y al final de la separación. Si el comienzo seleccionado y/o fecha de finalización coincide con el inicio y/o el final del período de registro, entonces el inicio de la separación coincide con el inicio del período de registro, y/o el final de la separación coincide con el final del período de registro.

Aunque existen variantes del método, en este trabajo se decidió por utilizar el de mínimos locales. El método de mínimos locales determina cada día si la descarga es la más baja en la mitad del intervalo 2N menos 1 día [0,5 (2N * -1) días] antes y después del día que se considera. Esto quiere decir que se va comprobando día por día si este corresponde a la descarga más baja para un intervalo de tiempo determinado por la relación anterior, si lo es, entonces se trata de un mínimo local y este se encuentra conectado por líneas rectas a mínimos locales adyacentes (ilustración 2.1). Los valores correspondientes del caudal para cada día entre mínimos locales se estiman mediante interpolaciones lineales.



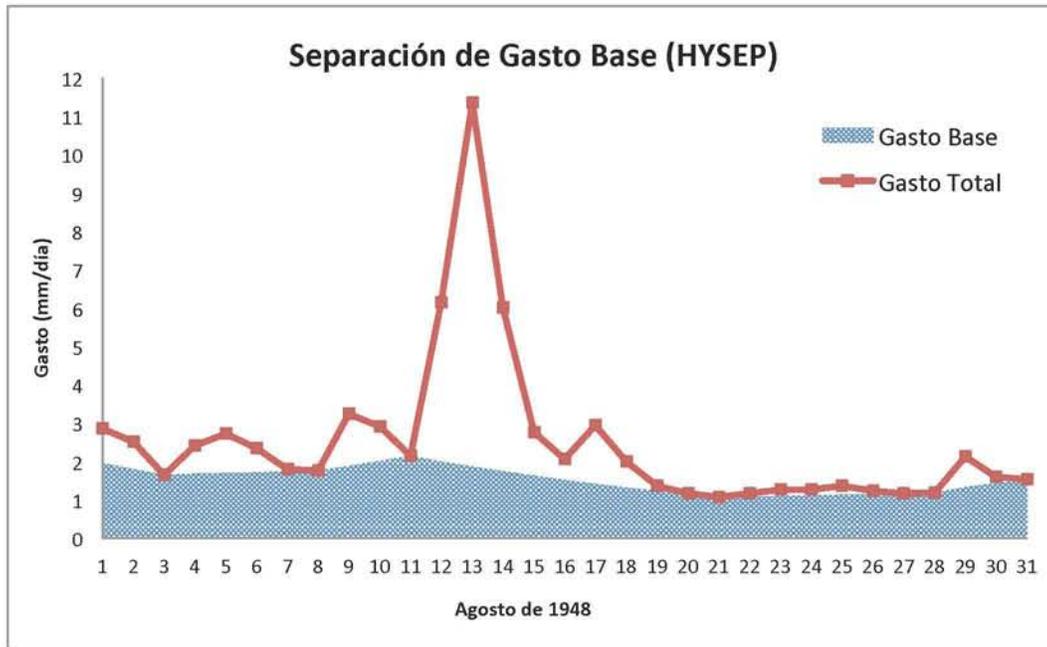


Ilustración 2.1 Ejemplo de separación de gasto base para la estación Ostuta (Oaxaca) con el programa HYSEP

2.2.2 Filtro digital recursivo

El filtro digital recursivo (Lyne & Hollick, 1979), aunque reconocido como carente de una base física, es fácil de automatizar y de repetir indefinidamente en series de tiempo (Nathan & McMahon, 1990). Una de las limitaciones de este método es que las series derivadas no reflejan ningún proceso físico subyacente, con lo cual no es posible hacer inferencias cuantitativas. Para la separación del hidrograma por medio del método del filtro digital, se utiliza una ecuación básica de filtrado (Lyne & Hollick, 1979) que se muestra a continuación:

$$q_f(i) = \alpha q_f(i - 1) + \frac{(1+\alpha)}{2} [q(i) - q(i - 1)] \quad (2.1)$$

Con las siguientes particularidades:

$$\text{Para } q_f(i) > 0; \text{ de otra forma } q_f(i) = 0 \quad (2.2)$$





Así mismo se tiene que:

$$q_b(i) = q(i) - q_f(i) \quad (2.3)$$

Donde $q_f(i)$ es el gasto directo en el instante (i); $q(i)$ es el gasto total al instante (i); $q_b(i)$ es el gasto base al instante (i) y finalmente α es un parámetro del filtro. Aunque la ecuación básica del filtro es de fácil comprensión, la misma requiere de ciertas condiciones, por lo cual se ha recomendado en la literatura el empleo de una “aproximación estándar” (Landson et. al., 2013).

Aproximación estándar

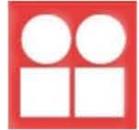
Este filtro ha sido ampliamente usado, de igual forma diversos paquetes de software han utilizado este método (BFIP, Aquapak, River Analysis Package -RAP-, Base Jumper), lo que ha resultado en una variación sustancial en el índice de gasto base (relación que existe entre la cantidad de escurrimiento base respecto al escurrimiento total).

La diferencia entre los resultados se debe a diferentes factores tales como el valor del parámetro α , los valores iniciales para la aplicación de este método así como algunos asuntos derivados de la calibración.

Por lo tanto, para generar una metodología estándar y evitar este tipo de problemas, se contemplan los siguientes puntos:

- a) Agregar valores al inicio y al final de una serie de tiempo para hacer frente a problemas de calibración.
- b) Especificar valores iniciales para cada pasada.
- c) Recomendar un número de pasadas dependiendo de los datos temporales usados (diarios u horarios).
- d) Especificar el procedimiento a utilizar con datos faltantes.
- e) Definir el parámetro α .





Serie rellenada (incorporación de valores iniciales y finales)

Para una aplicación adecuada del filtro, se propone generar una serie de tiempo rellenada mediante la incorporación de datos al inicio y al final de la serie de tiempo. La cantidad de valores por incorporar depende de la cantidad de datos de la serie de tiempo original: para una serie de tiempo de 1 a 100 datos se determina agregar 30 valores (30 al inicio y 30 al final), de 100 a 500 se añaden 100 y para más de 500 se incorporan 300 valores.

Si la cantidad de datos a agregar, es de aproximadamente 300 días o más, la influencia de las reflexiones del hidrograma en la recarga comienza a ser despreciable (Landson et. al., 2013).

Este último autor realizó un estudio de la sensibilidad del gasto base respecto a la cantidad de reflexiones, el tamaño de la serie de datos y el valor del parámetro α . De dicho trabajo se pudo concluir que:

- 1) Mientras α se incrementa, los efectos de la calibración se incrementan, por lo cual las reflexiones son más importantes.
- 2) Al mismo tiempo que la longitud de los datos incrementa, la influencia de las reflexiones decae.

De esta forma, si se tuvieran 501 datos en la serie de tiempo, se agregarían 300 valores, con lo que se tendría la siguiente ecuación:

$$q_{rellenada} = q_{301}, q_{300}, \dots, q_2, q_1, q_2, \dots, q_n, q_{n-1}, \dots, q_{n-300} \quad (2.4)$$

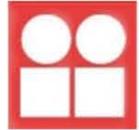
Donde $q_{rellenada}$ es la nueva serie de tiempo a la que se le añaden datos al inicio y al final, y q_n es el gasto número "n" que corresponde al número total de datos del registro.

Número de pasadas y valores iniciales

Debido a que la aplicación de la ecuación básica solo puede generarse a partir del segundo dato, se requiere asignar un valor inicial y para una mejor exactitud es deseable realizar diversas pasadas o corridas.

Así, la cantidad de pasadas a realizar en el registro, depende íntegramente del mismo, para registros medios diarios se recomiendan 3 pasadas mientras que para registros horarios se





sugieren 9 pasadas como apropiadas. Estas pasadas se realizan de la siguiente manera: la primera se efectúa hacia adelante, la segunda hacia atrás y finalmente la tercera nuevamente hacia adelante.

De esta forma se tiene que, para la primera pasada, el valor inicial del gasto directo será igual al valor inicial del gasto total para los datos rellenados, para la segunda (que se realiza hacia atrás) se empieza por calcular a partir del elemento final de la serie rellenada q_{n-300} , en este caso el valor inicial del gasto directo será igual al valor del gasto base (q_b) de la primera pasada, asimismo se utilizan los datos del gasto base como registro de entrada para la ecuación anterior.

Finalmente, para la tercera pasada, el valor inicial del gasto directo será igual al primer valor del gasto base de la segunda pasada, y el filtro es aplicado con los registros de gasto base calculados en la segunda pasada como valores de entrada. Para registros horarios, el orden se realiza de manera similar, alternando entre adelante y hacia atrás.

Valores faltantes

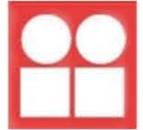
Los datos faltantes dificultan la estimación del gasto base. Por lo tanto, una detección de los periodos completos de los datos disponibles debe de realizarse en primera instancia, esto con el fin de identificar los periodos aptos para su análisis, particularmente para desechar aquellos periodos donde existen largos intervalos de valores faltantes.

De esta forma, identificando los periodos sin datos, se realizó lo siguiente: los periodos de valores ausentes de 3 meses o menos fueron eliminados. Para valores ausentes de más de tres meses las series de tiempo fueron divididas en segmentos de registros completos, para cada segmento se le aplicó el filtro digital y se agregaron valores al inicio y final de este, considerando la longitud del segmento, tal como se describió previamente.

Parámetro α

El valor de este parámetro influye en la atenuación del hidrograma, a pesar de que tradicionalmente un valor α de 0.925 ha sido ampliamente utilizado y recomendado (Nathan y McMahon, 1990). Históricamente, Nathan y McMahon compararon los





resultados de la separación del gasto base usando tres valores para este parámetro (0.9, 0.925 y 0.95) contra otras dos metodologías: separación manual y mínimos suavizados (Institute of Hydrology, 1980).

De esta forma, se encontró que los resultados fueron satisfactorios para estos tres valores, aunque recomendando el valor de 0.925 como óptimo debido a la similitud con las otras dos metodologías empleadas.

Es importante mencionar la existencia de cierta incertidumbre en estas estimaciones debido a la selección de un parámetro adecuado, pero esta puede disminuirse usando el valor recomendado en la literatura. No obstante, en el presente trabajo se realizó la estimación del gasto base con ambos valores para fines comparativos.

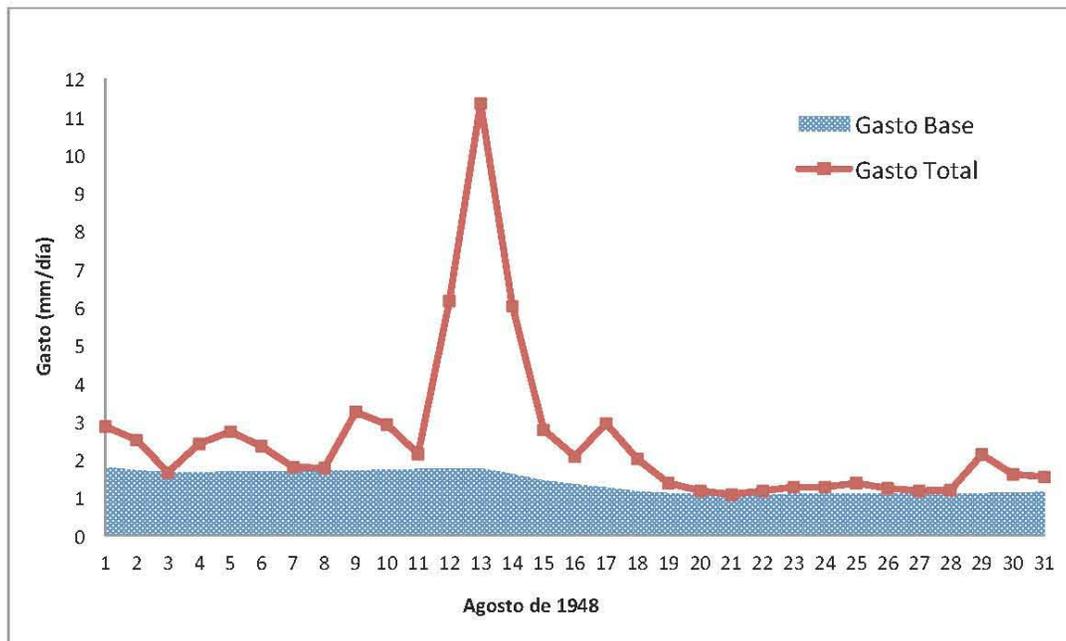


Ilustración 2.2 Ejemplo de separación de gasto base para la estación Ostuta (Oaxaca) con un filtro digital ($\alpha = 0.9$)



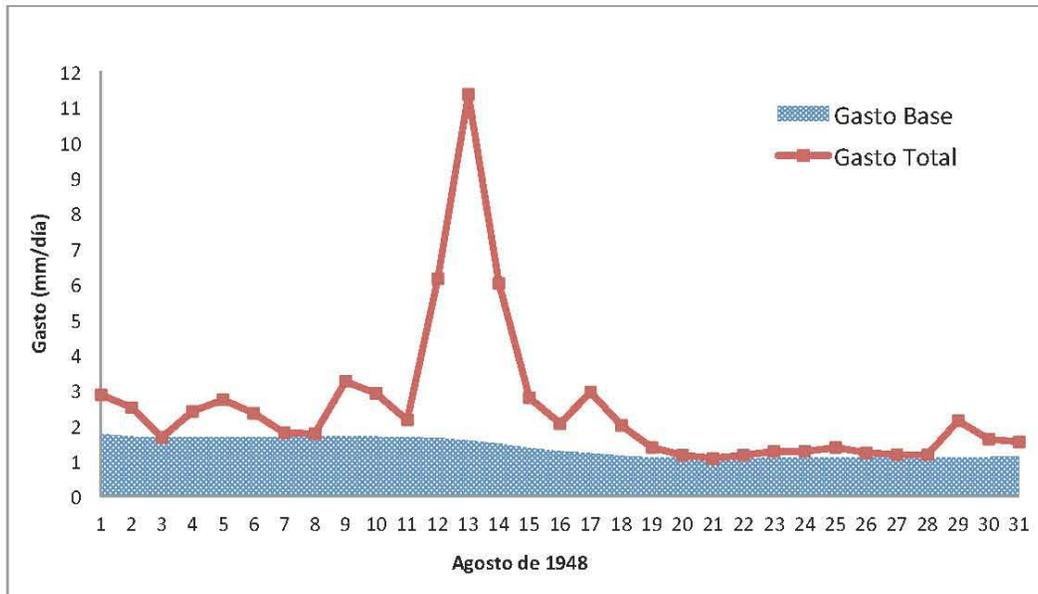


Ilustración 2.3 Ejemplo de separación de gasto base para la estación Ostuta (Oaxaca) con un filtro Digital ($\alpha = 0.925$).

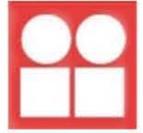
2.2.3 Análisis de curvas de recesión

Durante un evento de precipitación, una parte de esta se infiltra y recarga los acuíferos elevando sus niveles freáticos, por lo que el caudal de los ríos proviene de la descarga de agua subterránea mediante la contribución de acuíferos someros. En una curva de recesión, el efecto de la lluvia se detiene poco después de que finaliza la precipitación, y el hidrograma tiende a mostrar un comportamiento muy pronunciado al principio de la recesión mientras que la contribución del acuífero se vuelve más evidente con el tiempo. Así, la curva de recesión del gasto base describe la disminución del almacenamiento de agua subterránea.

El análisis de la curva de recesión permite la determinación de las características en el almacenamiento de agua subterránea activo (aquel que interactúa con los ríos y arroyos), y es un prerequisite para la separación del gasto base del gasto total, así como para obtener datos de la descarga de un acuífero somero (Tallaksen, 1995; Wittenberg, 1999; Aksoy y Wittenberg, 2011).

Tradicionalmente, los modelos conceptuales de recesión habían sido predominantemente





lineales (Horton, 1933; Barnes, 1939). Sin embargo, previos estudios realizados por Wittenberg (1994, 1999, 2003) han demostrado que la relación almacenamiento-caudal en cuencas hidrológicas sigue un comportamiento no lineal.

Algoritmo de almacenamiento no lineal

Las curvas de recesión han sido caracterizadas mediante el uso de una ecuación exponencial, teniendo una relación linealmente proporcional entre el almacenamiento de un acuífero (S) y la descarga a un cauce (Q). Esta relación matemática se origina de la ecuación diferencial no lineal de Boussinesq (Boussinesq, 1903; Boussinesq, 1904) y está dada por:

$$Q_t = Q_0 \exp\left(\frac{-t}{k}\right) \quad (2.5)$$

Donde Q_t es el gasto para t días después del gasto inicial; Q_0 es el gasto inicial para un tiempo $t = 0$ en la recesión, y k es el coeficiente de recesión.

De esta forma se tiene que la ecuación (2.1) refiere al hecho de que el acuífero se comporta como un almacenamiento linealmente proporcional a Q , lo que viene siendo:

$$S = KQ \quad (2.6)$$

Donde K es un coeficiente que varía de 0 a 1.

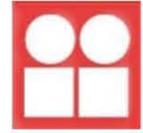
Cuando la relación lineal del almacenamiento se modifica añadiendo un exponente adimensional b a la ecuación, se obtiene lo siguiente:

$$S = aQ^b \quad (2.7)$$

De la ecuación (2.7) se puede observar que cuando $b = 1$ esta ecuación se convierte en la ecuación (2.6), por lo cual esta viene siendo un caso particular del algoritmo de almacenamiento no lineal. De igual forma, la ecuación de continuidad de un acuífero sin entradas de flujo está dada por:

$$\frac{dS}{dt} = -Q \quad (2.8)$$





Sustituyendo (2.7) en (2.8), y realizando la integración con respecto del tiempo se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q_t = Q_0 \left[1 + \frac{(1-b)Q_0^{1-b}}{ab} t \right]^{\frac{1}{b-1}} \quad (2.9)$$

Esta expresión corresponde a la encontrada por Coutagne (1948). Donde Q_0 es la descarga inicial que corresponde a $t = 0$.

El parámetro a toma las dimensiones de $m^{3-3b}s^b$ mientras que S se expresa en m^3 y Q en $\frac{m^3}{s}$. Si por el contrario, los volúmenes son expresados por unidad de área y el tiempo en días (S en mm, Q en $\frac{mm}{d}$) las unidades del parámetro a están dadas en $mm^{1-b}d^b$.

Parámetros a y b

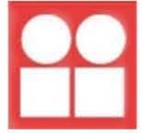
Este modelo se ha probado en cuencas con caudal perenne en diversas regiones del mundo (Wittenberg, 1994; Wittenberg y Sivapalan, 1999; Wang y Cai, 2009). Asimismo, se tiene una variación del gasto base (temporal y espacial), esta variación es producida por diversos factores climatológicos y fisiográficos, por lo que es necesario estimar la variabilidad de estos parámetros (Aksoy y Wittenberg, 2011).

El exponente b , de acuerdo a diversos análisis realizados (Wittenberg, 1994, 1999, 2003; Wittenberg y Sivapalan, 1999), tiene un rango que va del 0 al 1. No obstante, $b=0.5$ se considera como un valor estándar para acuíferos no confinados, mientras que el parámetro “ a ” dependerá de la porosidad y la conductividad hidráulica (Wittenberg, 1999).

En este estudio se analizaron las recesiones que tuvieran una duración mínima de cinco días consecutivos, y que la fecha de inicio de cada recesión se considerara dos días después del gasto pico debido a que durante los primeros días posteriores a una crecida el caudal del río está principalmente compuesto por flujo superficial y sub-superficial (Wittenberg y Sivapalan, 1999).

La validación de este ajuste se realizó mediante el cálculo del coeficiente de variación (CV):





$$CV = \sqrt{\frac{n^2 \sum(Q - Q_{calculado})^2}{(n-1) (\sum Q)^2}} \quad (2.10)$$

Donde n es el número de días de la recesión; Q es el gasto observado, y $Q_{calculado}$ es el gasto que se obtiene con la ecuación (2.9).

Para un coeficiente de variación $CV \leq 0.2$ se considera que los gastos calculados describen correctamente la curva de recesión (Aksoy y Wittenberg, 2011), mientras tanto, si la condición anterior no se cumple, se procede a eliminar el primer día de la recesión observada y nuevamente se ajusta el modelo.

Este paso se repite hasta que el coeficiente de variación cumpla con esa condición, o hasta que la curva de recesión tenga menos de cinco días de gastos consecutivos. Una vez que esta condición se satisface se procede a analizar la siguiente recesión.

Este procedimiento se realizó para todas las recesiones dentro de la serie de datos a analizar, para cada curva ajustada se guardó el valor del parámetro a y posteriormente se estimó el promedio mensual mientras que b permaneció fijo (Aksoy y Wittenberg, 2011).

Finalmente, para la obtención de los parámetros a y b en este trabajo, se procedió a minimizar de la suma del error cuadrático de los gastos diarios observados contra los gastos calculados por la ecuación 2.9.

Separación del gasto base

Para realizar la separación del gasto base se utilizó la relación inversa del algoritmo de almacenamiento no lineal dado por la ecuación (2.7) y se parte del ultimo valor hacia atrás en el eje de tiempo. De esta manera se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_{t-\Delta t} = \left[Q_t^{b-1} + \frac{(b-1)}{ab} t \right]^{\frac{1}{b-1}} \quad (2.11)$$

Donde Δt es el incremento de tiempo, el cual para este estudio corresponde a un día ya que las series de datos utilizados corresponden a gastos medios diarios.





Cuando el cálculo del gasto base en sentido opuesto al eje del tiempo coincide con la curva ascendente del gasto total se genera un punto de transición el día en que ocurre el gasto pico y la curva ascendente para el gasto base se estima con la ecuación (2.9) considerando al gasto inicial Q_0 como el gasto total del día anterior (en orden cronológico).

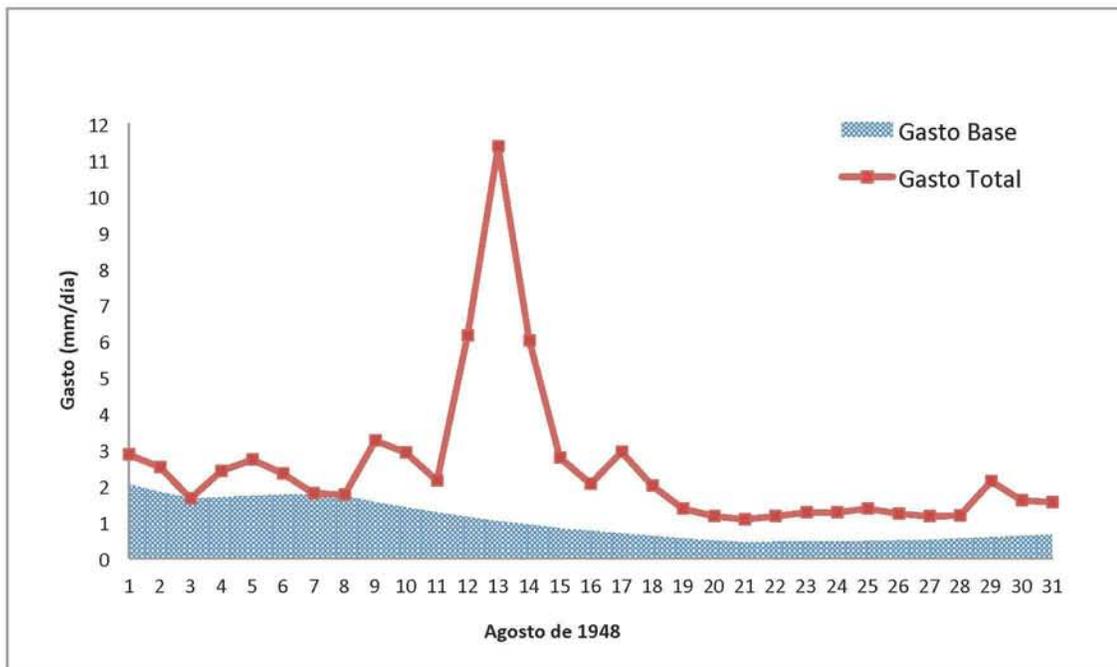


Ilustración 2.4 Ejemplo de separación de gasto base para la estación Ostuta (Oaxaca) con el algoritmo de almacenamiento no lineal.

2.3 Relación entre la recarga y, la fisiografía y climatología de una cuenca

Para el presente trabajo se comparó la variabilidad temporal y espacial de la recarga en función de ciertas características climatológicas y fisiográficas en cada cuenca de estudio, esto con el fin de obtener aquellas que cuentan con una mayor relación con la recarga, y que permiten inferir este parámetro de una forma indirecta.

Los valores medios anuales de las variables climatológicas más relevantes tales como la precipitación (P) y evaporación (E), e hidro-climatológicas como el índice de aridez





modificado (E/P) y el índice de Horton (V/W) fueron las características comparadas con los valores obtenidos de la recarga media anual, mientras que las características fisiográficas consideradas para cada una de las cuencas fueron las siguientes: pendiente media, pendiente ascendente del área acumulada (UAA, Upslope Accumulated Area, por sus siglas en inglés), índice topográfico de humedad (TWI, Topographic Wetness Index, por sus siglas en inglés) y la densidad de drenaje (Dd).

De igual forma, se realizó la comparación de estas características con el índice de gasto base (IGB). Este corresponde a la relación que existe entre la cantidad de escurrimiento base respecto al escurrimiento total para un periodo determinado, tal como se muestra en la ecuación (2.12).

$$IGB = \frac{Q_b}{Q_{total}} \quad (2.12)$$

La precipitación y la evaporación fueron obtenidas del Servicio Meteorológico Nacional a través de la base de datos CLICOM. El índice de aridez modificado se basa parcialmente en el índice de aridez propuesto por Budyko (1974), aunque con la diferencia que el numerador es la evaporación observada en un tanque de evaporación y no la evapotranspiración potencial estimada por alguna ecuación empírica.

El índice de Horton (HI), está definido por la ecuación (2.13)

$$HI = \frac{V}{W} \quad (2.13)$$

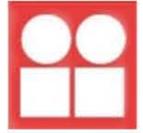
Donde V es la vaporización del agua a través de evaporación del suelo, la interceptación y la transpiración de la vegetación, y W es la humedad de la cuenca (agua disponible para la vaporización).

A nivel de una cuenca, V se puede estimar como la diferencia de la precipitación (P) y el escurrimiento total (q) mientras que W se estima como la diferencia de la precipitación (P) menos el escurrimiento directo (q_f) (Troch et al., 2009).

$$HI = \frac{P - q}{P - q_f} \quad (2.14)$$

El índice de humedad topográfica (TWI) fue desarrollado por Beven y Kirkby (1979) y se define con la siguiente ecuación:





$$TWI = \ln\left(\frac{UAA}{Tan\beta}\right) \quad (2.15)$$

Donde UAA es el área de pendiente ascendente local de drenaje a través de un punto determinado por unidad de longitud de contorno (Beven y Krikby, 1979) y $Tan\beta$ es la pendiente local.

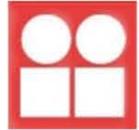
La densidad de drenaje se define como la relación entre la longitud total de la red fluvial de una cuenca (km) y su área total (km²):

$$Dd = \frac{L_{tc}}{A} = \frac{\sum_{j=1}^{Tc} L_t^i}{A}; \quad i = 1, 2, \dots, O_{cp} \quad (2.16)$$

Donde L_{tc} es la longitud total de la cuenca, A es el área y O_{cp} es el orden de corriente principal.

Las características fisiográficas de cada cuenca se obtuvieron mediante el uso del software ArcGIS.





2.4 Generalidades de la zona de estudio

La estimación de la recarga de agua subterránea se realizó en un grupo de cuencas ubicadas en la Sierra Madre de Chiapas, en los estados de Chiapas y Oaxaca, así como en un grupo de cuencas de la Sierra Madre Oriental, en el estado Veracruz.

Todas las cuencas se caracterizan por no tener obras de regulación aguas arriba de la estación de aforo que pudieran interferir en el régimen hidrológico.

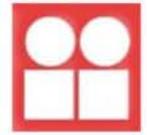
La Sierra Madre de Chiapas se caracteriza por su clima tropical húmedo con láminas de precipitación media anual por arriba de los 1200 mm y con valores máximos de más de 5000 mm durante años húmedos. Con el fin de tener estimaciones confiables de la recarga media anual y su variabilidad interanual, se analizaron 14 cuencas con una superficie menor a los 1000 km² durante un periodo de alrededor 35 años.

Estas cuencas entran en el rango de cuencas pequeñas a intermedias grandes (Tabla 2.5), de igual forma la pendiente media de las cuencas varía de 22 a 50 % (Tabla 2.6) con lo que se tienen vertientes muy pronunciadas y por lo tanto respuestas hidrológicas (tiempos de concentración) bastante rápidas.

Las 8 cuencas ubicadas en la Sierra Madre Oriental tienen una lámina de precipitación media anual de alrededor de 1500 mm y con valores de hasta 4000 mm durante periodos húmedos, estas cuencas tienen una superficie menor a 5500 km², por lo que su clasificación de acuerdo a su área va de intermedia pequeña a intermedia grande, y únicamente una cuenca de tamaño grande, la pendiente media de las cuencas tienen un rango de 13 a 30 % por lo que se clasifica como terreno accidentado aunque significativamente menor que las cuencas de la Sierra de Chiapas.

En promedio, los registros hidrométricos tienen un periodo de alrededor de 50 años.





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS



Ilustración 2.5 Localización de las cuencas de estudio en la Sierra Madre Oriental.





Ilustración 2.6 Localización de las cuencas de estudio en la Sierra Madre de Chiapas.





Tabla 2.5 Clasificación de la cuenca según su área.

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
<25	Muy pequeña
25-250	Pequeña
250-500	Intermedia pequeña
500-2500	Intermedia grande
2500-5000	Grande
>5000	Muy grande

Tabla 2.6 Clasificación de la cuenca según su pendiente.

Porcentaje (%)	Tipo de terreno
2	Llano
5	Suave
10	Accidentado medio
15	Accidentado
25	Fuertemente accidentado
50	Escarpado
>50	Muy escarpado

2.4.1 Geología

Las cuencas de estudio localizadas en el estado de Chiapas se encuentran contenidas en tres acuíferos: 0709 (Acapetahua), 0710 (Soconusco) y 0711 (Arriaga-Pijiapan). Por otra parte, las cuencas localizadas en el estado de Oaxaca se ubican dentro el acuífero 2008 (Ostuta). La distribución espacial de las cuencas hidrológicas con respecto a la delimitación de acuíferos se puede ver en la Ilustración 2.7.





Ilustración 2.7 Ubicación de acuíferos en la Sierra Madre de Chiapas. Fuente: CONAGUA.

continuación, se proporciona las características básicas geológicas de cada acuífero. Esta información fue obtenida del apartado “Disponibilidad de Agua Subterránea” de la página de internet de la CONAGUA, donde se pueden encontrar documentos divididos por estados y por acuíferos que contienen dicha información.

Acuífero 0709 (Acapetahua): La secuencia estratigráfica del área que comprende este acuífero y la zona de recarga, forman una columna geológica, cuya edad abarca desde el Paleozoico al Reciente. En este acuífero afloran materiales continentales y un complejo de rocas ígneo–metamórficas. Las rocas poco permeables, que también corresponden a las más antiguas, conforman el basamento que delimita al acuífero.

Las rocas en las que el acuífero está alojado, fueron originadas en ambientes continentales y de transición, cuyos componentes principalmente son materiales arenosos.

La recarga del acuífero que ocurre por la infiltración de lluvia alcanza volúmenes importantes, si se toma en cuenta el alto valor de la precipitación media anual y su





distribución durante el año. Este acuífero se considera libre.

Acuífero 0710 (Soconusco): Debido a las características de los depósitos aluviales y a su funcionamiento hidráulico, este acuífero se clasifica como libre y se encuentra delimitado por las siguientes fronteras naturales: al noroeste por una barrera de rocas ígneas graníticas que forman la Sierra Madre del Sur o Macizo Granítico, al noreste, por los productos piroclásticos del volcán Tacaná, al este, por el Río Suchiate, que sirve de límite entre México y Guatemala, y al sur y oeste con el Océano Pacífico. Este acuífero, es drenado básicamente por los ríos Suchiate, Cahuacán Coatán y Huixtla en época de estiaje, mientras que es recargado verticalmente en la temporada de lluvias

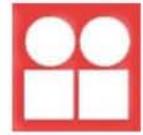
Acuífero 0711 (Arriaga-Pijijiapan): Dentro del área del acuífero, afloran materiales sedimentarios continentales y un complejo de rocas ígneas y metamórficas. El almacenamiento de agua subterránea, está formado principalmente por los materiales de relleno aluvial de la Planicie Costera. La recarga de este acuífero, es por infiltración directa de la precipitación sobre la planicie costera, así como también de la parte aluvial al pie de las Sierras Cristalinas, en donde las corrientes superficiales pierden velocidad e infiltran una gran parte de su volumen. Debido a las características de los depósitos aluviales y a su funcionamiento hidráulico, este acuífero se considera del tipo libre.

Acuífero 2008 (Ostuta): La región está formada por rocas ígneas intrusivas, que han sido cubiertas, en varias etapas, por rocas extrusivas y que contienen localmente algunas rocas metamórficas con edades que varían desde el Precámbrico al Mioceno. A continuación, se muestra el mapa geológico de la Sierra Madre de Chiapas y la planicie costera (Ilustración 2.8).



Ilustración 2.8 Geología de la Sierra Madre de Chiapas. Fuente: INEGI





Para la región de la Sierra Madre Oriental, las cuencas abarcan distintos sistemas geohidrológicos (un total de 13). En el estado de Hidalgo, se tienen los siguientes acuíferos: 1302 (Orizatlán), 1303 (Atotonilco), 1304 (Xochitlán) y 1305 (Atlapexco). Para el estado de San Luis Potosí se tiene únicamente el acuífero 2419 (Tamuín). Para el estado de Veracruz se abarcan los acuíferos 3003 (Martínez de la Torre), 3004 (Perote Zayaleta), 3005 (Valle de Actopan), 3006 (Costera de Veracruz), 3008 (Cotaxtla), 3017 (Tampico Misantla) y 3018 (Jalapa-Coatepec). Finalmente, para el estado de Puebla se tiene el 2102 (Libres Oriental).

En la ilustración 2.9 se puede observar que, a diferencia de la Sierra Madre de Chiapas, las cuencas de estudio en la Sierra Madre Oriental no están únicamente contenidas en un solo acuífero, si no que abarcan varios dependiendo de su ubicación.

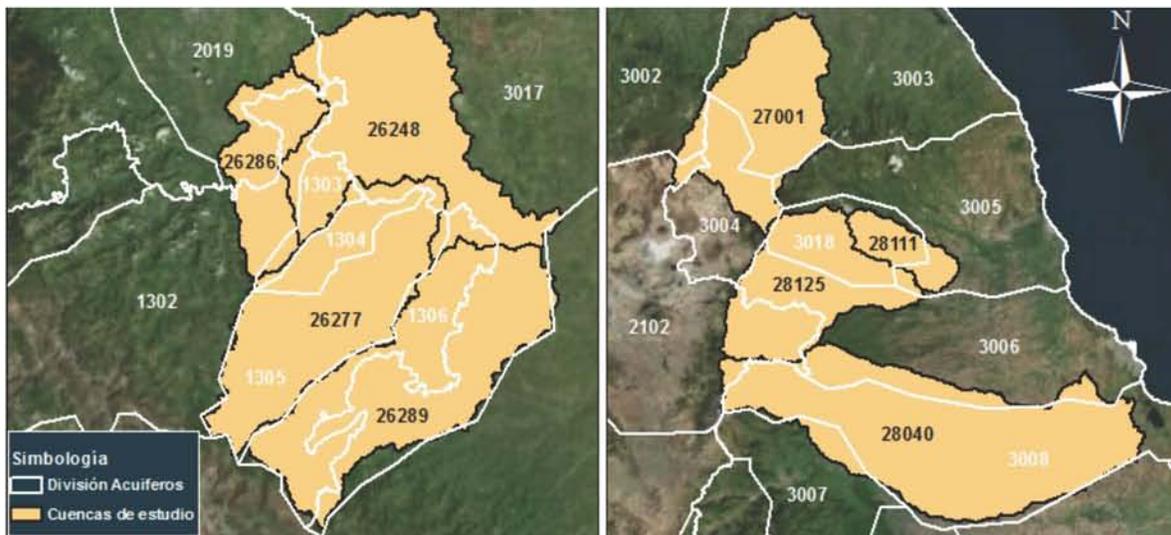


Ilustración 2.9 División de acuíferos en la Sierra Madre Oriental.

Acuíferos 1302 (Orizatlán), 1303 (Atotonilco), 1304 (Xochitlán): Los acuíferos localizados en el estado de Hidalgo tienen una geología conformada por lutitas y areniscas del Pérmico y Triásico, a las que les sobreyacen calizas y lutitas del Jurásico. Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir los acuíferos como de tipo libre, heterogéneo y anisótropo. La recarga natural se produce por efecto de la infiltración de la lluvia que se precipita en el valle y a lo largo de los escurrimientos en los arroyos y la que proviene de zonas montañosas contiguas a través de una recarga por flujo horizontal subterráneo. De igual forma aunque en menor grado la infiltración de los





excedentes del riego agrícola y del agua residual de las descargas urbanas, constituyen otra fuente de recarga a los acuíferos.

Acuíferos 3003 (Martínez de la Torre), 3004 (Perote Zayaleta), 3005 (Valle de Actopan), 3006 (Costera de Veracruz), 3008 (Cotaxtla), 3017 (Tampico Misantla), y 3018 (Jalapa-Coatepec): Esta zona geológica localizada en el estado de Veracruz está constituida por lutitas y arsénicas formadas desde el Paleoceno al Oligoceno, además de material volcánico, los que en su conjunto forman una amplia planicie.

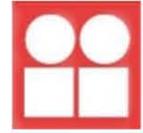
Estos acuíferos presentan un comportamiento hidráulico de tipo libre. Adicionalmente, los acuíferos 3017 y 3018 están constituidos geológicamente por rocas sedimentarias calizas, dolomitas, areniscas, y margas. La recarga principal proviene de la infiltración de la precipitación que se presenta en la zona, así como por el flujo horizontal subterráneo proveniente de la parte oeste.

Acuíferos 2102 (Libres Oriental) y 2419 (Tamuín): Estos acuíferos -localizados en Puebla y San Luis Potosí, respectivamente- están conformados principalmente por rocas sedimentarias, correspondiendo a casi un 45% de lutitas, localizadas al centro y norte del área, un 30% de lutitas-areniscas identificadas al centro y sur, y un 20% de material aluvial, así como de rocas ígneas (intrusivas y extrusivas). La recarga en estas regiones es principalmente debida a la precipitación.



Ilustración 2.10 Geología de la Sierra Madre Oriental. Fuente: INEGI





2.4.2 Geohidrología

De igual forma, se encuentra disponible información cuantitativa y cualitativa de los diferentes acuíferos que forman parte de este trabajo.

Acuífero 0709 (Acapetahua): En 1998, la UNAM realizó un estudio geofísico e hidrogeoquímico del acuífero de Acapetahua, los resultados de dicho estudio, indican que el basamento cristalino tiene espesores variables entre los 100 y los 500 m. Las concentraciones de los iones se incrementan desde la sierra hacia la costa, indicando la presencia de una interface salina, que sigue la forma de la costa, con excepción de la zona de lagunas costeras y su desembocadura, donde también se incrementa el espesor de los sedimentos. La mayor parte de las muestras, pertenecen a la familia bicarbonatada-cálcica en la parte noroeste, mientras que en la porción sureste predominan muestras pertenecientes a la familia bicarbonatada-sódica. La concentración de nitratos varía entre no detectado y 243 ppm. Para el 70% de las muestras se reportan concentraciones menores al 10%, mientras que se observan dos zonas con concentraciones máximas de 118 y 243 ppm en la parte central y noroeste del área de estudio, respectivamente.

Acuífero 0711 (Arriaga-Pijijiapan): La concentración de Sólidos Totales Disueltos, se incrementa de manera paralela a la dirección de flujo de aguas subterráneas. Así, desde la sierra hacia el mar, la concentración salina del agua subterránea, se incrementa de 200 ppm al pie de las sierras, a más de 3000 ppm en algunos sitios costeros. La clasificación que se presenta en esta región, es: la Bicarbonatada-Cálcica y la Bicarbonatada-Sódica. La calidad del agua de este acuífero se considera buena y apropiada para su utilización como agua potable, salvo en algunos aprovechamientos en la costa, que corresponden a agua de mediana a mala calidad, por presentar altos contenidos de sales.

Acuífero 2008 (Ostuta): El acuífero de este valle es de tipo libre en material granular, conformado por materiales de relleno de alta permeabilidad. Su superficie abarca espesores que pueden oscilar entre los 15 y los 60 metros. Dicho acuífero está conformado por arenas, limos y gravas. Debido a su ubicación con respecto a la línea de costa, el principal problema de contaminación lo constituye la intrusión de agua salina.

Acuíferos 1302 (Orizatlán), 1303 (Atotonilco), 1304 (Xochitlán): Debido a la topografía accidentada y al carácter predominantemente impermeable de la zona serrana, el escurrimiento en los cauces y arroyos ocurre de manera rápida, sin permitir su infiltración.





Solo en las partes bajas de las cuencas, es posible la recarga y el almacenamiento de agua subterránea, conformando un acuífero de reducidas dimensiones y de baja capacidad de almacenamiento, el cual presenta una permeabilidad media. En las porciones sur y centro del acuífero es común la existencia de pequeños manantiales que en forma de “lloraderos” descargan localmente la infiltración del agua a través de las fracturas del medio poroso o por el contacto con rocas impermeables. La descarga del acuífero, se realiza directamente a las corrientes superficiales.

Acuíferos 3003 (Martínez de la Torre), 3004 (Perote Zayaleta), 3005 (Valle de Actopan), 3006 (Costera de Veracruz), 3008 (Cotaxtla), 3017 (Tampico Misantla) y 3018 (Jalapa-Coatepec): La unidad hidrogeológica de mayor importancia es la clasificada como gravas y arenas, de porosidad primaria y de permeabilidad media a alta, la que está en función del contenido de arcillas y el grado de compactación del material.

De acuerdo con información obtenida mediante la perforación de pozos, se tiene que esta unidad se extiende desde la porción norte de Martínez de la Torre, hasta San Rafael, diferenciándose granulométricamente de un sitio a otro, así como también su espesor es variable. Se puede establecer que la zona acuífera está limitada por rocas arcillosas del Terciario, mientras que, en una parte de su límite oeste, todo parece indicar que se trata de una frontera de carga hidráulica constante, favoreciendo el flujo horizontal subterráneo, así como una posible recarga proveniente del río Nautla.

Acuíferos 2102 (Libres Oriental), 2419 (Tamuín): Los acuíferos son de tipo semi-confinado por depósitos arcillosos, de baja permeabilidad y espesor de varias decenas de metros.





2.4.3 Comparación recarga estimada contra estudios de la CONAGUA.

La CONAGUA provee un registro de la disponibilidad media anual de agua subterránea, como se mencionó anteriormente, esta información puede consultarse en la página de internet de este organismo

(<http://www.conagua.gob.mx/disponibilidad.aspx?n1=3&n2=62&n3=112>).

La disponibilidad es presentada a partir de la división hidrogeológica que se tiene a nivel nacional tal como se presentó en la Ilustración 1.7, por lo cual se tiene la información de la recarga obtenida para cada uno de estos acuíferos. Cabe señalar que la estimación de la recarga por este organismo corresponde al año cuando dicho estudio fue realizado y por lo tanto su variabilidad temporal no es conocida.

La recarga total de los acuíferos en estos estudios se obtiene mediante la suma de la recarga natural y la recarga inducida. La recarga natural se estima mediante el cálculo de la infiltración debido a la precipitación, la infiltración indirecta que ocurre en la red fluvial y el flujo subterráneo horizontal que se presenta, mientras que la recarga inducida será aquella causada por el retorno de riego.

Para proceder a la comparación de estos parámetros se procedió a identificar los acuíferos de acuerdo a la división de la CONAGUA en los que se encuentran localizadas las cuencas del presente trabajo: Ilustraciones 2.7 y 2.9. Para el caso de las cuencas localizadas en la Sierra Madre de Chiapas, la comparación se realizó por cuenca, comparando la recarga estimada por los diversos métodos previamente descritos contra la recarga estimada por la CONAGUA de acuerdo al acuífero al que pertenece (ver Tabla 2.7).

Para la región de la Sierra Madre Oriental, al no tener un acuífero en concreto al cual pertenezca cada cuenca se realizó lo siguiente: se procedió a identificar los acuíferos que tenían inferencia en cada cuenca de estudio y se agruparon en un mismo bloque, tabla (2.8). Posteriormente se obtuvo la recarga para cada acuífero y una vez obtenido este valor se realizó un promedio aritmético entre los acuíferos que conforman cada bloque. Dicho valor se comparó contra la recarga obtenida con los métodos utilizados en este estudio.





Tabla 2.7 Recarga anual acuíferos de la CONAGUA Sierra Madre de Chiapas

Estación	Acuífero al que pertenece (CONAGUA)	Clave	Recarga (Mm ³ /año)	Área (Km ²)	Recarga (mm/año)
Niltepec	Ostuta	2008	87	3789	230
Zanatepec	Ostuta	2008	87	3789	230
Ostuta	Ostuta	2008	87	3789	230
Jesús	Arriaga-Pijijiapan	711	496	4147	1196
Pijijiapan	Arriaga-Pijijiapan	711	496	4147	1196
Coapa	Arriaga-Pijijiapan	711	496	4147	1196
Cacaluta	Acapetahua	709	861	3641	2364
Novillero	Acapetahua	709	861	3641	2364
Tablazón	Acapetahua	709	861	3641	2364
Cintalapa	Acapetahua	709	861	3641	2364
San Nicolás	Acapetahua	709	861	3641	2364
Despoblado	Acapetahua	709	861	3641	2364
Huehuetan	Soconusco	710	938	3193	2938
Huixtla	Soconusco	710	938	3193	2938

Tabla 2.8 Recarga anual acuíferos de la CONAGUA Sierra Madre Oriental

Estación	Acuíferos (CONAGUA)	Clave	Recarga (Mm ³ /año)	Área (Km ²)	Recarga promedio (mm/año)
El Tejar	Cotaxtla	3008	252	3264	771
Ídolos	Jalapa-Coatepec	3018	90	863	1314
	Valle de Actopan	3005	400	2524	
El Cardón	Orizatlán	1302	185	2923	677
	Tamuín	2419	370	5127	
Tempoal	Calabozo	1306	81	858	921
	Tampico-Misantla	3017	190	14324	
	Atlapexco-Candelaria	1305	192	1112	
	Xochitlán-Huejutla	1304	39	260	
	Atotonilco-Jaltocan	1303	12	218	
	Orizatlán	1302	185	2923	

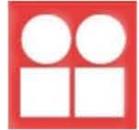




ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

Terrerillos	Calabozo	1306	81	858	538
	Tampico-Misantla	3017	190	14324	
Los Hules	Atlapexco-Candelaria	1305	150	1112	1348
	Costera de Veracruz	3006	508	3078	
Carrizal	Jalapa-Coatepec	3018	90	863	1047
	Libres-Oriental	2102	179	3995	
Martínez de la Torre	Martínez de la Torre	3003	73	4384	312
	Perote-Zalayeta	3004	46	1022	





3. CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1 Estimación de la recarga

Las ilustraciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 muestran la relación entre la recarga anual estimada y la precipitación anual para las cuencas de estudio, así como los años en los que se presentó el fenómeno de El Niño (barras en rojo). Las Tablas 3.1 y 3.2 muestran el rango de valores medios anuales en los que se encuentra la recarga y el índice del gasto base utilizando el método de mínimos locales (HYSEP), el filtro digital y el análisis del algoritmo inverso de almacenamiento. El gasto base en las 3 cuencas ubicadas en la parte más seca de la Sierra Madre de Chiapas (Niltpec, Zanatepec y Ostuta) en promedio es menor al gasto directo mientras que en aquellas cuencas ubicadas en la región más lluviosa (sur de Chiapas) el gasto base suele ser la componente más importante del caudal total observado. Por lo tanto, se puede inferir que la recarga en esta última región tiende a ser mayor que el escurrimiento directo generado por la lluvia. También, es importante resaltar que la variabilidad temporal de la recarga media anual puede diferir considerablemente entre cuencas con valores de recarga similares como es el caso de las cuencas Novillero, Tablazón y Coapa. Una posible explicación estaría en el área de drenaje de cada cuenca, en este caso, a menor área se tiene una mayor variabilidad interanual. Las cuencas localizadas en la Sierra Madre Oriental presentan un índice de gasto base muy similar, a excepción de la cuenca de Carrizal, que es la que tiene una mayor recarga promedio anual. No obstante, la variabilidad interanual que se presentó en esta zona fue menor. De igual forma, la correlación (R) (calculada como el coeficiente de correlación de Pearson) que existe entre la precipitación y la recarga es mayor en la Sierra Madre de Chiapas, cuyos valores van desde 0.15 hasta 0.66, mientras que en la Sierra Madre Oriental se va de 0.13 a 0.56





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

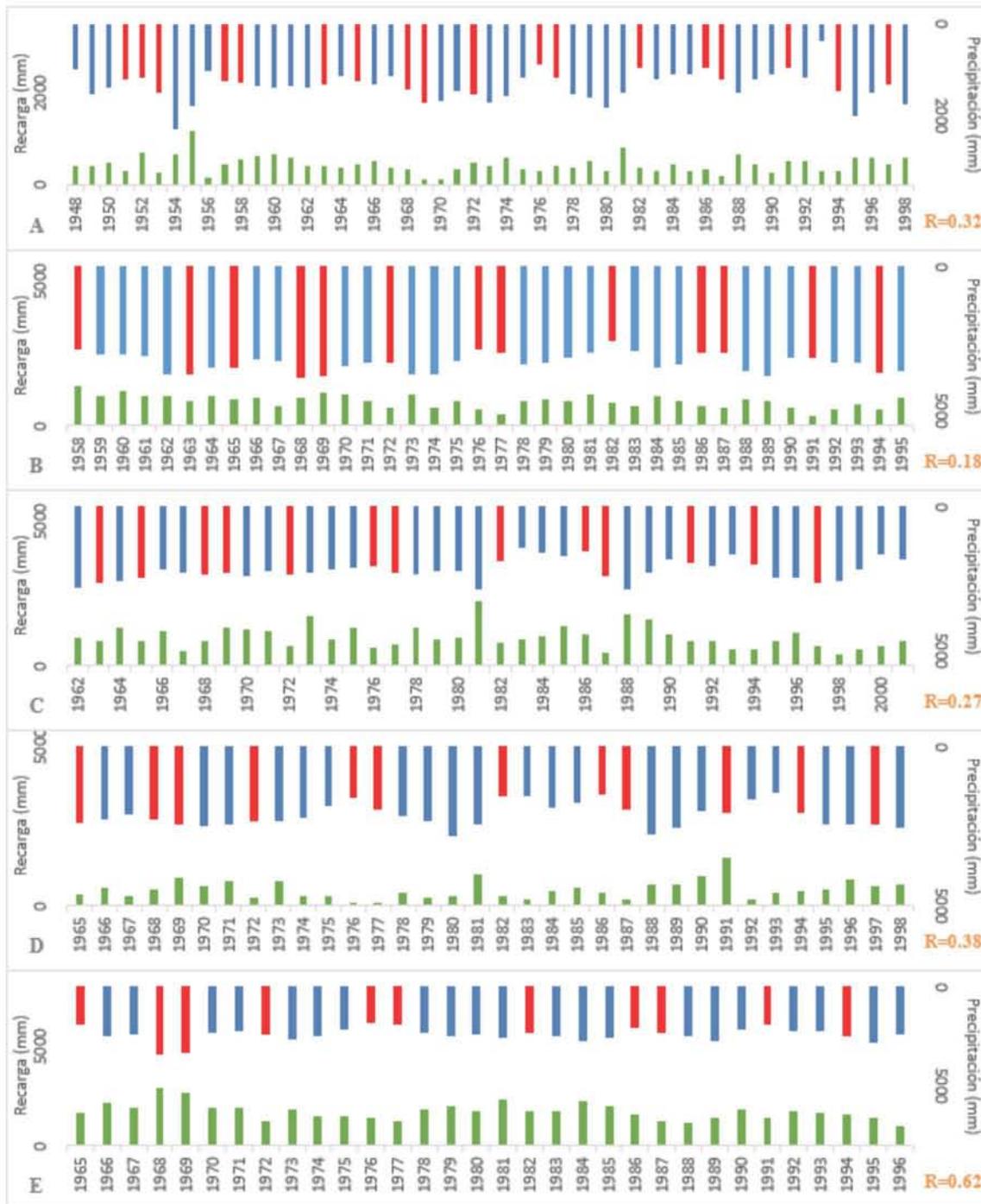


Ilustración 3.1 Recarga (verde) y precipitación (azul y rojo, correspondientes a años de El Niño), en mm/año para las cuencas hidrológicas de la Sierra Madre de Chiapas: (A) Ostuta, (B) Huixtla, (C) Pijijiapan, (D) Jesús, (E) Huehuetan.



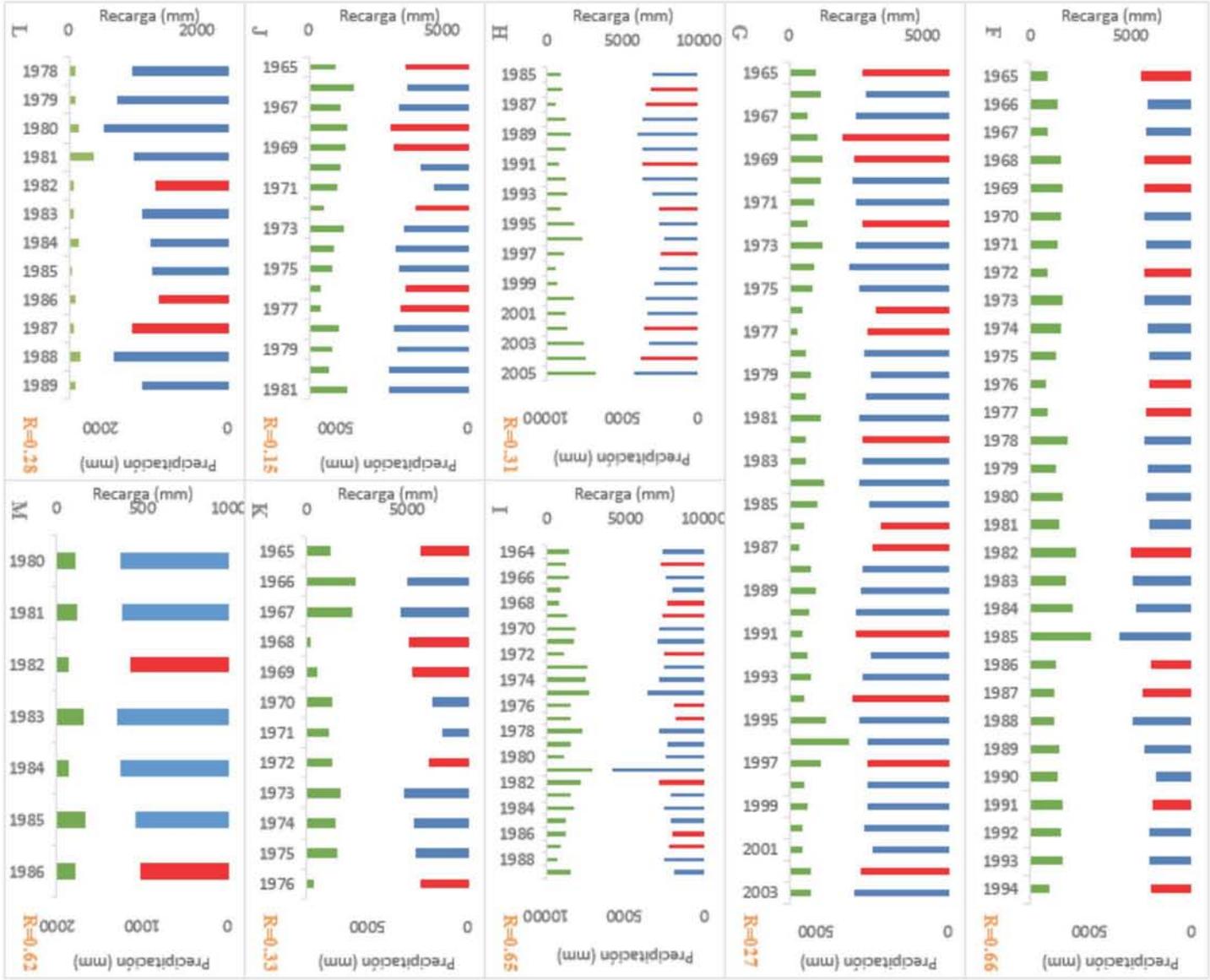


Ilustración 3.2 Recarga y precipitación para las cuencas de estudio Sierra Madre de Chiapas: (F) Coarpa, (G) Despoñado, (H) Cacaluta, (I) Novillero, (J) San Nicolás, (K) Tablazón, (L) Zanatepec, (M) Nitepec.



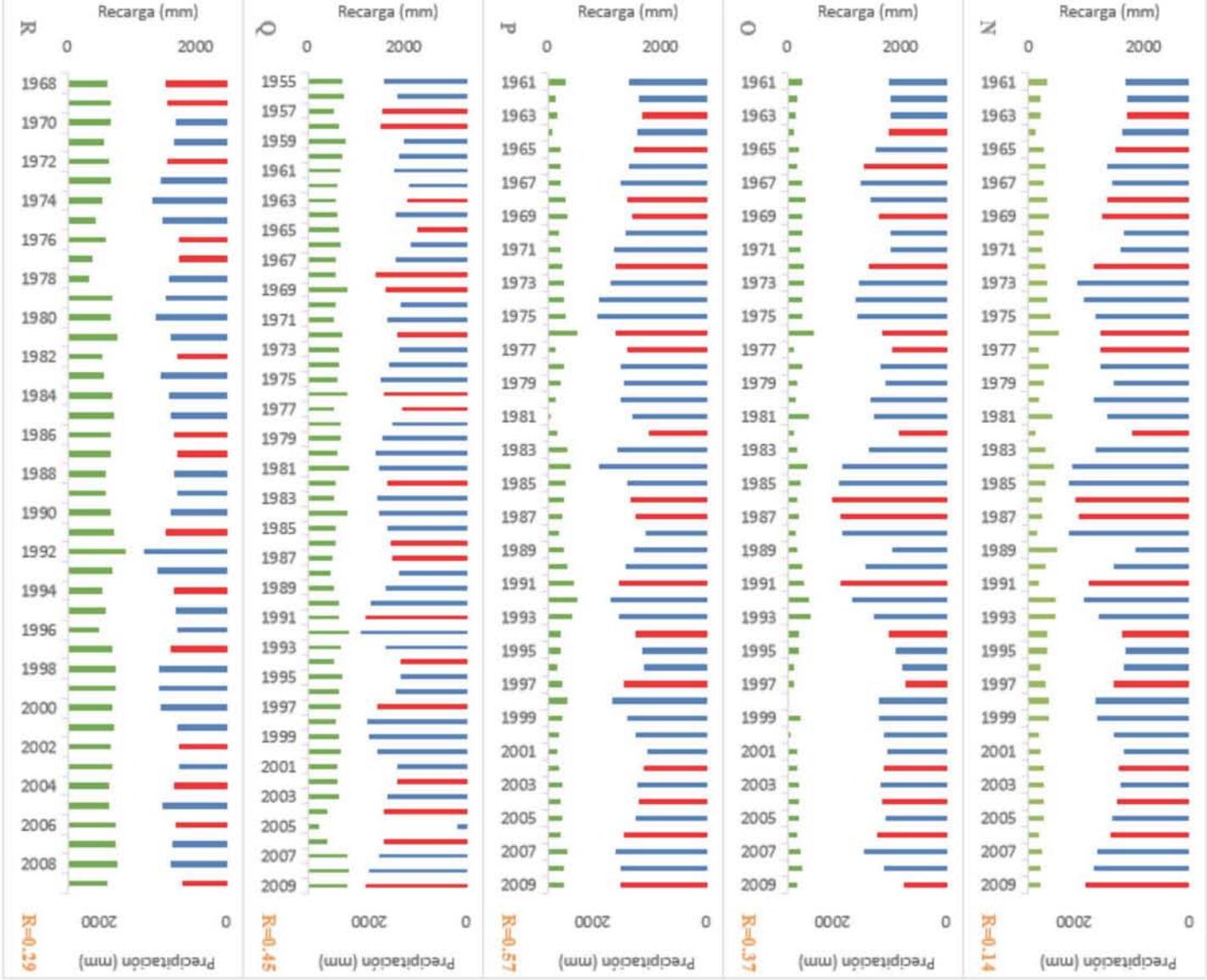


Ilustración 3.3 Recarga y precipitación para las cuencas de estudio Sierra Madre Oriental: (N) Los Hules, (O) El Cardón, (P) Terrevillos, (Q) Martínez de la Torre, (R) Carrizal.



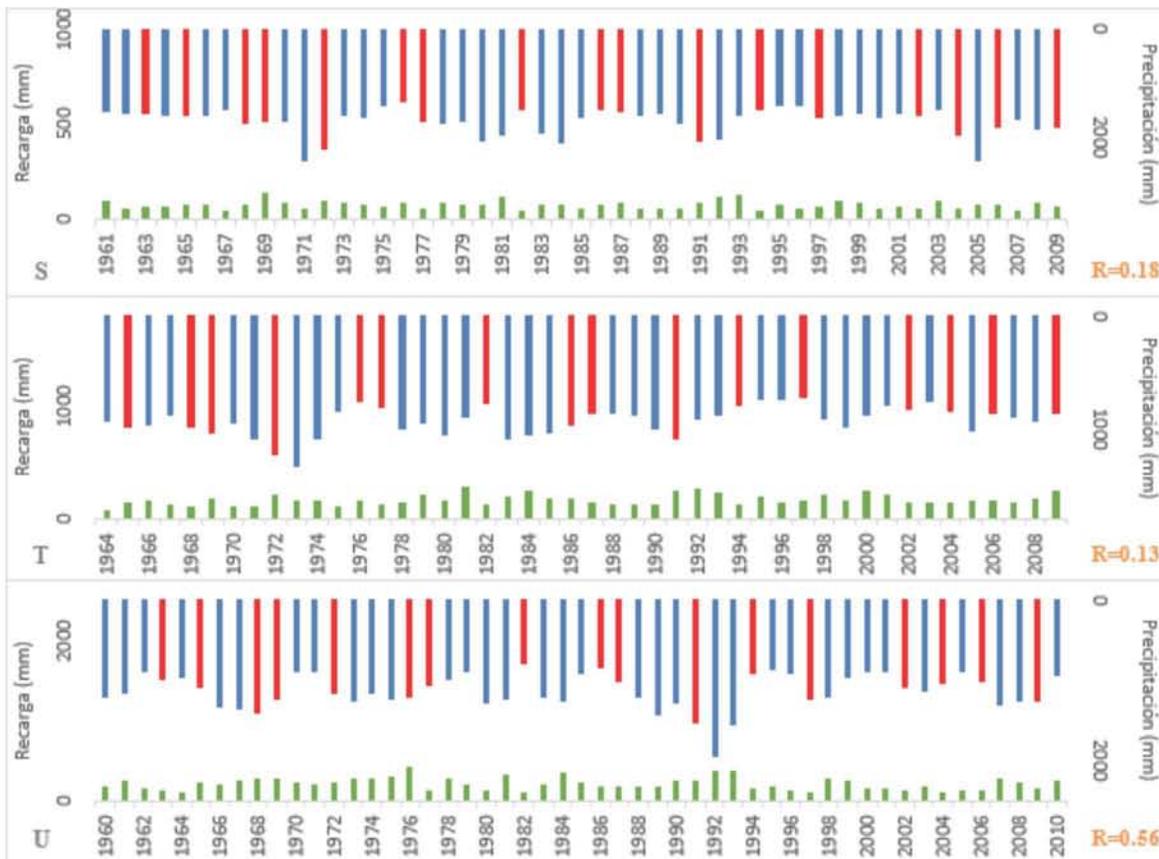
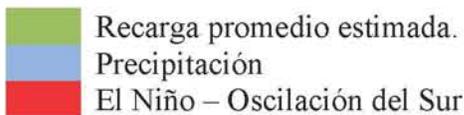


Ilustración 3.4 Recarga y precipitación para las cuencas de estudio Sierra Madre Oriental (S) El Tejar, (T) Ídolos, (U) Tempoal.



El Niño Oscilación del Sur es fenómeno que se caracteriza por un calentamiento oceánico a gran escala en el Océano Pacífico tropical. La Oscilación del Sur se caracteriza por un sube y baja interanual de la presión a nivel del mar tropical entre el Pacífico occidental y oriental, que consiste en un debilitamiento y fortalecimiento de los vientos alisios del este sobre el Pacífico tropical. (Chunzai et al., 2012)

El fenómeno no se presenta de manera periódica, sino que lo hace de manera irregular, con ciclos que se presentan cada 2 a 7 años. El fenómeno se puede presentar en tres fases muy distintas entre sí: Neutral, fría o "La Niña", y cálida o "El Niño". Es bien conocido que la





presencia de un evento "El Niño" puede afectar de manera considerable los patrones de precipitación y temperatura en México. Sin embargo, los patrones de precipitación pueden variar a lo largo del país de acuerdo a la intensidad del fenómeno.

Los años en los que el fenómeno "El Niño" o ENOS (El Niño - Oscilación del Sur) ocurre suelen representar periodos lluviosos en México. Este fenómeno es resultado de una fluctuación interanual del sistema océano-atmósfera en el Océano Pacífico Ecuatorial, en el que se tiene un aumento en la temperatura superficial del mar de alrededor de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Sistema Meteorológico Nacional, 2010).

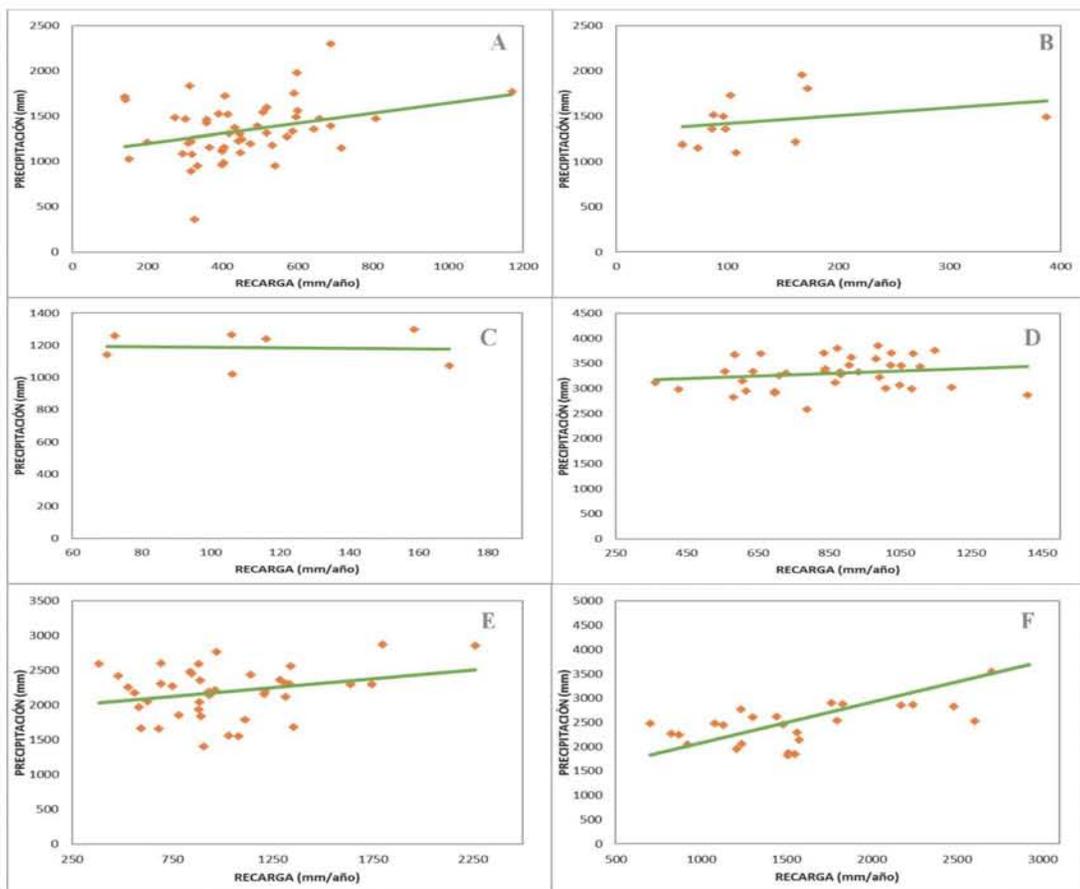


Ilustración 3.5 Recarga Vs Precipitación Sierra Madre de Chiapas; (A) Ostuta, (B) Zanatepec, (C) Nilttepec, (D) Huixtla, (E) Pijijiapan, (F) Novillero.





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

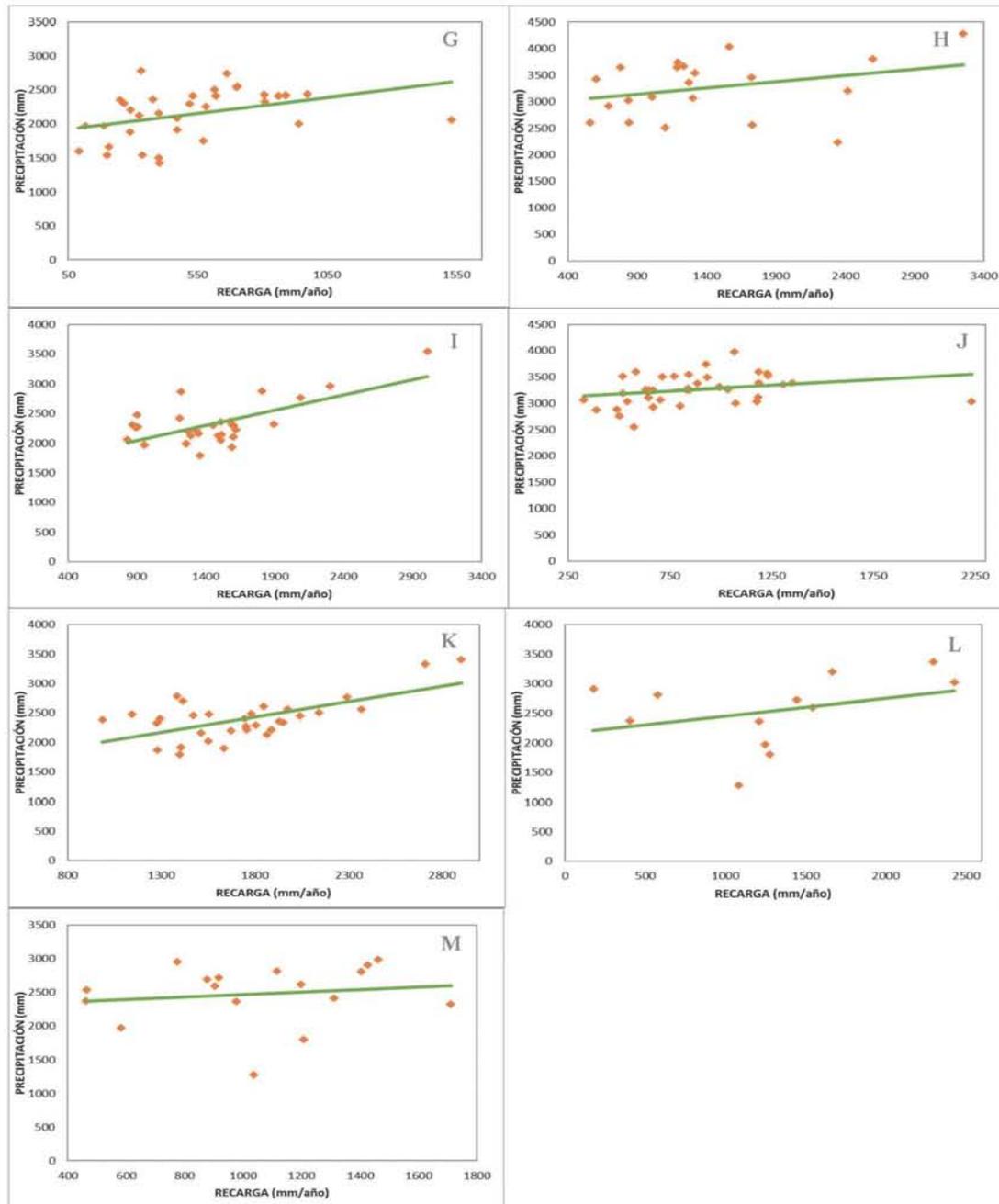


Ilustración 3.6 Recarga Vs Precipitación Sierra Madre de Chiapas; (G) Jesús, (H) Cacaluta, (I) Coapa, (J) Des poblado, (K) Huehuetan, (L) Tablazón, (M) San Nicolás.





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

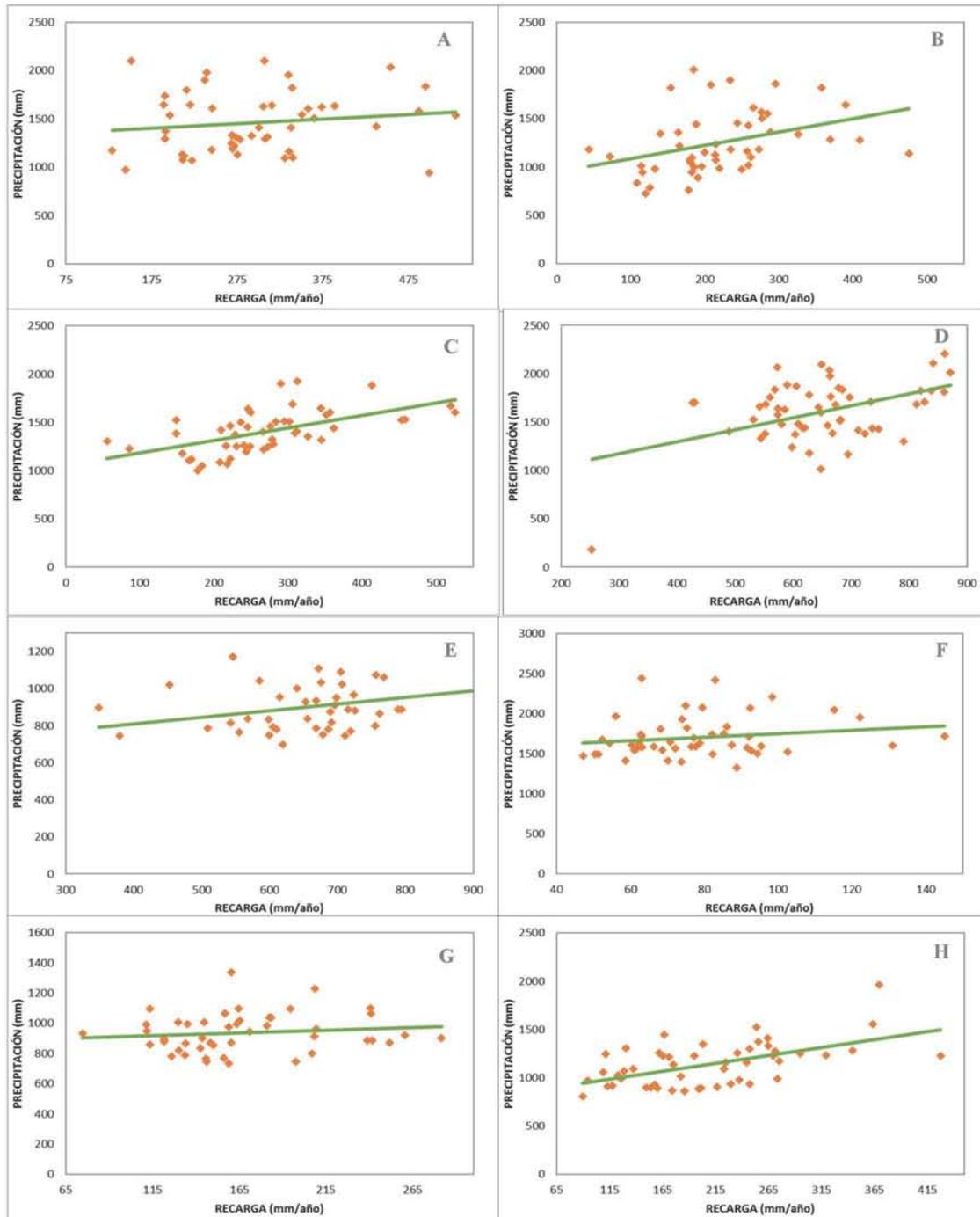


Ilustración 3.7 Recarga Vs Precipitación Sierra Madre Oriental; (A) Los Hules, (B) El Cardón, (C) Terrerillos, (D) Martínez de la Torre, (E) Carrizal, (F) El Tejar, (G) Ídolos, (H) Tempoal.

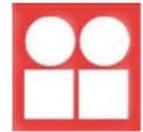




Tabla 3.1 Recarga promedio anual (R) e índice de gasto base (IGB) con el método Hysep y algoritmo inverso. DE representa la desviación estándar.

Estación	HYSEP			Algoritmo Inverso		
	IGB	R (mm/año)	DE (mm/año)	IGB	R (mm/año)	DE (mm/año)
Sierra Madre de Chiapas						
Niltepec	0.39	175	128	0.21	72	33
Zanatepec	0.49	247	225	0.25	124	105
Ostuta	0.51	487	220	0.40	339	210
Jesús	0.66	790	480	0.23	305	203
Pijjiapan	0.74	1270	487	0.54	938	504
Huehuetan	0.75	1997	489	0.69	1863	551
Cacaluta	0.78	1773	662	0.51	1026	522
Novillero	0.78	1896	799	0.61	1481	696
Tablazón	0.78	1903	1440	0.44	1071	678
Huixtla	0.79	984	306	0.72	903	291
Cintalapa	0.79	1154	412	0.66	966	379
San Nicolás	0.8	1302	523	0.70	1138	459
Despoblado	0.8	1106	443	0.57	789	388
Coapa	0.81	1903	1050	0.46	1082	578
Sierra Madre Oriental						
Terretillos	0.45	290	122	0.51	326	143
Martínez de la Torre	0.65	703	122	0.67	716	132
El Tejar	0.53	85	26	0.59	96	33
Ídolos	0.5	191	57	0.48	183	54
Carrizal	0.73	699	121	0.74	711	132
Tempoal	0.39	215	89	0.48	267	125
Los Hules	0.48	315	119	0.53	344	143
El Cardón	0.39	249	109	0.43	274	125



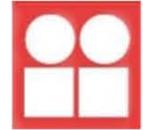


ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

Tabla 3.2 Recarga (R) e índice de gasto base (IGB) (Filtro Digital). DE representa la desviación estándar.

Estación	Filtro Digital $\alpha=0.925$			Filtro Digital $\alpha=0.9$		
	IGB	R (mm/año)	DE (mm/año)	IGB	R (mm/año)	DE (mm/año)
Sierra Madre de Chiapas						
Niltepec	0.25	115	65	0.29	132	73
Zanatepec	0.32	158	131	0.36	179	152
Ostuta	0.35	343	137	0.38	378	154
Jesús	0.45	523	319	0.5	580	350
Pijijiapan	0.53	906	333	0.58	993	360
Huehuetan	0.61	1601	373	0.65	1711	406
Cacaluta	0.62	1364	1069	0.66	1461	1109
Novillero	0.63	1525	626	0.68	1640	673
Tablazón	0.58	1675	963	0.64	1842	1079
Huixtla	0.64	790	240	0.68	842	259
Cintalapa	0.59	849	288	0.63	920	312
San Nicolás	0.57	937	350	0.62	1019	388
Despoblado	0.59	825	339	0.64	891	364
Coapa	0.71	1657	963	0.75	1842	1079
Sierra Madre Oriental						
Terrerillos	0.35	225	82	0.39	248	91
Martínez de la Torre	0.58	619	98	0.6	644	101
El Tejar	0.44	72	19	0.48	79	21
Ídolos	0.38	145	37	0.41	156	40
Carrizal	0.64	612	103	0.67	640	108
Tempoal	0.34	185	70	0.37	204	78
Los Hules	0.39	251	82	0.42	276	92
El Cardón	0.27	179	56	0.3	199	64





Para la Sierra Madre de Chiapas, el índice de gasto base con el método Hysep osciló entre 0.39 y 0.81, mientras que la recarga anual obtenida se situó entre 175 ± 128 mm en años secos y 1997 ± 489 mm en años húmedos. Mientras que con el filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.925$, el índice de gasto base se colocó entre 0.25 y 0.71, y la recarga anual obtenida tuvo valores entre 115 ± 65 mm en años secos y 1675 ± 963 mm en años húmedos. Adicionalmente, para el filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.90$, el índice de gasto base osciló entre 0.29 y 0.75, mientras que la recarga anual obtenida estuvo entre 132 ± 73 mm en años secos y 1842 ± 1079 mm en años húmedos. El índice de gasto base obtenido mediante el algoritmo de almacenamiento no lineal tomó un rango de valores de 0.21 a 0.72, mientras que la recarga anual se situó entre 72 ± 33 mm en años secos y 1863 ± 551 mm en años húmedos.

Para el estado de Veracruz se obtuvo que el método Hysep proporcionó valores del índice de gasto base entre 0.39 y 0.73, mientras que la recarga anual obtenida se situó en 85 ± 26 mm en años secos y 703 ± 122 mm en años húmedos. Para el filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.925$, el índice de gasto base se colocó entre 0.27 y 0.64, mientras que la recarga anual obtenida tuvo valores entre 72 ± 19 mm en años secos y 619 ± 98 mm en años húmedos. El filtro digital con un parámetro $\alpha = 0.90$, obtuvo un índice de gasto base entre 0.3 y 0.67, y la recarga anual obtenida fue de 79 ± 21 mm en años secos y 644 ± 101 mm en años húmedos. Finalmente, el índice de gasto base obtenido mediante el algoritmo de almacenamiento no lineal tomó un rango de valores de 0.43 a 0.67, por otra parte, la recarga anual se situó entre 96 ± 33 mm en años secos y 716 ± 132 mm para años húmedos. En las Ilustraciones 3.5 y 3.6, se muestran gráficamente los valores obtenidos del índice de gasto base, así como de la recarga estimados mediante los diferentes métodos.





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

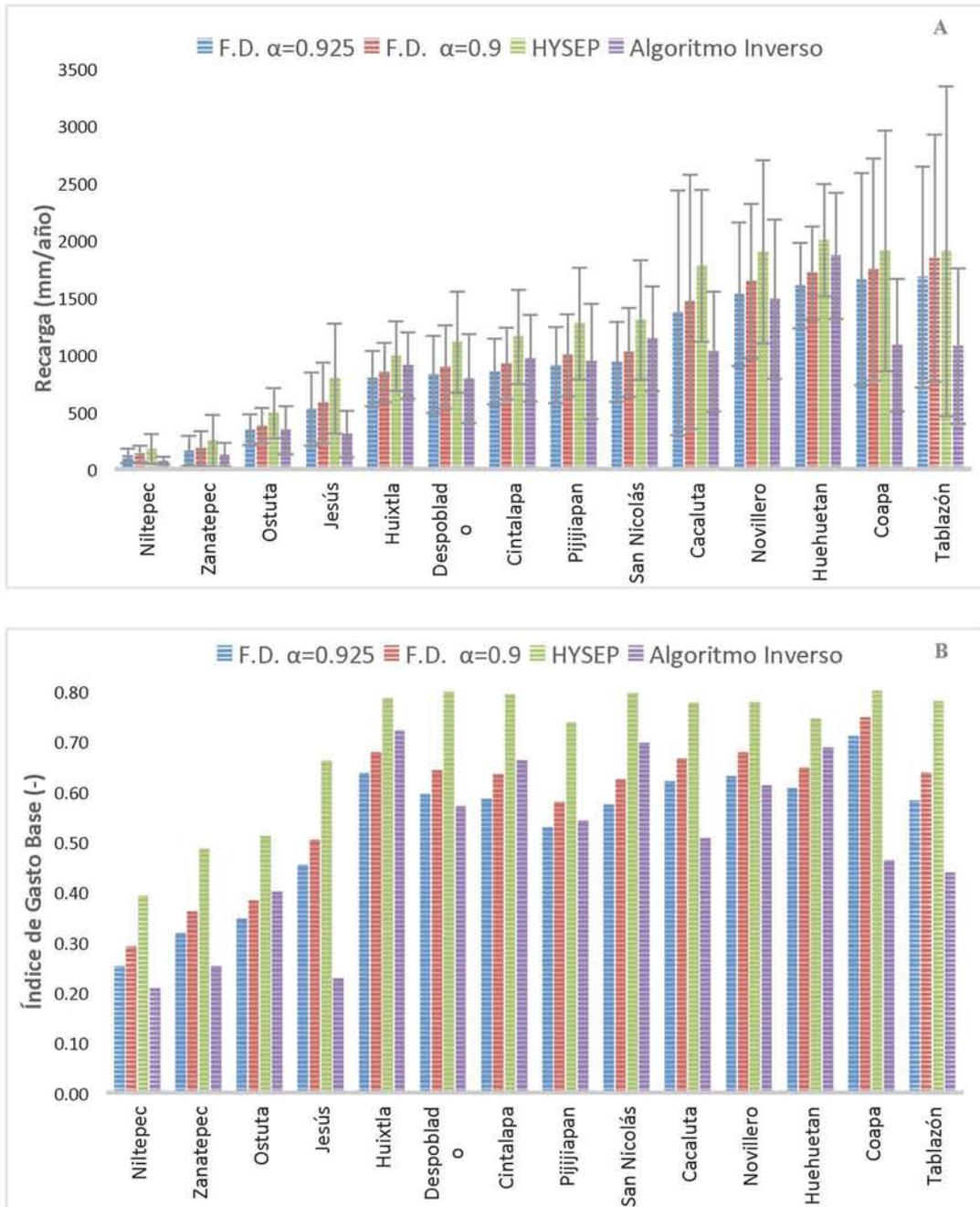


Ilustración 3.8 Recarga (A) e Índice de Gasto Base (B) estimados en las cuencas de la Sierra Madre de Chiapas



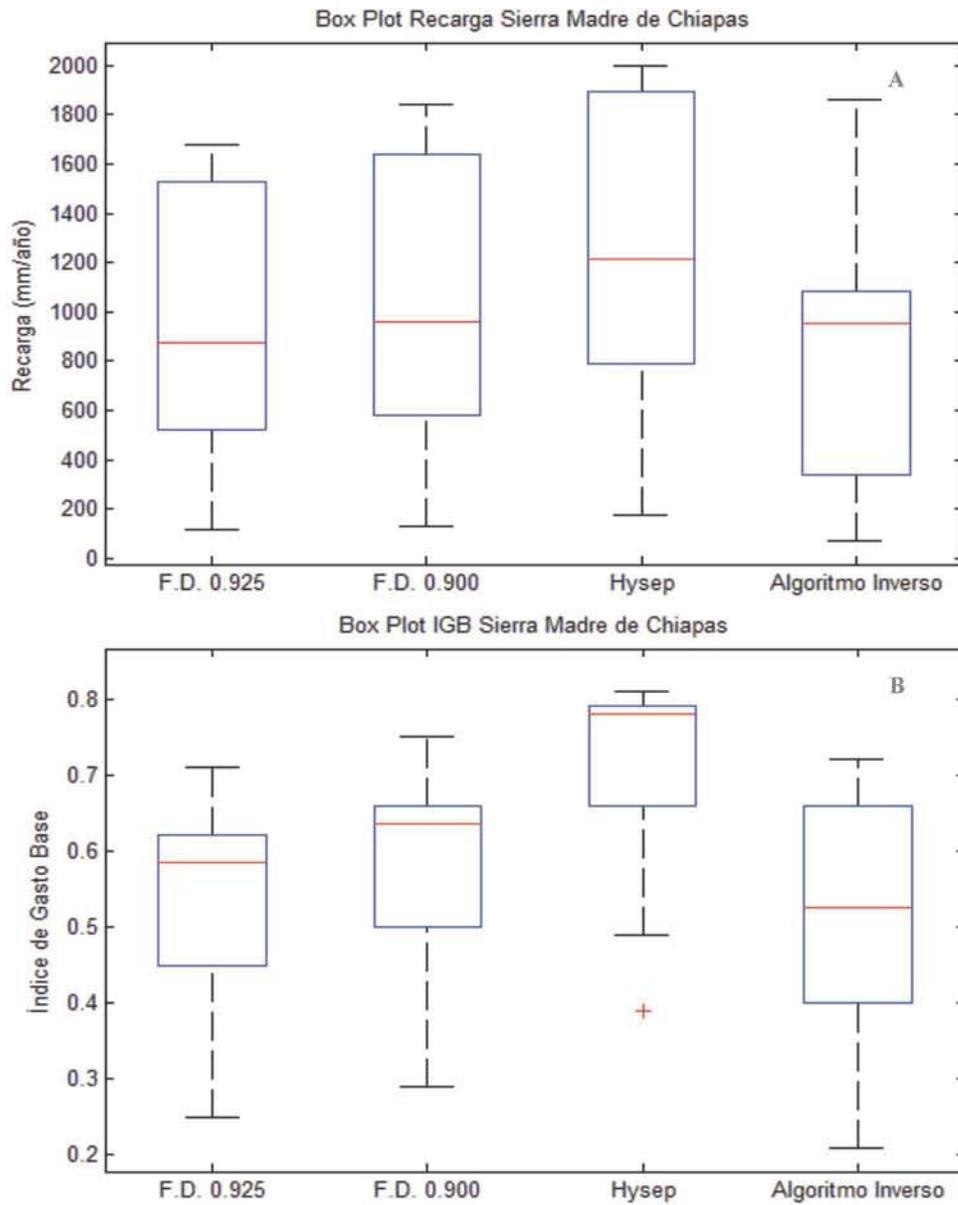


Ilustración 3.9 Box Plot, Recarga (A) e Índice de Gasto Base (B) estimados en las cuencas de la Sierra Madre de Chiapas





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

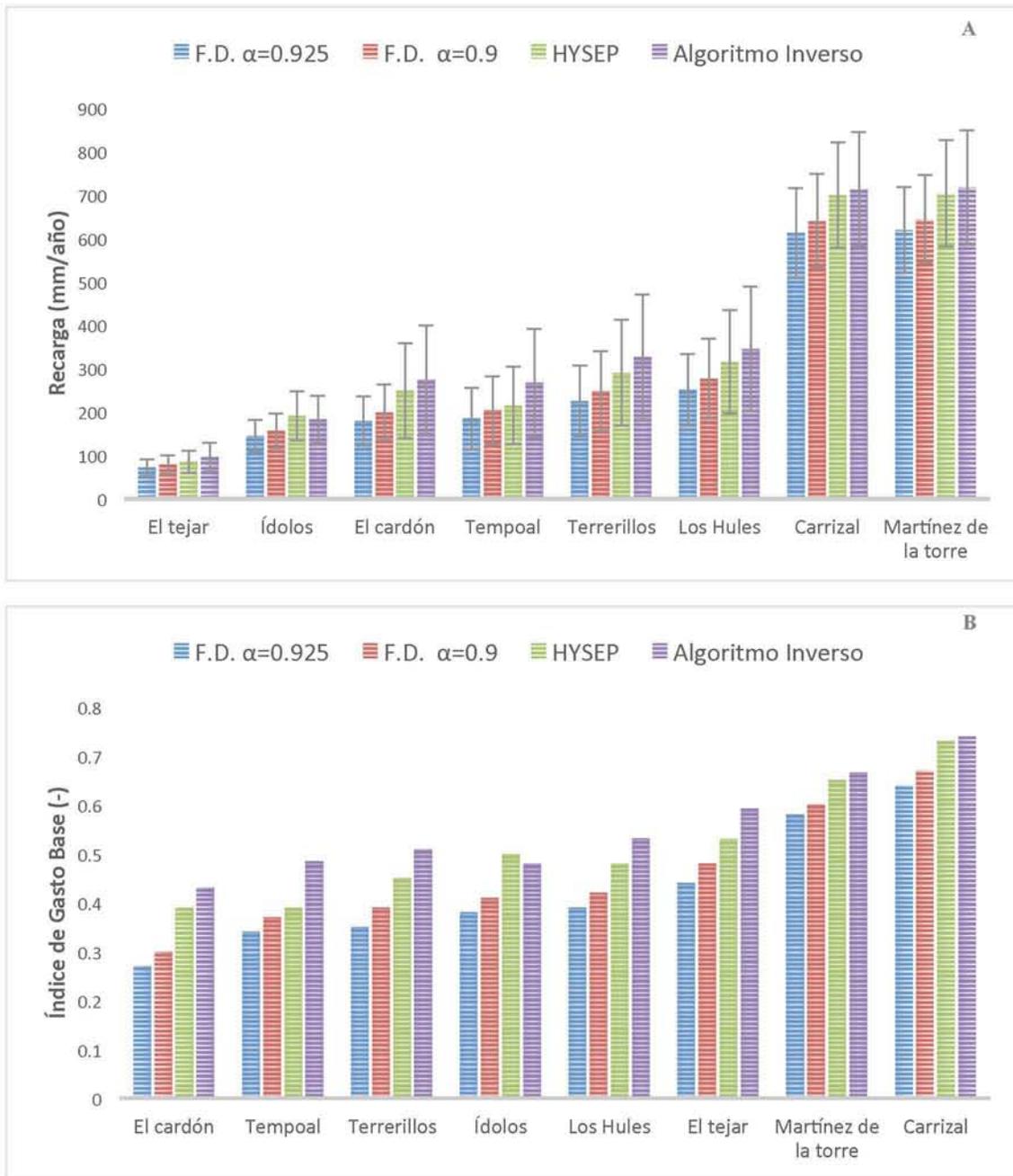


Ilustración 3.10 Recarga (A) e Índice de Gasto Base (B) estimados en las cuencas de la Sierra Madre Oriental



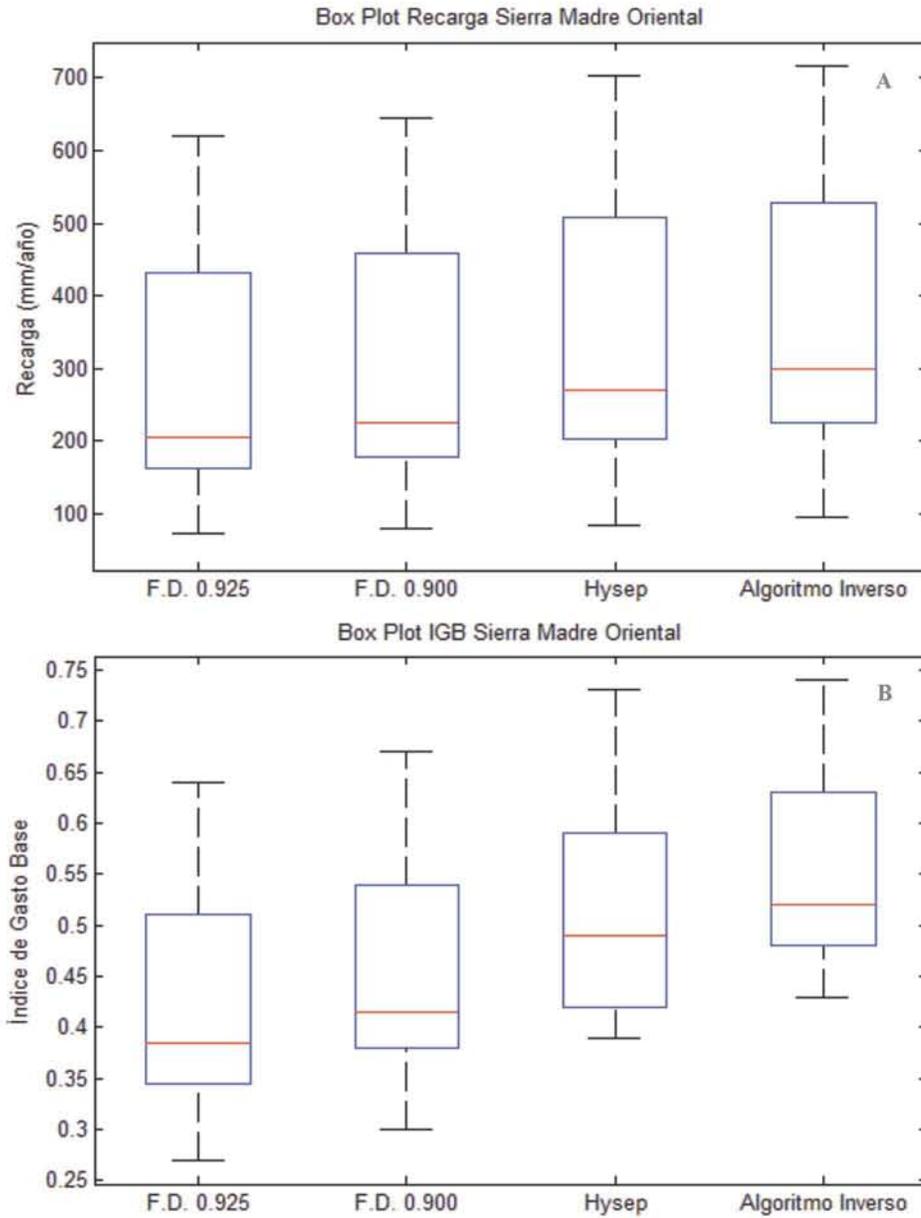


Ilustración 3.11 Box Plot, Recarga (A) e Índice de Gasto Base (B) estimados en las cuencas de la Sierra Madre Oriental





3.2 Validación de resultados

En las siguientes ilustraciones se muestra la comparación entre los valores de recarga determinados por los métodos empleados y el estimado por la CONAGUA. Cabe resaltar que los datos reportados por este organismo son a nivel de acuífero, el cual puede llegar a abarcar diferentes cuencas, por lo que existe una diferencia que bien puede ser resultado de la escala usada en este trabajo (cuenca hidrológica) la cual difiere con el de este organismo (unidad hidrogeológica). De igual forma, se puede notar que los valores para la Sierra Madre Oriental no son tan cercanos a los estimados por este organismo. Como se mencionó en el capítulo 2, esta zona presentó una problemática para la comparación debido a la ubicación de los acuíferos y de las cuencas de estudio.

También es importante resaltar que los valores de la CONAGUA corresponden a un año en específico (cuando se realizó el balance de agua subterránea) mientras que los resultados de este trabajo corresponden a un valor promedio calculado a partir de 30 años o más.

Tabla 3.3 Año de estudio de la recarga de agua subterránea (CONAGUA)

Acuífero	Clave	Año de estudio
Sierra Madre de Chiapas		
Ostuta	2008	2015
Arriaga-Pijijiapan	711	2015
Acapetahua	709	2015
Soconusco	710	2015
Sierra Madre Oriental		
Cotaxtla	3008	2010
Jalapa-Coatepec	3018	2011
Valle de Actopan	3005	2009
Orizatlán	1302	2010
Tamuín	2419	2011
Calabozo	1306	2015
Tampico-Misantla	3017	2011
Xochitlán-Huejutla	1304	2010
Atotonilco-Jaltocan	1303	2010
Atlapexco-Candelaria	1305	2010
Costera de veracruz	3006	2009
Libres-Oriental	2102	2011
Martínez de la Torre-Nautla	3003	2009
Perote-Zalayet	3004	2009



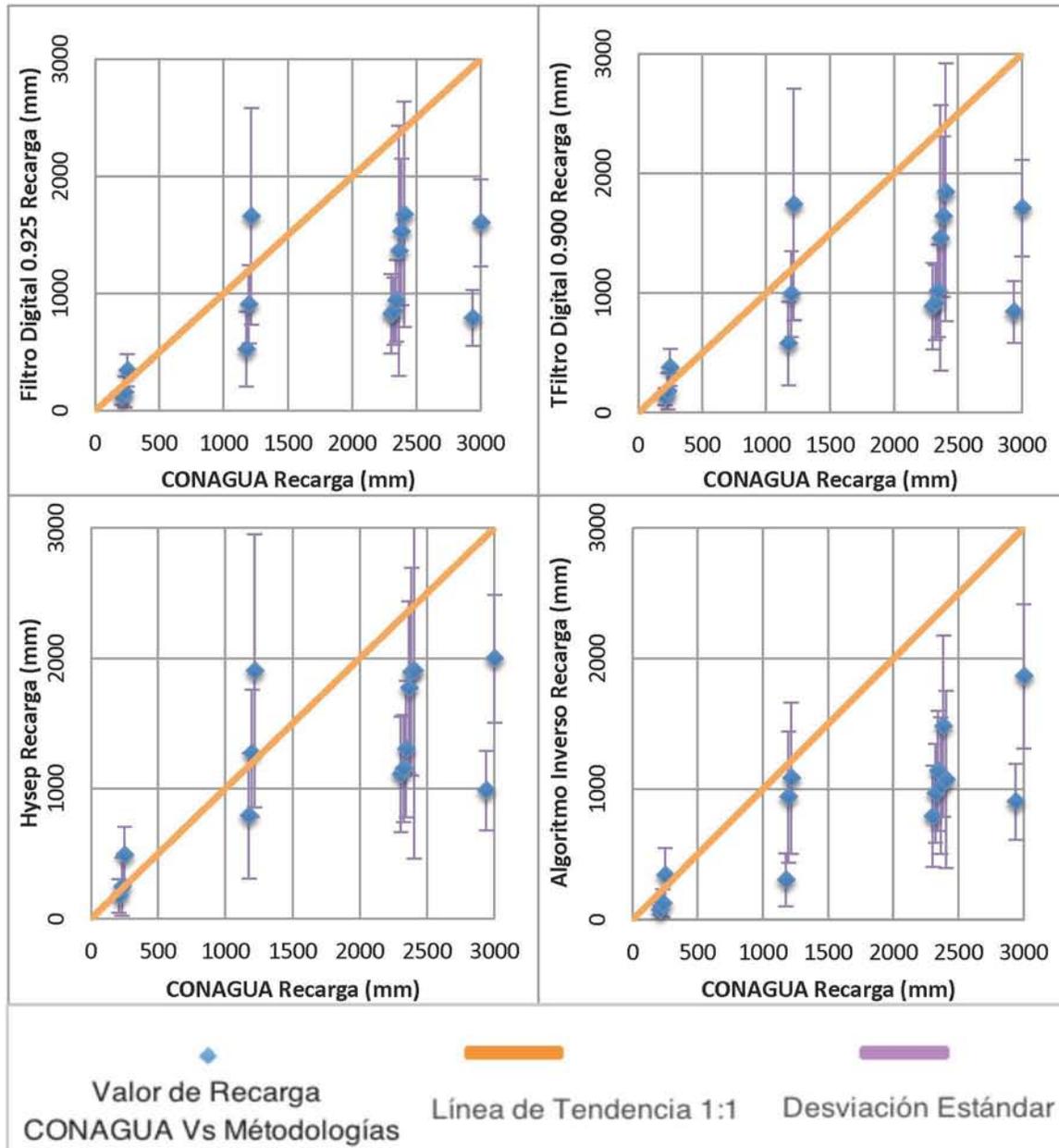


Ilustración 3.12 Comparación de la Recarga calculada por la CONAGUA contra la Recarga estimada en este trabajo, Sierra Madre de Chiapas: (A) Filtro Digital 0.925, (B) Filtro Digital 0.9, (C) Hysep y (D) Algoritmo Inverso



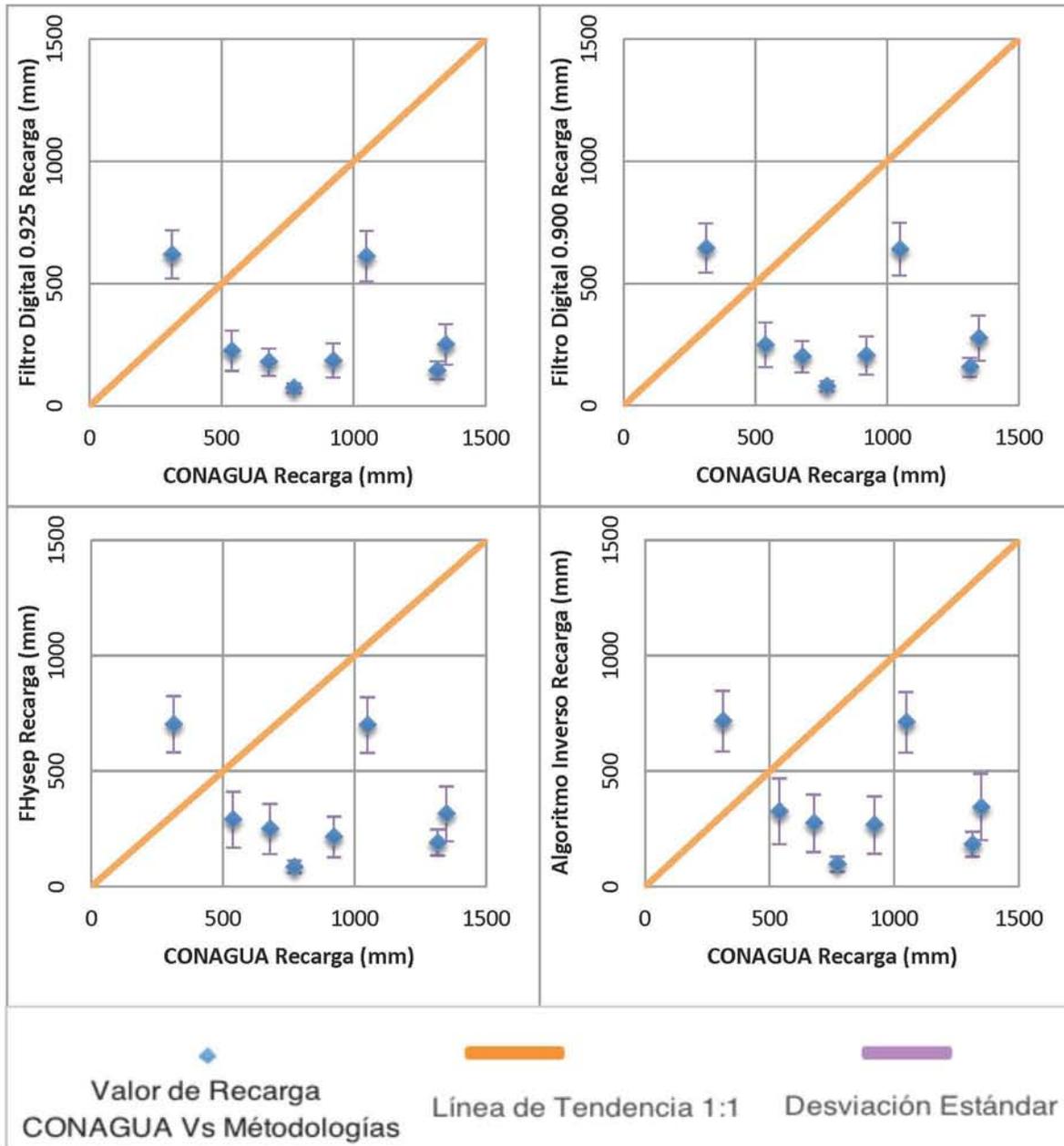
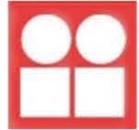


Ilustración 3.13 Comparación de la Recarga calculada por la CONAGUA contra la Recarga estimada en este trabajo, Sierra Madre Oriental (A) Filtro Digital 0.925, (B) Filtro Digital 0.9, (C) Hysep y (D) Algoritmo Inverso





Existe una diferencia entre las estimaciones del presente estudio y las presentadas por la CONAGUA, anteriormente se mencionaron las posibles causas de estas diferencias, adicionalmente se tiene que las presentadas por este organismo corresponden a una metodología en la cual se contabiliza la infiltración producto de la precipitación de lluvia principalmente, mientras que en este trabajo se utiliza una técnica de separación de hidrogramas probado en trabajos previos (Pettyjohn y Henning, 1979; Lyne y Hollick, 1979; Wittenberg, 1999). Los resultados obtenidos por estas metodologías fueron sensiblemente similares, a diferencia de los resultados obtenidos por la CONAGUA.

De igual forma, la lámina de recarga promedio de la CONAGUA fue calculada dividiendo este parámetro entre el área que reporta este organismo, misma que se basa en un polígono administrativo que difiere con los límites geológicos del acuífero, por lo cual las fronteras hidrogeológicas reales son diferentes a las administrativas, por lo cual la recarga estimada de la CONAGUA podría contener este error en su estimación.

3.3 Relación entre la recarga, el clima y la fisiografía de una cuenca

La relación que se presenta entre la recarga, el clima y la fisiografía de una cuenca fue determinada mediante un ajuste de regresión lineal, de esta forma para las cuencas de estudio se presenta una síntesis de los resultados obtenidos para cada método de separación de gasto base (hysep, filtro digital, algoritmo inverso), para los cuales se presentan los coeficientes de correlación (R) más altos.

Para la obtención de los factores con una mayor relación con la recarga se procedió a realizar una comparación entre los valores de este parámetro contra las características fisiográficas (Tabla 3.4) y climatológicas (Tabla 3.5) de cada cuenca, adicionalmente se realizó la comparación del índice de gasto base contra estos valores.





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

Tabla 3.4 Características fisiográficas de las cuencas de estudio. P.Media es la Pendiente Media, UAA Pendiente Ascendente del Área Acumulada, TWI Índice de Humedad Topográfica y D. De Drenaje es la Densidad de Drenaje.

Estación	P. Media (%)	UAA (-)	TWI (-)	D. de Drenaje (km/km ²)
Sierra Madre de Chiapas				
Niltepec	22.3	12415	7.3	2.3
Zanatepec	36.6	17352	6.9	2.8
Ostuta	28.6	22049	7.1	1.7
Jesús	45.7	8036	6.4	3.0
Huixtla	36.5	26553	6.7	2.9
Despoblado	37.1	22450	6.6	2.6
Cintalapa	45.1	23986	6.6	3.1
Pijjiapan	40.9	14034	6.6	2.5
San Nicolás	48.2	17613	6.4	2.5
Cacaluta	43.9	15816	6.5	2.9
Novillero	36.8	20832	6.7	2.4
Tablazón	32.7	6697	7.0	2.9
Coapa	41.6	12007	6.6	2.8
Huhuetan	29.7	20394	7.0	2.8
Sierra Madre Oriental				
El Tejar	14.5	81622	8.3	0.18
Ídolos	13.4	20230	8.0	0.14
Tempoal	24.4	103327	7.5	0.15
El Cardón	19.3	29088	7.5	0.12
Terrerillos	32.5	59093	7.0	0.14
Los Hules	33.4	45687	6.9	0.16
Carrizal	29.6	42574	7.1	0.13
Martínez de la Torre	25.5	45048	7.4	0.13





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

Tabla 3.5 Características climatológicas de las cuencas de estudio. SD Sin datos., P Precipitación, E Evaporación, R Recarga, Horton Índice de Horton.

Estación	P	E	E/P	F.D. $\alpha=0.925$		F.D. $\alpha=0.9$		HYSEP		A. Inverso	
				R/P	Horton	R/P	Horton	R/P	Horton	R/P	Horton
Sierra Madre de Chiapas											
Niltepec	1346	2198	1.6	0.09	0.86	0.10	0.85	0.13	0.80	0.05	0.85
Zanatepec	1557	2107	1.4	0.10	0.87	0.12	0.85	0.16	0.81	0.08	0.85
Ostuta	1210	2074	1.7	0.28	0.43	0.31	0.41	0.4	0.35	0.28	0.41
Jesus	1305	2012	1.5	0.40	0.18	0.44	0.16	0.61	0.12	0.23	0.16
Huixtla	2906	1462	0.5	0.27	0.68	0.29	0.66	0.34	0.63	0.31	0.66
Despoblado	2629	1471	0.6	0.31	0.60	0.34	0.58	0.42	0.53	0.30	0.58
Cintalapa	2266	1571	0.7	0.37	0.49	0.41	0.47	0.51	0.41	0.43	0.47
Pijijiapan	1916	1537	0.8	0.47	0.18	0.52	0.16	0.66	0.13	0.49	0.16
S. Nicolas	2080	1610	0.8	0.45	0.32	0.49	0.30	0.63	0.25	0.55	0.30
Cacaluta	2340	1492	0.6	0.58	0.08	0.62	0.07	0.76	0.06	0.44	0.07
Novillero	2499	1620	0.6	0.61	0.04	0.66	0.04	0.76	0.03	0.59	0.04
Tablazón	2466	1616	0.7	0.68	0.01	0.75	0.01	0.77	0.01	0.43	0.01
Coapa	2410	SD	SD	SD	0.04	SD	0.04	SD	0.04	SD	0.04
Huhuetan	2895	1514	0.5	0.55	0.01	0.59	0.12	0.69	0.10	0.64	0.12
Sierra Madre Oriental											
El Tejar	1703	1401	0.82	0.04	0.96	0.05	0.95	0.05	0.95	0.06	0.95
Idolos	933	1482	1.59	0.16	0.79	0.17	0.78	0.20	0.74	0.20	0.78
Tempoal	1127	1407	1.25	0.16	0.76	0.18	0.74	0.19	0.73	0.24	0.74
El Cardón	1200	1350	1.13	0.15	0.76	0.17	0.74	0.21	0.69	0.23	0.74
Terrerillos	1395	1185	0.85	0.16	0.77	0.18	0.75	0.21	0.72	0.23	0.75
Los Hules	1390	1313	0.94	0.18	0.75	0.20	0.73	0.23	0.70	0.25	0.73
Carrizal	1019	1459	1.43	0.68	0.09	0.71	0.08	0.78	0.08	0.70	0.08
M. de la T.	1720	1199	0.70	0.36	0.03	0.37	0.03	0.41	0.03	0.42	0.03





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

Tabla 3.6 Coeficiente de correlación R entre la recarga media anual y las características climatológicas de cada cuenca. IH Índice de Horton, E Evaporación, P Precipitación, R Recarga.

Filtro Digital

Características climatológicas		Hysep	A. Inverso	$\alpha = 0.925$	$\alpha = 0.9$	Promedio
VS		R	R	R	R	R
Sierra Madre de Chiapas						
Recarga	Precipitación	0.75	0.77	0.75	0.74	0.75
Recarga	IH	0.83	0.69	0.83	0.83	0.80
Recarga	Evaporación	0.79	0.81	0.76	0.75	0.78
Recarga	E/P	0.80	0.83	0.79	0.78	0.80
R/P	E/P	0.55	0.72	0.61	0.59	0.62
Índice gasto base	Precipitación	0.80	0.76	0.85	0.85	0.82
Índice gasto base	IH	0.62	0.43	0.63	0.63	0.58
Índice gasto base	Evaporación	0.94	0.87	0.95	0.95	0.93
Índice gasto base	E/P	0.89	0.84	0.93	0.93	0.90
Sierra Madre Oriental						
Recarga	Precipitación	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07
Recarga	IH	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99
Recarga	Evaporación	0.26	0.29	0.24	0.25	0.26
Recarga	E/P	0.06	0.09	0.07	0.07	0.07
R/P	E/P	0.31	0.27	0.29	0.29	0.29
Índice gasto base	Precipitación	0.13	0.26	0.18	0.19	0.19
Índice gasto base	IH	0.80	0.79	0.84	0.81	0.81
Índice gasto base	Evaporación	0.07	0.02	0.04	0.04	0.04
Índice gasto base	E/P	0.09	0.13	0.04	0.04	0.08

Mejores ajustes (Recarga).

Mejores ajustes (Índice de Gasto Base).





Tabla 3.7 Coeficiente correlación R entre la recarga media anual y las características fisiográficas de cada cuenca.

		Filtro Digital				
Características Fisiográficas		Hysep	A. Inverso	$\alpha = 0.925$	$\alpha = 0.9$	Promedio
VS		R	R	R	R	R
Sierra Madre de Chiapas						
Recarga	Pendiente m.	0.28	0.19	0.21	0.21	0.22
Recarga	UAA	0.10	0.22	0.13	0.14	0.15
Recarga	TWI	0.34	0.28	0.27	0.27	0.29
Recarga	D. de drenaje	0.35	0.25	0.34	0.34	0.32
Índice gasto base	Pendiente m.	0.61	0.31	0.5	0.52	0.49
Índice gasto base	UAA	0.16	0.63	0.17	0.16	0.28
Índice gasto base	TWI	0.69	0.39	0.61	0.62	0.58
Índice gasto base	D. de drenaje	0.51	0.18	0.48	0.50	0.42
Sierra Madre Oriental						
Recarga	Pendiente m.	0.5	0.55	0.48	0.5	0.51
Recarga	UAA	0.3	0.25	0.25	0.25	0.26
Recarga	TWI	0.54	0.58	0.50	0.52	0.54
Recarga	D. de drenaje	0.55	0.55	0.51	0.51	0.53
Índice gasto base	Pendiente m.	0.17	0.28	0.22	0.22	0.22
Índice gasto base	UAA	0.25	0.01	0.1	0.08	0.11
Índice gasto base	TWI	0.12	0.19	0.15	0.15	0.15
Índice gasto base	D. de drenaje	0.11	0.01	0.07	0.04	0.06

 Mejores ajustes (Recarga).
 Mejores ajustes (Índice de Gasto Base).

En la Tabla 3.6 se pueden observar los factores climatológicos más determinantes para la recarga: en la Sierra Madre de Chiapas se muestra que la evaporación es aquella que más se relaciona con el índice de gasto base, esto para los tres métodos utilizados, así como para el valor promedio, mientras que el Índice de Horton es el que tiene mayor relación con la





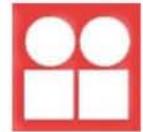
recarga, con excepción del método del algoritmo de almacenamiento inverso.

En la Sierra Madre Oriental, los resultados muestran que el Índice de Horton es el parámetro que más relación tiene tanto con la recarga como con el índice de gasto base. La recarga se relaciona con un coeficiente R cercano a 1, de igual forma los ajustes de los 3 métodos coincidieron bastante con este parámetro.

La Tabla 3.7 muestra los valores del coeficiente R para las características fisiográficas. Las cuencas de la Sierra Madre de Chiapas muestran una alta relación entre el índice de gasto base y el índice topográfico de humedad para 2 de las metodologías empleadas (Hysep y Filtro Digital [0.9 y 0.925]) mientras que el algoritmo inverso de almacenamiento mostró que la pendiente ascendente del área acumulada (UUA) es aquella con la que se tiene una mayor correlación. Esta metodología es la única que difiere de las otras, aunque también se observó que el segundo mejor ajuste (para este método) fue de igual forma el índice topográfico de humedad. Por otro lado, la recarga se relacionó con la densidad de drenaje para 3 de los métodos a excepción del algoritmo de almacenamiento no lineal, el cual indicó que el mejor ajuste se obtenía con el índice topográfico de humedad, siendo el segundo mejor ajuste, la densidad de drenaje. Por su parte, en la Sierra Madre Oriental se indica que la densidad de drenaje se relaciona predominantemente con la recarga obtenida mediante el método Hysep y por el filtro digital con un parámetro $\alpha=0.925$, mientras que el índice topográfico de humedad tiene una mayor relación con los valores estimados por el algoritmo inverso de almacenamiento y el filtro digital con $\alpha=0.9$.

En general, el coeficiente R para esta región fue similar para estos dos parámetros (Dd y TWI). Para el índice de gasto base, tres metodologías indican que la mejor relación se obtiene con la pendiente media a excepción de la metodología Hysep, la cual indica que el mejor ajuste corresponde a la pendiente ascendente del área acumulada. Se encontró que en la Sierra Madre de Chiapas se tiene una buena relación entre la recarga y las características climatológicas, mientras que para las características fisiográficas esta relación desciende considerablemente. A continuación, se muestran gráficamente las mejores relaciones obtenidas para las diferentes metodologías empleadas.





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

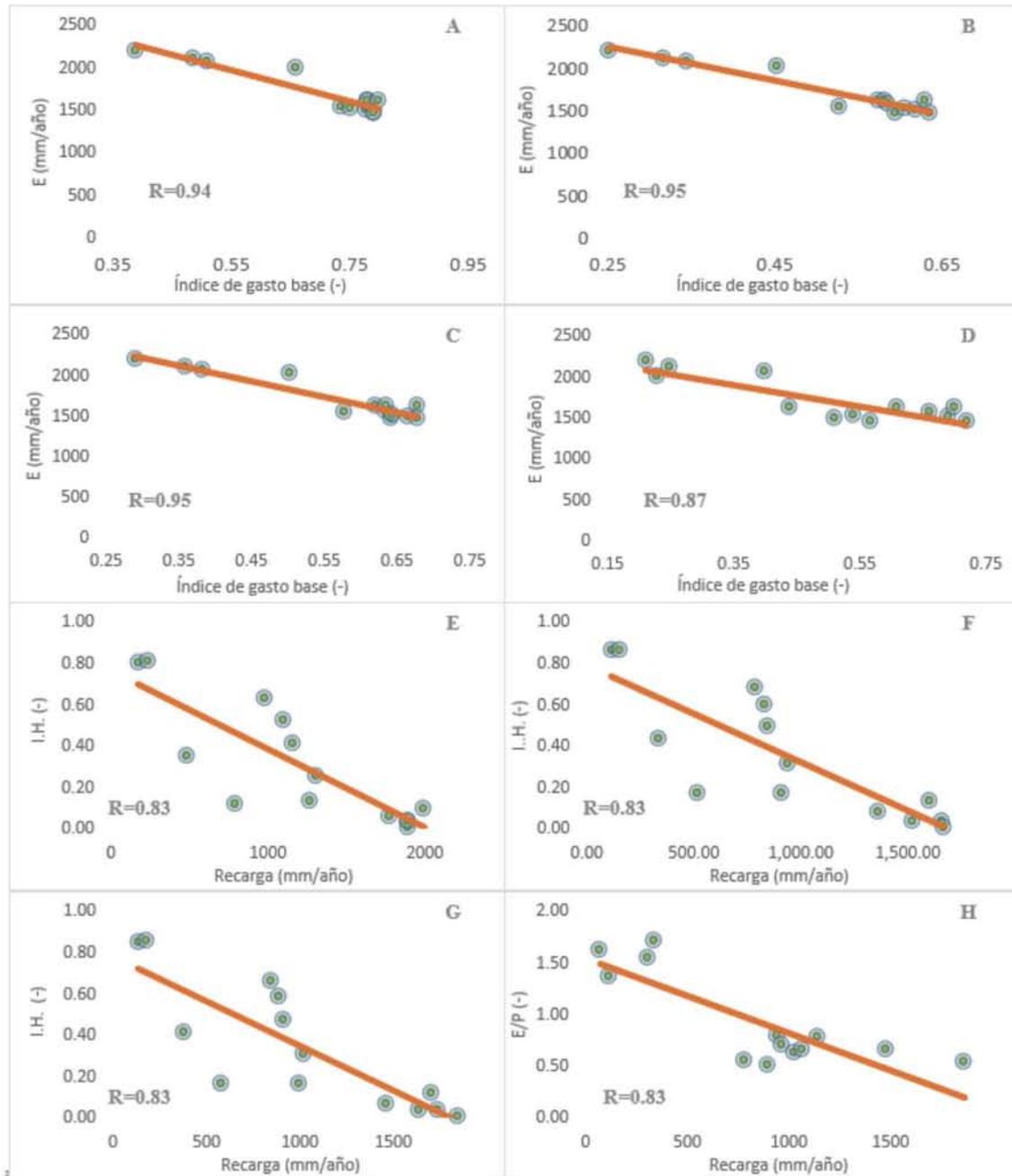
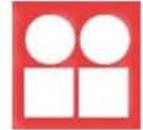


Ilustración 3.14 Mejores ajustes climatológicos para las cuencas en la Sierra Madre de Chiapas; (A) IGB Vs E [Hysep], (B) IGB Vs E [F.D. 0.925], (C) IGB Vs E [F.D. 0.9], (D) IGB Vs E [A.Inverso], (E) R Vs I.H. [Hysep], (F) R Vs I.H. [F.D. 0.925], (G) R Vs I.H. [F.D. 0.9], (H) R Vs E/P [A.Inverso].





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

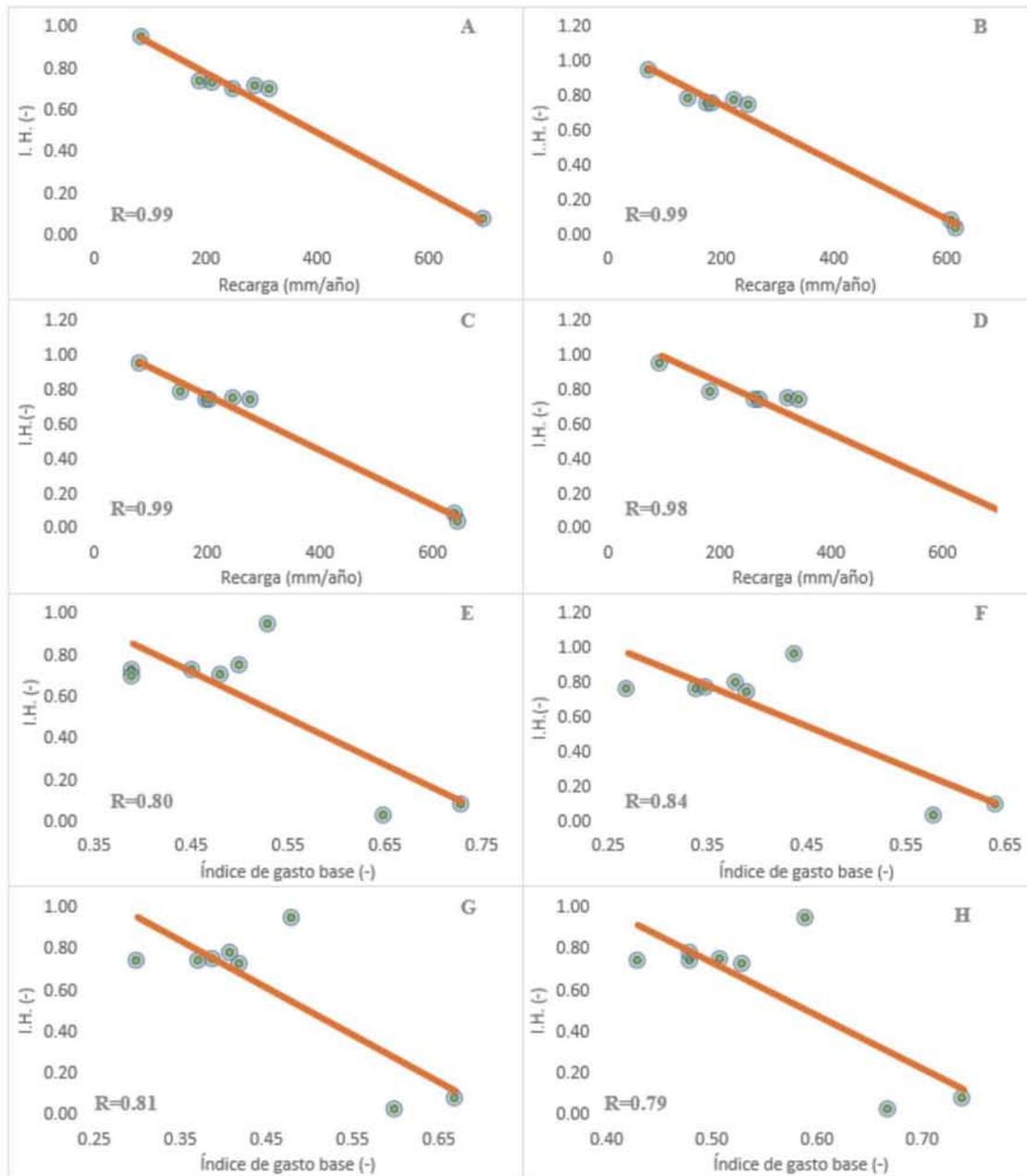


Ilustración 3.15 Mejores ajustes climatológicos para las cuencas de la Sierra Madre Oriental; (A) R Vs I.H. [Hysep], (B) R Vs I.H. [F.D. 0.925], (C) R Vs I.H. [F.D. 0.9], (D) R Vs I.H. [A. Inverso], (E) IGB Vs I.H. [Hysep], (F) IGB Vs I.H. [F.D. 0.925], (G) IGB Vs I.H. [F.D. 0.9], (H) IGB Vs I.H. [A. Inverso].





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

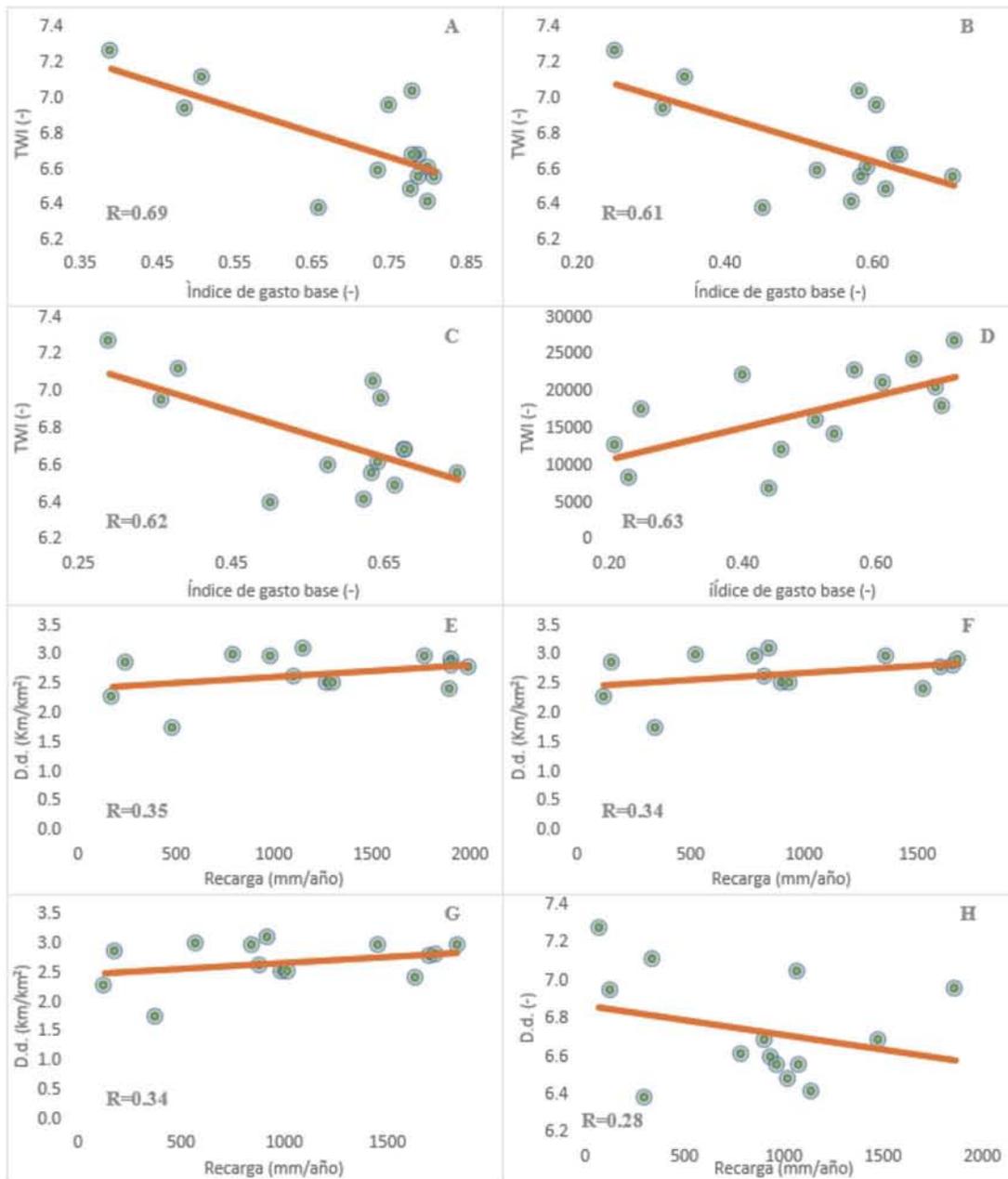


Ilustración 3.16 Mejores ajustes fisiográficos para las cuencas de la Sierra Madre de Chiapas; (A) IGB Vs TWI [Hysep], (B) IGB Vs TWI [F.D. 0.925], (C) IGB Vs TWI [F.D. 0.9], (D) IGB Vs UAA [A. Inverso], (E) R Vs D.D. [Hysep], (F) R Vs D.D. [F.D. 0.925], (G) R Vs D.D. [F.D. 0.9], (H) R Vs TWI [A. Inverso].





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

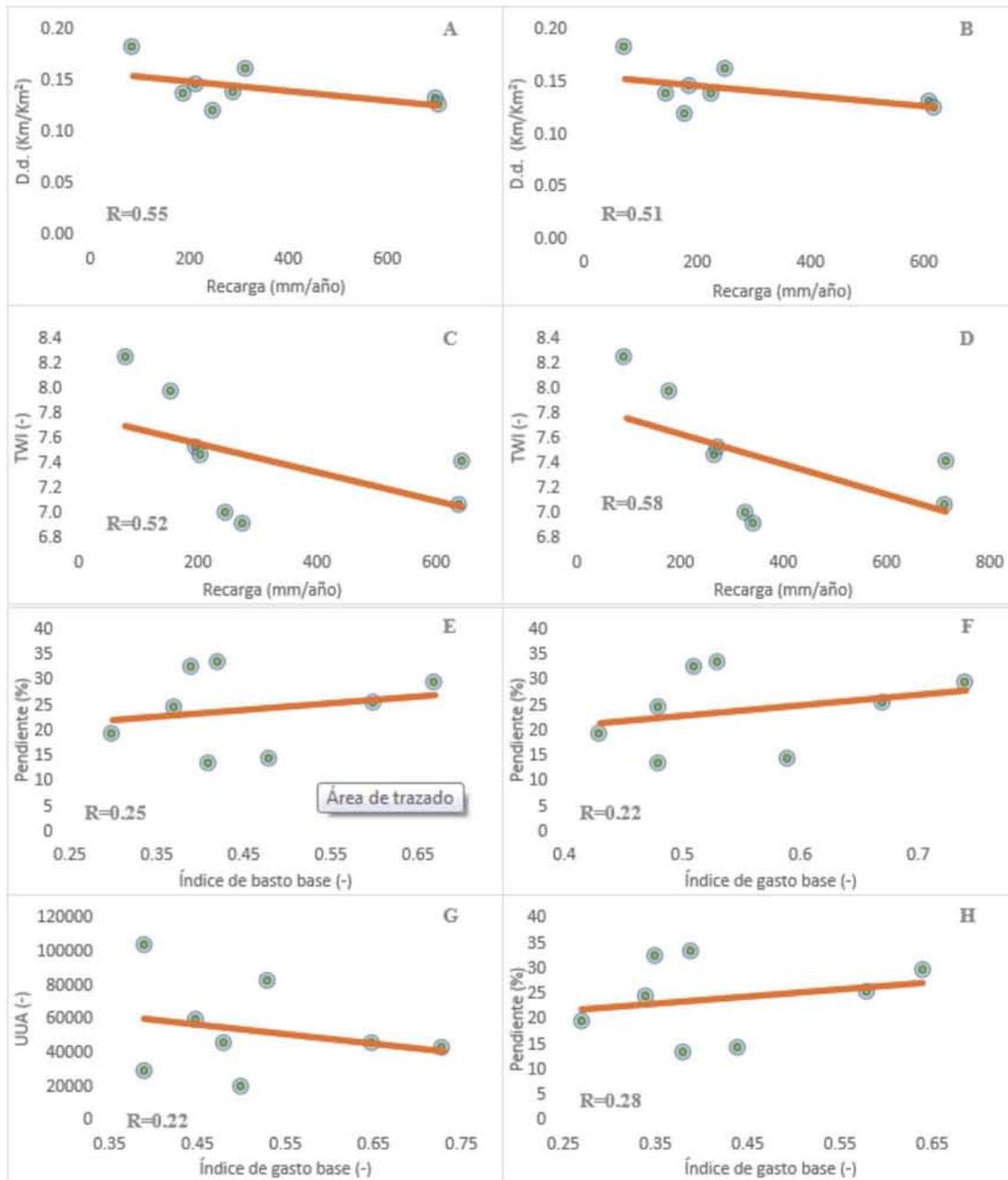
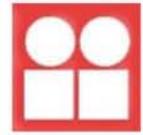


Ilustración 3.17 Mejores ajustes fisiográficos para la Sierra Madre Oriental; (A) R Vs DD [Hysep], (B) R Vs DD [F.D. 0.925], (C) R Vs TWI [F.D. 0.9], (D) R Vs TWI [A. Inverso], (E) IGB Vs Pendiente [Hysep], (F) IGB Vs Pendiente [F.D. 0.925], (G) IGB Vs UAA [F.D. 0.9], (H) IGB Vs Pendiente [A. Inverso].





3.4 Mapas de recarga e Índice de gasto base

A continuación, se presentan los mapas de los índices de gato base y recarga obtenidos en las regiones de estudio.

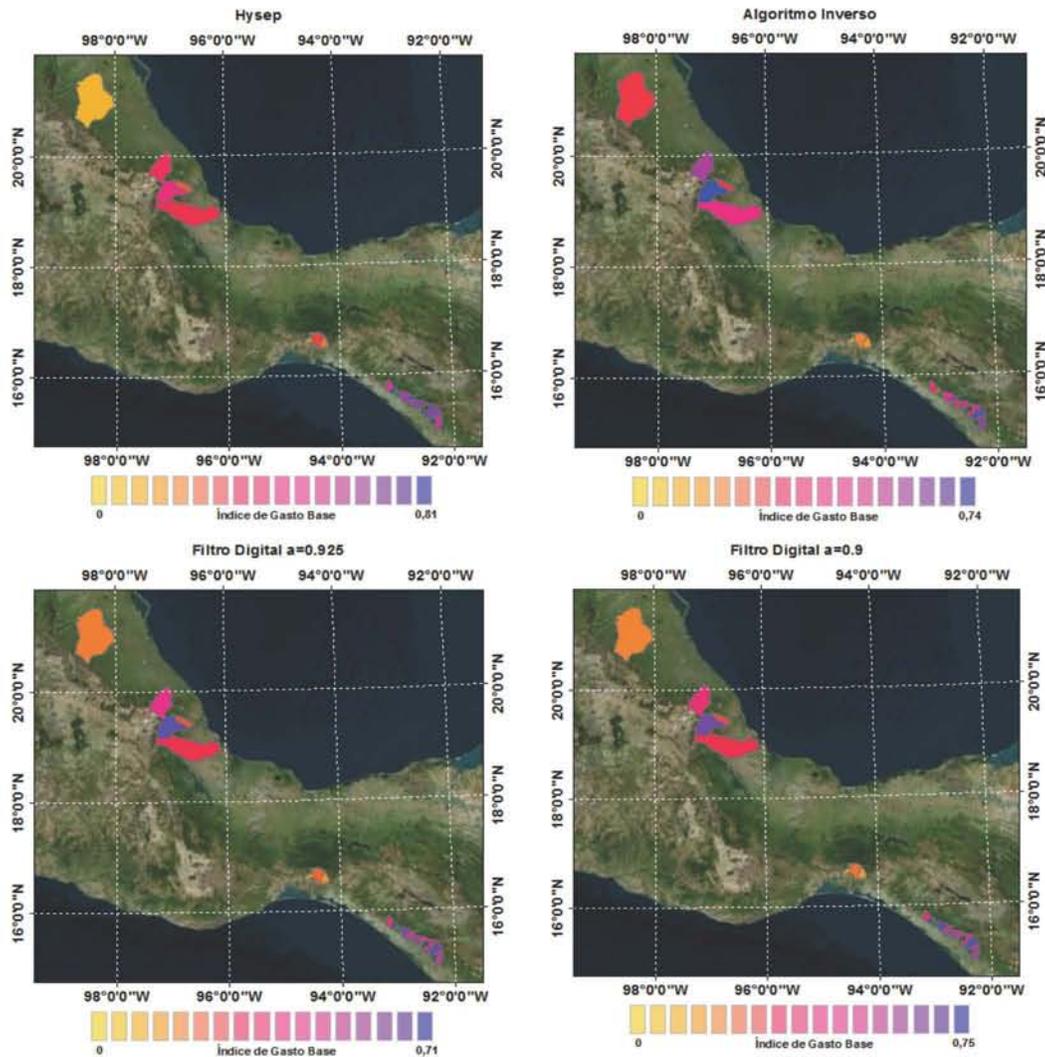


Ilustración 3.18 Mapas del índice de gasto base medio anual en la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre de Chiapas.





ESTIMACIÓN DE LA RECARGA EN CUENCAS TROPICALES HÚMEDAS

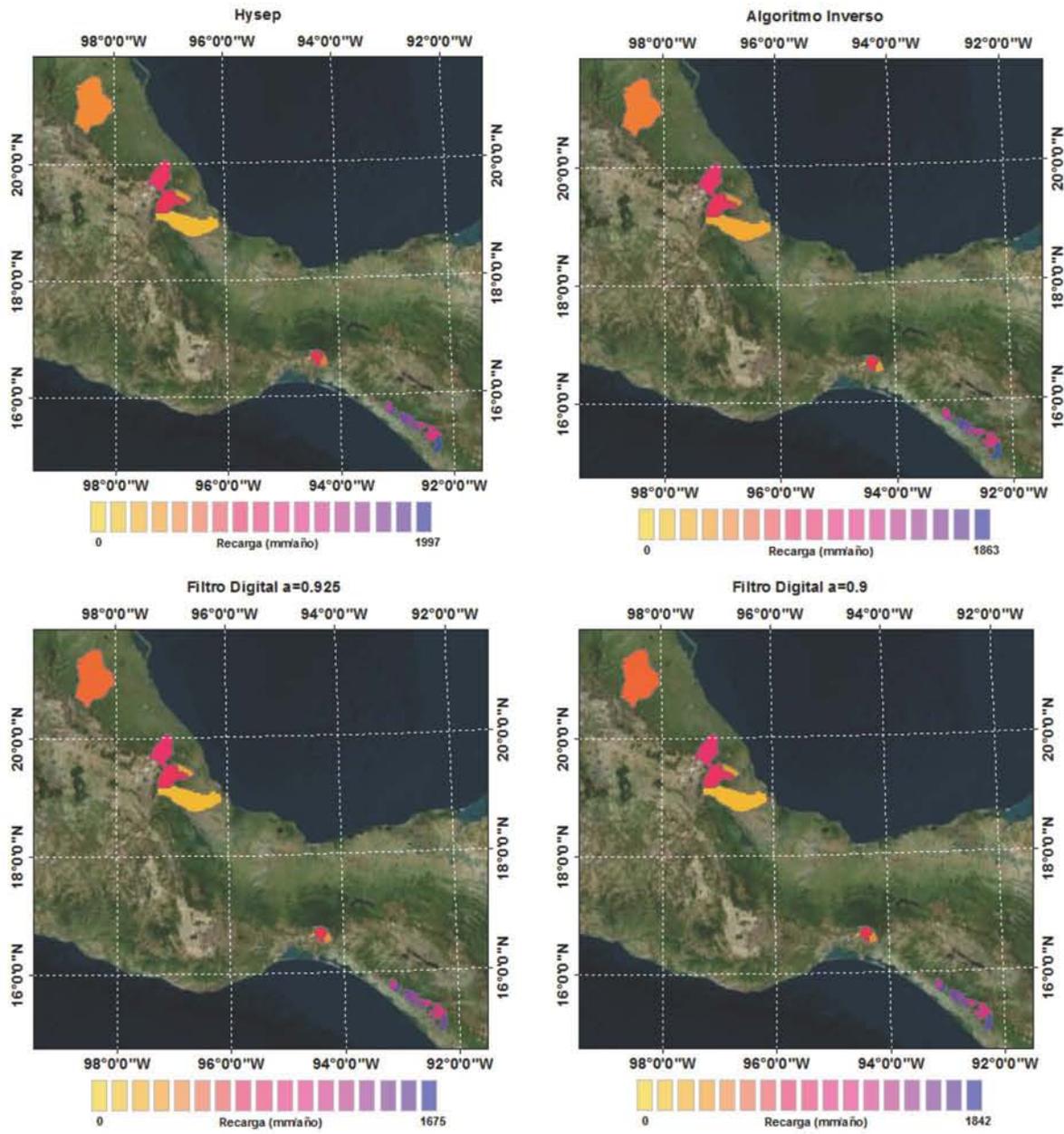
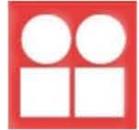


Ilustración 3.19 Mapas de la recarga media anual en la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre de Chiapas.





4. CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

Este estudio presenta una metodología simple, pero confiable para estimar la recarga en regiones húmedas tropicales de la República Mexicana. A partir de datos diarios de hidrometría se obtuvieron valores de la recarga media anual, así como de la contribución del gasto base respecto al gasto total, lo que nos permite inferir acerca de la importancia del agua subterránea en el régimen de escurrimiento en estas regiones. Se utilizaron tres diferentes metodologías (valores mínimos, filtro digital y análisis de curva de recesión) para estimar la variabilidad de la recarga anual y para fines de comparación con estimaciones oficiales por la CONAGUA.

Los resultados obtenidos muestran que el gasto base domina la respuesta hidrológica en la mayoría de las zonas de estudio (13 de las 22 cuencas hidrológicas analizadas), mientras que en términos del flujo hidrológico, en dichas cuencas, la recarga tiende a superar al escurrimiento directo anual. Para estas mismas cuencas, el índice de gasto base promedio osciló entre 0.51 y 0.71 lo cual indica que a pesar de que estas regiones se caracterizan por tener intensas tormentas de origen orográfico, frontal y ciclónico durante una buena parte del año, el escurrimiento directo generado por este tipo de precipitaciones no constituye la principal contribución con respecto al caudal total observado. A nivel regional, la Sierra Madre de Chiapas se caracteriza por tener grandes contribuciones del flujo sub-superficial ($IGB > 0.5$ en 10 de las 14 cuencas de estudio) en comparación con la Sierra Madre Oriental ($IGB > 0.5$ en 3 de las 8 cuencas de estudio) así como en términos absolutos (1014 mm/año en la Sierra Madre de Chiapas y 316 mm/año en la Sierra Madre Oriental, respectivamente). Sin embargo, la variabilidad interanual del gasto base y recarga resultó ser predominantemente mayor en las cuencas de Chiapas y Oaxaca (± 221 mm/año) que en Veracruz (± 46 mm/año) lo cual tiene implicaciones para fines de gastos mínimos y caudales ecológicos.



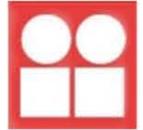


Las estimaciones obtenidas en este trabajo de investigación se encuentran, por lo general, dentro del mismo rango de valores calculados en estudios de disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos delimitados por la CONAGUA. En la Sierra Madre de Chiapas, se encontraron que estos valores de recarga anual se asemejan a los estimados por la CONAGUA, mientras que en la Sierra Madre Oriental se tiene una mayor variación entre ambas estimaciones. Entre las posibles causas que expliquen dichas discrepancias, está el hecho de que las estimaciones realizadas por la CONAGUA son para un año en particular, mientras que los del presente estudio representan un promedio de 35 a 50 años. De igual manera, otros factores como son los errores en el balance geohidrológico debido a la incertidumbre espacial de la precipitación, evapotranspiración e infiltración de un acuífero, pueden propiciar estas diferencias observadas. También, ciertos errores de medición en el caudal durante la época de estiaje, así como en gastos extraordinarios durante la temporada de lluvias también pueden inducir en la validación de los resultados de manera desfavorable. Finalmente, variaciones en los resultados debido a las diferentes escalas espaciales pueden ser un factor de contribución importante. En efecto, mientras que en esta tesis los resultados son representativos a nivel de cuenca, las estimaciones de la CONAGUA son representativas de acuerdo a su división de acuíferos. Por ejemplo, las cuencas ubicadas en Chiapas y Oaxaca prácticamente se encuentran cada una en un mismo acuífero, mientras que, en el estado de Veracruz, una cuenca puede abarcar distintos acuíferos los cuales en muchas ocasiones tienen valores promedio de la recarga lo suficientemente diferentes.

Por otro lado, se investigaron los parámetros climatológicos y fisiográficos intrínsecos a la zona de estudio que demostraron tener un mayor control en el índice del gasto base y la recarga. En la Sierra Madre de Chiapas, se observó una alta correlación entre el índice de gasto base y la evaporación potencial ($R=0.93$) así como con el índice de humedad topográfico ($R=0.58$). En la Sierra Madre Oriental, el índice de Horton explica aproximadamente 87% de la recarga estimada mientras que ciertos parámetros fisiográficos como la densidad de drenaje ($R=0.53$) y el índice de humedad topográfico ($R=0.54$) mostraron una alta correlación, aunque inferior a la del índice de Horton.

A pesar de que este trabajo está basado en resultados obtenidos para una muestra de 24 cuencas hidrológicas, dicho análisis representa un primer paso para estimar la recarga de agua subterránea en cuencas de la República Mexicana. Recientes estudios han demostrado el potencial del uso de estas metodologías para inferir la recarga en zonas semi-áridas





(Ajami et al., 2009) y áridas, por lo cual es posible realizar estimaciones de la recarga a la escala nacional.

Para una validación más robusta de la metodología propuesta en este trabajo, es necesario analizar un mayor número de cuencas en México. En caso de tener resultados favorables, esta metodología podría ser considerada como una herramienta de validación para los estudios de disponibilidad media anual de las aguas nacionales (NOM-011-CONAGUA). Otros aspectos que merecen ser investigados de manera detallada se encuentran los efectos de la variabilidad climática (precipitación, evapotranspiración) en la variabilidad de la recarga para escenarios futuros, así como proponer y desarrollar relaciones empíricas más robustas entre el clima y la fisiografía de una cuenca, y su recarga.





5. BIBLIOGRAFÍA

Ajami, H. (2009). “Quantifying Recharge in Semi-Arid Basins: Translating Impact of Climate Variability and Change on Groundwater Resources”, Department of Hydrology and Water Resources College of Engineering. University of Arizona.

Aksoy, H., & Wittenberg, H. (2011). “Nonlinear baseflow recession analysis in watersheds with intermittent streamflow”, *Hydrological Sciences Journal*, 56:2, 226-237, DOI: 10.1080/02626667.2011.553614

Aparicio, F.J., (1992). “Fundamentos de hidrología de superficie” Ed. Limusa

Arnold, J. G., Allen, P. M. (1999). “Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow records”, *Jawra journal of the american water resources association*, 35: pp 411–424, Doi: 10.1111/j.1752-1688.1999.tb03599.x

Barnes, B. S. (1939). “The structure of discharge recession curves”, *Eos Transactions AGU*, 20, 721–725.

Baumgartner, A., Reichel, E. (1975) “The World Water Balance” , (New York: Elsevier).

Beven, K. J., Kirkby, M. J. (1979). “A physically based, variable contributing area model of basin hydrology”, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43–69.

Budyko, M. I. (1974). “*Climate and Life*”, Academic Press, New York.

Boussinesq, J. (1904). “Recherches the'oriques sur l'e'coulement des nappes d'eau infiltr'e'es dans le sol et sur le de'bit des sources.” *J. Math. Pure. Appl.* 5me. Ser. 10: 5–78.

Coutagne, A. (1948). “Etude générale des variations de débits en fonction des facteurs qui les conditionnent, 2ème partie: Les variations de débit en période non influencée par les precipitations”, *La Houille Blanche* Sep.–Oct., 416–436.





Chunzai W. (2012). “El Niño and Southern Oscillation (ENSO): A Review”.

Daniel, C.C. (1996). “Ground-water recharge to the regolith-fractured crystalline rock aquifer system” Orange County, North Carolina: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4220, 59 p.

Delin, N. D., Healy, R.W., Lorenz, D.L. and Nimmo, J.R. (2007). “Comparison of local-to regional-scale estimates of groundwater recharge in Minnesota”, USA. *Journal of Hydrology*, 334: pp. 231–249, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.010>

Dennis W. R., William J., G., Gordon J.F. (2005) “Comparison of Methods for Estimating Ground-Water Recharge and Base Flow at a Small Watershed Underlain by Fractured Bedrock in the Eastern United States.” U.S. Geological Survey.

Doll, P., Fiedler, K., (2008). “Global-scale modeling of groundwater recharge” Institute of Physical Geography, University of Frankfurt, Frankfurt am Main, Germany.

Gebert, W. A., Radloff, M. J., Considine, E. J., Kenedy, J. L. (2007) “Use of streamflow data to estimate baseflow/groundwater recharge for Wisconsin”. *Journal of the American Water Resources Association*, V. 43, no. 1, p. 220-336.

Gebert, W. A., Walker, J. F., Kenedy, J.L. (2011) “Estimating 1970-99 average annual groundwater recharge in Wisconsin using streamflow data. U.S. Geological Survey Open File Report 2009-1210, 17 p. plus appendixes.

Hendrickx J., Walker G. (1997). “Recharge from precipitation.” In: Simmers I (ed) *Recharge of phreatic aquifers in (semi-)arid areas*. AA Balkema, Rotterdam, pp 19–98.

Holtzschlag, D.J. (1997). “A generalized estimate of ground-water recharge rates in the Lower Peninsula of Michigan: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2437, 37 p”.

Horton, R. E. (1933). “The role of infiltration in the hydrologic cycle”, *Eos Transactions AGU*, 14, 446–460.

Institute of Hydrology (1980). *Low Flow Studies*. Research Report, Wallingford, Oxon.

Korzun, V.I., Sokolov, A.A., Budyko, M.I., Voskresensky, K.P., Kalinin, G.P., Konoplyantsev, A.A., Korotkevich, E.S. & L’vovitch, M. I., eds. (1978). “Atlas of world water balance”, USSR National Committee for the International Hydrological Decade.





English translation. Paris, UNESCO. 663 pp.

Ladson, A.R., Brown, R., Neal, B., Nathan, R. (2013). “A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter”, *Australian Journal of Water Resources*, Vol. 17, No. 1, pp. 25-34, <http://dx.doi.org/10.7158/W12-028.2013.17.1>.

Lerner, D. (1990). “General principles of techniques for estimating recharge”. En D.N. Lerner, A.S. Issar y I. Simmers (eds) *Groundwater recharge*, Cap. 10, 101-110. Hannover, Verlag Heinz Heise.

Lvovitch, M. I. (1970). “World water balance (General Report)”, *Symposium on the world water balance*. Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, Pub. No 93, Vol. II, pp. 401-415.

Lyne, V., Hollick, M. (1979). “Stochastic time- variable rainfall-runoff modelling”, *Proceedings of the Hydrology and Water Resources Symposium*, Perth, 10-12 September, Institution of Engineers National Conference Publication, No. 79/10, pp. 89-92.

MacDonald A. M., Calow, R. C., MacDonald D. M. J., Darling, W. G., Dochartaigh B. E. (2009). What impact will climate change have on rural water supplies in Africa?

Nathan, R. J., McMahon, T. A. (1990). “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis”, *Water Resources Research*, Vol. 26, pp. 1465-1473.

Nimmo J., Stonestrom D., Akstin K. (1994). The feasibility of recharge rate determinations using the steady-state centrifuge method. *Soil Sci Soc Am J* 58:49–56.

Olmsted , F.H., Hely, A.G. (1962). “Relation between ground water and surface water in Brandywine Creek Basin, Pennsylvania”, U.S. Geological Survey Professional Paper 417-A, 21 p.

Pettyjohn, W.A., Henning, R. (1979). “Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio”, *Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report Number 552*, 323 p.

Phillips F. (1994). Environmental tracers for water movement in desert soils of the American Southwest. *Soil Sci Soc Am J* 58:14–24.

Roman R., Caballero R., Bustos A., Diez J., Cartagena M., Ballejo A., Caballero A. (1996). Water and solute movement under conventional corn in central Spain: I *Water*





balance. *Soil Sci Soc Am J* 60:1530–1536.

Ronan A., Prudic D., Thodal C., Constantz J. (1998). “Field study and simulation of diurnal temperature effects on infiltration and variably saturated flow beneath an ephemeral stream.” *Water Resources* 34:2137–2153.

Scanlon, B. R., Healy, R. W., Cook, P. G. (2002). “Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge”, *Hydrogeology Journal*, pp. 18–39, <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-001-0176-2>

Singh V. (1995). “Computer models of watershed hydrology”. *Water Resources Publications*, Highlands Ranch, Colorado.

Sistema Meteorológico Nacional (2010) “Impacto del fenómeno El Niño en México”. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=270&Itemid=166

Sloto, R.A., Crouse, M.Y. (1996) “HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis” . U.S. Geological Survey Water– Resources Investigations Report 96–4040, 1996, 46 p.

Tallaksen, L. M. (1995). “A review of baseflow recession analysis”, *Journal Hydrology* 165, 349–370.

Taniguchi M., Fukuo Y. (1993). “Continuous measurements of ground-water seepage using an automatic seepage meter.” *Ground Water* 31:675–679.

Tindall J., Kunkel J. (1999). *Unsaturated zone hydrology for scientists and engineers*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.

Troch, P.A., Martinez, G. F., Pauwels, R.N., Durcik, M., Sivalpan, M., Harman, C., Brooks, P. D., Gupta, H., Huxman, T., (2009). “Climate and vegetation water use efficiency at catchment scales”, *Wiley InterScience*.

Ponce, V. M., Pandey, R. P., Kumar, S. (1999). “Groundwater recharge by channel infiltration in el barbon basin, Baja California, Mexico”, *Journal of Hydrology* 214.

Szilagyi, J., Harvey F.E., and Ayers J.F., (2003). “Regional estimation of base recharge to ground water using water balance and a base-flow index: *Ground Water*”, v. 41, no. 4, p. 504-513.

U.S. Geological Survey, (1989). *Federal Glossary of selected terms Subsurface-water flow*





and solute transport: U.S. Geological Survey, Office of Water Data Coordination, Ground Water Subcommittee of the Federal Interagency Advisory Committee on Water Data, 38 p.

Wada, Y., Ludovicus, P. H. B., Cheryl, M. K., Josef, W. T. M. R., Slavek, V., Marc F. P. B., (2010). “Global depletion of groundwater resources” *Geophysical Research Letters*, Vol. 37, L20402, doi:10.1029/2010GL044571, 2010

Wang, D., Cai, X. (2009). “Detecting human interferences to low flows through base flow recession analysis”, *Water Resources Research*, Vol. 45, W07426, doi:10.1029/2009WR007819.

Warren, A. G., John, F. W., Randall, J. F. (2011). “Groundwater recharge in wisconsin—annual estimates for 1970-99 using streamflow data”, USGS Water Science Center

Wittenberg, H. (1994). “Nonlinear analysis of flow recession curves”, In: *FRIEND: Flow Regimes from International Experimental and Network Data* (Proc. Second FRIEND Conf., Braunschweig October 1993) (P. Seuna, A. Gustard, N. W. Arnell & G. A. Cole, eds), 61–67. Wallingford: IAHS Press, IAHS Publ. 221.

Wittenberg, H. (1999). “Baseflow recession and recharge as nonlinear storage processes”, *Hydrol. Processes* 13, 715–726.

Wittenberg, H. (2003). “Effects of season and man-made changes on baseflow and flow recession: case studies”, *Hydrol. Processes* 17, 2113–2123.

Wittenberg, H., Sivapalan, M. (1999). “Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation”, *J. Hydrol.* 219, 20–33.

Young M., Wierenga P., Mancino C. (1996). Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies. *Soil Sci Soc Am J* 161:491–501.

