

## Balance hídrico de la cuenca Pijijiapan en Chiapas, México

Itzel Castro Mendoza e-mail: [castro.itzel@inifap.gob.mx](mailto:castro.itzel@inifap.gob.mx)  
Investigador del Campo Experimental Centro de Chiapas del INIFAP, México.

Reynol Magdaleno González e-mail: [reymg01@hotmail.com](mailto:reymg01@hotmail.com)  
Profesor de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México.

Eileen Cruz Salinas e-mail: [salinas.eileen@inifap.gob.mx](mailto:salinas.eileen@inifap.gob.mx)  
Investigador del Campo Experimental Centro de Chiapas del INIFAP, México.

Roberto Reynoso Santos e-mail: [reynoso.roberto@inifap.gob.mx](mailto:reynoso.roberto@inifap.gob.mx)  
Investigador del Campo Experimental Centro de Chiapas del INIFAP, México.

Walter López Báez e-mail: [lopez.walter@inifap.gob.mx](mailto:lopez.walter@inifap.gob.mx)  
Investigador del Campo Experimental Centro de Chiapas del INIFAP, México.

### RESUMEN

Con el objetivo de conocer la importancia de la Reserva de la Biosfera del Triunfo (REBITRI) como zona de recarga hídrica, se estimó el balance hídrico de la cuenca Pijijiapan ya que la parte alta de la misma se ubica dentro del polígono de la reserva. Se estimó una precipitación de 653,8 millones de m<sup>3</sup> anuales, de la cual el 12 % escurre, el 64 % se evapotranspira y el 24 % se infiltra. El volumen de recarga hídrica neta potencial es 2,6 veces mayor dentro de la zona de la REBITRI que fuera de ella. Los resultados resaltan la importancia que tiene la REBITRI como zona de recarga hídrica y regulación de la erosión y riesgos de inundación en la parte baja de la cuenca.

**Palabras clave:** balance hídrico, Pijijiapan, REBITRI.

## Water balance of the basin of Pijijiapan in Chiapas, Mexico

### SUMMARY

With the objective of determining the influence as a recharge area over the Biosphere Reserve The Triumph (REBITRI), it was estimated the water balance of Pijijiapan river watershed since its high basin is included into the reserve polygon. It was estimated an annual rainfall of 653,8 millions of m<sup>3</sup>, 12% of which is runoff, 64% is evapotranspired and 24% becomes infiltration. The potential recharge volume of the watershed is 2,6 higher at the area inside the REBITRI than outside. The results remark the role of the REBITRI as a water recharge zone, as well as its erosion and flood regulation effect in the watershed of Pijijiapan.

**Keywords:** water balance, Pijijiapan, REBITRI.

## **INTRODUCCIÓN**

Los efectos del cambio climático son una realidad en el estado de Chiapas, especialmente en la zona de la Sierra Madre. Así lo demuestran los desastres por derrumbes e inundaciones ocurridos en los últimos 15 años, que han ocasionado pérdidas de vidas humanas y afectaciones en el desarrollo económico local y en la oferta de servicios ecosistémicos. De no hacer nada estos efectos adversos serán mayores, especialmente en la agricultura y en los recursos hídricos (Caparros 2007), (Stern 2007), (SHCP 2009), (Morales et al. 2011).

En 1990 se estableció en la Sierra Madre de Chiapas la Reserva de la Biósfera El Triunfo (REBITRI), considerada una de las áreas naturales protegidas con mayor biodiversidad en el mundo e importante por la provisión de servicios ecosistémicos como la regulación de los escurrimientos en 14 cuencas interconectadas con influencia en 11 municipios con una población aproximada de 400 000 habitantes (López et al. 2011).

No obstante su importancia, la REBITRI está amenazada por: 1) el desconocimiento e inadecuada valoración que la sociedad y los tres niveles de gobierno hacen de los servicios ecosistémicos de la reserva, los cuales son aprovechados para su bienestar sin que exista reconocimiento y mucho menos pago por utilizarlos y 2) la falta de estudios que demuestren los beneficios que se derivan de su conservación.

Diversas investigaciones señalan que los efectos adversos del cambio climático se acentúan en la Sierra Madre de Chiapas por los peligros naturales existentes (altas precipitaciones, orografía accidentada, geología) y por las acciones de deterioro de las cuencas (deforestación y malas prácticas en agricultura y ganadería en las partes altas) ocasionando desastres naturales aguas abajo (USAID-USFS 2007), (Schroth et al. 2009).

El objetivo de este estudio fue contribuir a demostrar los beneficios que se derivan de la conservación de la REBITRI, a través de la generación de datos sobre su importancia como zona de recarga hídrica de una de las cuencas vinculadas con su territorio (Karin 2007).

## **UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

La cuenca Río Pijijiapan se ubica entre los 93° 03' 11" y 93° 20' 08" de longitud oeste y 15° 30' 50" y 15° 53' 50" de latitud norte, cuenta con un área de 306,55km<sup>2</sup> y un perímetro de 109 km. En orden de importancia comparte superficie con los municipios de Pijijiapan, Villa Corzo y La Concordia (figura 1). El 18,6 % de su superficie (5 703,37 ha) se ubica dentro del polígono de la Reserva de la Biósfera El Triunfo y corresponde a la parte alta de la cuenca. Vierte hacia la costa del Pacífico.

Los climas que predominan en la cuenca Río Pijijiapan son el cálido húmedo presente en el 46 % de la superficie de la cuenca, seguido por cálido subhúmedo y semicálido húmedo presentes en el 30 y 24 % del territorio de la cuenca respectivamente (García 1998). Los suelos predominantes son el litosol y el regosoleútrico, el primero se ubica en la parte alta de la cuenca y ocupa el 66,5 % del territorio y el segundo se ubica en la parte media-baja y ocupa el 22 % de la cuenca (INEGI 2002).

La cuenca presenta una topografía muy compleja con una elevación que va desde el nivel del mar hasta los 2 480 m. En la parte alta la pendiente promedio es de 34,4 %, en la parte media a alta de 7,8 % y en la parte baja de 0,78 %. La temperatura oscila en un rango entre 15 y 28 °C.

En cuanto al uso del suelo, en la parte alta de la cuenca dentro de la REBITRI se ubican 2 104,6 ha de bosque mesófilo de montaña y una área de 11 218 ha de agricultura de temporal mezclada con vegetación secundaria de selva alta perennifolia. En la parte media y baja de la cuenca el cambio de uso de suelo de zonas boscosas a pastizales para fines pecuarios ocupa un poco más del 50 % del territorio de la cuenca con 15 570 ha y es la principal amenaza para la REBITRI.

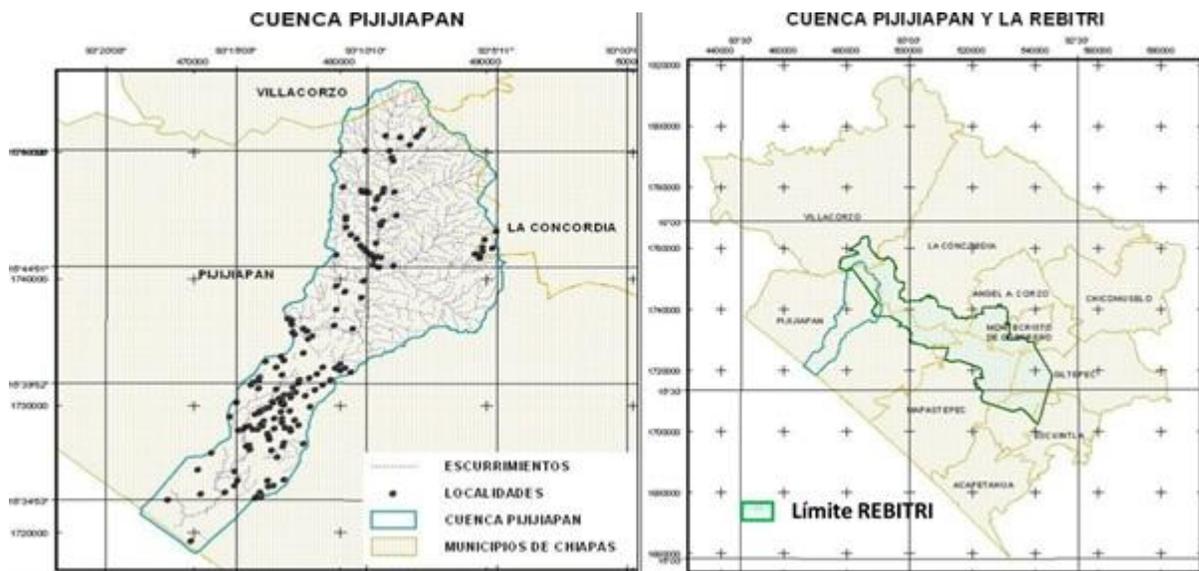


Figura 1. Ubicación del área de estudio

## DESARROLLO

Para conocer la importancia que tiene la REBITRI como zona de recarga hídrica y regulación ecosistémica en la cuenca Pijijiapan se estimó el volumen anual de agua ( $m^3$ ) que escurre y se infiltra, comparando áreas dentro y fuera de la reserva, para las cuales se generó su polígono respectivo. Para el cálculo se utilizaron los promedios medios anuales reportados en el área.

Se usó la metodología del balance hídrico –ecuaciones (1) y (2)–propuesta por Llerena (2003) para cuencas con poca información disponible.

$$P = Q + ET \quad (1)$$

donde:

- $P$  = Precipitación ( $m^3$ )
- $Q$  = Escorrimento ( $m^3$ )
- $ET$  = Evapotranspiración ( $m^3$ )

$$Q = Es + Ess_l + Ess_r + Est \quad (2)$$

donde:

- $Es$  =Escorrimento superficial ( $m^3$ )
- $Ess_l$ =Escorrimento subsuperficial lento ( $m^3$ )
- $Ess_r$ =Escorrimento subsuperficial rápido ( $m^3$ )
- $Est$  =Escorrimento subterráneo ( $m^3$ )

El escurrimiento subsuperficial (Ess) se divide en escurrimiento subsuperficial rápido y lento. El primero generalmente emerge a la superficie y forma los llamados manantiales; el lento se une al escurrimiento subterráneo (Est) y conforman el volumen de infiltración ( $In$ ) que no es evapotranspirado y se le conoce como volumen de recarga neta potencial (FIRCO 2002). Sustituyendo lo anterior en la ecuación (1) se obtiene la ecuación (3).

$$P = Es + In + ET \quad (3)$$

### ESTIMACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

La estimación del volumen anual precipitado se realizó mediante álgebra de mapas en el sistema de información geográfica (SIG) ArcMap 9.1, con base en las ecuaciones propuestas por Aparicio (2009) para datos de precipitación meda anual (ecuación 4).

$$VP = P * AC \quad (4)$$

donde:

- $VP$  =Volumen anual de precipitación ( $m^3$ )
- $P$  = Precipitación media anual (m)
- $AC$  = Área de la cuenca ( $m^2$ )

Para determinar  $VP$  se ubicaron las estaciones climatológicas (figura 2) de influencia en la cuenca con registro de medias mensuales y anuales de precipitación y temperatura. Se interpolan los valores anuales de precipitación (m) para obtener un raster que refleja el comportamiento promedio de la precipitación en la cuenca. El cálculo del volumen de lluvia se obtiene a partir del raster precipitación multiplicada por el área de la cuenca, tanto dentro como fuera de la reserva.

### ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL

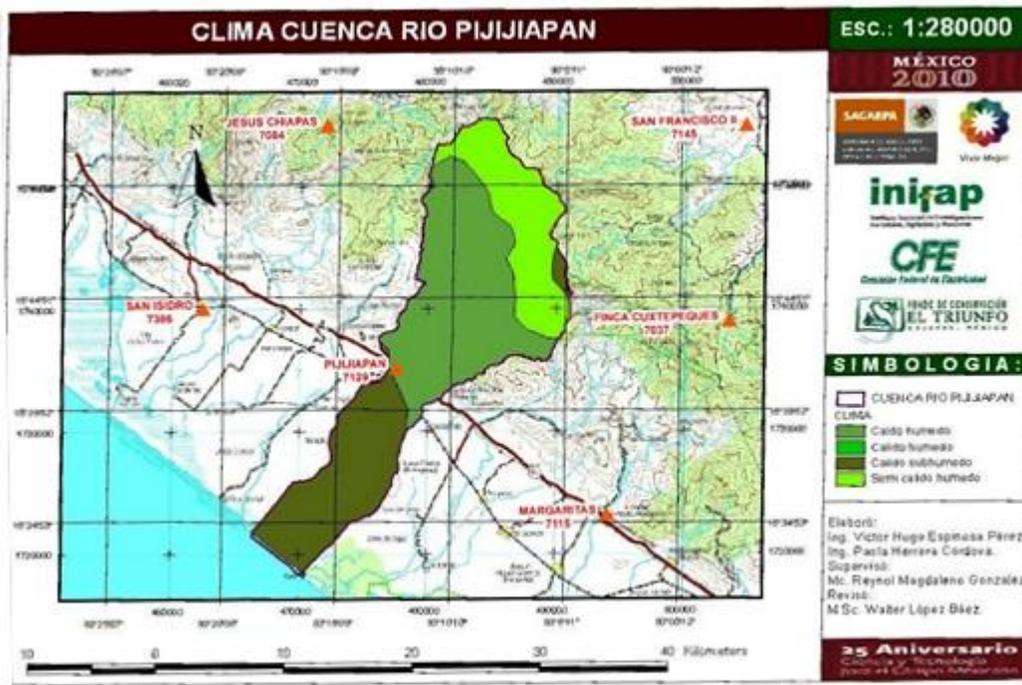
El escurrimiento superficial se estimó con el método del escurrimiento medio (SARH-CP 1982), el cual requiere de la lluvia media anual (m) en el área de la cuenca, el área de drenaje y su coeficiente de escurrimiento, como se muestra en la ecuación (5).

$$Es = AC * C * P \quad (5)$$

donde:

- $Es$  = Volumen promedio que puede escurrir ( $m^3$ )
- $AC$  = Área de la cuenca ( $m^2$ )
- $C$  = Coeficiente de escurrimiento, con valores adimensionales entre 0,1 - 1,0

$P$  = Precipitación media anual en la cuenca (m).



**Figura 2. Clima y estaciones climatológicas**

La metodología utilizada para determinar el coeficiente de escurrimiento es la que se presenta en el Apéndice Normativo A (A.1.2.1.2) de la NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT 2002) y se expresa en las ecuaciones (6) y (7) y en las tablas 1 y 2.

$$C = k * \frac{P - 250}{2000} + \frac{k - 0,15}{1,50} \text{ cuando } k > 0,15 \quad (6)$$

$$C = k * \frac{P - 250}{2000} \text{ cuando } k \leq 0,15 \quad (7)$$

donde:

$k$  =Parámetro que depende del tipo y uso del suelo (tabla 1)

$P$  = Precipitación anual o mensual (mm)

El factor  $k$  refleja la capacidad del suelo para resistir al desprendimiento de partículas por efecto de la lluvia, es decir, mide la energía necesaria para que conforme a las condiciones físicas del suelo y su tipo de cobertura ocurra desprendimiento de partículas de suelo. Para calcular el valor de  $k$ , y generar un mapa con estos valores, primero se determinaron los mapas de uso de suelo. El uso de suelo se digitalizó a través de la fointerpretación de imágenes de satélite con el software Google EarthV.5.0., los polígonos generados en formato kml fueron exportados a un

formato shape (shp) para su manipulación. Posteriormente se les asignó los valores de  $k$  a las áreas con características homogéneas.

**Tabla 1. Valores de  $k$  que son utilizados en México**

Uso de suelo o cubierta vegetal	Tipo de suelo		
	A	B	C
Cultivos:			
En hilera	0,24	0,27	0,3
Legumbres o rotación de praderas	0,24	0,27	0,3
Granos pequeños	0,24	0,27	0,3
Pastizal (% de suelo cubierto/ pastoreo):			
Más del 75%/ poco	0,14	0,2	0,28
Del 50 al 75%/ regular	0,2	0,24	0,3
Menos del 50%/ mucho	0,24	0,28	0,3
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,3
Otros usos:			
Pradera permanente	0,18	0,24	0,3
Barbecho, áreas sin cultivo o desnudas	0,26	0,26	0,30
Cascos y zonas con edificaciones	0,26	0,29	0,32
Caminos (incluyendo derecho de vía)	0,27	0,3	0,33
*Normatividad conforme al Método de la SARH-CP (1982).			

**Tabla 2. Tipos de suelo**

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los suelos A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas
*Normatividad conforme al Método de la SARH-CP (1982).	

Para la generación del mapa de los tipos de suelo se utilizó el conjunto de datos vectoriales de suelo de la carta edafológica 1:250000 del INEGI, Serie II.

### ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE RECARGA NETA POTENCIAL

El volumen de la recarga neta potencial o infiltración neta potencial, se estimó con la ecuación (8).

$$In = It - ET \quad (8)$$

donde:

- $In$  = Volumen infiltrado ( $m^3$ )
- $It$  = Volumen total infiltrado ( $m^3$ )
- $ET$  = Volumen evapotranspirado ( $m^3$ )

El volumen total infiltrado anual puede estimarse como una función del coeficiente de escurrimiento y de la precipitación media anual, de acuerdo con la ecuación (9).

$$It = (1-C) * P * AC \quad (9)$$

donde:

- $It$  = Volumen total infiltrado ( $m^3$ )
- $P$  = Precipitación media anual (m)
- $AC$  = Área de la cuenca ( $m^2$ )
- $C$  = coeficiente de escurrimiento

### ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

El volumen anual de evapotranspiración, se obtuvo con la ecuación (10).

$$ET = AC * ETR \quad (10)$$

donde:

- $ET$  = Volumen evapotranspirado ( $m^3$ )
- $AC$  = Área de la cuenca ( $m^2$ )
- $ETR$  = Evapotranspiración anual real (m)

Para fines prácticos la determinación de la evapotranspiración anual real se utilizó el método de Turc, quien propone una fórmula simple en función de la precipitación y la temperatura del lugar de estudio (ecuación 11).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,90 + (P/L)^2}} \quad (11)$$

donde:

- $ETR$  = Evapotranspiración anual real (m)
- $P$  = Precipitación media anual (m)
- $L$  = Parámetro que está en función de la temperatura media conforme con la ecuación (12).

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3 \quad (12)$$

donde:

$P$  = Precipitación media anual (mm)

$T$  = Temperatura media anual (°C)

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El balance hídrico se muestra en la tabla 3. Del total precipitado el 12% escurre, el 64% se evapotranspira y el 24% se infiltra. Proporcionalmente, en el área de la cuenca dentro de la REBITRI escurre 25 veces menos y se infiltra 2,6 veces más que en el área de la cuenca fuera de la REBITRI.

**Tabla 3. Balance hídrico de la cuenca Pijijiapan (volumen anual)**

	Precipitación	Escurrimiento	Evapotranspiración	Infiltración	Área
	millones de m <sup>3</sup>	ha			
Fuera de la REBITRI	538,13	72,59	358,93	42,52	24 952,14
Dentro de la REBITRI	115,67	2,94	63,05	113,76	5 703,37
Total	653,8	75,53	421,98	156,28	30 655,51

Espacialmente la mayor precipitación, escurrimiento y evapotranspiración ocurren en la parte media y baja de la cuenca mientras que en la parte alta se presentan las mayores tasas de infiltración (figura 3, figura 4 y figura 5) que coinciden con zonas de bosque mesófilo de montaña, selva, agricultura de temporal y algunos pastizales. Es de señalar que el área de la cuenca ubicada dentro de la REBITRI tiene tasas de infiltración de 600 a 1300 mm anuales (figura 5). En la parte baja de la cuenca, cercano a la costa, se presentan tasas de infiltración entre 600 a 700 mm anuales, sin embargo, estas tasas son reflejo de la textura del suelo (arenas) y no del uso, como ocurre en la zona de la REBITRI (figura 5).

A pesar de las diferencias de pendiente promedio entre la parte alta (34,4 %), media (7,8 %) y baja (0,78 %) el mayor escurrimiento ocurre en la parte media y baja donde existen pastizales cultivados.

Dentro de la cuenca, la demanda del recurso hídrico es más significativa en la parte baja en donde se ubican el Distrito de Temporal Tecnificado 020 Margaritas-Pijijiapan y el 64 % de los 16 180 habitantes.

El Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) reporta 15 concesiones de agua en la cuenca con un total anual de 207 284 m<sup>3</sup>, de las cuales solo una se ubica dentro de la REBITRI con un uso de agua público urbano, y un volumen de 18 922 m<sup>3</sup>. Con base en el REPDA y el balance hídrico, tanto el escurrimiento como la infiltración satisfacen la demanda del recurso hídrico.

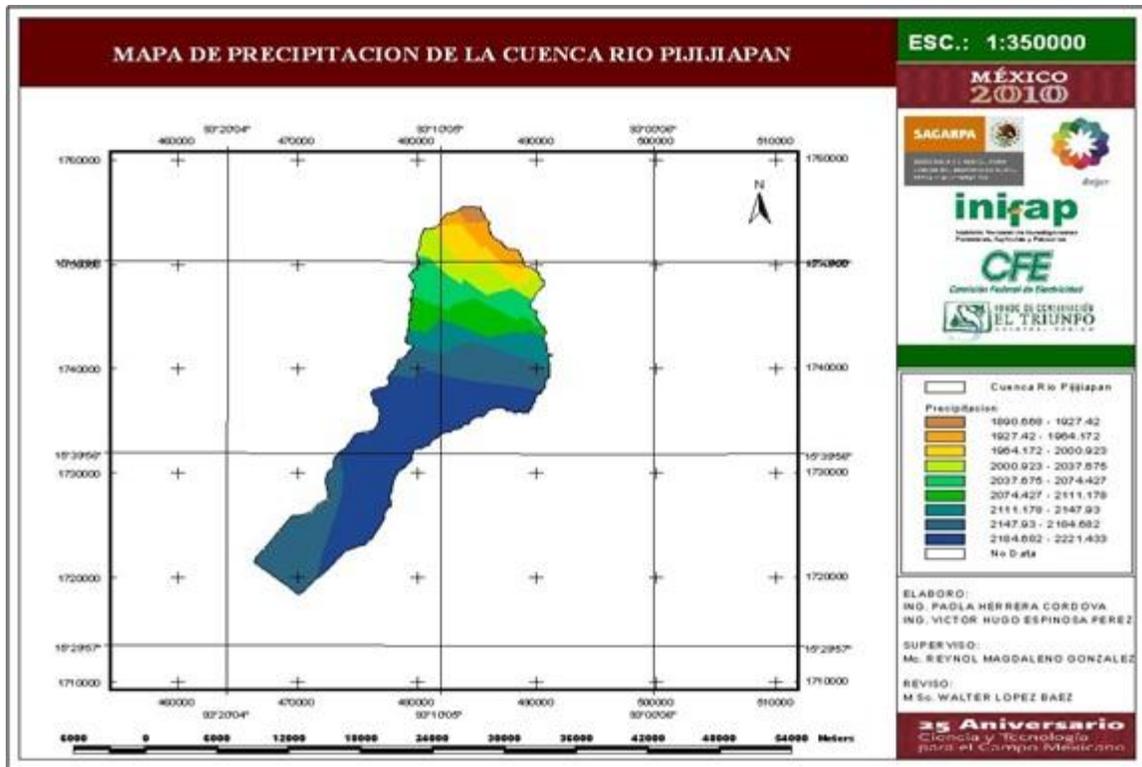


Figura 3. Mapa de precipitación de la cuenca del Río Pijijapan

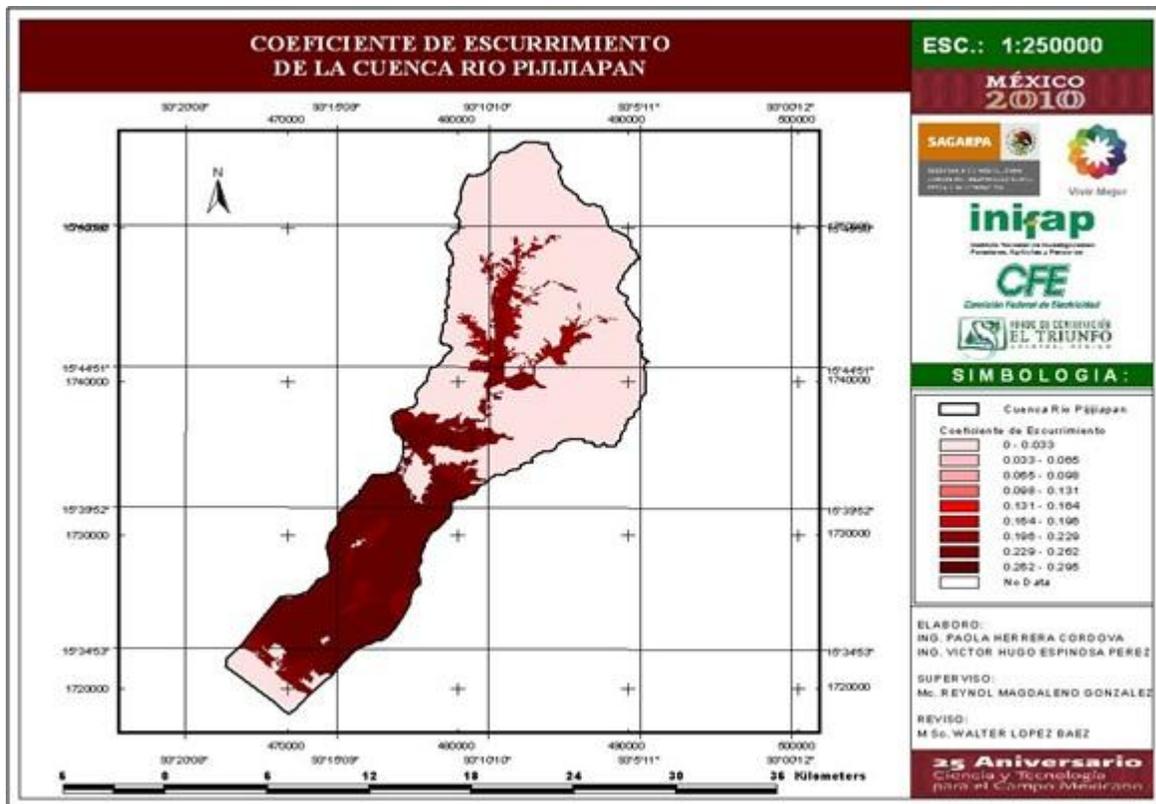


Figura 4. Coeficientes de escurrimiento de la cuenca del Río Pijijapan

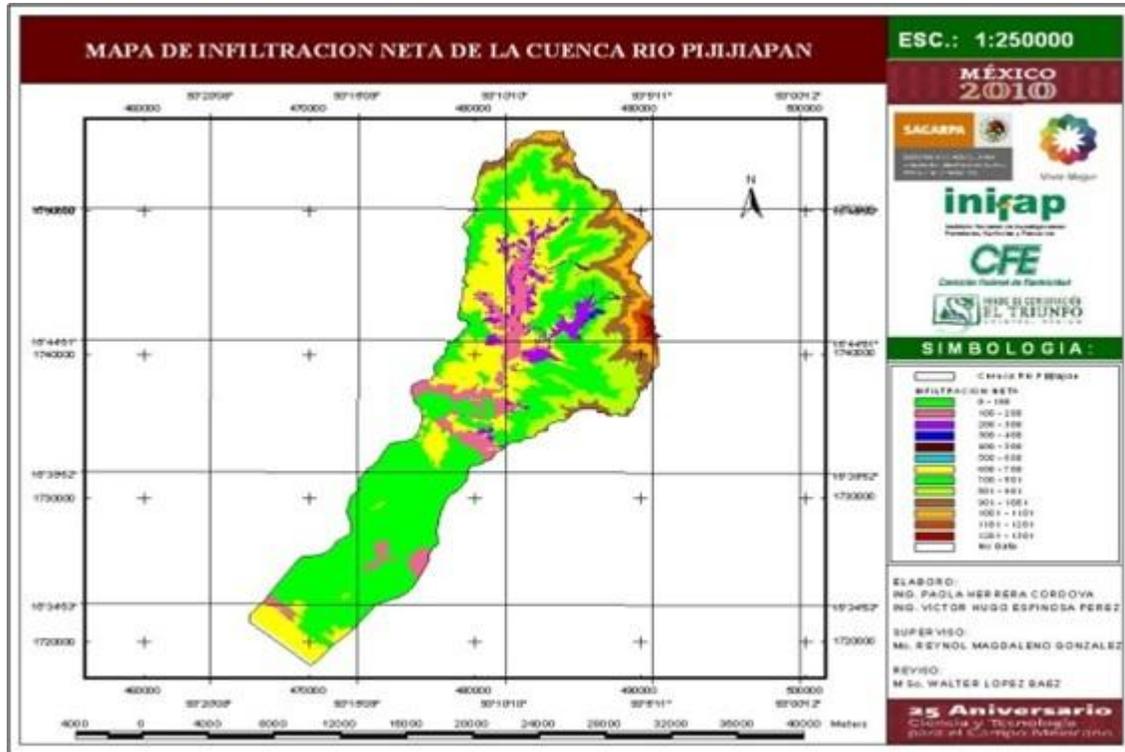


Figura 5. Mapa de infiltración de la cuenca Río Pijijiapan

## CONCLUSIONES

- El área dentro de la REBITRI representa el 18 % del total de la cuenca, en ella se capta el 18% de lluvia total, solamente escurre el 4% y se infiltra 72 % del agua, a pesar de su pendiente.
- Estas condiciones se atribuyen al uso de suelo que es principalmente bosque, selva y pastizal.
- Es evidente que la REBITRI en la parte alta de la cuenca Pijijiapan es la principal zona de recarga hídrica e influye en el flujo de los escurrimientos hacia las partes bajas de la cuenca, con importantes repercusiones ecológicas, socioeconómicas y de gobernabilidad.
- Con base en los resultados obtenidos se recomienda implementar en la cuenca Pijijiapan dentro de la zona de la REBITRI actividades de conservación y reforestación.

## REFERENCIAS

- Aparicio F. J.** (2009). "Fundamentos de hidrología de superficie". 1ra Edición. ISBN 10: 968-18-3014-8. Editorial Limusa, México. Pp. 303.
- Caparros G. A.** (2007). "El informe Stern sobre la economía del cambio climático". Ecosistemas. vol. 16, no. 1, pp. 124-125. ISSN 1697-2473. Instituto de Política y Bienes Públicos. Consejo Superior de Investigación Científica. Madrid. España.
- FIRCO** (2002). "Fideicomiso de Riesgo Compartido 2002. Diplomado Nacional de Rehabilitación de Microcuencas". Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México.

- García E.** (1998). “Climas (clasificación de Koppen, modificado por García)”. Escala 1:1000000. CONABIO. México.
- INEGI** (2002). “Conjunto de Datos Vectorial Edafológico”. Escala 1:250 000 Serie III (Continuo Nacional).INEGI. México.
- Karin M. K.** (2007). “Valoración de cuencas como una herramienta para la conservación de la biodiversidad. Lecciones aprendidas de proyectos de conservación”. The Nature Conservancy-USAID. USA. Pp. 48.
- López B. W., Magdaleno G. R., Reynoso S. R. y Salinas C. E.** (2011). “Conectividad hídrica entre municipios, cuencas y Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. Potencial para la creación de un mercado local de agua”. Libro Técnico No. 5. ISSN: 2007-0934. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Centro de Chiapas. México. Pp. 83.
- Llerena C.** (2003). “Servicios ambientales de las cuencas y producción de agua. Conceptos, valoración, experiencias y sus posibilidades de aplicación en el Perú”. Foro Regional sobre sistemas de pago por servicios ambientales. Arequipa, Perú. Pp. 16.
- Morales M. G., Filho E. d. M. V., León C. J., Tinoco J. N., Hills T., Vázquez A. V., Castro J. C., Vázquez J. J., Alva A., Aguilera M., Roblero L., Osorio E., Flores E., Line F., Gudiño L., Ruiz J. C. Z. , Arias O. E. M.** (2011). “Estrategia del sector cafetalero para la adaptación, mitigación y reducción de la vulnerabilidad ante el cambio climático en la Sierra Madre de Chiapas Chiapas, México, PNUD”. Informe de proyecto. Conservation International México, A.C. Chiapas. México. Pp. 80.
- SARH-CP** (1982). “Manual de Conservación del Suelo y del Agua”. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Colegio de Postgraduados. 2a ed. Dirección General de Conservación del Suelo y Agua, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Schroth G., Laderach P., Dempewolf J., Philpott S., Hagggar J.,Eakin H., Castillejos T., Moreno J.G., Pinto L.S. and Hernandez R.** (2009). “Towards a climate change adaptation strategy for coffee communities and ecosystems in the Sierra Madre de Chiapas, Mexico”. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, vol. 14, no. 7, pp 605-625. ISSN: 1381-2386. Springer.USA.
- SEMARNAT** (2002). “Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000”. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, Distrito Federal, extraído de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/NOM-011-CNA-2000.pdf> en abril de 2014.
- SHCP** (2009). “La economía del cambio climático en México: Síntesis. Dr. Luis Miguel Galindo, Coordinador”. Secretaría de Hacienda y Crédito Público-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.Pp. 67.
- Stern N.** (2007). “Stern review on the economics of climate change”. HM Treasury & Cabinet Office, United Kingdom, extraído de: <http://www.sternreview.org.uk> en junio de 2011.
- USAID-USFS** (2007). “Landslides, channel erosion, and sedimentation in the western Sierra Madre, Chiapas, Mexico, during hurricane Stan in 2005: a brief field review with recommendations”. Technical report.USAID and US Forest Service.USA. Pp. 24.