



## Analysis of vulnerability of the Río Misantla basin to extreme hydrometeorological phenomena

## Análisis de vulnerabilidad de la cuenca del río Misantla ante fenómenos hidrometeorológicos extremos

Rodríguez-Hernández, L.D.<sup>1</sup>, Valdés-Rodríguez, O.A.<sup>2,\*</sup>, Ellis, E.A.<sup>3</sup>, Armenta-Montero, S.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Estudiante del Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable, El Colegio de Veracruz, México. ORCID: [0000-0001-9214-3225](https://orcid.org/0000-0001-9214-3225).

<sup>2</sup>Colegio de Veracruz, México. ORCID: [0000-0002-3702-6920](https://orcid.org/0000-0002-3702-6920).

<sup>3</sup>Universidad Veracruzana, Centro de Investigaciones Tropicales. México ORCID: [0000-0001-8972-4846](https://orcid.org/0000-0001-8972-4846).

<sup>4</sup>Universidad Veracruzana, Centro de Investigaciones Tropicales ORCID: [0000-0001-6316-9573](https://orcid.org/0000-0001-6316-9573).

**Cite this paper/Como citar este artículo:** Rodríguez-Hernández, L.D., Valdés-Rodríguez, O.A., Ellis, E.A., Armenta-Montero, S. (2020). Analysis of vulnerability of the Río Misantla basin to extreme hydrometeorological phenomena. *Revista Bio Ciencias* 7, e900. doi: <https://doi.org/10.15741/revbio.07.e900>



### ABSTRACT

The Río Misantla basin in Veracruz, Mexico is a region with high vulnerability to the impact of extreme hydrometeorological phenomena, with disastrous effects on both natural and human systems. Recently, these effects have been augmented by poor management within the basin, changes in land use and the lack of landscape recovery practices. This study analyzed the impact of changing land use on the hydric balance of the Río Misantla basin and its relationship to increased vulnerability to meteorological phenomena. We used the Soil and Water Assessment Tool integrated with Arcgis 10.1, obtaining a model efficiency of 0.61 and a coefficient of determination of 0.89. The results reflect the fact that forests have a direct effect on the hydrological

#### Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: December 10<sup>th</sup> 2019.

Accepted/Aceptado: August 29<sup>th</sup> 2020.

Available on line/Publicado: September 15<sup>th</sup> 2020.

### RESUMEN

La cuenca del río Misantla, Veracruz, es propensa a recibir el embate de fenómenos hidrometeorológicos extremos, con efectos desastrosos tanto para los sistemas naturales como para los humanos. Recientemente estos efectos se han incrementado por el mal manejo de la cuenca, el cambio de uso de suelo y la ausencia de prácticas de recuperación del paisaje. En esta investigación se analizó el impacto del cambio de uso de suelo en el balance hídrico de la cuenca del río Misantla y su relación con el incremento de la vulnerabilidad ante fenómenos meteorológicos. Se utilizó la Herramienta de Evaluación del Suelo y Agua integrada a la plataforma de Arcgis 10.1, con la cual se obtuvo una eficiencia del modelo de 0.61 y un coeficiente de determinación de 0.89. Los resultados reflejan que los bosques tienen un efecto directo sobre el ciclo hidrológico y el comportamiento de la cuenca; ya que en su ausencia, la cuenca se vuelve más vulnerable ante la llegada de fuertes lluvias, tormentas o huracanes; mientras que su presencia protege a la cuenca de estos eventos y disminuye el potencial de inundaciones y arrastre de sedimentos. Se concluye que para reducir la vulnerabilidad ante el cambio

#### \*Corresponding Author:

Valdés-Rodríguez, O. A. Colegio de Veracruz, Carrillo Puerto 26, Xalapa, Ver., CP. 91000, Xalapa, Veracruz, México. Phone: +52(228) 841 5100. E-mail: [andrea.valdes@gmail.com](mailto:andrea.valdes@gmail.com)

cycle and the behavior of the basin. In the absence of forests, the basin becomes more vulnerable to the impact of heavy rains, storms or hurricanes while, in contrast, the presence of this vegetation protects the basin from these events and decreases the potential for flooding and sediment dragging. We conclude that appropriate management of the basin will reduce its vulnerability to climate change. Therefore, it is necessary to recover and restore deforested lands and to adequately regulate areas of agriculture and livestock production.

---

### KEY WORDS

---

Vulnerability, deforestation, water balance, SWAT, environmental services.

---

### Introduction

The climate of the Earth has varied continuously for more than 4,500 million years (Sánchez-Cohen *et al.*, 2011). However, since the industrial revolution, humanity has generated pressures on the environment and climate, causing destabilization of different life support systems and drastically modifying their state of equilibrium as a consequence (IPCC, 2014; Olabe-Egaña, 2016). This disequilibrium, in addition to the exposure to extreme climatic phenomena, such as tropical cyclones and hurricanes, among others, has generated conditions of high vulnerability to climate change in Mexico (Conde-Álvarez & Palma-Grayeb, 2006; Monterroso & Conde, 2015). This situation has been observed throughout history, manifested in the loss of human lives and the economic impacts generated. If the trend continues, estimations point out that the problems will become more acute with the increase in the global temperature of the planet (IPCC, 2014; SEDATU, 2016; SEMARNAT, 2013). In Mexico, just during the period 2000 to 2016, 22,279 emergencies were declared at the national level, for different phenomena related to climatic change (CENAPRED, 2019).

At the basin level, vulnerability to climatic change is presented by a lack of preventative measures, irregular location of human settlements over the banks of rivers, and the poor management of these settlements (Bitrán, 2001; Olabe-Egaña, 2016). This vulnerability could even be increased by the direct effect of land-use change

climático debe existir un manejo adecuado de la cuenca, por lo que se requiere recuperar y restaurar las áreas desprovistas de vegetación, así como regular el crecimiento de la mancha agrícola y pecuaria.

---

### PALABRAS CLAVE

---

Vulnerabilidad, deforestación, balance hídrico, SWAT, servicios ambientales.

---

### Introducción

El clima en la tierra ha variado continuamente desde hace más de 4,500 millones de años (Sánchez-Cohen *et al.*, 2011). Sin embargo, desde la revolución industrial, la humanidad ha generado presiones sobre el ambiente y el clima, ocasionando una desestabilización de los distintos sistemas de soporte de la vida y como consecuencia se ha modificado drásticamente su estado de equilibrio (IPCC, 2014; Olabe-Egaña, 2016). Este desequilibrio, aunado a la exposición de fenómenos climáticos extremos, tales como ciclones tropicales y huracanes, entre otros; ha generado condiciones de alta vulnerabilidad ante el cambio climático en México (Conde-Álvarez & Palma-Grayeb, 2006; Monterroso & Conde, 2015). Esta situación se ha observado a lo largo de la historia por la pérdida de vidas humanas y los impactos económicos generados, y de continuar la tendencia se estima que los problemas se agudizarán con el incremento de la temperatura global del planeta (IPCC, 2014; SEDATU, 2016; SEMARNAT, 2013). En el país, tan solo del año 2000 al 2016, se han emitido 22,279 declaratorias de emergencias a nivel nacional, por distintos fenómenos relacionados con el cambio climático (CENAPRED, 2019).

A nivel de cuencas la vulnerabilidad ante el cambio climático se presenta por la falta de medidas preventivas, por la localización de asentamientos humanos irregulares y a orillas de ríos y por el mal manejo de las mismas (Bitrán, 2001; Olabe-Egaña, 2016). Esta vulnerabilidad puede incrementarse incluso por el efecto directo del cambio de uso de suelo (Ruiz-Barradas, 2012), lo que se traduce en la pérdida de servicios ambientales, tales como la protección que la cuenca hidrográfica puede brindar, la riqueza de la biodiversidad y la captura de carbono (Pagiola *et al.*, 2003). De manera particular, la cuenca del río Misantla, ubicada en la zona montañosa central del Estado de Veracruz, se

(Ruiz-Barradas, 2012), which translates into the loss of environmental services, such as protection provided by the hydrographic basin, biodiversity richness and carbon capture (Pagiola *et al.*, 2003).

In particular, the Río Misantla basin, located in the mountainous central zone of Veracruz State, in Mexico, is characterized by the presentation of rugged geomorphology and areas that are devoid of vegetation. This basin has seen various climatic events, such as hurricane Roxana in 1995, hurricane Stan in 2005, hurricanes Karl and Matthew in 2010, and the tropical storms Barry and Fernand in 2013. These events have generated impacts due to underwater sediment dragging, causing flooding that has led to the loss of crops, livelihoods, infrastructure, and human lives (Tejeda-Martínez, 2006; Tejeda-Martínez *et al.*, 2012).

In this context, one form of evaluating the vulnerability of a hydrographic basin exposed to extreme climatic phenomena and observing the effect of bad management practices and their impact on the landscape characteristics is through the use of an indirect model, which consists of determining the hydric balance using informatic modeling tools (Benavides-Solorio *et al.*, 2008; Logreira Rentería, 2009). These models use temporal and spatial variables to simulate water flows into and out of a given area, considering all stages of the hydrological cycle (Abad, 2006; Isabel *et al.*, 2004).

The objective of this study was to analyze the impact of land-use change on the hydric balance of the Río Misantla basin during the period 2000 to 2014 and determine its relationship to increased vulnerability to extreme climatic phenomena.

## Material and Methods

### Study area

The study was conducted in the Río Misantla basin, located in the mountainous central zone of Veracruz State, in Mexico, in hydrological region number 27 Tuxpan – Nautla. This basin covers an area of 585.76 km<sup>2</sup> and occupies 12 municipalities, all within Veracruz State (Figure 1).

The basin is located in the physiographic sub-provinces known as “Sierra de Chiconquiaco” and “Llanuras y Lomerios” (INEGI, 2001). This mountain chain presents abrupt and distinct units until reaching a zone of rounded low

caracteriza por presentar una geomorfología accidentada y tener áreas desprovistas de vegetación; en ella se han registrado distintos eventos climáticos como el huracán Roxana en 1995, el huracán Stan en 2005, el huracán Karl y Matthew en 2010, y la tormenta tropical Barry y Fernand en 2013; los cuales han generado impactos por el arrastre de sedimentos aguas abajo, ocasionando inundaciones que han generado la pérdida de cultivos, medios de vida, infraestructura y vidas humanas (Tejeda-Martínez, 2006; Tejeda-Martínez *et al.*, 2012).

Al respecto, una forma de evaluar la vulnerabilidad en una cuenca hidrográfica expuesta a fenómenos climáticos extremos y observar el efecto que tienen las malas prácticas de manejo y su impacto en las características del paisaje, es a través de un modelo indirecto, que consiste en la obtención del balance hídrico con apoyo de herramientas informáticas de modelación (Benavides-Solorio *et al.*, 2008; Logreira Rentería, 2009), las cuales utilizan variables temporales y espaciales para simular los flujos de agua y las entradas y salidas de un área determinada, considerándose el ciclo hidrológico en todas sus etapas (Abad, 2006; Isabel *et al.*, 2004).

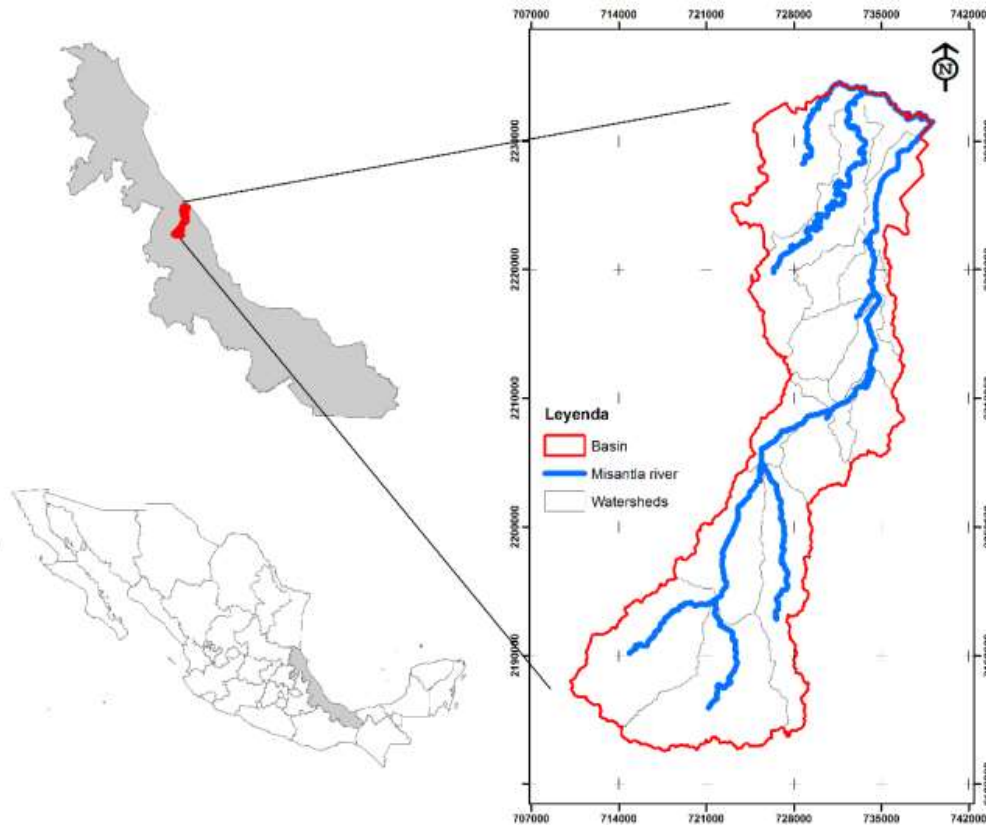
Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue analizar el impacto del cambio de uso de suelo en el balance hídrico de la cuenca del río Misantla durante el periodo 2000–2014 y su relación con el incremento de la vulnerabilidad ante fenómenos climáticos extremos.

## Material y Métodos

### Área de estudio

El estudio se realizó en la cuenca del Río Misantla, ubicada en la zona montañosa central del Estado de Veracruz, México; en la región hidrológica número 27 Tuxpan – Nautla. Esta cuenca presenta una superficie de 585.76 km<sup>2</sup> y ocupa 12 municipios, todos en el Estado de Veracruz (Figura 1).

La cuenca se localiza dentro de las subprovincias fisiográficas Sierra de Chiconquiaco y Llanuras y lomeríos (INEGI, 2001). Dicha sierra presenta unidades abruptas y tendidas hasta una zona de lomeríos y colinas redondeadas, asociadas con cañadas y mesetas (Medina-Chena *et al.*, 2010). La topografía de la cuenca es muy variada; presenta altitudes que van desde el nivel del mar



**Figure 1. Location of the Misantla river basin.**

Source: INEGI (1990). State political division scale 1:4 000 000  
INEGI (2010). Hydrographic Network. Scale 1:50 000 edition 2.0

**Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Misantla.**

Fuente: INEGI (1990). División política estatal escala 1:4 000 000  
INEGI (2010). Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0

hills, associated with gullies and plateaus (Medina-Chena *et al.*, 2010). The topography of the basin is very varied; it presents elevations ranging from sea-level to 2,680 masl within a range of 55.5 km. Twelve different edaphic units are presented along the basin (INEGI, 2013a).

The basin comprises multiple streams and runoffs, among which are Río Palmas, known previously as the Río Grande, and Río Palchán, which combine to form the Río Misantla that gives its name to the basin, finally discharging into the Gulf of Mexico at Barra de Palmas. The maximum mean temperature in the basin is 33 °C while the minimum

hasta los 2,680 masl en un rango de 55.5 km. A lo largo de la cuenca se presentan 12 unidades edáficas diferentes (INEGI, 2013a).

La cuenca está conformada por múltiples arroyos y escurrimientos, donde los de mayor importancia corresponden al río Palmas, antes llamado río Grande, y al río Palchán, los cuales se unen para dar origen al río Misantla y cuyo nombre lleva la cuenca, para finalmente desembocar al Golfo de México en la Barra de Palmas. La temperatura promedio máxima es de 33.0 °C mientras que la mínima de 22.8 °C, con promedios de precipitación anual acumulada de 1,662 mm (CONAGUA, 2015a).

is 22.8 °C, with an annual mean accumulated precipitation of 1,662 mm (CONAGUA, 2015a).

The basin presents diverse ecosystems, being the most important tropical montane cloud forest (INEGI, 2013b). According to the latest statistics of the National Institute of Statistic and Geography (INEGI, 2010), the total human population of the basin is 59,956 inhabitants, of whom 27,051 are men and 28,585 are women, distributed among 202 localities that mainly present medium and high indices of marginalization (CONAPO, 2010).

#### Determination and modeling of the hydric balance

The hydrological balance was determined using SWAT (soil and water assessment tool). Topographic (elevation model), edaphological (soil types and their physicochemical properties), land use and vegetation, hydrological and climatic (Figure 2) data were required by the model (Arnold *et al.*, 2012; Winchell *et al.*, 2008).

Once all of the layers of information were categorized and entered, the input databases were generated and a period of 15 years (2000 – 2014) simulated, from which the output data were created. At the end of the simulation, the efficiency of the model was validated to verify the certainty of the data obtained through calculation of the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the coefficient of efficiency (E) of Nash & Sutcliffe (1970) (Equation 1).

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

Where  $Q_o$  represents the observed or true cost,  $Q_m$  the simulated cost,  $T$  the sum of the times analyzed, and  $t$  the time of analysis.

To evaluate the effect of the land use and vegetation on the behavior of the hydrological variables in the Río Misantla basin, two scenarios were created: one deforested and the other forested.

For the deforested scenario, areas with tropical montane cloud forests from the upper and mid parts of the basin

En la cuenca se presentan diversos ecosistemas, siendo el más importante el bosque mesófilo de montaña (INEGI, 2013b). De acuerdo con las últimas estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010), la población total de la cuenca es de 59,956 habitantes, de los cuales 27,051 son hombres y 28,585 son mujeres, distribuidos en 202 localidades que en su mayoría presentan un índice de marginación medio y alto (CONAPO, 2010).

#### Obtención del balance hídrico y modelación

La obtención del balance hidrológico se realizó por medio de la herramienta SWAT (herramienta de evaluación del suelo y agua, por sus siglas en inglés). Los datos que requirió el modelo fueron topográficos (modelo de elevación), edafológicos (tipos de suelo y sus propiedades físico-químicas), uso de suelo y vegetación, hidrológicos y climáticos (Figura 2) (Arnold *et al.*, 2012; Winchell *et al.*, 2008).

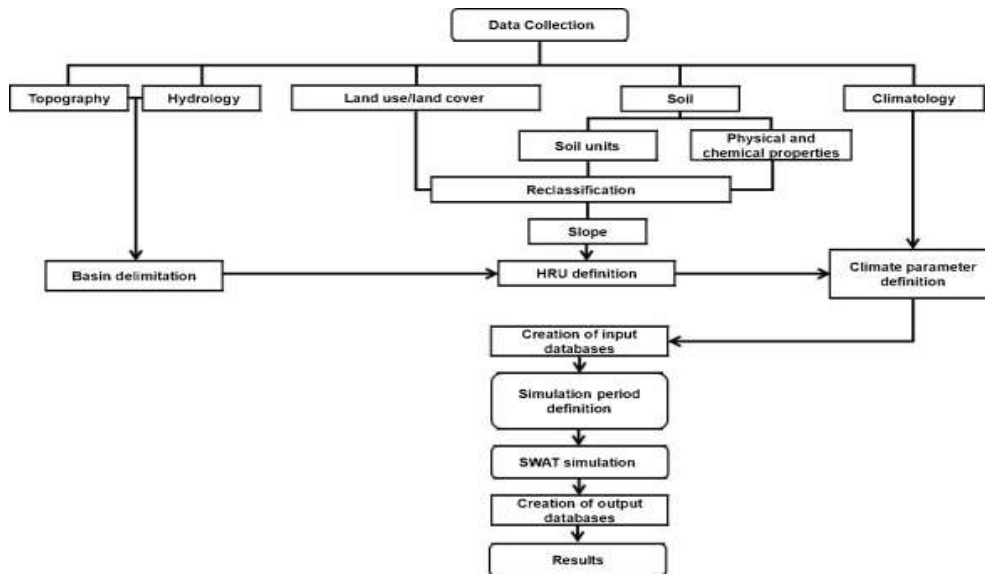
Una vez categorizadas e ingresadas todas las capas de información, se generaron las bases de datos de entrada y se llevó a cabo la simulación para un periodo de 15 años (2000 – 2014), mismos con los que se crearon los datos de salida. Al finalizar la simulación, se llevó a cabo la validación de la eficiencia del modelo para verificar la certeza de los datos obtenidos mediante el cálculo del coeficiente de determinación  $R^2$  y el coeficiente de eficiencia (E) de Nash & Sutcliffe (1970) (Ecuación 1).

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

Donde  $Q_o$  representa el gasto observado o real,  $Q_m$  el gasto simulado,  $T$  la suma de los tiempos analizados y  $t$  el tiempo de análisis.

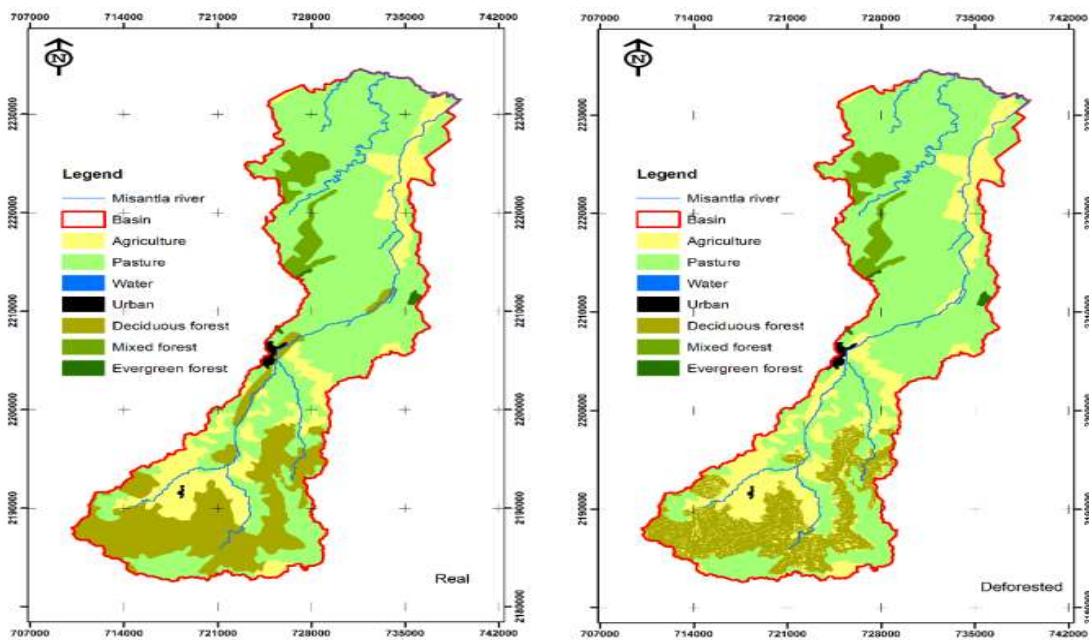
A fin de evaluar el efecto que tiene el uso de suelo y la vegetación sobre el comportamiento de las variables hidrológicas en la cuenca del río Misantla, se creó un escenario deforestado y otro forestado.

Para el escenario deforestado se seleccionaron áreas de la parte alta y media de la cuenca con bosque mesófilo de montaña (FRSD) y pendientes menores al 40 %, mismas que se reclasificaron como zonas agrícolas (AGRL). La superficie de cambio de uso de suelo correspondió a



**Figure 2. Flow char to process information in SWAT.**  
Source: (Arnold *et al.*, 2012; Winchell *et al.*, 2008).

**Figura 2. Diagrama de flujo para procesar la información en SWAT.**  
Fuente: (Arnold *et al.*, 2012; Winchell *et al.*, 2008).



**Figure 3. Land use change scenario in SWAT.**  
Source: ArcSwat.

**Figura 3. Escenario de cambio de uso de suelo en SWAT.**  
Fuente: ArcSwat.

(FRSD) and slopes of less than 40 % were selected and reclassified as agricultural zones (AGRL). The area of the land-use change corresponded to 3,101.66 ha, equivalent to a reduction of 25.75 % of the initial forested area (Figure 3).

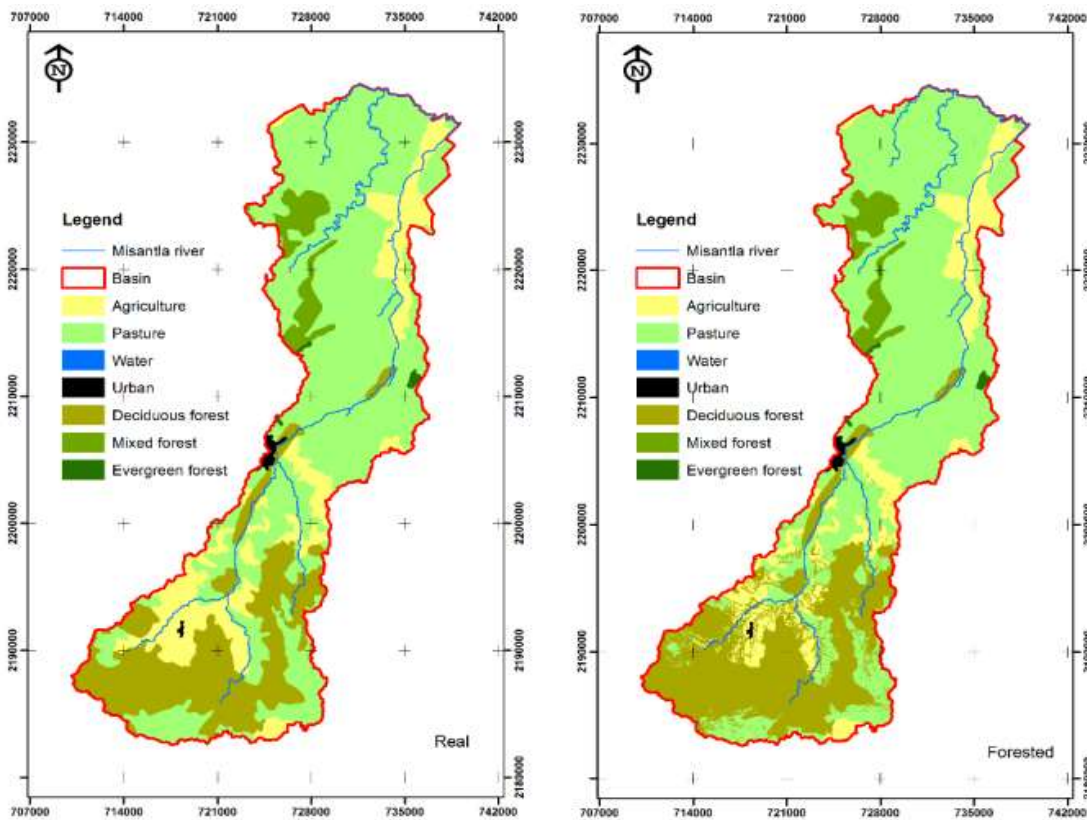
In contrast, to analyze the effect of forestation over the upper part of the basin, agricultural (AGRL) and livestock production (PAST) areas with slopes greater than 40 %, which could recover their forested coverage, were selected. These areas were reclassified as forested zones (FRSD), contributing to an increase in the forest coverage of 3,362.38 ha, which was equivalent to 27.91 % of the initial area (Figure 4).

To determine whether there were differences in the hydrological behavior of the basin between these two simulated scenarios, a one-way analysis of variance

3,101.66 ha, equivalent to a reduction of 25.75 % of the initial forested area (Figure 3).

Por el contrario, a fin de analizar el efecto de la forestación en la parte alta de la cuenca, se seleccionaron áreas agrícolas (AGRL) y ganaderas (PAST) con pendientes superiores al 40 %, que pudiesen recuperar su cobertura arbolada. Estas áreas fueron reclasificadas como zonas forestales FRSD contribuyendo a un incremento en la superficie forestal de 3,362.38 ha equivalente al 27.91 % de la superficie inicial (Figura 4).

Para conocer si existen diferencias en el comportamiento hidrológico de la cuenca entre escenarios simulados, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para siete variables hidrológicas con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .



**Figure 4. Forested scenario in SWAT.**

Source: ArcSwat.

**Figura 4. Escenario forestado en SWAT.**

Fuente: ArcSwat.

(ANOVA) was conducted for seven hydrological variables, with a level of significance of  $\alpha = 0.05$ .

## Results and Discussion

According to the results of the hydric balance modeled by SWAT (Table 1), the Río Misantla basin exceeds by 16.51 % the annual mean precipitation of the State of Veracruz (INEGI, 2015), and 57.81 % and 51.46 % more than the national mean, according to the World Bank (2015) and the National Water Commission (2015b), respectively. From the data obtained, 9.38 % of the precipitation runs

## Resultados y Discusión

De acuerdo con los resultados del balance hídrico modelado por SWAT (Tabla 1), en la cuenca del río Misantla llueve un 16.51 % más que la media estatal anual (INEGI, 2015), un 57.81 % y 51.46 % más que la media nacional, según datos de Banco Mundial (2015) y la Comisión Nacional del Agua (2015b) respectivamente. De los datos obtenidos, el 9.38 % de la precipitación se escurre superficialmente, el 1.13 % fluye hacia el océano a través de corrientes subterráneas (percolación profunda), el 84.31 % se evapotranspira; mientras que del total de agua producida en el sistema, el 63% se escurre

**Table 1.**  
**Hydrology modeled by SWAT.**

**Tabla 1.**  
**Hidrología modelada por SWAT.**

YEAR	PREC (mm)	SURQ (mm)	LATQ (mm)	PERC (mm)	SW (mm)	ET (mm)	PET (mm)	WY (mm)	SY (ton <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
2000	2,037.13	99.10	100.57	15.35	44.26	1,862.19	21,366.26	199.88	22.22
2001	1,902.66	132.50	110.95	22.51	11.44	1,671.38	21,717.89	244.85	8.77
2002	1,381.97	93.22	82.41	12.43	17.52	1,188.54	22,544.96	176.22	8.44
2003	1,469.64	117.53	89.17	11.71	18.50	1,249.41	22,576.97	207.31	12.32
2004	1,822.25	235.50	99.85	22.42	22.45	1,460.94	21,920.42	336.25	16.22
2005	2,198.82	294.16	118.43	31.12	31.44	1,744.97	20,908.04	413.81	27.45
2006	1,572.02	215.58	82.80	23.55	34.30	1,247.14	21,870.84	299.68	18.86
2007	1,938.66	144.88	98.21	23.71	29.44	1,675.99	21,602.77	244.45	13.52
2008	1,665.33	116.24	96.87	15.90	8.16	1,459.24	22,109.80	214.06	10.82
2009	1,946.54	193.27	100.83	26.00	55.79	1,576.77	21,486.01	294.85	17.04
2010	1,904.61	258.60	111.94	31.80	33.67	1,525.05	21,861.06	372.26	29.79
2011	1,871.64	236.16	105.84	22.93	43.89	1,495.76	21,706.99	343.27	32.21
2012	2,001.66	177.45	99.14	20.93	35.77	1,712.32	21,286.04	277.84	14.70
2013	1,703.84	156.83	88.46	14.51	26.31	1,454.58	21,607.43	246.10	15.02
2014	1,534.70	57.73	78.00	11.30	15.04	1,399.02	21,322.15	136.38	5.25
<b>Mean</b>									
	<b>1,796.76</b>	<b>168.58</b>	<b>97.56</b>	<b>20.41</b>	<b>28.53</b>	<b>1,514.89</b>	<b>21,725.84</b>	<b>267.15</b>	<b>16.84</b>

PREC = precipitation; SURQ = surface runoff; LATQ = lateral flow; PERC = amount of percolating water; SW = soil water content; ET = actual evapotranspiration; PET = potential evapotranspiration; WY = water yield; SY = sediment yield.  
Source: SWAT output database.

PREC = precipitación; SURQ = escorrentía superficial; LATQ = flujo lateral; PERC = cantidad de agua de filtración; SW = contenido de agua del suelo; ET = evapotranspiración real; PET = evapotranspiración potencial; WY = rendimiento de agua; SY = rendimiento de sedimentos.  
Fuente: Base de datos de salida de SWAT.



off over the surface, 1.13 % flows to the ocean through subterranean currents (deep percolation), 84.31 % is evapotranspired, while 63.10 % the water produced in the system runs off over the surface. Percolation is 0.34 % greater than the total recharge of the soil, thus, all of the water that percolates recharges the aquifers of the basin.

On comparison of a year with low precipitation with another of high precipitation, as a result of the incidence of climatic combined phenomena, such as hurricane Stan and tropical storm Bret in 2005, differences are observed in the variables predicted by the model for this basin (Table 2), showing that the arrival of hydrometeorological phenomena from the coast of the Gulf of Mexico puts the population at risk due to the increase in surface runoff and the dragging and transport of sediments in the water towards the lower parts of the basin (Tejeda-Martínez, 2006), which increases the risk of flooding (IPCC, 2001; SEDATU, 2016).

The modeled scenarios (Table 3) demonstrate that the vegetation in the upper part of the Río Misantla basin is important to maintain the processes and equilibrium of the water cycle through the imposition of a direct effect on its

superficialmente. La percolación es 0.34 % superior que la recarga total del suelo por lo que todo lo que se percola recarga los mantos acuíferos de la cuenca.

Al comparar un año de baja precipitación con otro de alta precipitación producto del paso de fenómenos climáticos, como el huracán Stan y la tormenta tropical Bret que ocurrieron en el 2005, se observan diferencias en las variables predichas por el modelo para esta cuenca (Tabla 2), poniendo de manifiesto que la entrada de fenómenos hidrometeorológicos por la costa del Golfo de México pone en riesgo a la población por el aumento en la escorrentía superficial y el arrastre y transporte de sedimentos en el agua hacia las partes bajas de la cuenca (Tejeda-Martínez, 2006), incrementando el riesgo de inundaciones (IPCC, 2001; SEDATU, 2016).

Los escenarios modelados (Tabla 3) demuestran que la vegetación en la parte alta de la cuenca del río Misantla es importante para mantener los procesos y el equilibrio del ciclo del agua al tener un efecto directo sobre su funcionamiento (Paré & Gerez, 2012), observándose que los bosques disminuyen de manera significativa la erosión

**Table 2.**  
**Hydrology modeled by SWAT in years with different rainfall.**

**Tabla 2.**  
**Hidrología modelada por SWAT en años con distinta precipitación.**

Parameter	2002 (Low rainfall)	2005 (High rainfall)	Variation	% of change
PREC (mm)	1,381.97	2,198.82	816.85	59.11
SURQ (mm)	93.22	294.16	200.94	215.55
LATQ (mm)	82.41	118.43	36.02	43.71
PERC(mm)	12.43	31.12	18.69	150.36
SW (mm)	17.52	31.44	13.92	79.45
ET (mm)	1,188.54	1744.97	556.43	46.82
PET (mm)	22,544.96	20,908.04	-1,636.92	-7.26
WY (mm)	176.22	413.81	237.59	134.83
SY (ton/ ha <sup>-1</sup> /año <sup>-1</sup> )	8.44	27.45	19.01	225.24

PREC = precipitation; SURQ = surface runoff; LATQ = lateral flow; PERC = amount of percolating water; SW = soil water content; ET = actual evapotranspiration; PET = potential evapotranspiration; WY = water yield; SY = sediment yield.  
Source: SWAT output database.

PREC = precipitación; SURQ = escorrentía superficial; LATQ = flujo lateral; PERC = cantidad de agua de filtración; SW = contenido de agua del suelo; ET = evapotranspiración real; PET = evapotranspiración potencial; WY = rendimiento de agua; SY = rendimiento de sedimentos.  
Fuente: Base de datos de salida de SWAT.

**Table 3.**  
**Hydrology modeled by SWAT by scenario.**

**Tabla 3.**  
**Hidrología modelada por SWAT por escenario.**

Parameter	Mean		
	Real scenario	Deforested scenario	Forested scenario
PREC	1,796.76 mm	1,796.76 mm	1,796.76 mm
SURQ	168.58 mm	190.34 mm	159.81 mm
LATQ	97.56 mm	71.55 mm	102.40 mm
PERC	20.41 mm	20.28 mm	21.50 mm
SW	28.53 mm	30.42 mm	27.61 mm
ET	1,514.89 mm	1,519.15 mm	1,517.78 mm
PET	21,725.84 mm	21,725.84 mm	21,725.84 mm
WY	267.15 mm	262.89 mm	263.26 mm
SY	16.84 ton <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	18.51 ton <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	7.38 ton <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>

PREC = precipitation; SURQ = surface runoff; LATQ = lateral flow; PERC = amount of percolating water; SW = soil water content; ET = actual evapotranspiration; PET = potential evapotranspiration; WY = water yield; SY = sediment yield.  
Source: SWAT output database.

PREC = precipitación; SURQ = escorrentía superficial; LATQ = flujo lateral; PERC = cantidad de agua de filtración; SW = contenido de agua del suelo; ET = evapotranspiración real; PET = evapotranspiración potencial; WY = rendimiento de agua; SY = rendimiento de sedimentos.  
Fuente: Base de datos de salida de SWAT.

functioning (Paré & Gerez, 2012), showing that the forests act to significantly reduce soil erosion, dragging of sediments to deposits and the risk of landslides and flooding (Armenta-Montero, 2012; García-Chevesich, 2010; Manson, 2004). With this, the vulnerability of the population to the impact of hydrometeorological phenomena is reduced.

The ANOVA for the seven hydrological variables modeled by SWAT found significant differences among surface runoff (SURQ) and sediment yield (SY) (Table 4).

#### Validation of the SWAT model

The values obtained in the validation of the model for the Río Misantla basin produced a coefficient of determination ( $R^2$ ) = 0.89 and an Efficiency of the model (ENS) = 0.61. According to Ramanarayanan *et al.* (1997), these data represent a model that is considered acceptable or satisfactory, when  $R^2 > 0.6$  and  $ENS > 0.5$ . Moriasi *et al.* (2007) classified the efficiency of the SWAT model as acceptable when the value ENS is

del suelo, reducen el arrastre de sedimentos a los depósitos y el peligro de deslaves e inundaciones (Armenta-Montero, 2012; García-Chevesich, 2010; Manson, 2004); y con ello se reduce la vulnerabilidad de la población ante la llegada de fenómenos hidrometeorológicos.

Al comparar siete variables hidrológicas modeladas por SWAT mediante un análisis de varianza, solo se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el escurrimiento lateral (SURQ) y en la producción de sedimentos (SY) (Tabla 4).

#### Validación del modelo SWAT

Los valores obtenidos en la validación del modelo para la cuenca del río Misantla arrojaron un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0.89 y una Eficiencia del modelo (ENS) = 0.61; datos que, de acuerdo con Ramanarayanan *et al.* (1997), representan un modelo que se considera aceptable o satisfactorio, si  $R^2 > 0.6$  y el  $ENS > 0.5$ . Por su parte, Moriasi *et al.* (2007) clasifican la eficiencia del modelo SWAT como

**Table 4.**  
**Comparison chart of ANOVA's for seven hydrological variables along the Misantla river basin.**

**Tabla 4.**  
**Cuadro comparativo de ANOVAs para siete variables hidrológicas de la cuenca del Río Misantla.**

Parameter	Mean	Standard deviation	Degrees of freedom	F	P
Surface runoff (SURQ)	172.9	69.18	2	0.7665	0.47102
<b>Lateral flow (LATQ)</b>	<b>90.51</b>	<b>17.41</b>	<b>2</b>	<b>34.178</b>	<b>0.00000</b>
amount of water percolating (PERCOLATE)	20.73	6.72	2	0.1447	0.86567
soil water content (SW)	28.85	13.1	2	0.1715	0.84297
Actual evapotranspiration (ET)	1517	191.8	2	0.002	0.99815
Water yield (WYLD)	264.4	75.53	2	0.0140	0.98612
<b>Sediment Yield (SYLD)</b>	<b>14.24</b>	<b>8.566</b>	<b>2</b>	<b>10.5724</b>	<b>0.00019</b>

between 0.50 and 0.65, but unsatisfactory when ENS is less than 0.50 (Barrios & Urribarri, 2010). For this reason, the SWAT model obtained in this study can be considered reliable for this basin.

These results indicate that the hydrological models implemented through geographic information systems (GIS) allow us to study the causal relationships of the hydric behavior of a basin, obtaining reliable results even when there is a lack of information and suitable infrastructure for collecting field data (Barrios & Urribarri, 2010; Hernández, 2014).

The fitting model ( $R^2 = 0.89$ ;  $ENS = 0.61$ ) indicates high reliability (Table 5), according to previous studies. However, it is important to consider the acquisition of field data to calibrate and obtain higher values at the time of model validation, thus increasing the degree of confidence in the predictions.

## Conclusions

The vegetation of the upper part of the Río Misantla basin has a direct effect on the hydrological cycle and behavior of the basin, protecting it from the impact of extreme hydrometeorological phenomena. This leads us to conclude that it is possible to reduce vulnerability to climatic change in these areas with appropriate management, recuperation and restoration of areas

acceptable cuando el valor de ENS se encuentra entre 0.50 y 0.65 e insatisfactorio cuando ENS es menor a 0.50 (Barrios & Urribarri, 2010). Por lo que se considera que el modelo SWAT obtenido en esta investigación es confiable para esta cuenca.

Estos resultados nos indican que los modelos hidrológicos implementados mediante los sistemas de información geográfica (GIS) nos permiten estudiar las relaciones causales del comportamiento hídrico de una cuenca, obteniéndose resultados confiables aun cuando se carece de información e infraestructura adecuada para la obtención de datos en campo (Barrios & Urribarri, 2010; Hernández, 2014).

El ajuste ( $R^2 = 0.89$ ;  $ENS = 0.61$ ) demuestra una confiabilidad alta (Tabla 5), de acuerdo con investigaciones anteriores. Sin embargo, es importante tener en cuenta la obtención de datos en campo para calibrar y obtener valores más altos al momento de validar el modelo, aumentando el grado de confianza de las predicciones.

## Conclusiones

La vegetación de la parte alta de la cuenca del río Misantla tiene un efecto directo sobre el ciclo hidrológico y el comportamiento de la cuenca, protegiéndola del embate de fenómenos hidrometeorológicos extremos; lo que nos lleva a reflexionar que es posible reducir la vulnerabilidad ante el cambio climático en estas áreas con el manejo adecuado, la recuperación y restauración de áreas desprovistas

**Table 5.**  
**Water modeling adjustments with the SWAT tool.**

**Tabla 5.**  
**Ajustes en la modelación hídrica con la herramienta SWAT.**

Year	Basin	Country	R <sup>2</sup>	ENS	Author
2014	Río Atulapa	Guatemala	0.86	0.6	(Hernández, 2014)
2014	Santa Catalina	Argentina	0.82	0.66	(Guevara <i>et al.</i> , 2014)
2014	Santa Catalina	Argentina	0.86	0.74	
2014	Río Mixteco	México	0.93	-	(Salas-Martínez <i>et al.</i> , 2014)
2010	Taquiña	Bolivia	0.77	0.54	(Zarate, 2010)
2010	Tolomosa	Bolivia	0.84	0.63	
2010	Río Chama	Venezuela	0.88	0.76	(Barrios & Urribarri, 2010)
2008	Tapalta	México	0.85	-	(Benavides-Solorio <i>et al.</i> , 2008)
2008	Río Amajac	México	0.59	0.94	(Mata-Espinoza, 2008)
2005	Río La Laja	México	0.82	-	(Torres-Benites <i>et al.</i> , 2005)
2004	El Tejocote	México	0.93	0.85	(Torres-Benites <i>et al.</i> , 2004)

ENS = model efficiency.

ENS = eficiencia del modelo.

devoid of vegetation and with the regulation of the growth of the agricultural and livestock production footprint.

With tools such as SWAT, it is possible to create a baseline of knowledge that allows modeling of climate change scenarios to support the creation of environmental policies that facilitate conservation and restoration, as well as a reduction in the vulnerability of the Río Misantla basin.

de vegetación y con la regulación del crecimiento de la mancha agrícola y pecuaria.

Con herramientas como SWAT es posible crear una línea base de conocimientos que permitan la modelación de escenarios de cambio climático, para apoyar la creación de políticas ambientales que permitan la conservación, restauración y reducción de la vulnerabilidad en la cuenca del río Misantla.

## References

- Abad, C. (2006). Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México (*Tesis de Maestría*) Tecnológico de Monterrey. <https://repositorio.tec.mx/handle/11285/567666?show=full>
- Armenta-Montero, S. (2012). Impacto de la vegetación y uso del suelo sobre las características hidrológicas en las cuencas de los ríos Tuxpan y Coatzacoalcos, Veracruz. (*Tesis de Maestría en Ecología Tropical*). Universidad Veracruzana.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B. and Neitsch, S. L. (2012). Input/Output Documentation. Soil and Water Assessment Tool. Texas Water Resources Institute. <https://swat.tamu.edu/media/69296/swat-io-documentation-2012.pdf>
- Banco Mundial. (2015). Promedio detallado de precipitaciones (mm anuales) - México. <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.PRCP.MM?locations=MX>
- Barrios, A. G. & Urribarri, A. L. (2010). Aplicación del modelo SWAT en los Andes venezolanos: Cuenca alta del río Chama. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 11–29. <https://www.redalyc.org/pdf/3477/347730384002.pdf>
- Benavides-Solorio, J. D., González-Guillén, M. J., López-Paniagua, C. and Valdez-Lazalde, J. R. (2008). Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientada hacia los servicios ambientales. *Madera y Bosques*, 14(2), 5–38.

- <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v14n2/v14n2a2.pdf>
- Bitrán, D. (2001). Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-1999. In *Serie. Impacto socioeconómico de los desastres naturales en México* (1ra.).
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2015a). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2015b). Reporte Del Clima En México 2015. [https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/DiagnósticoAtmosférico/Reporte\\_del\\_Clima\\_en\\_México/Anual2015.pdf](https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/DiagnósticoAtmosférico/Reporte_del_Clima_en_México/Anual2015.pdf)
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2019). Declaratorias Sobre Emergencia, Desastre y Contingencia Climatológica. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/declaratorias-sobre-emergencia-desastre-y-contingencia-climatologica>.
- Consejo Nacional de Población [CONAPO]. (2010). Índice de Marginación y Pobreza. [http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice\\_de\\_Marginacion\\_por\\_Localidad\\_2010](http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010)
- Conde-Álvarez, A. C. & Palma-Grayeb, B. (2006). Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático. In *Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz*. <https://www.uv.mx/eventos/inundaciones2005/>
- García-Chevesich, P. (2010). Factores que afectan la erosión y la sedimentación. In D. Brea & F. Balocchi (Eds.), *Procesos de erosión-sedimentación en cauces y cuencas*.
- Guevara, O. C., Cazenave, G., Vazquez, A. G., Collazos, G. and Vives, L. (2014). Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras. Aplicación en una cuenca rural, arroyo Santa Catalina, Provincia de Buenos Aires. // *Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, 10. [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/47531/Documento\\_completo.pdf?sequence=3](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/47531/Documento_completo.pdf?sequence=3)
- Hernández, M. E. T. (2014). Aplicación del modelo hidrológico soil and water assessment tool (swat), para la simulación del balance hídrico de la microcuenca del río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala, C.A. (*Tesis de Licenciatura en Agronomía*) Universidad de San Carlos, Guatemala. [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01\\_2927.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2927.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2001). Fisiografía. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos Serie I. Continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2013a). Carta Edafológica Serie II Continuo Nacional Escala 1:250,000. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2013b). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso Del Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000, Serie V (Capa Unión). <https://www.inegi.org.mx/temas/ususuelo/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2015). Cuentame de México: Estado de Veracruz. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ver/territorio/clima.aspx?tema=me&e=30>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (1990). División política estatal escala 1:4 000 000 <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2001). Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas cambio climático 2001. In *Tercer Informe de Evaluación Cambio climático 2001 Impactos, adaptación y vulnerabilidad Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Organización Meteorológica Mundial.
- Isabel, G.-C., Martínez-Otero, A., Ramírez-Soto, A., Niño-Cruz, A., Juan-Rivas, A. and Dominguez-Barradas, L. (2004). La relación agua-bosque: Delimitación de zonas prioritarias para pago de servicios ambientales hidrológicos en la Cuenca del Río Gavilanes, Coatepec, Veracruz. In *El Manejo Integral de Cuencas en México: Estudios y Reflexiones para Orientar la Política Ambiental*. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/528/relacion.pdf>
- Logreira Rentería, A. (2009). Metodologías técnicas en el ámbito biofísico para la determinación y monitoreo de los servicios ambientales relacionados con regulación hídrica y control de sedimento, y su relación con el uso del suelo.
- Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1),

- 3–20. <https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Manson-2004.pdf>
- Mata-Espinoza, H. A. (2008). El modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México. (*Tesis de maestría*) Colegio de Postgraduados. México. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1600>
- Medina-Chena, A., Salazar-Chimal, T. E. and Álvarez-Palacios, J. L. (2010). Fisiografía y suelos. In *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz*. Universidad Veracruzana. [https://www.sev.gob.mx/servicios/publicaciones/colec\\_veracruzsigloXXI/PatrimoniounaturalVeracruz/PatrimoniounaturalVeracruz1.pdf](https://www.sev.gob.mx/servicios/publicaciones/colec_veracruzsigloXXI/PatrimoniounaturalVeracruz/PatrimoniounaturalVeracruz1.pdf)
- Monterroso, A. & Conde, C. (2015). Exposure to climate and climate change in Mexico. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(4), 272–288. <https://doi.org/10.1080/19475705.2013.847867>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.532.2506&rep=rep1&type=pdf>
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Olabe-Egaña, A. (2016). *Crisis Climática-Ambiental. La hora de la responsabilidad*. Ed. Galaxia Gutenberg, S.L.
- Pagiola, S., Bishop, J. and Landell, M. N. (2003). La venta de servicios ambientales forestales: mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Ed. Instituto Nacional de Ecología.
- Paré, L. & Gerez, P. (2012). *Al filo del agua: cogestión de la subcuenca del río Pixquiac, Veracruz*. Ed. Instituto Nacional de Ecología.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M. and McFarland, A. M. S. (1997). *Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management: Part II. Model Application*. Texas Institute of Applied Environmental Research.
- Ruiz-Barradas, A. (2012). Inundaciones 2010 : Lluvias extremas en Veracruz y su relación con la variabilidad natural del clima. University of Maryland, E.U.A. <http://www.atmos.umd.edu/~alfredo/Inunda2010paper.pdf>
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, M. R. and Fernández-Reynoso, D. S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48(1), 1–15. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n1/v48n1a1.pdf>
- Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., Cavazos-Pérez, M. T., Granados-Ramírez, G. R. and Gómez-Reyes, E. (2011). *Elementos para entender el cambio climático y sus impactos*. Ed. Miguel Ángel Porrúa.
- Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano [SEDATU]. (2016). *Guía de resiliencia urbana 2016*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/179708/Guia\\_de\\_Resiliencia\\_Urbana\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/179708/Guia_de_Resiliencia_Urbana_2016.pdf)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2013). *Estrategia nacional de cambio climático. Visión 10-20-40*. [http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06\\_otras/ENCC.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/archivosanteriores/informacionambiental/Documents/06_otras/ENCC.pdf)
- Tejeda-Martínez, A. (2006). *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz* Ed. Universidad Veracruzana. <https://www.uv.mx/eventos/inundaciones2005/>
- Tejeda-Martínez, A., Montes-Carmona, E. and Sarabia-Bueno, C. (2012). *Las inundaciones de 2010 en Veracruz Vulnerabilidad y adaptación*. Ed. Universidad Veracruzana.
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D. S., Oropeza- Mota J. L. and Mejía-Saenz, E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca “El Tejocote”, Atlacomulco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 437–444. <http://www.redalyc.org/pdf/573/57311096007.pdf>
- Torres-Benites, E., Mejía-Sáenz, E., Cortés-Becerra, J., Palacios-Vélez, E. and Exebio-García, A. (2005). Adaptación de un modelo hidrológico a la cuenca del Río Laja, Guanajuato, México. *Agrociencia*, 39, 481–490.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, M. and Arnold, J. G. (2008). *User’s Guide. ArcSWAT Interface for SWAT 2005*. Texas Agrilife Research – USDA Agricultural Research Service. [http://colinmayfield.com/public/PDF\\_files/ArcSWAT\\_Documentation.pdf](http://colinmayfield.com/public/PDF_files/ArcSWAT_Documentation.pdf)
- Zarate, B. O. (2010). Aplicabilidad del modelo hidrológico SWAT en cuencas con características extremas – Cuencas de los ríos Taquiña y Tolomosa. *Acta Nova*, 4(4), 568–577. <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/ran/v4n4/v4n4a07.pdf>