



Variabilidad del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas de la región Huasteca

Variability in the climate change impact on the hydrological regime of two basins located in the Huasteca region

Dávila-Ortiz Rodrigo

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México

Posgrado en Geociencias Aplicadas

Correo: rodrigo.davort@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-4309-9269>

Velázquez-Zapata Juan Alberto

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

El Colegio de San Luis

Programa Agua y Sociedad

Correo: javelazquezza@conacyt.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0208-9286>

Algara-Siller Marcos

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Área de Ciencias de la Tierra

Correo: marcos.algara@uaslp.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9070-9624>

Resumen

Debido a sus características físicas y sociales, México es una zona especialmente vulnerable ante los efectos adversos del cambio climático. Bajo ese contexto, la modelación hidroclimática es una valiosa herramienta para estimar los potenciales impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos a nivel regional. Esta investigación evalúa el impacto del cambio climático en las cuencas del Río Gallinas y la del Río Valles, localizadas en la región Huasteca de México. Para este trabajo, se simularon caudales con un modelo hidrológico, el cual fue alimentado con simulaciones climáticas bajo las trayectorias de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5 para un periodo de referencia (1971-2000) y dos periodos en futuro (2041-2070 y 2071-2100). Los resultados muestran disminuciones en los indicadores hidrológicos en ambas cuencas, las cuales varían según el escenario y la trayectoria de concentración considerada. Por ejemplo, para el Río Gallinas considerando el horizonte 2071-2100, los caudales altos con un periodo de retorno de 10 años proyectan una disminución – 21 % bajo RCP4.5 y de aproximadamente – 81 % con RCP8.5. En el caso del Río Valles y en el mismo horizonte, se estima un decremento en este indicador de – 40 % bajo RCP4.5, y de – 95 % bajo RCP8.5.

Descriptor: Modelos climáticos, simulación hidrológica, caudales altos, impacto del cambio climático.

Abstract

Mexico is a country with high vulnerability to climate change due to its geographical and social features. In this context, the hydroclimatic simulation is a valuable tool to estimate the impact of climate change on the water resources. This work evaluates the impact of climate change in two basins located in the Huasteca region, Mexico: The Valles River Basin and the Gallinas River Basin. The streamflow was simulated with a hydrological model fed with climate simulations under two Representative Concentration Pathways (RCP4.5 and RCP8.5) for a reference period (1971-2000) and two future periods (2041-2070 and 2071-2100). The results show a decrease on the hydrological indicators which vary according to the RCP and the horizon considered. For example, in the Gallinas River Basin (horizon 2071-2100) the simulation estimates a decrease in the 10-y high flow indicator of – 21 % and – 81 % under RCP4.5 and RCP8.5 respectively. For the Valles River Basin, the estimated decrease for the same horizon is – 40 % and – 95 % under RCP4.5 and – RCP8.5 respectively.

Keywords: Climate model, hydrological simulation, high flows, climate change impact.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas los registros meteorológicos han revelado un aumento en la temperatura promedio a nivel mundial, el cual se atribuye principalmente a una mayor concentración de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (IPCC, 2014). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) estima que este desequilibrio energético en la atmósfera ha modificado la configuración climática del planeta superando su variabilidad natural intrínseca. Estas modificaciones incluyen cambios en la precipitación y en la frecuencia de eventos extremos.

La evolución futura de la emisión de gases de efecto invernadero es incierta, para ello se desarrollaron los escenarios de emisión, los cuales son una imagen alternativa del desarrollo de las sociedades en el futuro. El reporte especial del IPCC (2000) presentó diversos escenarios de emisión con base en un análisis que incluyó variables tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socio-económico de las sociedades y el cambio tecnológico hacia fuentes de energía menos contaminantes. Estos escenarios de emisión se han utilizado ampliamente en la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en México. Recientemente, el IPCC presentó nuevos escenarios conocidos como Trayectorias de Concentración Representativas (RCPs por sus siglas en inglés), las cuales consideran diversas alternativas de forzamiento radiativo para el futuro (*i.e.*, variación del flujo de energía en la parte superior de la atmósfera): un escenario de mitigación (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario severo de crecientes emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5) (van-Vuuren *et al.*, 2011).

México se ubica en una zona altamente sensible ante los efectos asociados al cambio climático debido a sus características fisiográficas y a su ubicación latitudinal (Conde *et al.*, 2016). Además, en el país se encuentran condiciones de vulnerabilidad social, las cuales hacen que algunos sectores de la población sean menos resilientes ante los impactos adversos del cambio climático (Conde & Saldaña, 2007). Bajo este contexto, se han publicado diversos trabajos que abordan el tema del cambio climático dentro del territorio nacional, algunos de estos estudios analizan las tendencias de temperatura y precipitación a través de registros históricos para determinar los efectos del cambio climático (*e. g.*, Algara, 2009).

Por otro lado, diversos estudios utilizan series de tiempo de simulaciones climáticas, obtenidas de modelos de circulación de la atmósfera bajo diversos escena-

rios de emisión, para estimar los potenciales efectos del cambio climático en los recursos hídricos en periodos futuros. Cabe destacar que la mayoría de ellos se han realizado con base en los escenarios del reporte especial de escenarios de emisión del IPCC (2000) (*e.g.*, Esquivel *et al.*, 2017; Gratiot *et al.*, 2010; Rivas *et al.*, 2012; Tapia *et al.*, 2014; Velázquez *et al.*, 2017). Una excepción es el trabajo de Dávila & Velázquez (2018), el cual evaluó, para una cuenca mexicana, las condiciones hidrológicas con base en dos RCPs para un horizonte cercano centrado en la década de 2050. Los trabajos anteriores estimaron el impacto del cambio climático en indicadores hidrológicos de caudal medio, en el balance hidrológico o en índices de aridez, sin embargo, no evaluaron el impacto del cambio climático en caudal alto.

El objetivo de esta investigación es la evaluación del impacto del cambio climático en el régimen hidrológico de dos cuencas en la región Huasteca en México. El estudio incluye estimaciones para un horizonte cercano (2041-2070) y uno lejano (2071-2100). Este trabajo, además de considerar indicadores de caudal medio, evalúa el impacto del cambio climático en indicadores de caudal alto, el cual tiene implicaciones en la evaluación del riesgo hidrológico. Cabe destacar que las cuencas de estudio presentan actualmente diversos problemas de escasez debido a una inadecuada gestión de sus recursos hídricos. Por lo tanto, la información sobre el probable impacto del cambio climático podrá servir a gestores y tomadores de decisiones para evaluar medidas de adaptación.

El artículo se divide en las siguientes secciones: Materiales y métodos, donde se presentan las cuencas de estudio, los datos climáticos e hidrométricos, el modelo hidrológico y los indicadores hidrológicos seleccionados; asimismo la sección de resultados y discusión, la cual presenta la evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos seleccionados; y finalmente las conclusiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se conforma por las cuencas del Río Valles y del Río Gallinas, las cuales se encuentran en la región Huasteca, principalmente en el estado de San Luis Potosí (Figura 1a). Ambas cuencas pertenecen a la región hidrológica RH26 Bajo Pánuco (INEGI, 2016; SIATL-INEGI, 2016). Los ríos Valles y Gallinas son escurrimientos que convergen en el Río Tampaón, el cual es el afluente más importante de la cuenca del Río Pánuco en cuanto a volumen de aportación (SEDUE, 1986).

Las cuencas de estudio se localizan en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental, zona que recibe

los vientos provenientes del Golfo de México, los cuales al encontrarse con el complejo relieve del terreno generan importantes precipitaciones orográficas (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1964); en la zona se presentan climas de tipo Cwa (templado seco en invierno), Am (tropical monzón) y Aw (tropical sabana; Figura 1b). La precipitación media anual en la cuenca del Río Gallinas es de 1407 mm, mientras que para la cuenca del Río Valles es de 1323 mm; por su parte, la temperatura promedio es de 21.2 °C y 23.6 °C para la cuenca del Río Gallinas y la Cuenca del Río Valles, respectivamente (datos estimados con base en estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio para el periodo 1971-2000). La Tabla 1 muestra las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.

La cuenca del Río Valles tiene un área de 3521 Km² y la del Río Gallinas tiene un área de 789 Km² (IMTA, 2017) y están formadas principalmente por rocas sedi-

mentarias marinas (Figura 1c) que tuvieron su origen entre el Cretácico y el Jurásico (SEDUE, 1986), estas rocas sedimentarias (principalmente calizas) dieron origen a Litosoles (suelos de alta permeabilidad Ortiz & Ortiz-Solorio, 1990) en las zonas altas, mientras que en los valles proliferaron suelos como Regosoles y Vertisoles principalmente (Figura 1d).

En el caso de la cuenca del Río Gallinas, la disolución de las rocas carbonatas que la conforman dieron origen a la subprovincia fisiográfica conocida como Carso Huasteco, la cual se caracteriza por sus importantes aportaciones de agua subterránea (Figura 1e).

A pesar de contar con importantes precipitaciones y de recibir importantes escurrimientos, en los últimos años gran parte de la región de la Huasteca Potosina ha presentado condiciones de escasez de agua debido principalmente a la mala gestión del recurso (Jabardo & Padilla, 2016); además, del total de agua disponible

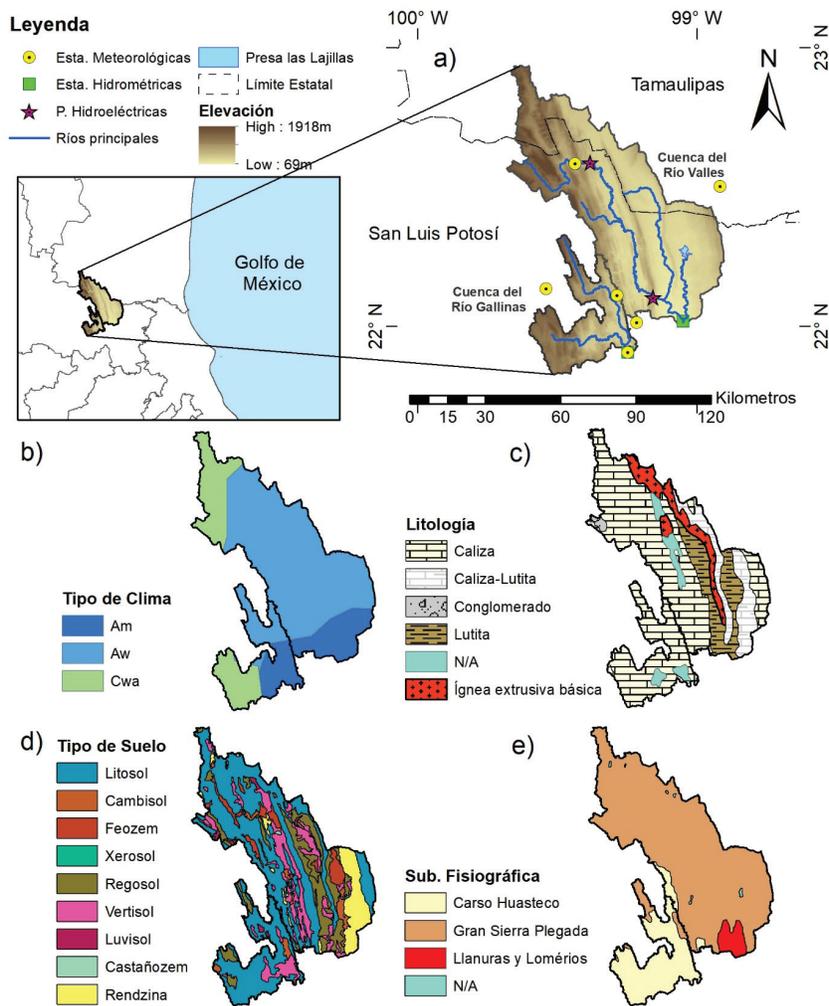


Figura 1. Caracterización de la zona de estudio con base en información en formato vectorial 1:1,000,000 del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática: Para ubicación a), litología superficial c), edafología d) y subprovincias fisiográficas e). Para la determinación de climas b); se utilizó la clasificación climática Köppen-Giger con base en el trabajo de Peel *et al.* (2007). Fuente: INEGI, (2016)

para consumo humano en la zona, gran parte de esta se destina para uso agrícola, donde la producción de cítricos y los ingenios azucareros son las actividades principales en la región. Bajo ese contexto, en el trabajo de Santacruz (2012) se estima que aproximadamente 82 % del agua superficial concesionada en toda la cuenca del Río Valles se destina al sector agrícola. Las actividades agroindustriales han provocado problemas de contaminación debido al uso de fertilizantes y pesticidas en el cultivo de la caña de azúcar, lo que resulta un riesgo en la población que se abastece de agua del cauce del Río Gallinas y de sus manantiales (Vargas *et al.*, 2018).

La zona Huasteca es una zona compleja desde un punto de vista social, ya que a pesar de presentar un importante crecimiento económico en los últimos años, existen sectores de la población en donde las condiciones de vulnerabilidad ante eventos hidrometeorológicos extremos se hacen cada vez más críticas (Santacruz, 2012; Santacruz-De León & Santacruz-De León, 2015). Así, Cote (2011) identificó 19 inundaciones en la cuenca del Río Valles entre 1973 y 2004, las cuales estuvieron relacionadas con ciclones tropicales y frentes fríos, principalmente en Ciudad Valles, área urbana que se localiza en la margen del río.

Por otro lado, en la región se encuentra la presencia de megaproyectos como las centrales hidroeléctricas Camilo Arriaga (capacidad de 18,000 kW) y la central Micos y Electroquímica (10,000 kW; Ramos & Montenegro, 2012) ubicadas en la cuenca del Río Valles, y la Presa Las Lajillas (capacidad de 45 Mm³; Figura 1a), los cuales han generado problemáticas sociales ligadas a la disponibilidad del agua entre ejidatarios y los concesionarios de estos proyectos (Santacruz, 2012). Por otro lado, existe la posibilidad de que megaproyectos de mayor impacto comprometan el suministro de agua a futuro, tal es el caso del acueducto Monterrey VI, el

cual propone el trasvase de la cuenca del Río Pánuco para cubrir con el suministro de agua en el municipio de Monterrey (SADM, 2012).

En esta investigación el análisis de los efectos asociados al cambio climático sobre los recursos hídricos se realizó con base en la cadena de modelación hidroclimática que se ilustra en la Figura 2, que consiste en simulaciones provenientes de un modelo climático, las cuales se utilizan como datos de entrada en un modelo hidrológico. A partir de simulaciones hidrológicas (en el periodo de referencia y en periodos futuros) se evaluaron diversos índices hidrológicos (*e.g.*, Muerth *et al.*, 2013; Velázquez *et al.*, 2017).

Los datos climatológicos en el área de estudio fueron extraídos de la base de datos CLICOM (2016) del Servicio Meteorológico Nacional para el periodo 1971-2000. Las series climáticas para ambas cuencas se estimaron a partir de seis estaciones meteorológicas enlistadas en la Tabla 1. Las series de tiempo selecciona-

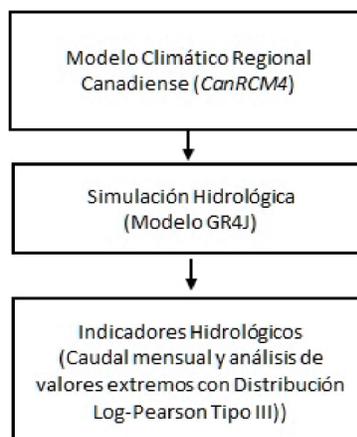


Figura 2. Cadena de modelación hidroclimática utilizada en este estudio

Tabla 1. Estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio

Estación meteorológica	Clave	Altitud (msnm)	Periodo disponible	Temperatura promedio anual (°C)	Desv. Estand. Temp. (°C)	Precipitación promedio anual (mm)	Desv. Estand. Precip. (mm)
Gallinas	24031	314	1961-2015	23.9	0.7	1710	445
Damián Carmona	24014	491	1961-2010	23.5	0.9	1574	345
Ojo de Agua	24047	1379	1961-2011	16.2	1.9	1105	225
San Dieguito	24064	346	1961-2015	22.9	0.6	1479	415
El Salto	24027	558	1954-2014	23.4	0.9	1351	416
El Refugio	28139	75	1973-2014	24.7	0.6	1242	311

das tuvieron, en promedio 5 % de datos faltantes por estación. Para la estimación de datos faltantes de precipitación se aplicó el método de Combinación Lineal Ponderada (CLP; Barrera, 2004) utilizando datos provenientes de estaciones meteorológicas vecinas.

Los datos hidrométricos se obtuvieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS; IMTA, 2017) de la Comisión Nacional del Agua para el periodo 1971-2000. La información hidrométrica para las cuencas del Río Valles y del Río Gallinas se obtuvieron a partir de las estaciones hidrométricas Santa Rosa (clave 26263) y Gallinas (clave 26267), respectivamente. La selección del periodo de referencia 1971-2000 se realizó por la disponibilidad de datos meteorológicos e hidrométricos.

Para determinar los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos, en este trabajo se utilizaron series climáticas de precipitación y temperatura provenientes del Modelo Climático Regional Canadiense (CanRCM4; resolución horizontal 0.44 ° ~ 50 km; Scinocca *et al.*, 2016). Las series climáticas comprenden tres periodos, uno en referencia (1971-2000) y dos horizontes en el futuro, los cuales son llamados en este estudio H01 (periodo 2041-2070) y H02 (periodo 2071-2100). Las series climáticas en el futuro comprenden las trayectorias de concentración representativas RCP 4.5 y RCP 8.5.

Las series climáticas presentan sesgos sistemáticos (*i.e.*, diferencias entre las simulaciones climáticas del modelo y los datos observados en las estaciones climatológicas, Troin *et al.*, 2015), por lo que necesitan de un tratamiento estadístico para corregir dichos sesgos antes de emplearse en un modelo hidrológico. En esta investigación se utilizó el método Linear Scaling (LS), propuesto por Lenderink *et al.* (2007), el cual se ha utilizado ampliamente en estudios de evaluación del impacto del cambio climático (*e.g.*, Levison *et al.*, 2014; Troin *et al.*, 2015). En este método se calculan factores de corrección mensuales entre las variables observadas (temperatura y precipitación promedio) y las simulaciones en cada una de las estaciones meteorológicas, con los cuales se obtienen series de simulaciones climáticas corregidas, en el periodo de referencia y en el periodo futuro. Para el periodo de referencia (ref) la corrección se realiza mediante las ecuaciones 1 y 2:

$$T_{(corr,d)}^{ref} = T_{sim(d)}^{ref} + (\bar{T}_{obs(m)}^{ref} - \bar{T}_{sim(m)}^{ref}) \quad (1)$$

$$P_{(corr,d)}^{ref} = P_{sim(d)}^{ref} \left(\frac{\bar{P}_{obs(m)}^{ref}}{\bar{P}_{sim(m)}^{ref}} \right) \quad (2)$$

Donde T y P son la temperatura y la precipitación respectivamente, y los subíndices corresponden a día (d), mes (m), variable observada (obs), variable simulada (sim) y variable corregida (corr). Para el periodo futuro (fut) las series climáticas se corrigen con las siguientes ecuaciones:

$$T_{(corr,d)}^{fut} = T_{sim(d)}^{fut} + (\bar{T}_{obs(m)}^{ref} - \bar{T}_{sim(m)}^{ref}) \quad (3)$$

$$P_{(corr,d)}^{fut} = P_{sim(d)}^{fut} \left(\frac{\bar{P}_{obs(m)}^{ref}}{\bar{P}_{sim(m)}^{ref}} \right) \quad (4)$$

La simulación hidrológica se realizó utilizando el modelo hidrológico precipitación-escorrentía GR4J (*Modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier*), que es un modelo conceptual del tipo global (*i.e.*, lumped model; Perrin *et al.*, 2003). La Figura 3 muestra el diagrama del modelo GR4J, este se alimenta con series de datos diarios de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (E). La variable E se estimó con base en la metodología propuesta por Oudin *et al.* (2005), la cual requiere de datos diarios de temperatura y de radiación solar. La hidrología en GR4J se simula de la siguiente manera: primero, el modelo sustrae la E de la precipitación para obtener la lluvia neta (P_n) y la capacidad de Evapotranspiración (E_n) es cero. Si P < E, entonces P_n es 0 y E_n=E-P. En caso de que exista lluvia neta, una parte de ella P_s entra al reservorio de producción. Una cantidad de P escapa del reservorio de producción por percolación (Perc). Si E_n es diferente de cero, se determina una tasa real de evaporación E_s en función del nivel del reservorio de producción (S). Otra porción de la precipitación se dirige hacia la ruta del escurrimiento (Pr). Esta ruta de escurrimiento consiste en dos hidrogramas unitarios (que distribuyen 10 % y 90 % del escurrimiento) y un reservorio de distribución no lineal (con nivel R), el cual tiene de un intercambio con el flujo de agua subterránea (F), mientras que el caudal de salida se identifica como Q. Los parámetros a optimizar son la máxima capacidad del reservorio de producción (x₁), el coeficiente de intercambio con flujo subterráneo (x₂), la máxima capacidad del reservorio de distribución (x₃) y el tiempo base de hidrograma unitario (x₄).

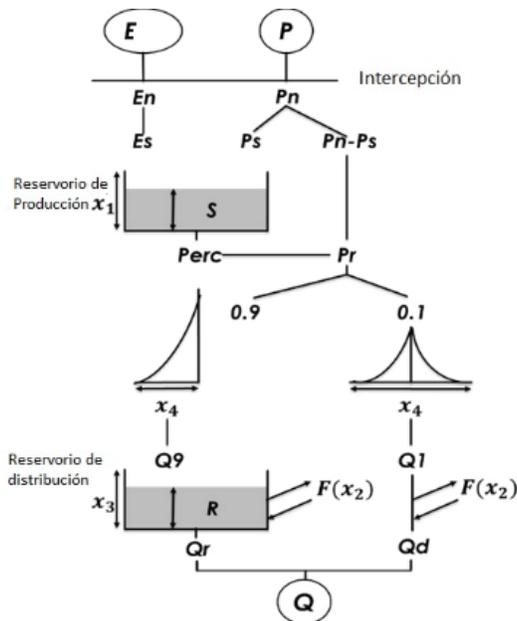


Figura 3. Diagrama del modelo hidrológico GR4J

Para calibrar y validar el modelo hidrológico en el periodo histórico, este se alimentó con series de variables observadas y mediante un proceso de optimización se obtuvo el juego de parámetros que describe mejor el comportamiento hidrológico de cada cuenca. La Tabla 2 muestra los periodos de calibración y validación de este estudio.

Los indicadores estadísticos con los que se evaluó el rendimiento del modelo GR4J fueron el coeficiente de determinación R^2 (Ecuación 5), el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS; Ecuación 6; Nash & Sutcliffe, 1970) y el error cuadrático medio (MSE; Ecuación 7):

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2 \quad (5)$$

$$NS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{N} \quad (7)$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado y Q_{sim} es el caudal simulado en el día i del total de días N . El coeficiente R^2 tienen un rango entre 0 y 1 y NS tiene un rango entre $-\infty$ y 1, siendo el valor de 1 el de correspondencia perfecta entre observaciones y simulaciones para ambos estadísticos. Para MSE el valor de correspondencia perfecta es 0.

Los indicadores hidrológicos utilizados en la evaluación del impacto del cambio climático son los siguientes:

- Q_m = Caudal medio mensual
- Q_2 = Caudal con periodo de retorno de 2 años
- Q_{10} = Caudal con un periodo de retorno de 10 años
- Q_{100} = Caudal con un periodo de retorno de 100 años

Para la estimación de los caudales extremos se obtuvieron los caudales diarios máximos anuales para los periodos evaluados y las series se ajustaron a la distribución de probabilidad log Pearson III (e.g., Muerth *et al.*, 2013). La selección de dicha distribución de probabilidad se basó en la recomendación como método base en análisis de frecuencia de crecientes (Campos, 2015; WRC, 1981).

La señal de cambio climático (SCC) se calculó con la Ecuación 8:

$$SCC = \frac{I^{fut} - I^{ref}}{I^{ref}} \quad (8)$$

Donde I es la variable meteorológica (o indicador hidrológico) calculado con las simulaciones hidrológicas para el periodo de referencia (ref) y el periodo futuro (fut).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En lo que se refiere a la eficiencia del modelo hidrológico, la Tabla 3 muestra que los valores de NS de calibración y de validación en la zona de estudio se encuentran

Tabla 2. Periodos de calibración y validación para el modelo hidrológico GR4J, para las cuencas de estudio

Cuenca	Calibración	Validación
Río Valles	1989 - 1995	1973 - 1979
Río Gallinas	1971 - 1976	1987 - 1992

Tabla 3. Coeficiente de determinación R^2 , coeficiente NS y MSE para los periodos de calibración y validación en las cuencas de los ríos Gallinas y Valles

Cuenca de estudio	Cuenca del Río Gallinas		Cuenca del Río Valles	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
R^2	0.889	0.785	0.748	0.864
NS	0.886	0.761	0.750	0.779
MSE	9.4284	12.1119	1.255	1.348

en un rango entre 0.88 a 0.75. Por otro lado, los valores de R^2 indican una buena correspondencia entre caudales observados con los simulados, por lo que según Moriasi *et al.* (2007) los valores obtenidos muestran que se tiene una buena eficiencia en la modelación hidrológica. Por lo tanto, el modelo GR4J simula adecuadamente los caudales diarios en las cuencas de estudio durante el periodo histórico.

La Figura 4 muestra la señal de cambio climático (*i.e.*, diferencia entre el periodo de referencia y el periodo en el futuro, SCC) para las variables de precipitación y temperatura media (promedio estacional) en el área de estudio. En esta figura se puede observar que, para el horizonte cercano (2041-2070), la simulación RCP 4.5 H01 estima un aumento en la temperatura (T) en un rango entre 1.64 °C (verano) y 1.74 °C (primavera). Por su parte, los cambios en precipitación (P) estiman variaciones tanto positivas como negativas, donde la primavera y el otoño son las estaciones donde se proyecta un incremento (entre 13 y 16 %) mientras en invierno y verano se estima un cambio menor (+3 y -3 %, respectivamente). Para el caso de la serie RCP 8.5 H01 la cual corresponde a una trayectoria de concentración más severa en un horizonte similar al caso anterior, el aumento de temperatura estimado varía entre 2 °C (verano) y 2.2 °C (primavera). Para este caso, la precipitación evalúa exclusivamente cambios negativos, así, el decremento mayor se proyecta en verano, con valores de SCC inferiores a -25 %.

En lo que respecta al horizonte 2071-2100, la Figura 4 muestra que para RCP 4.5 H02 las simulaciones climáticas evalúan un aumento en la temperatura en un rango entre 2 °C (verano) y 2.2 °C (invierno). Por otro lado, el rango de SCC para la precipitación se encuentra entre -10 % (verano) y 25 % (otoño). En lo que respecta a los cambios en precipitación, podemos observar que en primavera e invierno se estima poca variación

Dentro del conjunto de simulaciones analizadas, es la serie de RCP 8.5 H02 donde se estiman los mayores

impactos respecto a las condiciones climáticas del periodo de referencia. En primer lugar, se puede observar una gran variabilidad en la SCC entre las estaciones, donde el verano es la estación con mayores decrementos de precipitación (-50 %); por su parte, primavera e invierno muestran valores de SCC de -10 % y -20 %, respectivamente. El cambio menor se estima para otoño con una variación de aproximadamente -5 %. Respecto a las variaciones en T, el aumento de esta se evalúa en un rango entre 3.1 °C y 3.3 °C.

Las modificaciones en las variables meteorológicas modificarían a su vez el régimen hidrológico en las cuencas de estudio. En la Figura 5 se muestran los caudales mensuales simulados (Q_m) para el periodo en referencia y para los periodos en el futuro en la cuenca del Río Valles (Figura 5a) y en la del Río Gallinas (Figura 5b). Se puede observar, en el periodo de referencia, que las cuencas de estudio presentan diferente régimen hidrológico, donde el Río Gallinas es el más caudaloso; así, al comparar la precipitación promedio anual de las cuencas podemos notar que esta es mayor en la cuenca del Río Gallinas (1407 mm) que en la cuenca del Río Valles (1323 mm).

Por otro lado, hay importantes aportaciones de agua subterránea al caudal superficial en las cuencas, las cuales son características de las regiones con presencia de formaciones cársticas. La cuenca del Río Gallinas se localiza en la subprovincia fisiográfica conocida como Carso Huasteco (ver Figura 1e). Este tipo de formaciones influyen en la hidrología de la cuenca dado que hay aportaciones provenientes de manantiales al escurrimiento neto. En este sentido, el trabajo de Morán (2012) muestra que el flujo de agua subterránea en la región va de las zonas de mayor elevación topográfica localizadas en la Sierra de Álvarez (al oeste de la cuenca) a las de menor elevación hacia el Golfo de México, siguiendo una trayectoria de oeste a este a través de un sistema de fallas (Santacruz & Ramos, 2010).

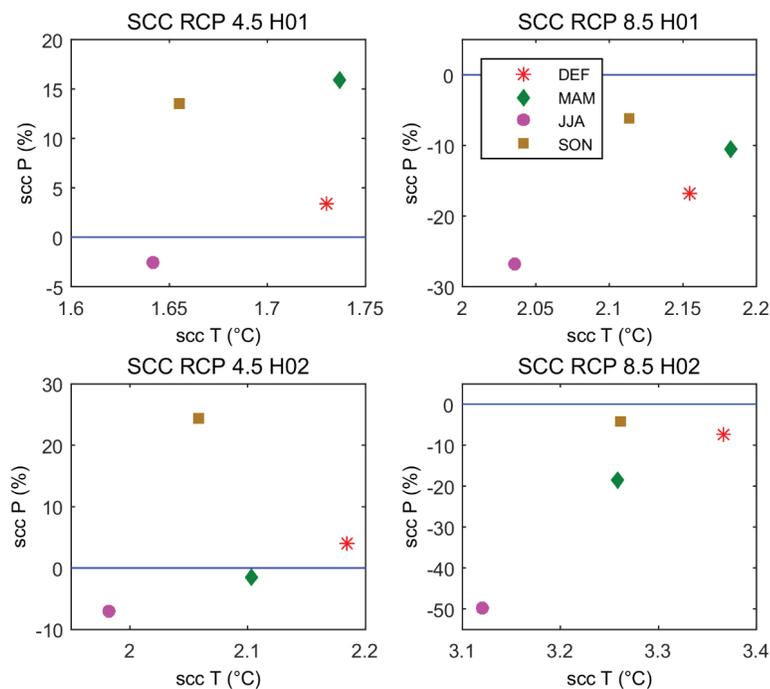


Figura 4. Señal de cambio climático (SCC) para el promedio estacional en temperatura media (T) y precipitación (P) calculados entre el periodo de referencia (1971-2000) y los horizontes H01 (arriba) y H02 (abajo) bajo los escenarios RCP 4.5 (izquierda) y RCP 8.5 (derecha). Se muestra la SCC para el invierno (DEF), la primavera (MAM), el verano (JJA) y el otoño (SON)

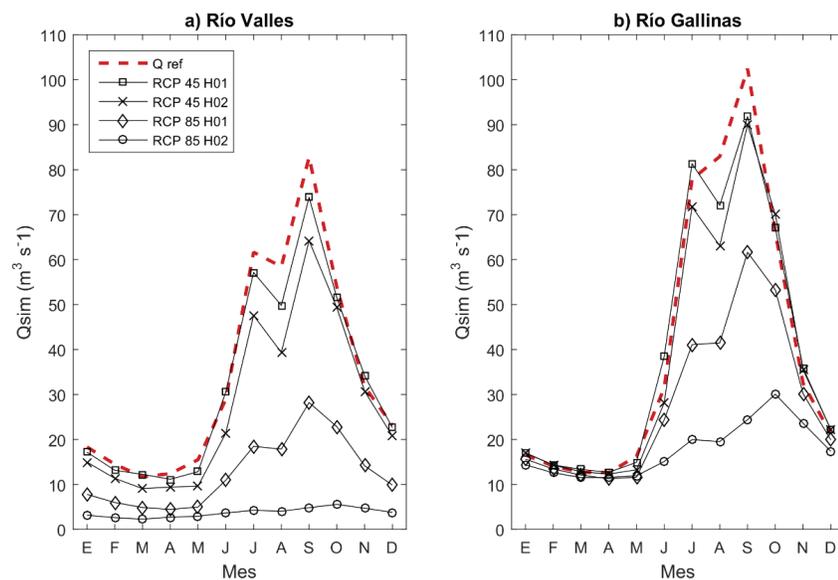


Figura 5. Caudales mensuales simulados en la cuenca del Río Valles a) y la cuenca del Río Gallinas b). La línea segmentada representa el caudal promedio mensual simulado en el periodo de referencia (Q ref), mientras que el resto de las líneas corresponde a las simulaciones en el periodo futuro

En la Tabla 4 podemos observar el promedio estacional de la señal de cambio climático (SCC) para el caudal mensual simulado. Los resultados muestran que en la cuenca del Río Valles (Figura 5a) se proyectan leves disminuciones de caudal con RCP4.5. Por ejemplo, en el verano (JJA) los decrementos estimados son -5.5% para RCP 4.5 H01 y -27.2% para RCP 4.5 H02. En caso del escenario más severo (RCP8.5) se estiman mayores disminuciones de caudal que con RCP4.5 y severas modificaciones sobre el régimen hidrológico. El mayor im-

pacto se puede apreciar cuando se considera el horizonte lejano en donde la SCC en verano es -67.2% para RCP 8.5 H01 y -91% para RCP8.5 H02.

Para la cuenca del Río Gallinas (Figura 5b) se proyectan ligeros cambios en los caudales para RCP4.5. Así, en el verano la SCC es 4.5% para RCP 4.5 H01 y -14.1% para RCP 4.5 H02. En contraste, los mayores cambios de esta estación se proyectan en las simulaciones RCP 8.5 H01 (-39.9%) y RCP 8.5 H02 (-67.6%), mientras que los decrementos en las otras estaciones

Tabla 4. Señal de cambio climático (promedio estacional en %) en los caudales simulados

Periodo	Cuenca del Río Valles				Cuenca del Río Gallinas			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	H01	H02	H01	H02	H01	H02	H01	H02
DEF	-5.9	-16.8	-57.9	-82.8	3.0	3.1	-5.5	-14.0
MAM	-7.6	-28.2	-63.5	-79.8	-0.9	-6.7	-14.8	-14.8
JJA	-5.5	-27.2	-67.2	-91.2	4.5	-14.1	-39.9	-67.6
SON	-2.5	-11.4	-59.6	-89.7	0.5	1.0	-22.1	-52.7

son menores. Este comportamiento es interesante, ya que en la cuenca del Río Gallinas en los meses que comprenden la temporada de secas no muestran grandes diferencias en la magnitud del caudal, comparadas con el periodo de referencia (ver Figura 5b), lo cual no coincide con los cambios estimados para la precipitación. Por ejemplo, en el invierno (DEF) para el horizonte RCP 8.5 H01 se estima una disminución de precipitación de 18 % (ver Figura 3) y no hay cambio de caudal importante (-5.5 %). Cabe mencionar que la modelación lluvia-escurrimiento no es un proceso lineal, lo cual puede visualizarse con el análisis de los parámetros calibrados de GR4J que nos muestra que el régimen hidrológico del Río Gallinas recibe importantes aportaciones de agua subterránea al caudal base, por lo que los cambios estimados de caudal para este horizonte son menores que en el Río Valles.

Por otro lado, en ambas cuencas se observan modificaciones en el régimen hidrológico, por ejemplo, en la cuenca del Río Valles, en el periodo de referencia y en el escenario de emisión menos severo se pueden apreciar dos extremos mensuales durante julio y septiembre con un ligero decremento de caudal en agos-

to, asociado al periodo intraestival o canícula (Magaña *et al.*, 1999). Sin embargo, observando los valores de caudal mensual estimados para las simulaciones del horizonte lejano, los resultados muestran que el régimen hidrológico cambiaría, mostrando un solo pico en el caso de RCP 4.5 H02 mientras que con RCP 8.5 H02 no se presentan los picos.

El análisis de los caudales extremos se muestra en la Figura 6. Tanto para la cuenca del Río Valles como para la del Río Gallinas la proyección de los caudales extremos muestra un decremento (SCC negativa) para el periodo futuro, respecto al periodo de referencia en los horizontes y trayectorias de concentración consideradas. Por ejemplo, para la cuenca del Río Valles considerando RCP4.5 para el horizonte H01, la SCC muestra un decremento de -1 %, -31 % y -61 % para Q_2 , Q_{10} y Q_{100} respectivamente. Para esta misma trayectoria y considerando el horizonte más alejado H02, el decremento estimado es mayor, con valores de SCC de -21 %, -40 % y -65 % para Q_2 , Q_{10} y Q_{100} respectivamente. Cuando se considera la trayectoria RCP8.5 el decremento evaluado es mayor que con RCP4.5. Por ejemplo, para el horizonte cercano H01 el decremento estimado para el caudal alto se en-

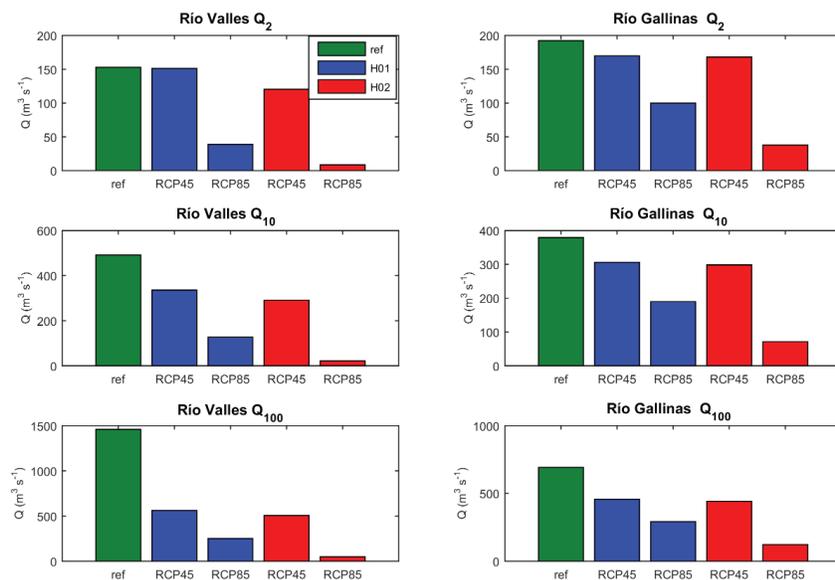


Figura 6. Caudales diarios máximos anuales ajustados a la distribución de probabilidad log Pearson III, con un periodo de retorno de 2, 10 y 100 años (Q_2 , Q_{10} y Q_{100} , respectivamente) para las cuencas del Río Valles (izquierda) y la del Río Gallinas (derecha) para el periodo de referencia (ref) y los periodos futuros 2041-20170 (H01) y 2071-2100 (H02), bajo los RCPs 4.5 y 8.5

cuentra entre -74% y -82% mientras que para H02 el decremento evaluado se encuentra cercano a -95% .

En la Cuenca del Río Gallinas los resultados muestran también decrementos importantes, aunque menores que en la cuenca del Río Valles. Por ejemplo, cuando se considera RCP4.5 y el horizonte lejano H02 la SCC muestra decrementos de -12% , -21% y -36% para Q_2 , Q_{10} y Q_{100} , respectivamente, mientras que para la trayectoria RCP8.5 y horizonte H02 la SCC muestra decrementos cerca del -81% .

CONCLUSIONES

Este trabajo utilizó una cadena de modelación para evaluar el impacto del cambio climático en dos cuencas de la región Huasteca (México) la cual consiste en simulaciones de un modelo climático que alimentan un modelo hidrológico (calibrado y validado) para obtener series de caudales en el periodo de referencia y en dos periodos futuros, con el fin de comparar indicadores hidrológicos seleccionados. En este trabajo se consideraron indicadores hidrológicos de caudal medio, además, se consideraron caudales altos con un periodo de retorno de 2, 10 y 100 años, los cuales, en nuestro conocimiento, no habían sido evaluados en trabajos previos en México.

Los resultados muestran que los cambios proyectados en precipitación y temperatura tendrían un impacto en los caudales medios y extremos de las cuencas de estudio. Se consideraron dos escenarios de emisión y dos horizontes de proyección, lo que ocasiona que exista una gran variabilidad en el impacto del cambio climático estimado, principalmente para el horizonte 2071-2100, pues la Trayectoria de Concentración Representativa seleccionada tiene importancia en el caudal estimado. Por otro lado, en el trabajo futuro deberán considerarse diversos modelos climáticos y modelos hidrológicos para evaluar otras fuentes de incertidumbre en la estimación del impacto del cambio climático.

Si bien los resultados de este estudio estiman una variabilidad importante en el impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos, es necesario tener en cuenta que el posible grado de afectación a la población no está dado solamente por la intensidad de los eventos hidrometeorológicos, sino que el riesgo es el punto donde el evento extremo y la vulnerabilidad social se intersectan. Por lo tanto, es necesario comprender que las medidas de adaptación al cambio climático no dependen solamente de soluciones tecnológicas o de avances científicos, sino de la implementación de medidas que reduzcan la vulnerabilidad y que aumenten las capacidades adaptativas especialmente en los sectores

más afectados por los impactos adversos del cambio climático (Conde, 2010), por esta razón, es imprescindible hacer cambios profundos en los procesos y las prácticas de manejo de los recursos hídricos que nos conduzcan a un desarrollo sustentable y más equitativo.

La información que se obtuvo a partir de este trabajo de investigación, puede ser de ayuda en el manejo sustentable de los recursos hídricos, además de servir como base de estudios interdisciplinarios para tener un análisis más completo sobre los posibles impactos asociados al cambio climático que involucren la vulnerabilidad social.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los grupos de investigación que hicieron disponibles los datos hidrometeorológicos y las simulaciones climáticas. Rodrigo Dávila agradece la beca de investigación de El Colegio de San Luis. Este trabajo se incluye en el marco del proyecto FORDECYT 297525 "Evaluación y optimización de los recursos hídricos en el nexo agricultura-sociedad-industria en tres zonas del país: árida, bajío y tropical, hacia un modelo de transferencia y política pública".

REFERENCIAS

- Algara, M. (2009). *Propuesta metodológica para medir el impacto del fenómeno de la sequía en la Huasteca Potosina y propuesta general de manejo*. (Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Ambientales). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Recuperado de http://148.224.97.92/jspui/bitstream/i/3625/1/MarcosAlgaraSiller_TesisDoctoral_CienciasAmbientales_090907.pdf
- Barrera, A. (2004). *Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España*. (Trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados (DEA)). Programa de Doctorado de Astronomía y Meteorología, Universidad de Barcelona. Recuperado de <http://zucaina.net/Publicaciones/barrera-dea.pdf>
- Campos, A. (2015). Contraste de seis métodos de ajuste de la distribución Log-Pearson tipo III en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Tecnología y ciencias del agua*, 17(2), 77-97.
- CLICOM. (2016). Base de Datos Climatológica Nacional. Servicio Meteorológico Nacional a través del CICESE. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx>.
- Conde, A.C. (2010). El cambio climático. De lo inequívoco a lo incierto. Retos y oportunidades. En Delgado G.C., Gay C., Imaz M. & Martínez M.A. (Eds.), *México frente al cambio climático*, UNAM, 17-33. Recuperado de <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/362>

- Conde, A.C., Hernández, G.E., Esquivel, N., López, J., López, F., Montes, R., Nava, Y. & Ruíz, K. (2016). Variabilidad climática y escenarios de cambio climático. Herramientas para los estudios de impactos potenciales y vulnerabilidad actual y futura. Ejemplos para México, Centroamérica y El Caribe. En Conde A.C. & López J. (Eds.), *Variabilidad y Cambio Climático. Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático en América Latina y el Caribe*, INE, 25-72. Recuperado de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD002498.pdf#page=27>
- Conde, C. & Saldaña, S. (2007). Cambio climático en América Latina y el Caribe: Impactos, vulnerabilidad y adaptación. *Ambiente y desarrollo*, 23(2), 23-30.
- Cote, F.D. (2011). *Analysis of hydrological modelling tool for water resources management in the Valles River Basin, México*. (Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias Ambientales). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Agenda Ambiental. Recuperado de <http://ninive.uaslp.mx/jspui/handle/i/3545>
- Dávila, R. & Velázquez, J.A. (2018). Evaluation of climate change impact as a tool for sustainable development: A case study of a Mexican basin. En Leal-Filho W., Noyola-Cherpitel R., Medellín-Milán P. & Ruiz-Vargas V. (Eds.), *Sustainable development research and practice in Mexico and selected Latin American Countries*, Springer International Publishing, 327-337. Recuperado de https://doi.org/10.1007/978-3-319-70560-6_21
- Esquivel, G., Nevarez, M.M., Velásquez, M.A., Sánchez, I. & Bueno, P. (2017). Modelación hidrológica de una cuenca del norte árido de México y su respuesta a cambios ambientales. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 03-17. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.12.008>
- Gratiot, N., Duvert, C., Collet, L., Vinson, D., Némery, J., Sáenz, C. (2010). Increase in surface runoff in the central mountains of Mexico: Lessons from the past and predictive scenario for the next century. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(2), 291-300. <https://doi.org/10.5194/hess-14-291-2010>
- IMTA. (2017). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Base de datos. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- INEGI. (2016). Datos en formato vectorial de México, Formato Shapefile. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/default.aspx>
- IPCC. (2000). Emissions Scenarios: IPCC Special Report (Nakicenovic N. & Swart R., Eds.). Cambridge University Press. Recuperado de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/emissions_scenarios-1.pdf
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad-Resumen para responsables de políticas. Contribución del grupo de trabajo II al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. En Edenhofer O., Pichs-Madruga R., Sokona Y., Farahani E., Kadner S., Seyboth K., Adler A., Baum I., Brunner S., Eickemeier P., Kriemann B., Savolainen J., Schlömer S., von-Stechow C., Zwickel T. & Minx J.C. (Eds.). Cambridge University Press. Recuperado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- Jabardo, V. & Padilla, L.S. (2016). La escasez de agua en la Huasteca Potosina (México): Conflictos locales. *Revista Universitaria de Geografía*, 25(2), 133-165.
- Lenderink, G., Buishand, A. & Van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145-1159. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>
- Levison, J., Larocque, M., Fournier, V., Gagné, S., Pellerin, S. & Ouellet, M.A. (2014). Dynamics of a headwater system and peatland under current conditions and with climate change. *Hydrological Processes*, 28(17), 4808-4822. <https://doi.org/10.1002/hyp.9978>
- Magaña, V., Amador, J.A. & Medina, S. (1999). The midsummer drought over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, 12(6), 1577-1588. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1577:TMDOMA>2.0.CO;2)
- Morán, J. (2012). *Conexiones hidráulicas en cuencas hidrogeológicas en la Sierra Madre Oriental aplicando modelos hidrogeoquímicos*. (Tesis para obtener el grado de Maestría en Ciencias Aplicadas). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11627/102>
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van-Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muerth, M.J., Gauvin St-Denis, B., Ricard, S., Velázquez, J.A., Schmid, J., Minville, M., Caya, D., Chaumont, D., Ludwig, R. & Turcotte, R. (2013). On the need for bias correction in regional climate scenarios to assess climate change impacts on river runoff. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(3), 1189-1204. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1189-2013>
- 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)
- Ortiz, B. & Ortiz, C. (1990). *Edafología*. Universidad Autónoma Chapingo, Departamentos de Suelos.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2-Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1), 290-306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

- Perrin, C., Michel, C. & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4), 275-289. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)
- Ramos, L. de J. & Montenegro, M. (2012). Las centrales hidroeléctricas en México: Pasado, presente y futuro. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(2), 103-121.
- Rivas, I., Güitrón, A. & Montero, M. (2012). Hydrologic vulnerability to climate change of the Lerma-Chapala Basin, Mexico. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 167, 297-308. <https://doi.org/10.2495/ST110271>
- SADM. (2012). Manifestación de impacto ambiental modalidad regional para el proyecto Monterrey VI. Monterrey. Servicio de agua y drenaje de Monterrey, I.P.D.
- Santacruz, G. (2012). Elementos para la gestión del agua en la cuenca del río Valles, Huasteca. En Oswald U. (Ed.), *Los Retos de la Investigación del agua en México*. CONACYT, CRIM-UNAM.
- Santacruz, G. & Ramos-Leal, J.A. (2010). Estudio del comportamiento hidrogeológico de la Reserva Sierra Abra Tanchipa y su zona de Influencia. Reporte Técnico GTZ-CONANP-COLSAN-IPICYT.
- Santacruz, G. & Santacruz, E.E. (2015). El acceso al agua en localidades rurales de la Huasteca Potosina, México: Entre la abundancia hídrica y la "escasez" financiera estatal. *Textual*, (66), 95-118. <https://doi.org/10.5154/r.textual.2015.66.006>
- Scinocca, J.F., Kharin, V.V., Jiao, Y., Qian, M.W., Lazare, M., Solheim, L., Flato, G.M., Biner, S., Desgagne, M. & Dugas, B. (2016). Coordinated global and regional climate modeling. *Journal of Climate*, 29(1), 17-35. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0161.1>
- Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1964). Informe del estudio hidrológico del Río Tampoán Presa el Pujal, S.L.P. Subdirección de Hidrología. Recuperado de http://repositorio.inecc.gob.mx/ae/ae_002388.pdf
- SEDUE. (1986). Estudio de calidad y clasificación del Río Tampoán, San Luis Potosí y Querétaro. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Recuperado de http://repositorio.inecc.gob.mx/ae/ae_002388.pdf
- SIATL-INEGI. (2016). Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas, Software Online. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Recuperado de http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#
- Tapia, E.M., Minjarez, I., Espinoza, I. & Minjarez, C. (2014). Use of Stella Software for the modelling of climate change impacts on water balance for the Rio Yaqui Basin, Sonora, Mexico. *European Scientific Journal, ESJ*, 10(14). <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/3414>
- Troin, M., Velázquez, J.A., Caya, D. & Brissette, F. (2015). Comparing statistical post-processing of regional and global climate scenarios for hydrological impacts assessment: A case study of two Canadian catchments. *Journal of Hydrology*, 520, 268-288. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.047>
- van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., & Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vargas, S.L., Güemes, A.M. & Almegua, M. de la L.V. (2018). Metodología para evaluar la sustentabilidad de la actividad turística a partir de criterios locales. Caso de estudio: Huasteca potosina. *UPIICSA. Investigación Interdisciplinaria*, 4(1), 15-34.
- Velázquez, J.A., Troin, M. & Dávila, R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 341-351. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.030>
- WRC. (1981). Guidelines for determining flood flow frequency, Bulletin #17A of the Hydrology Committee (Vol. 17). US Water Resources Council.