



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**DEPARTAMENTO DE IRRIGACIÓN Y MECÁNICA  
AGRÍCOLA**

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y  
USO INTEGRAL DEL AGUA**

**RESPUESTA DE LA CUENCA ALTA  
LAJA-PEÑUELITAS, ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO  
CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO**

**TESIS**

**Que como requisito parcial  
para obtener el grado de**

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**Presenta:**

**M.I. JORGE JAIMES RODRÍGUEZ**

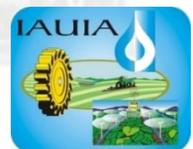
**Bajo la supervisión de:**

**DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO**

Chapingo, Estado de México, 26 de noviembre de 2021



**APROBADA**



RESPUESTA DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, ANTE  
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO

Tesis realizada por **M.I. JORGE JAIMES RODRÍGUEZ** bajo la supervisión del  
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito  
parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

  
**DIRECTOR:** \_\_\_\_\_  
DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

  
**ASESOR:** \_\_\_\_\_  
DR. GUSTAVO ANTONIO ARÉVALO GALARZA

  
**ASESOR:** \_\_\_\_\_  
DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

  
**LECTOR EXTERNO:** \_\_\_\_\_  
DR. ALEJANDRO ISMAEL MONTERROSO RIVAS

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	ix
DEDICATORIAS .....	xii
AGRADECIMIENTOS .....	xiii
DATOS BIOGRÁFICOS .....	xiv
RESUMEN GENERAL .....	xv
GENERAL ABSTRACT .....	xvi
1.    CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.1.  Literatura citada .....	2
2.    CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA .....	4
2.1.  Modelación hidrológica .....	4
2.1.1. Modelo HEC-HMS .....	4
2.2.  Cambio climático .....	5
2.2.1. Extremos climáticos .....	6
2.2.2. Índices de cambio climático & RClmDex .....	7
2.3.  Respuesta hidrológica .....	13
2.3.1. Respuesta hidrológica ante el cambio climático .....	14
2.3.2. Respuesta hidrológica ante el cambio de uso del suelo y vegetación ....	16
2.3.3. Respuesta hidrológica combinada ante el cambio climático y uso del suelo y vegetación .....	17
2.3.4. Implicaciones de la respuesta hidrológica ante el cambio climático y uso del suelo y vegetación .....	19
2.3.5. Generación de escenarios de cambio climático y uso del suelo y vegetación .....	20

2.3.6. Modelos hidrológicos para la evaluación de la respuesta hidrológica ante escenarios de cambio climático y uso del suelo y vegetación .....	25
2.4. Literatura citada.....	27
3. CAPÍTULO III: MODELO HIDROLÓGICO CALIBRADO PARA LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO .....	42
3.1. Introducción.....	44
3.2. Materiales y métodos .....	45
3.2.1. Área de estudio .....	45
3.2.2. Información empleada .....	46
3.2.3. Metodología.....	54
3.3. Resultados y discusión.....	63
3.4. Conclusiones.....	70
3.5. Agradecimientos.....	72
3.6. Literatura citada.....	73
4. CAPÍTULO IV: TENDENCIAS EN LA PRECIPITACIÓN DIARIA DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO .....	78
4.1. Introducción.....	80
4.2. Materiales y métodos .....	81
4.2.1. Área de estudio .....	81
4.2.2. Datos climáticos y fuentes.....	82
4.2.3. Tendencias en precipitación.....	84
4.3. Resultados y discusión.....	86
4.4. Conclusiones.....	94
4.5. Agradecimientos.....	95
4.6. Literatura citada.....	95

5.	CAPÍTULO V: RESPUESTA DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO .....	98
5.1.	Introducción .....	100
5.2.	Materiales y métodos .....	101
5.2.1.	Área de estudio .....	101
5.2.2.	Modelado hidrológico .....	102
5.2.3.	Índices de cambio climático en precipitación.....	107
5.2.4.	Cambios de uso del suelo y vegetación .....	108
5.2.5.	Respuesta hidrológica ante escenarios de cambio climático y uso del suelo y vegetación.....	110
5.3.	Resultados y discusión.....	116
5.3.1.	Modelo hidrológico calibrado.....	116
5.3.2.	Efectos del cambio climático y uso del suelo y vegetación .....	118
5.4.	Conclusiones.....	124
5.5.	Agradecimientos.....	125
5.6.	Literatura citada.....	125

## LISTA DE CUADROS

### CAPITULO II: REVISIÓN DE LITERATURA.

*Cuadro 1. Listado de los índices climáticos básicos del ETCCDI<sup>2</sup>..... 9*

### CAPITULO III: MODELO HIDROLÓGICO CALIBRADO PARA LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO.

*Cuadro 1. Números de curva de escurrimiento en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.  
..... 47*

*Cuadro 2. Asignación de la información de INEGI de uso del suelo y vegetación.  
..... 48*

*Cuadro 3. Unidades de suelos en la cuenca alta Laja-Peñuelitas. .... 49*

*Cuadro 4. Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas. .... 50*

*Cuadro 5. Presas consideradas en el área de estudio. .... 50*

*Cuadro 6. Caudal derivado para uso agrícola..... 51*

*Cuadro 7. Población en viviendas con drenaje periodo 2007-2014..... 52*

*Cuadro 8. Aportación al drenaje a nivel municipal en la cuenca..... 53*

*Cuadro 9. Aportación al drenaje industrial en el área de estudio para los eventos de simulación. .... 53*

*Cuadro 10. Especificaciones de control para los eventos de validación. .... 54*

*Cuadro 11. Métodos de modelación HEC-HMS seleccionados para el área de estudio. .... 55*

*Cuadro 12. Valores típicos de la constante de recesión. .... 58*

*Cuadro 13. Niveles con respecto al NAMO de la presa 1315 “Ignacio Allende”.  
..... 59*

*Cuadro 14. Subcuencas y pesos asignados para cada una de las estaciones meteorológicas automáticas. .... 60*

<i>Cuadro 15. Precipitación acumulada para cada evento de simulación.....</i>	60
<i>Cuadro 16. Rangos de desempeño del Índice de Nash (NSE) para valores mensuales (Moriasi et al., 2007).....</i>	62
<i>Cuadro 17. Rangos de desempeño del PBIAS para valores mensuales (Moriasi et al., 2007).....</i>	63
<i>Cuadro 18. Parámetros optimizados para el evento de calibración.....</i>	64
<i>Cuadro 19. Números de curva a nivel subcuenca por serie de INEGI y ajustados por humedad antecedente para cada evento de simulación.....</i>	64
<i>Cuadro 20. Números de curva ajustados por humedad antecedente (H.A) + pendiente (slope) y por calibración por subcuenca por evento de simulación. .</i>	65
<i>Cuadro 21. Resumen de estadísticas.....</i>	68

**CAPITULO IV: TENDENCIAS EN LA PRECIPITACIÓN DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO.**

<i>Cuadro 1. Estaciones meteorológicas consideradas para la cuenca alta Laja-Peñuelitas.....</i>	83
<i>Cuadro 2. Definiciones de los índices de cambio climático en precipitación<sup>z</sup>. ...</i>	85

**CAPITULO V: RESPUESTA DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO.**

<i>Cuadro 1. Información empleada en el modelo hidrológico calibrado.....</i>	103
<i>Cuadro 2. Rangos de desempeño del Índice de Nash (NSE) para valores mensuales (Moriasi et al., 2007).....</i>	106
<i>Cuadro 3. Rangos de desempeño del PBIAS para valores mensuales (Moriasi et al., 2007).....</i>	107
<i>Cuadro 4. Usos de suelo y vegetación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.....</i>	108
<i>Cuadro 5. Incrementos personalizados a partir del índice Rnn (22.3 mm). ....</i>	113

<i>Cuadro 6. Comportamiento de los valores del número de curva en el modelo hidrológico calibrado ante incremento y decremento potencial del 10 %.....</i>	<i>114</i>
<i>Cuadro 7. Parámetros optimizados en HEC-HMS.....</i>	<i>116</i>
<i>Cuadro 8. Números de curva ajustados por humedad antecedente (H.A), pendiente (slope) y por calibración para el evento de calibración.....</i>	<i>117</i>
<i>Cuadro 9. Comportamiento del caudal pico ante incrementos porcentuales en precipitación.....</i>	<i>119</i>
<i>Cuadro 10. Comportamiento del caudal pico ante incrementos porcentuales en precipitación y número de curva. ....</i>	<i>120</i>
<i>Cuadro 11. Comportamiento del caudal pico ante decremento en 10 % el número de curva e incrementos porcentuales en precipitación. ....</i>	<i>122</i>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPITULO II: REVISIÓN DE LITERATURA

*Figura 1. Representación esquemática de extremos climáticos. Fuente: Zhang et al. (2011).*..... 6

### CAPITULO III: MODELO HIDROLÓGICO CALIBRADO PARA LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO.

*Figura 1. Ubicación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.* ..... 45

*Figura 2. Usos del suelo y vegetación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.*..... 46

*Figura 3. Suelos de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.* ..... 48

*Figura 4. Diagrama metodológico de la estimación de viviendas con drenaje para el periodo 2007-2014 (Elaboración propia).*..... 51

*Figura 5. Comportamiento de un tramo del cauce principal cercano a la salida de la cuenca en temporada de estiaje (04/abril/2014) (izquierda); comportamiento del cauce finalizando la temporada de lluvias (20/noviembre/2018) (derecha) (Google LLC, 2020).* ..... 57

*Figura 6. Área de influencia de las EMAS en la cuenca alta Laja-Peñuelitas...* 59

*Figura 7. Modelo esquemático HEC-HMS generado para la cuenca alta Laja-Peñuelitas hasta la estación hidrométrica Puente Dolores.* ..... 63

*Figura 8. Caudal observado vs caudal simulado del evento c1 a nivel horario.* 65

*Figura 9. Caudal observado vs caudal simulado para el evento v1 a nivel horario.*  
..... 66

*Figura 10. Caudal observado vs caudal simulado para el evento v2 a nivel horario.*  
..... 66

*Figura 11. Caudal simulado vs caudal observado para el evento v3 a nivel horario.*  
..... 67

<i>Figura 12. Caudal simulado vs caudal observado para el evento v4 a nivel horario.</i>	67
--	----

**CAPITULO IV: TENDENCIAS EN LA PRECIPITACIÓN DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO.**

<i>Figura 1. Ubicación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.</i>	82
<i>Figura 2. Tendencias en los índices para las 18 estaciones meteorológicas en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.</i>	86
<i>Figura 3. Tendencia del índice de lluvia máxima en 24 horas (RX1day).</i>	87
<i>Figura 4. Valores promedio de los índices RX1day (a); PRCPTOT (b); Rnn (70 mm) (c); R20 (d).</i>	88
<i>Figura 5. Tendencia de las estaciones meteorológicas ante los índices RX5day (superior izquierda); SDII (superior derecha.); PRCPTOT (inferior derecha); Rnn 70 mm (inferior derecha).</i>	89
<i>Figura 6. Tendencia de las estaciones meteorológicas ante los índices R10 (superior izquierda.); R20 (superior derecha); Rnn 22.3 mm (inferior derecha); Rnn 37.3 mm (inferior derecha).</i>	91

**CAPITULO V: RESPUESTA DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO.**

<i>Figura 1. Ubicación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.</i>	102
<i>Figura 2. Modelo esquemático HEC-HMS generado para la cuenca alta Laja-Peñuelitas hasta la estación hidrométrica Puente Dolores.</i>	105
<i>Figura 3. Resumen de tendencias en los índices para la cuenca alta Laja-Peñuelitas; (+) tendencia de incremento no significativa, (++) tendencia de incremento significativa, (-) tendencia de decremento no significativa, (--)</i>	

<i>tendencia de decremento significativa, (S/T) sin tendencia. Significancia estadística (p-valúe ≤ 0.05).....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4. Comportamiento de la superficie de los usos del suelo y vegetación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas. ....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5. Evolución de los usos del suelo y vegetación serie III a serie VI de INEGI en la cuenca alta Laja-Peñuelitas. ....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 6. Índice Rnn (22.3 mm) para la cuenca alta Laja-Peñuelitas.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 7. Ubicación y área de influencia de las estaciones meteorológicas convencionales y localización de las EMAS en la cuenca alta Laja-Peñuelitas. ....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 8. Comparación del caudal observado vs caudal simulado calibrado..</i>	<i>116</i>
<i>Figura 9. Flujo de salida modelado ante escenarios potenciales de cambio climático (incrementos en precipitación generalizados y personalizados). ....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 10. Flujo de salida modelado ante escenarios potenciales de cambio climático (incrementos en CN y en precipitación generalizados y personalizados). ....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 11. Flujo de salida modelado ante escenarios potenciales de cambio climático (reducción en CN e incrementos en precipitación generalizados y personalizados).....</i>	<i>121</i>

## DEDICATORIAS

- *A mis padres y hermanos, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.*
- *A mis familiares, que directa e indirectamente me han apoyado durante todos mis estudios.*
- *A mis amigos de maestría y doctorado, ya que hemos formado una hermandad y siempre estaremos para ayudarnos.*
- *A mis profesores, que través de sus enseñanzas, han forjado el profesional que actualmente soy.*

## **AGRADECIMIENTOS**

- *Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para la realización de esta tesis y los artículos contenidos en la misma.*
- *A la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), por el otorgamiento de información de las estaciones meteorológicas automáticas a su cargo.*
- *Al Comité de la presente tesis, por el seguimiento y orientación brindada para la culminación de esta investigación.*

## DATOS BIOGRÁFICOS



### Datos personales

Nombre:	Jorge Jaimes Rodríguez
Fecha de nacimiento:	23 de abril de 1991
Lugar de nacimiento:	Tejupilco de Hidalgo, Estado de México
No. de cartilla militar:	D-0143308
CURP:	JARJ910423HMCMDR07
Cédula profesional licenciatura:	09085562
Cédula profesional maestría:	10636523

### Desarrollo académico

- Bachillerato: Preparatoria Agrícola; Universidad Autónoma Chapingo (UACH)
- Licenciatura: Ingeniería en Recursos Naturales Renovables; UACH
- Maestría: Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua; UACH

## RESUMEN GENERAL

Respuesta de la cuenca alta Laja-Peñuelitas, ante escenarios de cambio climático y uso del suelo

Conocer la respuesta de una cuenca ante cambios es de vital importancia para cualquier tomador de decisiones. El objetivo del presente trabajo fue obtener la respuesta hidrológica de la cuenca alta Laja-Peñuelitas a través del comportamiento del hidrograma en la estación hidrométrica Puente Dolores, ante escenarios potenciales de cambio climático y uso del suelo y vegetación. El modelo HEC-HMS fue calibrado/validado hasta la estación hidrométrica Puente Dolores, el modelo calibrado presentó un desempeño NSE (0.768) y el mejor desempeño del modelo validado NSE (0.542), clasificando los rendimientos del modelo como muy bueno y satisfactorio respectivamente. Utilizando el programa RClimDex se analizó los cambios en los extremos de precipitación, empleando los índices de cambio climático desarrollados por el ETCCDI, mostrando una tendencia estadística no significativa ascendente (62.09 %) y significativa ascendente (14.05 %), indicando que en la cuenca es posible establecer el mantenimiento y ligero aumento en el comportamiento y cantidad de la precipitación. Finalmente, a través del modelo hidrológico calibrado se analizó la sensibilidad del hidrograma ante cambios potenciales en el clima (incrementos en precipitación en 10 %, 20 % y 30 %) y uso del suelo y vegetación (incremento y decremento en 10 % en el número de curva de escurrimiento), partiendo de información de los índices de cambio climático y del análisis de diferentes series de uso del suelo y vegetación de INEGI. Los resultados indican que tanto incrementos en precipitación o en el número de curva de escurrimiento aumentaron considerablemente el comportamiento del caudal en el hidrograma calibrado, presentando un efecto aun mayor ante la combinación clima-uso, con un máximo caudal pico de  $131.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  representando un aumento del 195.76 % respecto al caudal pico calibrado, mostrando que un aumento potencial en la precipitación y/o superficies impermeables intensificara el escurrimiento generado en la cuenca.

**Palabras clave:** Modelación hidrológica, HEC-HMS, RClimDex, cambio climático, uso del suelo y vegetación.

---

Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: M.I. Jorge Jaimes Rodríguez.

Director de Tesis: Dra. Laura Alícia Ibáñez Castillo.

## GENERAL ABSTRACT

Response of the upper Laja-Peñuelitas watershed, to scenarios of climate change and land use

Knowing the response of a watershed to changes is of vital importance for any decision maker. The objective of this work was to obtain the hydrological response of the upper Laja-Peñuelitas watershed through the behavior of the hydrograph at the Puente Dolores hydrometric station, to potential scenarios of climate change and land use and vegetation. The HEC-HMS model was calibrated/validated up to the Puente Dolores hydrometric station, the calibrated model presented an NSE performance (0.768) and the best performance of the validated NSE model (0.542), classifying the model performance as very good and satisfactory respectively. Using the RClimDex program the changes in precipitation extremes were analyzed, employing the climate change indices developed by the ETCCDI, showing a non-significant ascendent statistical trend (62.09 %) and a significant ascendent (14.05 %), indicating that in the watershed it is possible to establish the maintenance and light increase in the behavior and amount of precipitation. Finally, through the calibrated hydrological model the sensitivity of the hydrograph was analyzed to potential changes in climate (increases in precipitation in 10 %, 20 %, and 30 %) and land use and vegetation (increase and decrease in 10 % in the runoff curve number), beginning on information from climate change indices and the analysis of different series of land use and vegetation from INEGI. The results indicate that either increases in precipitation or in the number of the runoff curve considerably increased the behavior of the flow in the calibrated hydrograph, presenting an even greater effect with the climate-use combination, with a maximum peak flow of  $131.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  representing an increase of 195.76 % with respect to the calibrated peak flow, showing that a potential increase in precipitation and/or impervious surfaces will intensify the runoff generated in the watershed.

**Keywords:** Hydrological modeling, HEC-HMS, RClimDex, climate change, land use and vegetation.

---

Doctoral Thesis in Engineering, Postgraduate Degree in Agricultural Engineering and Integral Use of Water, Chapingo Autonomous University.  
Author: M.I. Jorge Jaimes Rodríguez.  
Advisor: Ph. D. Laura Alcía Ibáñez Castillo.

# 1. CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Proporcionar estimaciones útiles de la respuesta de un sistema hidrológico (es decir, una cuenca de captación o cuenca) en todos los lugares (es decir, calibrados y no calibrados) es posiblemente el desafío en el modelado de lluvia-escurrimiento (Vergara et al., 2016). El poder conocer el comportamiento hidrológico histórico y el potencial futuro en una cuenca es una herramienta vital tanto para autoridades como dueños y/o poseedores de los recursos naturales, ya que permite desarrollar estrategias de prevención, mitigación y adaptación a nivel cuenca ante un clima cambiante y una mayor intervención humana dentro de los procesos naturales que se desarrollan en esta.

Con datos limitados o inexistentes, la comprensión cuantitativa y la predicción de los procesos de generación de escurrimiento y su transmisión al punto de salida representan una de las áreas más desafiantes de la hidrología; la modelación hidrológica es una herramienta comúnmente utilizada para estimar la respuesta hidrológica de la cuenca debido a la precipitación (Halwatura & Najim, 2013).

Con más del 60% de la población mundial viviendo a menos de 1 km de las aguas superficiales, principalmente a lo largo de ríos y a lo largo de la costa, las inundaciones tienen un gran impacto en el bienestar humano a escala global (Jonkman, 2005; Tockner & Stanford, 2002). En México destacan entre los desastres naturales más frecuentes y los que ocasionan mayores pérdidas tanto de vidas como económicas (Ellis, Romero, Hernández, Gallo, & Alanís, 2012). Los daños económicos causados por inundaciones suman casi la mitad del total de todos los desastres naturales en el país (CENAPRED, 2001; Salas & Jiménez, 2007).

En México, la respuesta hidrológica de las cuencas ante el cambio de uso del suelo y vegetación ha sido abordada a través del análisis independiente de los componentes climático y de gestión del suelo; sin embargo, el análisis combinado del cambio climático y uso del suelo y vegetación no ha sido plenamente estudiado. Adicionalmente la generación de escenarios de cambio climático ha partido de información de modelos de circulación general (GCM) o a través de la generación de reducciones en la precipitación a través de información bibliográfica, no contemplando las variaciones generadas a nivel cuenca.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca alta Laja-Peñuelitas a través del comportamiento del hidrograma de salida en la cuenca ante diversos escenarios potenciales de cambio climático en precipitación y de uso del suelo y vegetación.

En el **capítulo I** se presenta el modelo hidrológico calibrado/validado de la cuenca alta Laja-Peñuelitas, Guanajuato, México, hasta la estación hidrométrica Puente Dolores, utilizando el programa HEC-HMS a partir de datos provenientes de estaciones meteorológicas automáticas a cada 2 horas. El **capítulo II** muestra la obtención de índices de cambio climático en precipitación para la cuenca alta Laja-Peñuelitas para el periodo 1982-2017, utilizando el programa RClimDex a partir de datos de lluvia diaria. El **capítulo III** presenta la utilización del modelo HEC-HMS calibrado junto con la evidencia generada a través de los índices de cambio climático en precipitación y la evolución de los usos del suelo y vegetación de INEGI para evaluar la sensibilidad del hidrograma calibrado ante escenarios potenciales de cambio climático y de uso del suelo y vegetación.

### **1.1. Literatura citada**

CENAPRED. (2001). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México* (1a ed.; O. Zepeda R & S. González M, eds.). Ciudad de México, México: Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana -

Centro Nacional de Prevención de Desastres.

- Ellis, E. A., Romero, J. A., Hernández, I. U., Gallo, C. A., & Alanís, J. L. (2012). Evaluación geográfica de áreas susceptibles a inundación en la cuenca del río Tuxpan, Veracruz. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 16(1), 7–28.
- Halwatura, D., & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software*, 46, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- Jonkman, S. N. (2005). Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods. *Natural Hazards*, 34, 151–175. <https://doi.org/10.1007/s11069-004-8891-3>
- Salas S, M. A., & Jiménez E, M. (2007). *Inundaciones* (1a ed.). México, D.F: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.
- Tockner, K., & Stanford, J. A. (2002). Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29(3), 308–330. <https://doi.org/10.1017/S037689290200022X>
- Vergara, H., Kirstetter, P. E., Gourley, J. J., Flamig, Z. L., Hong, Y., Arthur, A., & Kolar, R. (2016). Estimating a-priori kinematic wave model parameters based on regionalization for flash flood forecasting in the Conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 541, 421–433. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.011>

## **2. CAPÍTULO II**

### **REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **2.1. Modelación hidrológica**

El modelado de lluvia-escorrentamiento (es decir, modelado de cuencas hidrográficas) intenta simular el proceso de transformación de los hietogramas de lluvia en hidrogramas de escorrentamiento; hay varios modelos hidrológicos disponibles con diferentes grados de complejidad y precisión, los modelos de lluvia-escorrentamiento disponibles se pueden dividir en tres grupos principales: los modelos agrupados, los modelos semidistribuidos y los complicados modelos distribuidos (Gad, 2013).

##### **2.1.1. Modelo HEC-HMS**

HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) es un software de modelado hidrológico desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU-Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) (Felman, 2000). Esta físicamente basado y conceptualmente semidistribuido, diseñado para simular el proceso de lluvia-escorrentamiento en una amplia gama de áreas geográficas (Mokhtari, Remini, & Hamoudi, 2016). HEC-HMS está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrentamiento de sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas, aplicable en una amplia gama de áreas geográficas para resolver la mayor variedad posible de problemas, esto incluye el suministro de agua de las grandes cuencas fluviales y la hidrología de inundaciones, el escorrentamiento de cuencas pequeñas urbanas o naturales; los hidrogramas producidos por el programa se utilizan directamente o junto con otro software para estudios de disponibilidad de agua, impacto de urbanización futura, reducción de daños por inundaciones, etc., (Scharffenberg, Bartles, Brauer, Fleming, & Karlovits, 2018).

Estudios recientes han utilizado HEC-HMS en México como herramienta para la modelación hidrológica (Alarcón, Chávez, Palacios, & Ibáñez, 2020; Cázares-Rodríguez, Vivoni, & Mascaro, 2017; Espinosa-López, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, & Galeana-Pizaña, 2020; Granados-Olivas et al., 2016; Meza-Prieto & Aparicio, 2018; Montero & Ibáñez, 2017; Montiel, Prado, Vázquez, Ibáñez, & Pascual, 2019; Mounir, Che, González-Parra, & Robles-Morua, 2019; Prado-Hernández et al., 2019; Salomón-Guzmán, Ibáñez-Castillo, & Palerm-Viqueira, 2019; Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, & Arévalo-Galarza, 2018; Zúñiga, Domínguez, & Quevedo, 2018; Zúñiga & López, 2016).

## **2.2. Cambio climático**

IPCC (2014) define el cambio climático como la variación del estado del clima identificable (ej. mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos; el cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo.

La intensa actividad industrial ha provocado un aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre durante las últimas décadas, por lo que se ha reconocido el fenómeno del cambio climático; el aumento de los gases de efecto invernadero ha cambiado los patrones y tendencias de las variables climáticas extremas que son de gran importancia en la agricultura, los recursos hídricos y los peligros ambientales (Fathian et al., 2020).

### 2.2.1. Extremos climáticos

En el contexto del calentamiento global, la variación y las tendencias de los eventos climáticos extremos (Figura 1), como las heladas de finales de primavera, tormentas de viento, clima extremadamente caluroso, sequía severa o humedad prolongada del suelo que coincide con climas cálidos, han recibido recientemente mucha atención, ya que son más sensibles a los cambios climáticos que los valores medios (Alexander et al., 2007; Klein & Konnen, 2003; Williams, Kniveton, & Layberry, 2010).

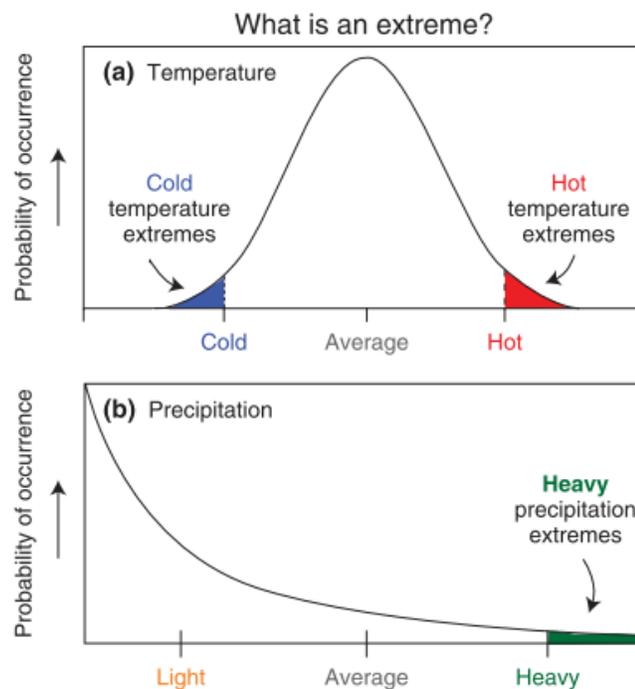


Figura 1. Representación esquemática de extremos climáticos. Fuente: Zhang et al. (2011).

Existen dos enfoques para analizar los extremos climáticos regionales, uno es utilizar modelos sofisticados del sistema climático, como los modelos climáticos regionales (RCM), la otra forma de analizar los extremos climáticos regionales es detectar tendencias estadísticas en los datos históricos, lo que ha demostrado ser eficaz (Wang et al., 2013).

Los primeros son Impulsados por modelos de circulación general (GCM) como condiciones de frontera, los RCM proporcionan variabilidad regional simulada de variables climáticas a diferentes escalas temporales (Cooley & Sain, 2010; Kyselý, Beranová, Pícek, & Stepánek, 2008; Marengo, Jones, Alves, & Valverde, 2009; Sylla, Gaye, Jenkins, Pal, & Giorgi, 2010). Sin embargo, las simulaciones en una resolución más fina con RCM forzadas por GCM están sujetas a grandes incertidumbres, que conducen a una variación en los cambios predichos por el modelo en los extremos más grande que la variabilidad natural (Kjellström et al., 2007). Las condiciones de frontera de los GCM también suelen causar sesgos sistemáticos en la simulación regional (Noguer, Jones, & Murphy, 1998). Algunos sesgos sistemáticos pueden amplificarse durante la búsqueda de eventos más extremos como temperaturas máximas y mínimas (Moberg & Jones, 2004).

Fathian et al. (2020) mencionan que los estudios que evalúan las tendencias climáticas pasadas en los extremos climáticos de temperatura y precipitación han progresado significativamente (Alexander et al., 2006; Ávila, Justino, Wilson, Bromwich, & Amorim, 2016; Karki, Hasson, Schickhoff, Scholten, & Böhner, 2017; Kharin & Zwiers, 2000; Nkemelang, New, & Zaroug, 2018; Shrestha et al., 2017; Whan et al., 2014), además, existen algunos estudios sobre la evaluación de las tendencias en los extremos climáticos para una mejor y más precisa comprensión de los cambios que ya han ocurrido en las condiciones climáticas globales en todo el mundo (Nicholls et al., 1996).

### **2.2.2. Índices de cambio climático & RCLimDex**

El corolario en la ciencia del clima es que los promedios mensuales suavizan una gran cantidad de información importante, como la que caracteriza el comportamiento de los extremos que suelen ser responsables de los impactos; los índices derivados de los datos diarios son un intento de extraer información objetivamente de las observaciones meteorológicas diarias que responden a

preguntas sobre los extremos que afectan a muchos sistemas humanos y naturales (Zhang et al., 2011).

Los índices climáticos describen el estado y los cambios en ciertos aspectos del sistema climático (Zhang et al., 2011), como la duración de los períodos húmedos y secos, el número de días en que se superan los umbrales de temperatura o precipitación y las frecuencias de superación por encima o por debajo de un umbral (Sillmann, Kharin, Zhang, Zwiers, & Bronaugh, 2013). Describen relaciones complejas mejor que los datos climáticos básicos y requieren datos fiables y de alta calidad, con series de tiempo largas y sin discontinuidades (Persson, Bärring, Kjellström, Strandberg, & Rummukainen, 2007). En términos generales, los índices que caracterizan aspectos de las colas lejanas de la distribución tienden a ser más relevantes para la sociedad y los sistemas naturales que los índices que caracterizan aspectos de la distribución que ocurren con mayor frecuencia, esto se debe a que cuanto más extremo es un evento, es más probable que cause daños sociales o ambientales (Zhang et al., 2011).

La información sobre ciertos tipos de extremos se ha recopilado durante muchos años, la información sobre el número de días con heladas y/o la fecha de la primera helada de otoño y la última helada de primavera se ha recopilado en algunas zonas desde la época medieval (Zhang et al., 2011). En algunas áreas, estas colecciones forman parte del registro documental del que se infiere información sobre el clima en el período preinstrumental (Luterbacher, 2004).

El Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) ha venido impulsando a escala global el cálculo de índices de cambio climático a partir de datos diarios (Vázquez, 2010). El uso sistemático de dichos índices ha permitido mejorar el diagnóstico global de los cambios en extremos de temperatura y precipitación (Alexander et al., 2006), contribuyendo al reporte de

evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Trenberth et al., 2007).

El ETCCDI ha desarrollado y puesto a disponibilidad de la comunidad internacional herramientas de software (ej. RClimDex, RHtests, FClimDex, etc.) y documentación con el fin de facilitar el cálculo de los índices de cambio climático (disponibles en el sitio electrónico del ETCCDI) (Vázquez, 2010). Los índices son calculados a partir de las series de datos observados de temperatura y precipitación, los índices de puntos de observación individuales pueden ser posteriormente agregados en series regionales representativas del área geográfica analizada, los índices del ETCCDI proveen una base teórica común de modo que pueden ser calculados consistentemente en diferentes regiones del planeta para luego comparar o integrar los resultados de diversas regiones (Vázquez, 2010). En total, se definieron 27 índices como se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Listado de los índices climáticos básicos del ETCCDI<sup>2</sup>.

No	ID	Nombre del indicador	Definición	Unidades
1	FD0	Frost days (Días de heladas)	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) < 0 °C	día
2	SU25	Summer days (Días de verano)	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) > 25 °C	día
3	ID0	Ice days (Días de hielo)	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) < 0 °C	día
4	TR20	Tropical nights (Noches tropicales)	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) > 20 °C	día
5	GSL	Growing season length (Duración de la estación de cultivo)	Anual (1st ene a 31st dic en HN, 1st julio a 30th junio en HS) cuenta entre el primer periodo de por lo menos 6 días con TG > 5 °C y primer periodo	día

			después de julio 1 (enero 1 en HS) de 6 días con TG < 5 °C	
6	TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
7	TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
8	TXn	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
9	TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
10	TN10p	Cool nights (Noches frías)	Porcentaje de días cuando TN < 10th percentil	día
11	TX10p	Cool days (Días fríos)	Porcentaje de días cuando TX < 10th percentil	día
12	TN90p	Warm nights (Noches calientes)	Porcentaje de días cuando TN > 90th percentil	día
13	TX90p	Warm days (Días calientes)	Porcentaje de días cuando TX > 90th percentil	día
			Días	
14	WSDI	Warm spell duration indicador (Indicador de la duración de periodos calientes)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX > 90th percentil	día
15	CSDI	Cold spell duration indicador (indicador de la duración de periodos fríos)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN < 10th percentil	día
16	DTR	Diurnal temperature range (rango diurno de temperatura)	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C
17	RX1day	Max 1-day precipitation amount (Cantidad máxima de precipitación en un día)	Máximo anual de precipitación en 1 día	mm
18	RX5day	Max 5-day precipitation amount (Cantidad máxima de precipitación en 5 días)	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
19	SDII	Simple daily intensity index (Índice simple de intensidad diaria)	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por la precipitación ≥ 1.0 mm) en un año	mm día <sup>-1</sup>

20	R10	Number of heavy precipitation days (Número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que la precipitación $\geq$ 10 mm	día
21	R20	Number of very heavy precipitation days (Número de días con precipitación muy intensa)	Número de días en un año en que la precipitación $\geq$ 20 mm	día
22	Rnn	Number of days above nn mm (Número de días sobre nn mm)	Número de días en un año en que la precipitación $\geq$ nn mm	día
23	CDD	Consecutive dry days (Días secos consecutivos)	Número máximo de días secos consecutivos con $RR < 1$ mm	día
24	CWD	Consecutive wet days (Días húmedos consecutivos)	Número máximo de días húmedos consecutivos con $RR \geq 1$ mm	día
25	R95p	Very wet days (Días muy húmedos)	Precipitación anual total en que $RR > 95$ percentil	mm
26	R99p	Extremely wet days (Días extremadamente húmedos)	Precipitación anual total en que $RR > 99$ percentil	mm
27	PRCPTOT	Annual total wet-day precipitation (Precipitación total anual en los días húmedos)	Precipitación anual total en los días húmedos ( $RR \geq 1$ mm)	mm

<sup>2</sup>Las abreviaciones son las siguientes: TX (Temperatura máxima); TN (Temperatura mínima); TG (Temperatura media); RR (precipitación diaria); un día húmedo es definido cuando  $RR \geq 1$  mm y un día seco cuando  $RR < 1$  mm; nn es un parámetro definido por el usuario en milímetros (mm). Fuente: Zhang and Yang (2004a); Zhang and Yang (2004b); Vázquez (2010); Ruiz-Álvarez, Singh, Enciso-Medina, Ontiveros-Capurata, and Santos (2020).

RClimDex está diseñado para proporcionar una interfase amigable para calcular índices de extremos climáticos; calcula todos los 27 índices básicos recomendados por el Equipo de Expertos de CCI/CLIVAR para “Climate Change Detection Monitoring and Índices” (ETCCDMI) así como también otros índices de temperatura y precipitación con límites definidos por el usuario; uno de los principales objetivos de construir índices de extremos climáticos es para usarlos

para estudios de monitoreo y detección de cambios climáticos (Zhang & Yang, 2004b).

### **Control de calidad de datos**

El control de calidad de los datos es un paso necesario antes del análisis de la variación de temperatura y precipitación porque los valores atípicos erróneos pueden afectar seriamente las tendencias (Yan et al., 2014). RClimDex en primera instancia el programa reemplaza todos los datos faltantes (actualmente codificados como -99.9) en un formato interno que reconoce R (disponible de <https://www.r-project.org/>) (ej. NA, no disponible), y reemplaza todos los valores no razonables por NA; estos valores incluyen a) cantidades de precipitación diarias menores que cero y b) Temperatura máxima diaria menor que temperatura mínima diaria (Zhang & Yang, 2004b). Posteriormente, la ejecución adicional implica la identificación de posibles valores atípicos, que deben manualmente verificarse, validarse, corregirse o eliminarse (Yan et al., 2014).

Tanto para la precipitación como para la temperatura, los gráficos de datos permiten la inspección visual para revelar más valores atípicos, así como problemas que causan cambios en el ciclo estacional o la variación de los datos (Aguilar et al., 2005; New et al., 2006). Aguilar et al. (2005) indican que los datos sospechosos deben ser validados, configurados como faltantes o corregidos con la ayuda del conocimiento climático local. La información sobre cómo el software efectúa el proceso del control de calidad de datos es proporcionada por Zhang and Yang (2004b).

### **Homogeneización de datos de precipitación**

Las series de datos climáticos generalmente contienen cambios artificiales debido a cambios inevitables en el instrumento de observación (u observador), la ubicación, el medio ambiente y las prácticas/procedimientos de observación que

tienen lugar durante el período de recopilación de datos. Las discontinuidades de datos también surgen de la tecnología en constante evolución del monitoreo climático. Es importante detectar puntos de cambio artificiales en las series de datos climáticos porque estos cambios artificiales podrían sesgar considerablemente los resultados de las tendencias climáticas, la variabilidad y el análisis de extremos (Wang, Chen, Wu, Feng, & Pu, 2010).

La evaluación de la homogeneidad puede ser bastante compleja y, a menudo, requiere estaciones vecinas cercanas, historial detallado de la estación y una serie de tiempo larga (Vincent et al., 2005). El paquete de software RHtests\_dlyPrpcp es similar a los paquetes RHtestsV3 y RHtestsV4, excepto que está específicamente diseñado para la homogeneización de series temporales de datos de precipitación diaria (Wang & Feng, 2013). Se basa en el algoritmo transPMFred (Wang et al., 2010), que integra un procedimiento de transformación de Box-Cox adaptativo de datos en el algoritmo PMFred (Wang, 2008a). El algoritmo PMFred se basa en la prueba F máxima penalizada (PMF) (Wang, 2008b), que está integrada en un algoritmo de prueba recursiva (Wang, 2008a) y se utiliza en el caso "sin una serie de referencia" en los paquetes RHtestsV3 y RHtestsV4.

Para el proceso de homogeneización de la serie de datos se incluye un ajuste por cuantiles QM (Quantile Matching Algorithm) en los casos donde las series no resultaron homogéneas (Wang & Feng, 2013). La información sobre cómo el software detecta inconsistencias y efectúa el proceso de homogeneización es proporcionada por Wang and Feng (2013).

### **2.3. Respuesta hidrológica**

La respuesta hidrológica a un evento de precipitación se puede interpretar como un proceso de flujo puramente mecánico, donde el agua migra de un potencial

hidráulico más alto a más bajo (Park, Sudicky, Brookfield, & Jones, 2011). En sencillas palabras podría decirse que es el comportamiento que tendrá una cuenca ante un evento de precipitación.

La respuesta hidrológica en una cuenca montañosa está controlada en gran medida por las propiedades del paisaje cercanas a la superficie (forma de relieve y características del suelo) que funcionan como filtros hidrológicos (Meybeck & Vörösmarty, 2005); sin embargo, las variaciones son a menudo no lineales y difíciles de representar (Beven & Germann, 1982; Troch, Paniconi, & van Loon, 2003).

La evaluación de la respuesta hidrológica de la cuenca es fundamental para la adopción e implementación de una gestión adecuada de los recursos hídricos para asegurar la producción sostenible de los recursos hídricos (Getachew, Manjunatha, & Bhat, 2021).

### **2.3.1. Respuesta hidrológica ante el cambio climático**

Según el quinto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático-IPCC-5AR (IPCC, 2013a), la emisión antropogénica de gases de efecto invernadero ha aumentado drásticamente en la última década, provocando muchos de los cambios observados en el clima y el calentamiento global. El IPCC-AR5 tiene en cuenta cuatro trayectorias diferentes de concentración de gases de efecto invernadero (es decir, vías de concentración representativas-RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5) para hacer proyecciones, correspondientes a cuatro posibles hipótesis sobre el aumento de la emisión de gases de efecto invernadero en los años siguientes por venir (Pumo, Arnone, Francipane, Caracciolo, & Noto, 2017).

Incluso considerando el escenario menos pesimista (es decir, RCP 2.6), las proyecciones futuras dibujan un mayor calentamiento y alteraciones duraderas

en todos los componentes del sistema climático, con las regiones secas volviéndose más secas y las regiones húmedas más húmedas y, como consecuencia, un aumento en disparidad entre regiones secas y húmedas (Donat, Lowry, Alexander, O’Gorman, & Maher, 2016).

Los efectos potenciales más significativos del cambio climático pueden incluir el aumento en la frecuencia y magnitud de sequías e inundaciones y cambios en el suministro de agua debido a los cambios esperados en la precipitación, temperatura, humedad, humedad del suelo, escurrimiento y otros componentes importantes del ciclo hidrológico (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008).

El cambio climático influye en la hidrología de una cuenca al cambiar los procesos hidrológicos como el patrón de precipitación, la evapotranspiración y la infiltración, lo que conduce a variaciones espacio-temporales en los patrones de flujo de la superficie y del subsuelo (Hassan, 2017; Shooshtari & Gholamalifard, 2015; Osei et al., 2019).

Se espera que el cambio climático provoque una intensificación del ciclo global del agua (Eckart, McPhee, & Bolisetti, 2017), resultando que el escurrimiento aumente durante el siglo XXI (Huntington, 2006). Las consecuencias del cambio climático a escala de la cuenca dependen de las características de la misma, y se deduce que cuanto más estrés y demandas se imponen al sistema, más vulnerable podría ser a estos cambios (Arnell, 2000).

Se proyecta que los cambios en el clima tendrán consecuencias significativas sobre el régimen de caudal y la respuesta hidrológica de muchas cuencas en todo el mundo (Nazif, Tavakolifar, & Eslamian, 2007; Pumo, Caracciolo, Viola, & Noto, 2016; Pumo, Lo Conti, Viola, & Noto, 2017; Stahl et al., 2010; Viola, Caracciolo, Forestieri, Pumo, & Noto, 2017; Viola et al., 2017).

### **2.3.2. Respuesta hidrológica ante el cambio de uso del suelo y vegetación**

El cambio climático no es el único factor que influye en los recursos hídricos, la disponibilidad de recursos hídricos también se ve afectada por las complejidades del uso del suelo / cobertura del suelo (Getachew et al., 2021).

En materia del uso del suelo y vegetación, el IPCC (2014) define el uso el suelo como el conjunto de disposiciones, actividades e insumos (conjunto de actividades humanas) adoptados para cierto tipo de cubierta terrestre; la expresión uso del suelo se utiliza también en el sentido de los fines sociales y económicos que persigue la ordenación de las tierras (ej., pastoreo, y extracción y conservación de madera); en los asentamientos urbanos se refiere a los usos de los terrenos dentro de las ciudades y sus barrios exteriores.

Asimismo el IPCC (2014) señala que el cambio de uso del suelo es el cambio del uso o la gestión del suelo por los seres humanos, que puede originar una modificación de la cubierta terrestre; el cambio de la cubierta terrestre y del uso del suelo puede afectar al albedo de la superficie, la evapotranspiración, las fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero o a otras propiedades del sistema climático y pueden, por consiguiente, producir un forzamiento radiativo u otros impactos sobre el clima, a nivel local o global.

Varias fuerzas de cambio, como los patrones demográficos, la variabilidad climática, las políticas nacionales y las actividades macroeconómicas, han contribuido a cambios significativos en la cobertura y el uso de la tierra, que a su vez tienen un efecto en el sistema hidrológico tanto a nivel de cuenca como regional (Gosling & Arnell, 2016; Legesse, Vallet-Coulomb, & Gasse, 2003).

Los recursos hídricos están influenciados por diferentes usos del suelo, como la industrialización, la urbanización, la silvicultura y la agricultura (Getachew et al., 2021). El cambio en el uso del suelo afecta seriamente los recursos hídricos

principalmente al dividir la cantidad de lluvia en intercepción, evapotranspiración, infiltración y almacenamiento de humedad del suelo, lo que afecta la disponibilidad de hidrología de cuencas (Mango, Melesse, McClain, Gann, & Setegn, 2011; Mishra et al., 2010).

Los cambios en la cobertura del suelo son una preocupación fundamental en los países en desarrollo debido al rápido crecimiento de la población y las economías basadas en la agricultura (Getachew et al., 2021). El cambio de la cobertura terrestre dentro de una cuenca también se reconoce como un factor importante que afecta el escurrimiento (Chang, 2007), y es posible que la transformación de la tierra en todo el mundo pueda tener una mayor influencia en el escurrimiento que el cambio climático (Vorosmarty, 2000).

Gosling and Arnell (2016) sugirieron que incluso en ausencia de cambio climático, se proyecta que la escasez de agua se expandirá significativamente debido a la presencia de una creciente presión humana sobre los recursos hídricos.

### **2.3.3. Respuesta hidrológica combinada ante el cambio climático y uso del suelo y vegetación**

Las características hidrológicas de una cuenca dependen de una variedad de factores, incluido el clima regional y el grado de desarrollo, los cambios en uno o ambos de estos factores pueden alterar significativamente el volumen y el momento del escurrimiento en toda la cuenca (Franczyk & Chang, 2009).

Simular la respuesta hidrológica de una cuenca a diferentes condiciones de escenario implica calibrar y validar un modelo hidrológico usando las condiciones presentes y ejecutar el modelo con parámetros y datos de entrada correspondientes a las condiciones del escenario propuesto y comparar las dos simulaciones (Legesse et al., 2003).

El cambio climático y el cambio de uso de la tierra son factores clave que determinan cambios en los procesos hidrológicos en las cuencas (Marhaento, Booij, & Hoekstra, 2018). Tanto el cambio climático como el de uso de la tierra afectan la variabilidad espacial y temporal de la hidrología de la cuenca al modificar el caudal, el escurrimiento superficial, el caudal base y la evapotranspiración (Liu, Zhang, Kou, & Zhou, 2017; Rahman et al., 2015).

Las interacciones complejas entre el uso de la tierra y los cambios climáticos pueden no solo dar lugar a cambios acelerados en los procesos hidrológicos (Khoi & Suetsugi, 2014; Legesse et al., 2003), sino que también pueden compensarse entre sí (Zhang, Nan, Xu, & Li, 2016), lo que requiere más estudios (Marhaento et al., 2018).

Teklay, Dile, Asfaw, Bayabil, and Sisay (2021) mencionan que, en los últimos años, muchos estudios examinaron el impacto combinado del uso de la tierra y el cambio climático en los procesos hidrológicos (Aboelnour, Gitau, & Engel, 2019; Hyandye, Worqul, Martz, & Muzuka, 2018; Koch et al., 2015), los hallazgos de estos estudios destacan constantemente los componentes del balance hídrico, incluidos el flujo de los arroyos, el escurrimiento superficial, el agua subterránea y la evapotranspiración, que probablemente se vean afectados por el uso futuro de la tierra y los cambios climáticos, sin embargo, los impactos relativos del uso de la tierra y el cambio climático pueden variar de un lugar a otro debido a la velocidad y extensión de los cambios en el clima y el uso de la tierra, por ejemplo, algunos estudios han encontrado que los procesos hidrológicos se ven más afectados por el cambio climático que por el cambio de uso de la tierra (Aboelnour et al., 2019; Mekonnen, Duan, Rientjes, & Disse, 2018), y otros estudios han indicado que los impactos del uso de la tierra los cambios son más significativos en comparación con los impactos del cambio climático (Mwangi, Julich, Patil, McDonald, & Feger, 2016; Yin, He, Xiong, & Qiu, 2017).

La interacción entre el cambio climático y el cambio de uso de la tierra no es lineal (Jung, Chang, & Moradkhani, 2011). Teklay et al. (2021) señalan que algunos estudios informaron que el aumento en el caudal debido al cambio de uso de la tierra se amplificó al humedecer los escenarios climáticos (Marhaento et al., 2018), y otros estudios encontraron que el cambio climático podría compensar sustancialmente el incremento del escurrimiento debido a la urbanización (Sunde, He, Hubbart, & Urban, 2018), resaltando la importancia de considerar la combinación de escenarios para comprender el impacto de los cambios ambientales en la disponibilidad futura de los recursos hídricos.

Franczyk and Chang (2009) mencionan que el efecto combinado de estas dos variables ha sido objeto de un mayor escrutinio en los últimos años para evaluar la influencia regional del cambio climático en las cuencas hidrográficas urbanizadas.

Investigar los efectos de los cambios en el clima y el uso de la tierra en la hidrología de las cuencas tiene una gran importancia práctica (Sunde et al., 2018). La investigación que intente evaluar la disponibilidad futura de recursos hídricos regionales incorporaría ambos aspectos en sus métodos de modelado (Wagener, 2007).

#### **2.3.4. Implicaciones de la respuesta hidrológica ante el cambio climático y uso del suelo y vegetación**

Los ingenieros hidráulicos, de recursos hídricos y otros profesionales del agua se enfrentan hoy al desafío de diseñar y evaluar el desempeño futuro de la infraestructura hidráulica que bien puede estar sujeta a descargas y volúmenes de flujo sustancialmente diferentes de los conocidos hoy en día (Denault, Millar, & Lence, 2006).

En pequeñas cuencas urbanas, el cambio climático que produce un aumento de las precipitaciones o, lo que es más importante, un aumento de la intensidad de las precipitaciones aumentará la magnitud de las descargas de diseño; un supuesto importante en el enfoque tradicional de diseño de infraestructura es la estacionariedad, que es que los parámetros estadísticos de las variables hidrológicas permanecen constantes en el tiempo, sin grandes fluctuaciones o tendencias a largo plazo, sin embargo, si el cambio climático está contribuyendo a cambios a largo plazo en la precipitación o la intensidad de la precipitación, esta suposición de estacionariedad se vuelve errónea (Denault et al., 2006).

En general, si bien los impactos del cambio climático serán espacialmente diversos, la literatura parece consistente en reafirmar que agregará estrés adicional a los desafíos de la gestión de aguas pluviales urbanas, especialmente con el factor adicional de una mayor urbanización (Eckart et al., 2017).

### **2.3.5. Generación de escenarios de cambio climático y uso del suelo y vegetación**

IPCC (2013) define escenario como la descripción plausible de un futuro verosímil, basada en un conjunto consistente y coherente de supuestos sobre las fuerzas motrices (ej., el ritmo de la evolución tecnológica y los precios) y sobre las relaciones más importantes; obsérvese que los escenarios no son ni predicciones ni pronósticos, pero son útiles ya que ofrecen un panorama de las consecuencias de la evolución de distintas situaciones y medidas.

#### **Escenarios de cambio climático**

IPCC (2013) menciona que un escenario climático es la representación plausible y en ocasiones simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas internamente coherente definido explícitamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropógeno, y que puede

introducirse como datos entrantes en los modelos de impacto las proyecciones climáticas suelen utilizarse como punto de partida para definir escenarios climáticos, aunque estos requieren habitualmente información adicional, por ejemplo sobre el clima actual observado; un escenario de cambio climático es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual.

Las estimaciones de los escenarios futuros de cambio climático, a diferencia de las predicciones, representan un cambio entre el clima actual y algún escenario climático futuro plausible (McCarthy, Canziani, Leary, Dokken, & White, 2001).

Smith and Pitts (1997) señalan que la selección de escenarios que sean útiles para los responsables de la formulación de políticas afecta la gama de escenarios que se utilizarán, para los evaluadores de impactos influye en el nivel de resultados detallados que deben tener los escenarios, para los participantes de los estudios de país afecta el nivel de sofisticación necesario para que los investigadores creen los escenarios; además de satisfacer las necesidades de las diferentes audiencias mencionadas anteriormente, los escenarios deben cumplir la mayor cantidad posible de los siguientes criterios: a) Los escenarios deben ser consistentes con estimaciones globales ampliamente aceptadas del cambio climático, b) Los escenarios deben ser físicamente plausibles e internamente coherentes, c) Los escenarios deben estimar un número suficiente de variables a una escala espacial y temporal adecuada para su uso en modelos de evaluación de la vulnerabilidad, d) Los escenarios deben reflejar un rango regional de cambio climático potencial.

Smith and Pitts (1997) consideran tres fuentes de información para recomendar escenarios de cambio climático: GCM, períodos cálidos analógicos y escenarios incrementales. Denault et al. (2006) señalan la utilización del análisis de tendencias.

### *Modelos de Circulación General (GCM)*

Los GCM son representaciones matemáticas de muchos procesos de la atmósfera, el océano y la superficie terrestre basadas en las leyes de la física (Smith & Pitts, 1997). Dichos modelos consideran una amplia gama de procesos físicos que caracterizan el sistema climático y se han utilizado para examinar el impacto del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en el clima global (Gates, Mitchell, Boer, Cubasch, & Meleshko, 1992). Estiman cambios para docenas de variables meteorológicas en el clima regional en cuadros de cuadrícula que suelen tener 3 o 4 grados de latitud y hasta 10 grados de longitud (Smith & Pitts, 1997).

La ventaja de utilizar GCM es que a) satisfacen total o parcialmente los cuatro criterios para seleccionar escenarios, b) los GCM se han ejecutado con un aumento de los gases de efecto invernadero, por lo tanto las estimaciones regionales del cambio climático son consistentes con los cambios globales en el clima provocados por el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero, c) resuelven las leyes fundamentales de la física y, por lo tanto, los cambios estimados en las variables climáticas regionales son aproximadamente consistentes, d) proporcionan estimaciones de los cambios diarios en numerosas variables en la escala de la cuadrícula, e) se pueden utilizar técnicas relativamente simples para crear escenarios diarios de cambio climático a escala local basados en este resultado de los GCM (Smith & Pitts, 1997).

Una de las principales desventajas de los GCM es que no representan con precisión el clima actual a escala regional (Grotch & MacCracken, 1991; Kalkstein, 1991; Robock et al., 1993). En muchos casos, los patrones estacionales básicos de precipitación se tergiversan, por lo tanto, los GCM no se consideran lo suficientemente confiables como para proporcionar predicciones del cambio climático regional (Smith & Pitts, 1997).

Aplicación de este método puede observarse en a través de diversos autores (Barlage, Richards, Sousounis, & Brenner, 2002; Bessah et al. 2020; Chanapathi & Thatikonda, 2020; Chang, 2003; Franczyk & Chang, 2009; Getachew et al., 2021; Guo, Fang, Xu, Tian, & Xie, 2020; Hejazi & Moglen, 2007; Huq & Abdul-Aziz, 2021; Hung, James, Carbone, & Williams, 2020; Hyandye et al., 2018; Karlsson et al., 2016; Mandal et al., 2021; Marhaento et al., 2018; Mendoza-Ponce, Corona-Nuñez, Kraxner, Leduc, & Patrizio, 2018; Montenegro & Ragab, 2012; Neupane, White, & Alexander, 2015; Osei et al., 2019; Oti, Kobo-bah, & Ofosu, 2020; Pandey, Khare, Kawasaki, & Meshesha, 2021; Peng et al., 2021; Shrestha & Htut, 2016; Strasser et al., 2019; Teklay et al., 2021; Wang et al., 2020; Wilk & Hughes, 2002; Worku, Teferi, Bantider, & Dile 2021).

### *Períodos cálidos analógicos*

Los períodos cálidos analógicos son períodos del pasado en los que el clima fue más cálido que ahora durante un período prolongado de tiempo; la ventaja de los periodos analógicos es que proporcionan cambios físicamente consistentes en el clima regional y pueden hacerlo a una escala más fina que los GCM, la desventaja de los períodos cálidos analógicos es que probablemente fueron causados por forzamientos distintos del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero; los períodos cálidos analógicos tienden a tener un grado relativamente bajo de calentamiento global, alrededor de 1 °C, y por lo tanto no reflejan una amplia gama de posibles cambios climáticos, por último, es posible que los datos para estos escenarios analógicos no existan en muchos países (Smith & Pitts, 1997).

### *Escenarios incrementales*

Estos también se conocen como cambios arbitrarios en el clima y generalmente implican cambios uniformes en el clima anual, como +2 °C y +4 °C combinados con ningún cambio en la precipitación 0 ± 10 % y 20 % de cambios en la

precipitación; la ventaja de los escenarios incrementales es que se pueden utilizar para representar una amplia gama de posibles cambios climáticos, como el aumento y la disminución de las precipitaciones, además, estos escenarios se pueden utilizar para examinar la sensibilidad de los sectores a los cambios en una variable climática en particular; dado que los cambios incrementales son arbitrarios, no se puede estar seguro de que sean consistentes con el cambio climático global causado por el aumento de gases de efecto invernadero, además, los escenarios incrementales pueden incluir combinaciones de variables que es poco probable que sucedan realmente (como un aumento de temperatura y ningún cambio mensual en la precipitación o asumir un cambio uniforme en una variable en un área grande) (Smith & Pitts, 1997).

Aplicación de este método puede observarse en diversos autores (Legesse et al., 2003; Nunes, Seixas, Keizer, & Ferreira, 2009; Pumo et al., 2017; Sharma, Vorosmarty, & Morre III, 2000; Tripathi, Sengupta, Patra, Chang, & Jung, 2014); No obstante en la generación de escenarios incrementales diversos estudios parten de información previa, por ejemplo, proyecciones globales (Pumo et al., 2017) y estudios anteriores (Nunes et al., 2009).

### *Análisis de tendencia*

El análisis de tendencias mediante regresión lineal ofrece varias ventajas, incluida la simplicidad y la capacidad combinada para detectar y cuantificar tendencias no estacionarias, y por lo tanto parece ser el método más adecuado para obtener futuros escenarios regionales de precipitación en los que se pueden identificar tendencias (Denault et al., 2006).

### **Escenarios de cambio de uso del suelo y vegetación**

Los escenarios de uso del suelo y vegetación se han generado de diversas maneras ya sea utilizando técnicas o modelos de generación tales como:

proyecciones de autoridades (Barlage et al., 2002; Chang, 2003; Marhaento et al., 2018), conjuntos de datos de cobertura terrestre de centros de investigación como PNW-ERC (Franczyk & Chang, 2009), Integrated Climate and Land-Use Scenarios (ICLUS) (Huq & Abdul-Aziz, 2021), modelo integrado de cadena de Markov y el modelo CA-Markov (Du et al., 2012; Getachew et al., 2021; Hyandye et al., 2018; Mahmoud & Alazba, 2015; Marhaento et al., 2018; Pandey et al., 2021; Wang et al., 2020), modificación de la cobertura vegetal (Chanapathi & Thatikonda, 2020; Guo et al., 2020; Hejazi & Moglen, 2007; Karlsson et al., 2016; Lin, Verburg, Chang, Chen, & Chen, 2009; Montenegro & Ragab, 2012; Neupane et al., 2015; Nunes et al., 2009; Osei et al., 2019; Peng et al., 2021; Sharma et al., 2000; Strasser et al., 2019; Teklay et al., 2021; Wilk & Hughes, 2002; Zhang et al., 2020), incrementos-reducción en el número de curva de escurrimiento (Tripathi et al., 2014), información histórica (Legesse et al., 2003), sistema interactivo basado en SIG (What if?) (McColl & Aggett, 2007), Dinámica EGO (Mendoza-Ponce et al., 2018), CLUE-S (Shrestha & Htut, 2016), Land Change Modeler (Palomeque-de la Cruz et al., 2016), Celular Automata Landuse Change Model (Pumo et al., 2017), Module for Land-use Change Evaluation (MOLUSCE) (Teklay et al., 2021), EPA's Integrated Climate and Land-Use Scenarios (ICLUS) (Hung et al., 2020), entre otros.

### **2.3.6. Modelos hidrológicos para la evaluación de la respuesta hidrológica ante escenarios de cambio climático y uso del suelo y vegetación**

Los modelos hidrológicos son reconocidos como herramientas científicas válidas para estudiar la cantidad y calidad del agua y brindar apoyo para la gestión y planificación integradas de los recursos hídricos a diferentes escalas (D'Agostino, Trisorio, Lamaddalena, & Ragab, 2010).

Los impactos del cambio de uso del suelo y vegetación y los cambios climáticos sobre el escurrimiento generalmente se pueden identificar mediante el uso de

modelos hidrológicos (Praskievicz & Chang, 2009). Estos modelos proporcionan marcos valiosos para investigar los cambios entre varias vías hidrológicas causadas por el clima y las actividades humanas (Jiang et al., 2007; Leavesley, 1994; Wang, Yu, Shrestha, Ishidaira, & Takeuchi, 2010).

La respuesta hidrológica ante escenarios de cambio climático y de uso del suelo utilizando la modelación hidrológica comúnmente ha sido abordada a través del análisis de: a) un solo componente ya sea climático (Denault et al., 2006; Mandal et al., 2021; Oti et al., 2020; Worku et al., 2021), o de cambio de uso del suelo y vegetación (Du et al., 2012; Lin et al., 2009; Du et al., 2012; McColl & Aggett, 2007; Zhang et al., 2020), b) dos componentes separados (Legesse et al., 2003; Montenegro & Ragab, 2012; Nunes et al., 2009; Wilk & Hughes, 2002) y c) el análisis combinado (Barlage et al., 2002; Chanapathi & Thatikonda, 2020; Chang, 2003; Franczyk & Chang, 2009; Getachew et al., 2021; Guo et al., 2020; Hejazi & Moglen, 2007; Hyandye et al., 2018; Hung et al., 2020; Huq & Abdul-Aziz, 2021; Karlsson et al., 2016; Marhaento et al., 2018; Neupane et al., 2015; Osei et al., 2019; Peng et al., 2021; Pumo et al., 2017; Sharma et al., 2000; Shrestha & Htut, 2016; Strasser et al., 2019; Teklay et al., 2021; Tripathi et al., 2014; Wang et al., 2020).

Los modelos hidrológicos se utilizan comúnmente para estudiar el efecto del cambio climático y de uso del suelo y vegetación enfocados principalmente en el escurrimiento superficial. La modelación hidrológica a través del análisis combinado clima-uso del suelo se ha realizado a través de la utilización de numerosos modelos tales como: BATS/HYDRO (Barlage et al., 2002), AVGWLF (Chang, 2003), SWAT (Chanapathi & Thatikonda, 2020; Franczyk & Chang, 2009; Getachew et al., 2021; Guo et al., 2020; Hyandye et al., 2018; Karlsson et al., 2016; Mandal et al., 2021; Marhaento et al., 2018; Neupane et al., 2015; Osei et al., 2019; Peng et al., 2021; Shrestha & Htut, 2016; Teklay et al., 2021; Wang

et al., 2020), WBM (Sharma et al., 2000), HEC-HMS (Tripathi et al., 2014), modelos de regresión (Hejazi & Moglen, 2007), Pitman Model (Wilk & Hughes, 2002), NAM (Karlsson et al., 2016), MIKE-SHE (Karlsson et al., 2016), tRIBS (Pumo et al., 2017), SWMM (Hung et al., 2020; Huq & Abdul-Aziz, 2021), WaSiM (Strasser et al., 2019), entre otros.

#### 2.4. Literatura citada

- Aboelnour, M., Gitau, M. W., & Engel, B. A. (2019). Hydrologic Response in an Urban Watershed as Affected by Climate and Land-Use Change. *Water*, 11, 1603. <https://doi.org/10.3390/w11081603>
- Aguilar, E., Peterson, T. C., Ramírez O, P., Frutos, R., Retana, J. A., Solera, M., ... Mayorga, R. (2005). Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research*, 110, D23107. <https://doi.org/10.1029/2005JD006119>
- Alarcón N, A., Chávez M, J., Palacios V, Ó. L., & Ibáñez C, L. A. (2020). Estimación de áreas vulnerables a inundaciones en zonas urbanas: Morelia, Michoacán, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(3), 1–26. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-03-01>
- Alexander, L. V., Hope, P., Collins, D., Trewin, B., Lynch, A., & Nicholls, N. (2007). Trends in Australia's climate means and extremes: A global context. *Australian Meteorological Magazine*, 56, 1–18.
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein T, A. M. G., ... Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Arnell, N. W. (2000). Thresholds and response to climate change forcing: The water sector. *Climatic Change*, 46, 305–316. <https://doi.org/10.1023/A:1005699210660>
- Ávila, A., Justino, F., Wilson, A., Bromwich, D., & Amorim, M. (2016). Recent precipitation trends, flash floods and landslides in southern Brazil. *Environmental Research Letters*, 11(11), 114029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/11/114029>
- Barlage, M. J., Richards, P. L., Sousounis, P. J., & Brenner, A. J. (2002). Impacts of Climate Change and Land Use Change on Runoff from a Great Lakes Watershed. *Journal of Great Lakes Research*, 28(4), 568–582. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(02\)70606-0](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(02)70606-0)

- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). *El Cambio Climático y el Agua: Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (B. C. Bates, Z. W. Kundzewicz, S. Wu, & J. P. Palutikof, eds.). Ginebra, Suiza: Secretaría del IPCC.
- Bessah, E., Raji, A. O., Taiwo, O. J., Agodzo, S. K., Ololade, O. O., & Strapasson, A. (2020). Hydrological responses to climate and land use changes: The paradox of regional and local climate effect in the Pra River Basin of Ghana. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100654. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100654>
- Beven, K., & Germann, P. (1982). Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 18(5), 1311–1325. <https://doi.org/10.1029/WR018i005p01311>
- Cázares-Rodríguez, J. E., Vivoni, E. R., & Mascaro, G. Comparison of Two Watershed Models for Addressing Stakeholder Flood Mitigation Strategies: Case Study of Hurricane Alex in Monterrey, México. , 22 *Journal of Hydrologic Engineering* 05017018 (2017).
- Chanapathi, T., & Thatikonda, S. (2020). Investigating the impact of climate and land-use land cover changes on hydrological predictions over the Krishna river basin under present and future scenarios. *Science of The Total Environment*, 721, 137736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137736>
- Chang, H. (2003). Basin Hydrologic Response to Changes in Climate and Land Use: the Conestoga River Basin, Pennsylvania. *Physical Geography*, 24(3), 222–247. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.24.3.222>
- Chang, H. (2007). Comparative streamflow characteristics in urbanizing basins in the Portland Metropolitan Area, Oregon, USA. *Hydrological Processes*, 21, 211–222. <https://doi.org/10.1002/hyp.6233>
- Cooley, D., & Sain, S. R. (2010). Spatial Hierarchical Modeling of Precipitation Extremes From a Regional Climate Model. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 15(3), 381–402. <https://doi.org/10.1007/s13253-010-0023-9>
- D'Agostino, D. R., Trisorio, L. G., Lamaddalena, N., & Ragab, R. (2010). Assessing the results of scenarios of climate and land use changes on the hydrology of an Italian catchment: modelling study. *Hydrological Processes*, 24(19), 2693–2704. <https://doi.org/10.1002/hyp.7765>
- Denault, C., Millar, R. G., & Lence, B. J. (2006). Assessment of possible impacts of climate change in an urban catchment. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 685–697. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04485.x>

- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5), 508–513. <https://doi.org/10.1038/nclimate2941>
- Du, J., Qian, L., Rui, H., Zuo, T., Zheng, D., Xu, Y., & Xu, C.-Y. (2012). Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. *Journal of Hydrology*, 464–465, 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.057>
- Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of The Total Environment*, 607–608, 413–432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>
- Espinosa-López, J. A., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., & Galeana-Pizaña, J. M. (2020). Modelo hidrológico distribuido con imágenes GPM-IMERG en la cuenca del río Huaynamota, Nayarit, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(5), 344–383. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-05-09>
- Fathian, F., Ghadami, M., Haghighi, P., Amini, M., Naderi, S., & Ghaedi, Z. (2020). Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1119–1133. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00704-020-03157-9>
- Felman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual* (A. D. Felman, ed.). Davis, CA: U.S Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Franczyk, J., & Chang, H. (2009). The effects of climate change and urbanization on the runoff of the Rock Creek basin in the Portland metropolitan area, Oregon, USA. *Hydrological Processes*, 23(6), 805–815. <https://doi.org/10.1002/hyp.7176>
- Gad, M. A. (2013). A useful automated rainfall-runoff model for engineering applications in semi-arid regions. *Computers & Geosciences*, 52, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.09.023>
- Gates, W. L., Mitchell, J. F. B., Boer, G. J., Cubasch, U., & Meleshko, V. P. (1992). Climate Modelling, Climate Prediction and Model Validation. In *Climate Change 1992: The Supplementary Report to The IPCC Scientific Assessment* (pp. 97–135). Cambridge, UK: WMO/UNEP Intergovernmental Panel on Climate Change-Cambridge University Press.
- Getachew, B., Manjunatha, B. R., & Bhat, H. G. (2021). Modeling projected impacts of climate and land use/land cover changes on hydrological responses in the Lake Tana Basin, upper Blue Nile River Basin, Ethiopia.

- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134, 371–385. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0853-x>
- Granados-Olivas, A., Alatorre-Cejudo, L. C., Adams, D., Serra, Y. L., Esquivel-Ceballos, V. H., Vázquez-Gálvez, F. A., ... Eastoe, C. (2016). Runoff Modeling to Inform Policy Regarding Development of Green Infrastructure for Flood Risk Management and Groundwater Recharge Augmentation along an Urban Subcatchment, Ciudad Juarez, Mexico. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, (159), 50–61.
- Grotch, S. L., & MacCracken, M. C. (1991). The Use of General Circulation Models to Predict Regional Climatic Change. *Journal of Climate*, 4(3), 286–303. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0286:TUOGCM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0286:TUOGCM>2.0.CO;2)
- Guo, Y., Fang, G., Xu, Y.-P., Tian, X., & Xie, J. (2020). Identifying how future climate and land use/cover changes impact streamflow in Xinanjiang Basin, East China. *Science of The Total Environment*, 710, 136275. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136275>
- Hassan, M. M. (2017). Monitoring land use/land cover change, urban growth dynamics and landscape pattern analysis in five fastest urbanized cities in Bangladesh. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 7, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.07.001>
- Hejazi, M. I., & Moglen, G. E. (2007). Regression-based approach to low flow prediction in the Maryland Piedmont region under joint climate and land use change. *Hydrological Processes*, 21(14), 1793–1801. <https://doi.org/10.1002/hyp.6374>
- Hung, C.-L. J., James, L. A., Carbone, G. J., & Williams, J. M. (2020). Impacts of combined land-use and climate change on streamflow in two nested catchments in the Southeastern United States. *Ecological Engineering*, 143, 105665. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105665>
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319, 83–95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- Huq, E., & Abdul-Aziz, O. I. (2021). Climate and land cover change impacts on stormwater runoff in large-scale coastal-urban environments. *Science of The Total Environment*, 778, 146017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146017>

- Hyandye, C. B., Worqul, A., Martz, L. W., & Muzuka, A. N. N. (2018). The impact of future climate and land use/cover change on water resources in the Ndembera watershed and their mitigation and adaptation strategies. *Environmental Systems Research*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0110-4>
- IPCC. (2013a). *Climate change 2013 The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley, eds.). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC. (2013b). Glosario. In T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. Plattner, S. K. Allen, ... P. M. Midgley (Eds.), *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (pp. 185–204). Cambridge, Reino Unido; NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). Anexo II: Glosario. In K. J. Mach, S. Plattner, & C. von Stechow (Eds.), *Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (pp. 127–141). Ginebra, Suiza: IPCC.
- Jiang, T., Chen, Y. D., Xu, C., Chen, X., Chen, X., & Singh, V. P. (2007). Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. *Journal of Hydrology*, 336, 316–333. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.01.010>
- Jung, I.-W., Chang, H., & Moradkhani, H. (2011). Quantifying uncertainty in urban flooding analysis considering hydro-climatic projection and urban development effects. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 617–633. <https://doi.org/10.5194/hess-15-617-2011>
- Kalkstein, L. S. (Ed.). (1991). *Global Comparisons of Selected GCM Control Runs and Observed Climate Data*. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency.
- Karki, R., Hasson, S. ul, Schickhoff, U., Scholten, T., & Böhner, J. (2017). Rising Precipitation Extremes across Nepal. *Climate*, 5(1), 4. <https://doi.org/10.3390/cli5010004>
- Karlsson, I. B., Sonnenborg, T. O., Refsgaard, J. C., Trolle, D., Børgesen, C. D., Olesen, J. E., ... Jensen, K. H. (2016). Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. *Journal of Hydrology*, 535, 301–317. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.069>

- Kharin, V. V., & Zwiers, F. W. (2000). Changes in the Extremes in an Ensemble of Transient Climate Simulations with a Coupled Atmosphere–Ocean GCM. *Journal of Climate*, 13(21), 3760–3788. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3760:CITEIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3760:CITEIA>2.0.CO;2)
- Khoi, D. N., & Suetsugi, T. (2014). The responses of hydrological processes and sediment yield to land-use and climate change in the Be River Catchment, Vietnam. *Hydrological Processes*, 28, 640–652. <https://doi.org/10.1002/hyp.9620>
- Kjellström, E., Barring, L., Jacob, D., Jones, R., Lenderink, G., & Schär, C. (2007). Modelling daily temperature extremes: recent climate and future changes over Europe. *Climatic Change*, 81, 249–265. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9220-5>
- Koch, H., Biewald, A., Liersch, S., Azevedo, J. R. G. de, Silva, G. N. S. da, Kölling, K., ... Hattermann, F. F. (2015). Scenarios of climate and land-use change, water demand and water availability for the São Francisco River basin. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, (36), 96–114. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820151007>
- Kysely, J., Beranová, R., Pícek, J., & Stepánek, P. (2008). Simulation of summer temperature extremes over the Czech Republic in regional climate models. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(5), 645–661. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0319>
- Leavesley, G. H. (1994). Modeling the effects of climate change on water resources - a review. *Climatic Change*, 28(1–2), 159–177. <https://doi.org/10.1007/BF01094105>
- Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., & Gasse, F. (2003). Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 275, 67–85. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00019-2)
- Lin, Y., Verburg, P. H., Chang, C., Chen, H.-Y., & Chen, M. (2009). Developing and comparing optimal and empirical land-use models for the development of an urbanized watershed forest in Taiwan. *Landscape and Urban Planning*, 92, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.003>
- Liu, J., Zhang, C., Kou, L., & Zhou, Q. (2017). Effects of Climate and Land Use Changes on Water Resources in the Taoer River. *Advances in Meteorology*, 2017, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/1031854>
- Luterbacher, J. (2004). European Seasonal and Annual Temperature Variability, Trends, and Extremes Since 1500. *Science*, 303, 1499–1503. <https://doi.org/10.1126/science.1093877>

- Mahmoud, S. H., & Alazba, A. A. (2015). Hydrological Response to Land Cover Changes and Human Activities in Arid Regions Using a Geographic Information System and Remote Sensing. *PLOS ONE*, *10*(4), e0125805. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125805>
- Mandal, U., Sena, D. R., Dhar, A., Panda, S. N., Adhikary, P. P., & Mishra, P. K. (2021). Assessment of climate change and its impact on hydrological regimes and biomass yield of a tropical river basin. *Ecological Indicators*, *126*, 107646. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107646>
- Mango, L. M., Melesse, A. M., McClain, M. E., Gann, D., & Setegn, S. G. (2011). Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. *Hydrology and Earth System Sciences*, *15*, 2245–2258. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2245-2011>
- Marengo, J. A., Jones, R., Alves, L. M., & Valverde, M. C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, *29*, 2241–2255. <https://doi.org/10.1002/joc.1863>
- Marhaento, H., Booij, M. J., & Hoekstra, A. Y. (2018). Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. *Hydrological Sciences Journal*, *63*(9), 1368–1385. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1511054>
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. S. (Eds.). (2001). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (1a ed.). 40 West 20th Street, New York, NY 10011-4211, USA: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- McColl, C., & Aggett, G. (2007). Land-use forecasting and hydrologic model integration for improved land-use decision support. *Journal of Environmental Management*, *84*, 494–512. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.06.023>
- Mekonnen, D. F., Duan, Z., Rientjes, T., & Disse, M. (2018). Analysis of combined and isolated effects of land-use and land-cover changes and climate change on the upper Blue Nile River basin's streamflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*, 6187–6207. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6187-2018>
- Mendoza-Ponce, A., Corona-Núñez, R., Kraxner, F., Leduc, S., & Patrizio, P. (2018). Identifying effects of land use cover changes and climate change on terrestrial ecosystems and carbon stocks in Mexico. *Global Environmental Change*, *53*, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.08.004>

- Meybeck, M., & Vörösmarty, C. (2005). Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1–2), 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.016>
- Meza-Prieto, B., & Aparicio, J. (2018). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 69–87. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-05>
- Mishra, V., Cherkauer, K. A., Niyogi, D., Lei, M., Pijanowski, B. C., Ray, D. K., ... Yang, G. (2010). A regional scale assessment of land use/land cover and climatic changes on water and energy cycle in the upper Midwest United States. *International Journal of Climatology*, 30, 2025–2044. <https://doi.org/10.1002/joc.2095>
- Moberg, A., & Jones, P. D. (2004). Regional climate model simulations of daily maximum and minimum near-surface temperatures across Europe compared with observed station data 1961-1990. *Climate Dynamics*, 23, 695–715. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0464-3>
- Mokhtari, E. H., Remini, B., & Hamoudi, S. A. (2016). Modelling of the rain–flow by hydrological modelling software system HEC-HMS – watershed’s case of wadi Cheliff-Ghrib, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 30(VII–IX), 87–100. <https://doi.org/10.1515/jwld-2016-0025>
- Montenegro, S., & Ragab, R. (2012). Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. *Journal of Hydrology*, 434–435, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.036>
- Montero M, M. J., & Ibáñez H, Ó. F. (2017). *La cuenca del río Conchos: una mirada desde las ciencias ante el cambio climático*.
- Montiel G, R., Prado H, J. V., Vázquez P, M. A., Ibáñez C, L. A., & Pascual R, F. (2019). Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 37, 291. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.484>
- Mounir, A., Che, D., Gonzalez-Parra, C., & Robles-Morua, A. (2019). Development of a Reservoir System Operation Model for Water Sustainability in the Yaqui River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(9), 04019033. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001098)
- Mwangi, H. M., Julich, S., Patil, S. D., McDonald, M. A., & Feger, K.-H. (2016). Relative contribution of land use change and climate variability on discharge of upper Mara River, Kenya. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 244–

260. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.12.059>

- Nazif, S., Tavakolifar, H., & Eslamian, S. (2007). Climate Change Impact on Urban Water Deficit. In S. Eslamian & F. Eslamian (Eds.), *Handbook of Drought and Water Scarcity, Vol. 2: Environmental Impacts and Analysis of Drought and Water Scarcity* (pp. 81–106). USA: Francis and Taylor, CRC Press.
- Neupane, R. P., White, J. D., & Alexander, S. E. (2015). Projected hydrologic changes in monsoon-dominated Himalaya Mountain basins with changing climate and deforestation. *Journal of Hydrology*, *525*, 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.048>
- New, M., Hewitson, B., Stephenson, D. B., Tsiga, A., Kruger, A., Manhique, A., ... Lajoie, R. (2006). Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa. *Journal of Geophysical Research*, *111*(D14), D14102. <https://doi.org/10.1029/2005JD006289>
- Nicholls, N., Gruza, G. V., Jouzel, J., Karl, T. R., Ogallo, L. R., & Parker, D. E. (1996). Observed climate variability and change. In J. T. Houghton, L. G. M. Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, & K. Maskell (Eds.), *Climate change 1995: the science of climate change* (pp. 133–192). Cambridge: Cambridge University Press.
- Nkemelang, T., New, M., & Zaroug, M. (2018). Temperature and precipitation extremes under current, 1.5 °C and 2.0 °C global warming above pre-industrial levels over Botswana, and implications for climate change vulnerability. *Environmental Research Letters*, *13*(6), 065016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac2f8>
- Noguer, M., Jones, R., & Murphy, J. (1998). Sources of systematic errors in the climatology of a regional climate model over Europe. *Climate Dynamics*, *14*, 691–712. <https://doi.org/10.1007/s003820050249>
- Nunes, J. P., Seixas, J., Keizer, J. J., & Ferreira, A. J. D. (2009). Sensitivity of runoff and soil erosion to climate change in two Mediterranean watersheds. Part II: assessing impacts from changes in storm rainfall, soil moisture and vegetation cover. *Hydrological Processes*, *23*(8), 1212–1220. <https://doi.org/10.1002/hyp.7250>
- Osei, M. A., Amekudzi, L. K., Wemegah, D. D., Preko, K., Gyawu, E. S., & Obiri-Danso, K. (2019). The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *25*, 100620. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100620>
- Oti, J. O., Kobo-bah, A. T., & Ofosu, E. (2020). Hydrologic response to climate change in the Densu River Basin in Ghana. *Heliyon*, *6*, e04722.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04722>

- Palomeque-De la Cruz, M. Á., Galindo-Alcántara, A., Escalona-Maurice, M. J., Ruiz-Acosta, S. D. C., Sánchez-Martínez, A. J., & Pérez-Sánchez, E. (2016). Analysis of land use change in an urban ecosystem in the drainage area of the Grijalva river, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, 23(1), 105–120. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.03.018>
- Pandey, B. K., Khare, D., Kawasaki, A., & Meshesha, T. W. (2021). Integrated approach to simulate hydrological responses to land use dynamics and climate change scenarios employing scoring method in upper Narmada basin, India. *Journal of Hydrology*, 598, 126429. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126429>
- Park, Y.-J., Sudicky, E. A., Brookfield, A. E., & Jones, J. P. (2011). Hydrologic response of catchments to precipitation: Quantification of mechanical carriers and origins of water. *Water Resources Research*, 47, W12525. <https://doi.org/10.1029/2010WR010075>
- Peng, S., Wang, C., Eguchi, S., Kuramochi, K., Kohyama, K., Yoshikawa, S., ... Hatano, R. (2021). Response of hydrological processes to climate and land use changes in Hiso River watershed, Fukushima, Japan. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 123, 103010. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103010>
- Persson, G., Barring, L., Kjellström, E., Strandberg, G., & Rummukainen, M. (2007). Climate indices for vulnerability assessments. In *Report Number RMK No. 111*. S-601 76 NORRKÖPING, Sweden: Swedish Meteorological and Hydrological Institute.
- Prado-Hernández, J. V., Pascual-Ramírez, F., Cristobal-Acevedo, D., Valentín-Paz, O. G., Carrillo-García, M., Martínez-Ruiz, A., & Sánchez-Morales, J. J. F. (2019). Application of the HEC-HMS and IBER in the numeric modeling of floods in the rio San Sebastian of the municipality of Totolapan, Morelos, México. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 239, 263–274. <https://doi.org/10.2495/WS190231>
- Praskievicz, S., & Chang, H. (2009). A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(5), 650–671. <https://doi.org/10.1177/0309133309348098>
- Pumo, D., Arnone, E., Francipane, A., Caracciolo, D., & Noto, L. V. (2017). Potential implications of climate change and urbanization on watershed hydrology. *Journal of Hydrology*, 554, 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.002>

- Pumo, D., Caracciolo, D., Viola, F., & Noto, L. V. (2016). Climate change effects on the hydrological regime of small non-perennial river basins. *Science of The Total Environment*, 542, 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.109>
- Pumo, D., Lo Conti, F., Viola, F., & Noto, L. V. (2017). An automatic tool for reconstructing monthly time-series of hydro-climatic variables at ungauged basins. *Environmental Modelling & Software*, 95, 381–400. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.045>
- Rahman, K., da Silva, A. G., Tejada, E. M., Gobiet, A., Beniston, M., & Lehmann, A. (2015). An independent and combined effect analysis of land use and climate change in the upper Rhone River watershed, Switzerland. *Applied Geography*, 63, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.021>
- Robock, A., Turco, R. P., Harwell, M. A., Ackerman, T. P., Andressen, R., Chang, H.-S., & Sivakumar, M. V. K. (1993). Use of general circulation model output in the creation of climate change scenarios for impact analysis. *Climatic Change*, 23(4), 293–335. <https://doi.org/10.1007/BF01091621>
- Ruiz-Alvarez, O., Singh, V. P., Enciso-Medina, J., Ontiveros-Capurata, R. E., & Santos, C. A. C. (2020). Observed trends in daily extreme precipitation indices in Aguascalientes, Mexico. *Meteorological Applications*, 27(1), 1–20. <https://doi.org/10.1002/met.1838>
- Salomón-Guzmán, E. G., Ibáñez-Castillo, L. A., & Palerm-Viqueira, J. (2019). Evaluation of a hypothetical suppression scenario of the spate irrigation system in Coeneo-Huaniqueo, Michoacán, Mexico. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 11(1), 21–38. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2018.03.003>
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., & Karlovits, G. (2018). *Hydrologic modeling system (HEC-HMS): User's manual Version 4.3*. Davis, CA: U.S Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC).
- Sharma, K. P., Vorosmarty, C. J., & Morre III, B. (2000). Sensitivity of the Himalayan hydrology to land-use and climatic changes. *Climatic Change*, 47, 117–139. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1005668724203>
- Shooshtari, S. J., & Gholamalifard, M. (2015). Scenario-based land cover change modeling and its implications for landscape pattern analysis in the Neka Watershed, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 1, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2015.05.001>
- Shrestha, A. B., Bajracharya, S. R., Sharma, A. R., Duo, C., & Kulkarni, A. (2017). Observed trends and changes in daily temperature and precipitation extremes over the Koshi river basin 1975-2010. *International Journal of*

- Climatology*, 37(2), 1066–1083. <https://doi.org/10.1002/joc.4761>
- Shrestha, S., & Htut, A. Y. (2016). Land Use and Climate Change Impacts on the Hydrology of the Bago River Basin, Myanmar. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(6), 819–833. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9511-9>
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 1716–1733. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50203>
- Smith, J. B., & Pitts, G. J. (1997). Regional climate change scenarios for vulnerability and adaptation assessments. *Climatic Change*, 36, 3–21. <https://doi.org/10.1023/A:1005300731681>
- Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L. M., van Lanen, H. A. J., Sauquet, E., ... Jódar, J. (2010). Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 2367–2382. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2367-2010>
- Strasser, U., Förster, K., Formayer, H., Hofmeister, F., Marke, T., Meißl, G., ... Schermer, M. (2019). Storylines of combined future land use and climate scenarios and their hydrological impacts in an Alpine catchment (Brixental/Austria). *Science of The Total Environment*, 657, 746–763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.077>
- Sunde, M. G., He, H. S., Hubbart, J. A., & Urban, M. A. (2018). An integrated modeling approach for estimating hydrologic responses to future urbanization and climate changes in a mixed-use midwestern watershed. *Journal of Environmental Management*, 220, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.05.025>
- Sylla, M. B., Gaye, A. T., Jenkins, G. S., Pal, J. S., & Giorgi, F. (2010). Consistency of projected drought over the Sahel with changes in the monsoon circulation and extremes in a regional climate model projections. *Journal of Geophysical Research*, 115, D16108. <https://doi.org/10.1029/2009JD012983>
- Teklay, A., Dile, Y. T., Asfaw, D. H., Bayabil, H. K., & Sisay, K. (2021). Impacts of Climate and Land Use Change on Hydrological Response in Gumara Watershed, Ethiopia. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21(2), 315–332. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2020.12.001>
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., ... Zhai, P. (2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, ... M. Tignor (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science*

*Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 102). <https://doi.org/10.5194/cp-6-379-2010>

- Tripathi, R., Sengupta, S. K., Patra, A., Chang, H., & Jung, I. W. (2014). Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA. *Applied Geography*, *46*, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.11.007>
- Troch, P. A., Paniconi, C., & Emiel van Loon, E. (2003). Hillslope-storage Boussinesq model for subsurface flow and variable source areas along complex hillslopes: 1. Formulation and characteristic response. *Water Resources Research*, *39*(11), 1316. <https://doi.org/10.1029/2002WR001728>
- Vázquez A, J. L. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México* (1a ed.). México, D.F: Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Vincent, L. A., Peterson, T. C., Barros, V. R., Marino, M. B., Rusticucci, M., Carrasco, G., ... Karoly, D. (2005). Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960–2000. *Journal of Climate*, *18*(23), 5011–5023. <https://doi.org/10.1175/JCLI3589.1>
- Viola, F., Caracciolo, D., Forestieri, A., Pumo, D., & Noto, L. V. (2017). Annual runoff assessment in arid and semiarid Mediterranean watersheds under the Budyko's framework. *Hydrological Processes*, *31*(10), 1876–1888. <https://doi.org/10.1002/hyp.11145>
- Vorosmarty, C. J. (2000). Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth. *Science*, *289*, 284–288. <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.284>
- Wagener, T. (2007). Can we model the hydrological impacts of environmental change? *Hydrological Processes*, *21*, 3233–3236. <https://doi.org/10.1002/hyp.6873>
- Wang, G., Yu, J., Shrestha, S., Ishidaira, H., & Takeuchi, K. (2010). Application of a distributed erosion model for the assessment of spatial erosion patterns in the Lushi catchment, China. *Environmental Earth Sciences*, *61*(4), 787–797. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0391-z>
- Wang, H., Chen, Y., Xun, S., Lai, D., Fan, Y., & Li, Z. (2013). Changes in daily climate extremes in the arid area of northwestern China. *Theoretical and Applied Climatology*, *112*, 15–28. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0698-7>
- Wang, Q., Xu, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Xiang, J., Xu, Y., & Wang, J. (2020). Individual and combined impacts of future land-use and climate conditions on

- extreme hydrological events in a representative basin of the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 236, 104805. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104805>
- Wang, X. L. (2008a). Accounting for Autocorrelation in Detecting Mean Shifts in Climate Data Series Using the Penalized Maximal t or F Test. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(9), 2423–2444. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1741.1>
- Wang, X. L. (2008b). Penalized Maximal F Test for Detecting Undocumented Mean Shift without Trend Change. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(3), 368–384. <https://doi.org/10.1175/2007JTECHA982.1>
- Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., Feng, Y., & Pu, Q. (2010). New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(12), 2416–2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Wang, X. L., & Feng, Y. (2013). *RHtests\_dlyPrcp User Manual*. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada.
- Whan, K., Alexander, L. V., Imielska, A., McGree, S., Jones, D., Ene, E., ... Vaiimene, M. (2014). Trends and variability of temperature extremes in the tropical Western Pacific. *International Journal of Climatology*, 34, 2585–2603. <https://doi.org/10.1002/joc.3861>
- Wilk, J., & Hughes, D. A. (2002). Simulating the impacts of land-use and climate change on water resource availability for a large south Indian catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 47(1), 19–30. <https://doi.org/10.1080/02626660209492904>
- Williams, C. J. R., Kniveton, D. R., & Layberry, R. (2010). Assessment of a climate model to reproduce rainfall variability and extremes over Southern Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 99, 9–27. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0124-y>
- Worku, G., Teferi, E., Bantider, A., & Dile, Y. T. (2021). Modelling hydrological processes under climate change scenarios in the Jemma sub-basin of upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Climate Risk Management*, 31, 100272. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100272>
- Yan, G., Qi, F., Wei, L., Aigang, L., Yu, W., Jing, Y., ... Qianqian, M. (2014). Changes of daily climate extremes in Loess Plateau during 1960–2013. *Quaternary International*, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.08.052>
- Yin, J., He, F., Xiong, Y. J., & Qiu, G. Y. (2017). Effects of land use/land cover and climate changes on surface runoff in a semi-humid and semi-arid

- transition zone in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 183–196. <https://doi.org/10.5194/hess-21-183-2017>
- Zhang, H., Wang, B., Liu, D. L., Zhang, M., Leslie, L. M., & Yu, Q. (2020). Using an improved SWAT model to simulate hydrological responses to land use change: A case study of a catchment in tropical Australia. *Journal of Hydrology*, 585, 124822. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124822>
- Zhang, L., Nan, Z., Xu, Y., & Li, S. (2016). Hydrological Impacts of Land Use Change and Climate Variability in the Headwater Region of the Heihe River Basin, Northwest China. *PLOS ONE*, 11(6), e0158394. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158394>
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Zhang, X., & Yang, F. (2004a). *Manual del Usuario RclimDex 1.0 (Versión en Español)* (J. L. Santos, ed.). Centro Internacional Para la Investigación del Fenómeno de El Niño CIIFEN.
- Zhang, X., & Yang, F. (2004b). *RClimDex (1.0) User Manual*. Ontario, Canada: Climate Research Branch, Environment Canada.
- Zúñiga L, D., Dominguez C, A., & Quevedo U, H. (2018). Hydraulic's model based on HEC-GeoRAS; HEC-HMS and ARC-MAP computer programs to assess Sediments stored on HE sink. *International Journal of Hydrology*, 2(4), 433–443. <https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00107>
- Zúñiga L, D., & López R, O. J. (2016). Caracterización de la vida útil del vaso Hermanos Escobar basada en la tasa de azolve anual observada durante las tormentas intensas propias del verano. *Culcyt*, 13(60), 52–59.

### 3. CAPÍTULO III

#### MODELO HIDROLÓGICO CALIBRADO PARA LA CUENCA ALTA LAJA- PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO

#### CALIBRATED HYDROLOGICAL MODEL FOR THE UPPER LAJA- PEÑUELITAS WATERSHED, GUANAJUATO, MEXICO

Jorge Jaimes Rodríguez<sup>1</sup>, Laura Alicia Ibáñez Castillo<sup>1\*</sup>, Gustavo Antonio Arévalo Galarza<sup>2</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Chapingo, Estado de México, CP: 56230. <sup>2</sup>Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Chapingo, Estado de México, CP: 56230.

\*Autor para correspondencia email: libacas@gmail.com.

#### Resumen

HEC-HMS es un software diseñado para simular los procesos lluvia-escurrimiento a nivel cuenca y subcuenca, siendo muy usado a nivel mundial ya que presenta diversas alternativas metodológicas a elegir. El objetivo del presente trabajo fue la modelación de eventos máximos, lluvia-escurrimiento con el programa HEC-HMS en la cuenca alta Laja-Peñuelitas; el modelo fue calibrado/validado hasta la estación hidrométrica Puente Dolores. Los modelos hidrológicos superficiales son muy usados para el diseño de estructuras hidráulicas, pronóstico de caudales, escenarios de cambio climático, análisis de cambio de uso del suelo, definición de zonas federales, etc. Sin embargo, muchas veces, al usar esos modelos, estos no han sido calibrados, lo que hace poner en duda la precisión de sus resultados. La lámina precipitada fue convertida a lámina escurrida con el método del número de curva de escurrimiento y la lámina escurrida fue convertida a hidrograma, con el hidrograma unitario del SCS. Se utilizó Muskingum en el tránsito de avenidas en cauces. Se consideraron dos presas en las cuales se realizó el tránsito de avenidas. Se trabajaron eventos del 2007, 2012 y 2014 en un tamaño de paso de 2 horas. El modelo calibrado presentó un desempeño NSE (0.768) y el mejor desempeño del modelo validado NSE (0.542), clasificando los rendimientos del modelo como muy bueno y satisfactorio respectivamente. Hay poca disponibilidad de información horaria de lluvia y caudales en México; a pesar de ello, se obtuvo un modelo hidrológico

confiable para su utilización por parte de tomadores de decisiones a nivel local, estatal o federal.

**Palabras clave:** HEC-HMS, modelación hidrológica, caudal máximo, número de curva de escurrimiento, Servicio de Conservación de Suelos, zonas de inundación.

---

Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: M.I. Jorge Jaimes Rodríguez.

Director de Tesis: Dra. Laura Alcía Ibáñez Castillo.

### **Abstract**

HEC-HMS is a software designed to simulate the rain-runoff processes at the basin and sub-basin level, being widely used worldwide since it presents various methodological alternatives to choose from. The objective of this work was the modeling of maximum events, rainfall-runoff with the HEC-HMS program in the upper Laja-Peñuelitas watershed; the model was calibrated/validated up to the Puente Dolores hydrometric station. Surface hydrological models are widely used for the design of hydraulic structures, flow forecasting, climate change scenarios, analysis of land use change, the definition of federal zones, etc. However, many times, when using these models, they have not been calibrated, which casts doubt on the precision of their results. The precipitated sheet was converted to a drained sheet with the slip curve number method and the drained sheet was converted to a hydrograph, with the SCS unit hydrograph. Muskingum was used in the transit of avenues in channels. Two dams were considered in which the transit of avenues was carried out. Events of 2007, 2012, and 2014 were worked on in a step size of 2 hours. The calibrated model presented an NSE performance (0.768) and the best performance of the validated model NSE (0.542), classifying the model performance as very good and satisfactory respectively. There is little availability of hourly information on rainfall and flows in Mexico; Despite this, a reliable hydrological model was obtained for use by decision makers at the local, state, or federal level.

**Keywords:** HEC-HMS, hydrological modeling, peak flow, runoff curve number, Soil Conservation Service, floodplain.

---

Doctoral Thesis in Engineering, Postgraduate Degree in Agricultural Engineering and Integral Use of Water, Chapingo Autonomous University.

Author: M.I. Jorge Jaimes Rodríguez.

Advisor: Ph. D. Laura Alcía Ibáñez Castillo.

### **3.1. Introducción**

México, por su situación geográfica y orográfica, está expuesto a la ocurrencia de diversos eventos climatológicos extremos. En los ríos se producen crecientes que causan inundaciones y daños materiales y humanos a las poblaciones situadas en sus márgenes. También se tienen periodos de poca precipitación y disminución en los caudales de ríos, que llevan a eventos de sequía, sobre todo entre los meses de enero a abril, y en especial en la región norte y centro del país, con sus efectos evidenciados en la baja producción agrícola, pérdidas de cabezas de ganado, problemas de abastecimiento de agua potable, etc., (Salas & Jiménez, 2007). La variación del nivel o del caudal de un río depende de las características climatológicas y físicas de la cuenca hidrográfica; entre esas características climatológicas se encuentran las distribuciones temporal y espacial de la precipitación (Tucci, 2007). La modelación hidrológica, o modelación lluvia-escorrentía, es una herramienta comúnmente utilizada para estimar la respuesta hidrológica de una cuenca debido a la precipitación. Dicha modelación puede ser utilizada para un sistema de alerta temprana por inundaciones, para el cálculo de avenidas diseño, y para modelar escenarios de cambio climático. Sin embargo, usar la herramienta de modelación en dichas aplicaciones, sería mucho más confiable, si previamente se calibra el modelo hidrológico. Por esas razones, en este trabajo se pretende generar un modelo hidrológico calibrado, con la ayuda de un software de acceso gratuito y de metodologías fáciles de usar en el contexto de la información disponible en las instituciones que manejan el agua en México. El objetivo del presente estudio fue modelar y calibrar eventos máximos, lluvia-escorrentía con el software HEC-HMS en la cuenca alta Laja-Peñuelitas, la cual se ubica en el estado de Guanajuato, México.

## 3.2. Materiales y métodos

### 3.2.1. Área de estudio

La cuenca alta Laja-Peñuelitas para este estudio fue definida hasta la estación hidrométrica 12715 “Puente Dolores”, está delimitada dentro de las coordenadas 101°31'60"O y 100°51'60"O; 21°6'0"N y 21°33'60"N, cubriendo una superficie de 1683 km<sup>2</sup>, de acuerdo con INEGI (2010b) se encuentra ubicada en el estado de Guanajuato, México, en la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago y en específico en la parte alta de la subcuenca RH12Ha Laja-Peñuelitas, representando un 23.42 % de la misma. La altitud varía de los 1890 hasta 2963 msnm (Figura 1). El río La Laja cruza la parte oriental de la ciudad de Dolores Hidalgo, Guanajuato. La cuenca de estudio posee una pendiente media de 14.33 %. La precipitación anual ponderada (periodo 1981-2010) es de 558 mm, concentrada mayormente en los meses de junio a octubre.

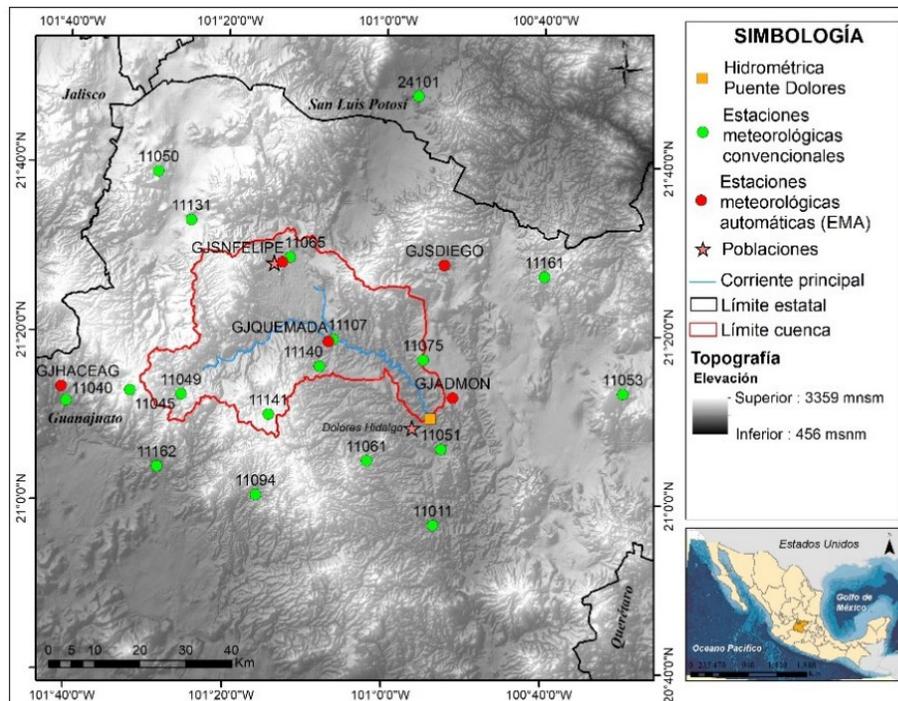


Figura 1. Ubicación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

### 3.2.2. Información empleada

Para el presente estudio se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) versión 4.3 (USACE, 2018) junto con la extensión GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension) (USACE, 2013), versión para ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012) disponibles gratuitamente en la página del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU.

#### Información topográfica

La información del relieve se obtuvo a partir del modelo digital de elevación de INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) con una resolución de pixel de 15 metros (INEGI, 2013b).

#### Información sobre uso del suelo y vegetación

Los datos de uso del suelo y vegetación se obtuvieron del Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación de la carta F14-7, serie IV y V, escala 1:250 000 (Conjunto Nacional) (INEGI, 2009; INEGI, 2013a) y del Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, serie VI (Capa Unión), escala 1:250 000, (INEGI, 2016), siendo estos agrupados en 15 categorías (Figura 2).

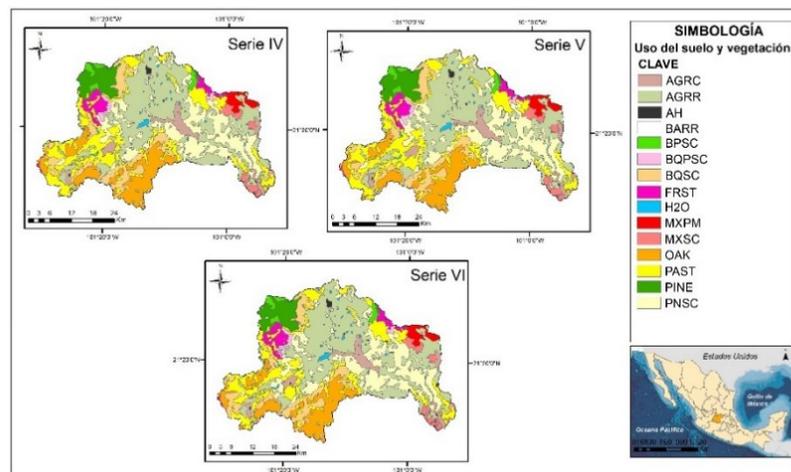


Figura 2. Usos del suelo y vegetación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Se recopilaron los valores de número de curva de escurrimiento (CN) del SCS (Soil Conservation Service) (Cuadro 1). Para identificar los números de curva de escurrimiento, se utilizaron diversas fuentes tales como las tablas originales del USDA-NRCS (United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service), CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) y la base de datos del programa SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (USDA-NRCS, 1986; CONAGUA, 1987; Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011).

Cuadro 1. Números de curva de escurrimiento en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Tipo de vegetación/uso del suelo	CLAVE	Número de curva/grupo hidrológico del suelo				Porcentaje del área de la cuenca		
		A	B	C	D	Serie IV	Serie V	Serie VI
Agricultura de riego	AGRC	62	73	81	84	4.02	3.99	3.97
Agricultura de temporal	AGRR	67	78	85	89	30.17	30.22	30.32
Asentamientos humanos	AH	77	85	90	92	0.25	0.25	0.38
Bosque de encino	OAK	45	66	77	83	9.85	9.90	9.82
Bosque de encino/vegetación secundaria arbustiva	BQSC	46	68	78	84	7.77	7.57	8.06
Bosque de encino-pino/vegetación secundaria arbustiva	BQPSC	46	68	78	84	0.79	0.79	0.85
Bosque de pino	PINE	25	55	70	77	4.38	4.38	4.34
Bosque de pino/vegetación secundaria arbustiva	BPSC	46	68	78	84	1.22	1.22	1.21
Bosque mixto (pino-encino-pino)	FRST	36	60	73	79	2.75	2.75	2.73
Cuerpos de agua	H2O	92	92	92	92	0.83	0.83	0.95
Matorral xerófilo	MXPM	49	68	79	84	1.54	1.54	1.54
Matorral xerófilo/vegetación secundaria arbustiva	MXSC	55	72	81	86	1.83	1.83	1.66

Pastizal natural e inducido	PAST	49	69	79	84	17.06	17.17	15.78
Pastizal natural/vegetación secundaria arbustiva	PNSC	35	56	70	77	17.55	17.56	18.12
Área desprovista de vegetación	BARR	77	86	91	94	0.00	0.00	0.28

La asignación de las series de uso del suelo para cada evento de simulación dependió de la tasa de vigencia de cada publicación como se observa en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Asignación de la información de INEGI de uso del suelo y vegetación.

Serie de uso del suelo y vegetación INEGI	Periodo de utilización
IV	2007-2010
V	2011-2013
VI	2014

### Información del suelo

Los datos de suelos fueron obtenidos del conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica F14-7, serie I, escala 1:250 000 (Figura 3) de INEGI (INEGI, 1998).

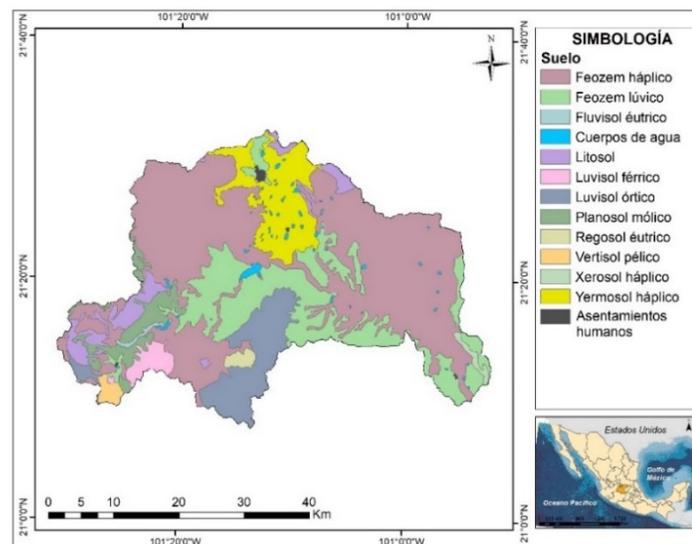


Figura 3. Suelos de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Para su ingreso al HEC-HMS se identificaron 11 tipos de suelos, mismos que a su vez se clasificaron en grupos hidrológicos basados en CONAGUA (1987) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Unidades de suelos en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Suelo	Grupo hidrológico	Porcentaje del área de la cuenca
Asentamientos humanos <sup>z</sup>	---	0.22
Cuerpos de agua <sup>z</sup>	---	0.87
Feozem háplico	C	50.44
Feozem lúvico	C	19.24
Fluvisol éutrico	B	0.28
Litosol	D	4.40
Luvisol férrico	C-D	1.69
Luvisol órtico	C-D	8.24
Planosol mólico	D	4.00
Regosol éutrico	B	0.62
Vertisol pélico	C-D	0.72
Xerosol háplico	B-C	0.47
Yermosol háplico	C	8.81

<sup>z</sup>Fueron catalogados por su comportamiento en el grupo hidrológico D.

### Información del clima

Se utilizó información de precipitación correspondiente a estaciones meteorológicas automáticas (EMA) a cargo de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), con un intervalo de registro a cada dos horas, para eventos de lluvia dentro del periodo 2007-2014. Partiendo de la eliminación de estaciones que no contaron con registros necesarios para el periodo de análisis y mediante la técnica de polígonos de Thiessen utilizada por los autores Chow, Maidment, and Mays, (1988) y Linsley, Kohler, and Paulhus (1982), se seleccionó las EMAS que presentaron influencia en la cuenca (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estaciones meteorológicas automáticas utilizadas.

Clave	Nombre	Municipio	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Elevación (msnm)
GJSNFELIPE	Cabecera San Felipe	San Felipe	-101.216	21.475	2094.0
GJHACEAG	Hacienda de Arriba	León	-101.678	21.225	1809.0
GJQUEMADA	La Quemada	San Felipe	-101.117	21.319	1998.0
GJSDIEGO	San Diego	San Diego de la Unión	-100.875	21.472	2078.0
GJADMON	Adjuntas del Monte	Dolores Hidalgo	-100.854	21.211	1953.0

### Datos hidrométricos

Los valores de caudal en metros cúbicos por segundo ( $m^3 s^{-1}$ ) se obtuvieron del BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) (CONAGUA, 2019a) de la estación hidrométrica número 12715 "Puente Dolores" ubicada en las coordenadas  $21^{\circ}10'6.98''N$  y  $100^{\circ}53'57.08''O$ . Los datos reportados de caudales corresponden solamente a 5 mediciones al día. Por ejemplo, en el evento del 2007, los datos medidos corresponden a las 7, 8, 12, 16, y 20 horas.

### Presas

Del Sistema de Seguridad de Presas (CONAGUA, 2012) se identificó las presas presentes dentro de la cuenca; por razones de simplificación del modelo, presas con almacenamientos pequeños fueron omitidas, finalizando con las presas reportadas en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Presas consideradas en el área de estudio.

Clave	Nombre	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Volumen al NAMO <sup>2</sup> ( $hm^3$ )
1402	San Juan de Llanos	21.274	-101.348	9.00
4475	Jesús María	21.352	-101.212	26.00

<sup>2</sup>NAMO: Nivel de Aguas Máximas Ordinarias.  $hm^3$  (Hectómetro cúbico).

Asimismo, se recopiló información del caudal derivado para uso agrícola a través de la obra de toma como se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Caudal derivado para uso agrícola.

Clave	Nombre	Caudal máximo derivado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
1402	San Juan de Llanos	3.45
4475	Jesús María	3.20

No existen registros de la utilización del agua almacenada en estas presas para abastecimiento público de agua potable.

### Drenaje

Para la aportación al cauce vía drenaje urbano en ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) en primera instancia se estimó la población en viviendas con drenaje como lo muestra el diagrama de la Figura 4, esto utilizando información del II Censo de Población y Vivienda INEGI del año 2005 (INEGI, 2005b) y del Censo de Población y Vivienda del año 2010 (INEGI, 2010a) para cada localidad inmersa dentro de la cuenca.

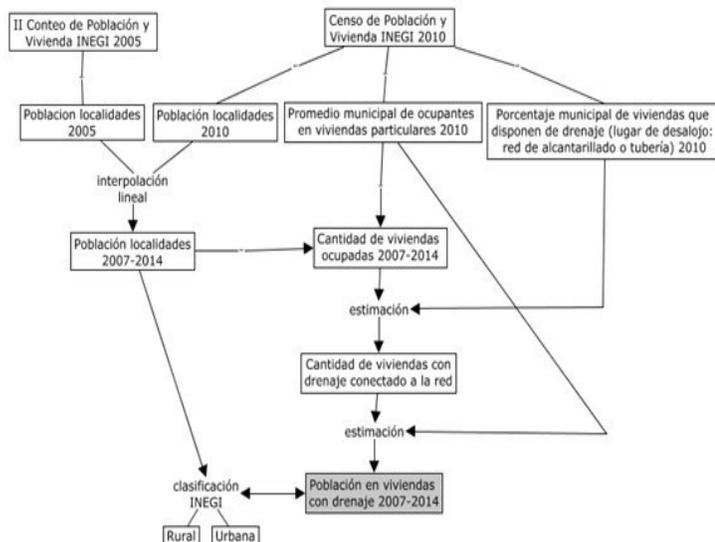


Figura 4. Diagrama metodológico de la estimación de viviendas con drenaje para el periodo 2007-2014 (Elaboración propia).

En el Cuadro 7 se muestra los resultados de la estimación de la población en viviendas con drenaje de las localidades inmersas en la cuenca de estudio.

Cuadro 7. Población en viviendas con drenaje periodo 2007-2014.

Municipio	Población en viviendas con drenaje (habitantes)							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Dolores Hidalgo	5503	5646	5788	5931	6073	6216	6358	6501
Guanajuato	133	135	137	139	141	143	144	146
León	993	1014	1034	1055	1075	1095	1116	1136
Ocampo <sup>z</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0
San Diego de la Unión	296	299	302	304	307	310	313	316
San Felipe	35526	36444	37361	38278	39195	40112	41029	41946

<sup>z</sup>Sin población dentro de la cuenca.

Cabe destacar que datos del Censo de Población y Vivienda 2020 no se encontraban aún publicados al momento de realizar el presente trabajo. El segundo paso consistió en la estimación del consumo de agua en la cuenca basado el entorno rural o urbano, partiendo de lo reportado por (CONAGUA, 2015) que considera un consumo promedio diario de 100 litros por habitante al día para el medio rural. Para el entorno urbano fue utilizada una relación clima predominante (semiseco-templado)-consumo medio en zonas urbanas, obteniendo un valor diario de 191 litros por habitante al día. IMTA (1993) menciona que es viable considerar como aportación de aguas residuales entre el 70 % y 75 % de la dotación de agua potable, en litros por habitante al día, considerando que el restante se consume antes de llegar a las atarjeas. Eligiendo para este estudio un 70 % de aportación, resultado así la aportación estimada al cauce de la cuenca alta Laja-Peñuelitas (Cuadro 8). Adicionalmente se estimó la aportación del drenaje por actividades industriales a la cuenca a partir de los estudios de disponibilidad media anual de agua en acuíferos de la CONAGUA para el estado de Guanajuato (CONAGUA, 2019b) y en particular la Cuenca Alta del río Laja que abarca un 95.75 % del área de estudio (CONAGUA, 2018) y el

porcentaje en el volumen de aprovechamientos activos de los acuíferos del estado (CEAG, 2015), que para uso industrial se considera un 3 %. Se retomó el porcentaje de aportación al drenaje del 70 % para este fin (Cuadro 9).

Cuadro 8. Aportación al drenaje a nivel municipal en la cuenca.

Municipio	Aportación drenaje ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )							
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Dolores Hidalgo	0.0045	0.0046	0.0047	0.0048	0.0049	0.0050	0.0052	0.0053
Guanajuato	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
León	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
Ocampo <sup>z</sup>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
San Diego de la Unión	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003
San Felipe	0.0481	0.0494	0.0507	0.0520	0.0533	0.0546	0.0559	0.0572

<sup>z</sup>Sin población dentro de la cuenca.

Cuadro 9. Aportación al drenaje industrial en el área de estudio para los eventos de simulación.

Acuífero	% área cuenca	Uso Industrial ( $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ )	Uso Industrial ( $\text{m}^3 \text{día}^{-1}$ )	Aportación drenaje industrial ( $\text{m}^3 \text{día}^{-1}$ )	Aportación drenaje industrial ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
Cuenca Alta del río Laja	95.76	746 370.00	408.97	286.28	0.0033
Jaral de Berrios - Villa de Reyes <sup>z</sup>	1.78	0.00	0.00	0.00	0.0000
Ocampo <sup>z</sup>	1.78	0.00	0.00	0.00	0.0000
Silao - Romita <sup>z</sup>	0.39	0.00	0.00	0.00	0.0000
Valle de León <sup>z</sup>	0.29	0.00	0.00	0.00	0.0000

<sup>z</sup>Sin presencia de zona industrial dentro de la cuenca.

### Extracciones para agua potable

El Consejo Consultivo del Agua (2001) menciona que el principal problema del estado de Guanajuato es la contaminación de sus ríos, siendo la disponibilidad de las aguas superficiales en algunas regiones nula y las aguas subterráneas han sido sobreexplotadas en un 35 % más allá de su recarga natural, además del

deterioro ambiental del Alto Lerma. Al no contar con información detallada disponible de cada una de las fuentes de agua potable para las localidades en la cuenca estudio y de acuerdo con CEAG (2016) que establece que la extracción a través de pozos es la principal fuente de agua potable, las extracciones del río para este fin se consideraron nulas para su ingreso en el modelo.

### 3.2.3. Metodología

#### Fechas de eventos considerados en el modelo

Las condiciones de control para los eventos de calibración y validación se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Especificaciones de control para los eventos de validación.

Evento	Fecha	Hora de inicio y termino (h)	Intervalo de registro de precipitación (h)
c1	29/agosto/2007 al 27/septiembre/2007	08:00	2
v1	16/junio/2007 al 04/julio/2007	08:00	2
v2	15/julio/2012 al 18/julio/2012	08:00	2
v3	30/junio/2014 al 18/julio/2014	08:00	2
v4	28/agosto/2014 al 16/septiembre/2014	08:00	2

#### Modelos de cuenca

El modelo HEC-HMS fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (Felman, 2000). Está diseñado para simular los procesos de precipitación-escorrimento de sistemas de cuencas dendríticas y ser aplicable en una amplia gama de áreas geográficas para resolver la gama más amplia posible de problemas, incluyendo el suministro de agua de grandes cuencas hidrográficas y la hidrología de inundaciones, y el pequeño escurrimiento de cuencas naturales o urbanas (Scharffenberg et al., 2018). El modelo HEC-HMS se ha aplicado a diferentes entornos geográficos, incluidas grandes cuencas

fluviales y pequeñas áreas urbanas (Olechnowicz & Weinerowska-Bords, 2014). En México existen diversos trabajos realizados con el modelo y especialmente en el estado de Guanajuato Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, y Arévalo-Galarza (2018) utilizaron HEC-HMS para la predicción de escurrimientos debidos a tormentas. En primera instancia se obtuvo el modelo base de cuenca mediante el programa HEC-GeoHMS con el uso de información topográfica, de uso del suelo y vegetación, edafológica y la ubicación tanto de presas, derivaciones y EMAS. Se seleccionaron los métodos de cálculo para modelar en HEC-HMS (Scharffenberg et al., 2018) mostrados en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Métodos de modelación HEC-HMS seleccionados para el área de estudio.

<b>Tipo de cálculo</b>	<b>Método de cálculo</b>
Lámina de lluvia a lámina escurrida	Número de curva de escurrimiento del SCS
Transformar lámina escurrida a hidrograma	Hidrograma unitario sintético del SCS
Flujo Base	Recesión
Tránsito de avenidas en cauces	Muskingum

Los números de curva generados para cada subcuenca fueron ajustados de acuerdo con las condiciones particulares de humedad antecedente (H.A) para cada evento de simulación. De acuerdo con McCuen (2004) y Aparicio (2017) el SCS define tres situaciones de condición de humedad antecedente asociándolos a la cantidad de precipitación acumulada de los cinco días previas a la fecha del evento analizado: I seco ( $CN_1$ ) (punto de marchitez permanente) equivalente a una precipitación acumulada < 25 mm, mostrada en la Ecuación (1); II ( $CN_2$ ) humedad media equivalente a una precipitación acumulada entre 25 y 50 mm, y III húmeda ( $CN_3$ ) (capacidad de campo) equivalente a precipitación acumulada > 50 mm, como se observa en la Ecuación (2). La condición de humedad II

corresponde al obtenido de las tablas del SCS. Las ecuaciones son descritas por Neitsch et al. (2011).

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 * (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636 * (100 - CN_2)])} \quad (1)$$

$$CN_3 = CN_2 * \exp[0.00673 * (100 - CN_2)] \quad (2)$$

Los números de curva para la condición de humedad II provistos en las tablas del SCS se asume son apropiados para pendientes del 5 %. Williams (1995) desarrolló una ecuación para ajustar los números de curva a pendientes diferentes como se observa en la Ecuación (3).

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} * [1 - 2 * \exp(-13.86 * slp)] + CN_2 \quad (3)$$

Donde  $CN_{2s}$  es la condición de humedad II ajustada por pendiente y  $slp$  es la fracción de la pendiente promedio para la cuenca. Para obtener los números de curva de las condiciones I y III se utiliza la Ecuación (1) y Ecuación (2) pero sustituyendo  $CN_{2s}$  en lugar de  $CN_2$ . El método del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos define un hidrograma unitario curvilíneo estableciendo primero el porcentaje de la escurrimiento unitario que ocurre antes del flujo máximo (NRCS, 2007). A continuación, se puede ajustar un hidrograma unitario triangular al hidrograma unitario curvilíneo para poder calcular la base de tiempo total del hidrograma unitario (Scharffenberg et al., 2018). El método de flujo base de recesión está diseñado para aproximarse al comportamiento típico observado en las cuencas hidrográficas cuando el flujo del canal retrocede exponencialmente después de un evento (Scharffenberg et al., 2018). HEC-HMS incluye un modelo de recesión exponencial para representar el flujo base de la cuenca (Chow et al., 1988). El modelo de recesión se ha utilizado a menudo para explicar el drenaje del almacenamiento natural en una cuenca (Linsley et al.,

1982). Recesión fue utilizado en el presente trabajo debido al comportamiento observado en los registros de la estación hidrométrica e imágenes satelitales del cauce principal, que indican que la corriente tiende a desaparecer del lecho, especialmente en temporadas de estiaje (Figura 5), esto no permite tener la certeza de un flujo base constante a través de los meses del año, si no que dependerá del escurrimiento superficial e interflujo provocado por eventos de lluvia previos y humedad del suelo.



Figura 5. Comportamiento de un tramo del cauce principal cercano a la salida de la cuenca en temporada de estiaje (04/abril/2014) (izquierda); comportamiento del cauce finalizando la temporada de lluvias (20/noviembre/2018) (derecha) (Google LLC, 2020).

Los parámetros de este modelo incluyen el flujo inicial, constante de recesión y el flujo umbral. Al mostrar corriente principal de la cuenca alta Laja-Peñuelitas un comportamiento del tipo estacional en la cual la contribución por flujo base es insignificante, el valor de flujo inicial se consideró cero. La constante de recesión o constante de decaimiento se obtuvo a partir de valores típicos propuestos por Pilgrim and Cordery (1992) como se muestra en el Cuadro 12; se consideró que el flujo base durante los eventos de simulación ocurre debido a la aportación de interflujo, esto basado en que el 69.96 % de los suelos de la cuenca son Feozem caracterizados por ser estos profundos, duros al estar secos y con alto contenido de arcillas, lo que repercute en una gran absorción de agua y aporte lento de la misma al cauce principal. Finalmente el flujo umbral se seleccionó como una

proporción al flujo máximo, el rango habitual señalado por Bedient, Huber, and Vieux (2012) es 0.05 a 0.15.

Cuadro 12. Valores típicos de la constante de recesión.

<b>Componente de flujo</b>	<b>Constante de recesión, Diaria</b>
Agua subterránea	0.95
Interflujo	0.8-0.9
Escurrecimiento superficial	0.3-0.8

El tránsito de avenidas en cauces por el método Muskingum depende principalmente de los parámetros  $K$  y  $x$ . El parámetro  $K$  se obtuvo a partir de la Ecuación (4) y Ecuación (5) presentes en Aparicio (2017).

$$K = \frac{L}{w} \quad (4)$$

$$w = 1.5 v \quad (5)$$

Donde  $K$  es el tiempo de viaje del pico de la avenida en el tramo del cauce (s),  $L$  es la longitud del cauce (m),  $w$  es la velocidad media del pico de la avenida ( $\text{m s}^{-1}$ ) y  $v$  es la velocidad media del agua ( $\text{m s}^{-1}$ ). Se estableció un valor de  $0.3 \text{ m s}^{-1}$  para la velocidad media a partir de lo señalado en Aparicio (2017) para pendientes del cauce principal de 0 % a 3 % con canales naturales no bien definidos. Asimismo Aparicio (2017) menciona que el parámetro  $x$  varía entre 0.0 y 0.5. En términos muy generales, se puede decir que  $x$  se aproxima a 0.0 en cauces muy caudalosos y de pendiente pequeña, ya 0.5 en caso contrario; si no hay datos, se recomienda tomar  $x = 0.2$  como un valor medio. Relacionado a las presas ingresaron funciones de elevación-almacenamiento y almacenamiento-descarga. Se estableció la condición inicial flujo de entrada = flujo de salida (inflow = outflow) y el método de cálculo curva de flujo de salida (outflow curve). Al no existir información disponible de los niveles del vaso con respecto al NAMO al inicio de cada evento de simulación, estos fueron replicados partiendo de la

mediana de 30 años (1978-2007) del nivel de almacenamiento de la presa 1315 “Ignacio Allende” (Cuadro 13), misma que se encuentra aguas abajo de la cuenca alta Laja-Peñuelitas sobre el mismo cauce del río La Laja. Finalmente, aguas abajo de las presas se ingresaron los valores de desviación del agua para uso agrícola como flujo constante.

Cuadro 13. Niveles con respecto al NAMO de la presa 1315 “Ignacio Allende”.

Presas	Porcentaje al inicio del evento de simulación				
	c1	v1	v2	v3	v4
Niveles de las presas respecto al NAMO	73.88	41.65	44.87	36.69	73.61

### Modelo Meteorológico

La distribución espacial de la precipitación fue realizada mediante el método Peso ponderado (Gage Weigth). Este método está diseñado para trabajar con instrumentos de precipitación y es posible elegir cualquier método para desarrollar los pesos aplicados a cada medidor de precipitación al calcular el hietograma para cada subcuenca (Scharffenberg et al., 2018). Para obtener los pesos específicos se utilizó la técnica de Polígonos de Thiessen (Figura 6).

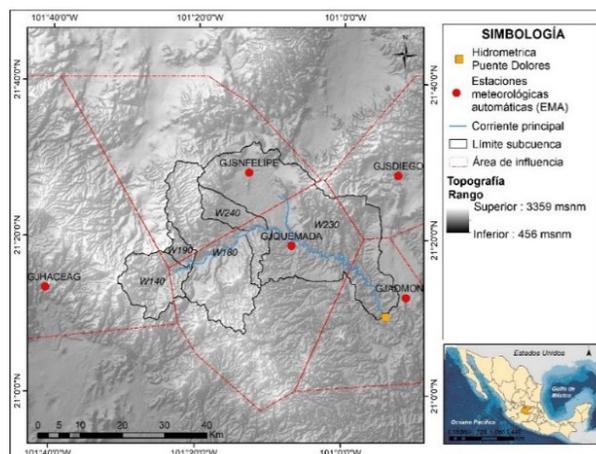


Figura 6. Área de influencia de las EMAS en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Las estaciones meteorológicas automáticas consideradas y sus polígonos resultantes se muestran en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Subcuencas y pesos asignados para cada una de las estaciones meteorológicas automáticas.

Subcuenca	EMA	Peso
W140	GJHACEAG	0.8038
	GJQUEMADA	0.1513
	GJSNFELIPE	0.0449
W180	GJQUEMADA	0.6175
	GJSNFELIPE	0.3825
W190	GJQUEMADA	0.1853
	GJSNFELIPE	0.8147
W230	GJADMON	0.1513
	GJQUEMADA	0.4607
	GJSDIEGO	0.0768
	GJSNFELIPE	0.3112
W240	GJQUEMADA	0.4569
	GJSNFELIPE	0.5431

La precipitación total acumulada para cada evento de simulación se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Precipitación acumulada para cada evento de simulación.

EMA	Precipitación acumulada por evento (mm)				
	c1	v1	v2	v3	v4
GJADMON	35.52	69.83	43.69	21.56	2.53
GJHACEAG	0.00	0.00	18.53	41.88	76.94
GJQUEMADA	87.85	115.23	28.19	71.35	62.73
GJSDIEGO	37.01	52.78	20.04	48.74	31.48
GJSNFELIPE	14.16	29.42	21.83	107.94	52.80

### Calibración y validación del modelo hidrológico

Para calibrar y validar los modelos y para fines de comparación, se requiere cierta información cuantitativa para medir el rendimiento del modelo (Golmohammadi,

Prasher, Madani, & Rudra, 2014). El modelo debe ser calibrado con respecto a los datos observados (ej. descarga del río) para mejorar la previsibilidad del modelo, que produce resultados más confiables (Halwatura & Najim, 2013; Muthukrishnan, Harbor, Lim, & Engel, 2006; Zhu, Chen, Chen, & He, 2016). Se puede estimar una serie de conjuntos de parámetros del modelo utilizando las herramientas de optimización del modelo HEC-HMS (Mishra et al., 2018). HEC-HMS cuenta con dos enfoques diferentes para la optimización del modelo: determinista y estocástico (Scharffenberg et al., 2018). En el presente trabajo se optó por una combinación de optimización determinista y manual basada en rangos establecidos. Scharffenberg et al. (2018) mencionan que la optimización determinista parte de estimaciones de parámetros iniciales y las ajusta para que los resultados simulados coincidan lo más posible con el caudal observado mediante algoritmos de búsqueda con el fin de encontrar un único conjunto óptimo, utilizando una variedad de funciones objetivas para medir la bondad de ajuste entre el flujo simulado y observado. El método determinista utilizado fue el simplex, el cual, Scharffenberg et al. (2018) señalan que evalúa todos los parámetros simultáneamente y determina qué parámetro ajustar. Seleccionando un número máximo de iteraciones de 10 000 y una tolerancia de 0.001, adicionalmente la función objetivo seleccionada en la optimización determinista fue el porcentaje de error en la descarga máxima (Percent Error in Peak Discharge), la cual tiene como motivación minimizar la diferencia entre el valor del flujo pico observado y simulado. El Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) o índice de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje de Sesgo (PBIAS) fueron utilizados por su amplia utilización en la evaluación final de resultados del modelado hidrológico. El NSE mostrado en la Ecuación (6) varía entre  $-\infty$  y 1. Indica una coincidencia perfecta entre los valores observados y los pronosticados cuando  $NSE = 1$ .

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

Donde  $S_i$  es el valor simulado en el tiempo  $i$ ,  $O_i$  es el valor observado en el tiempo  $i$ ,  $\bar{S}_i$  es el promedio de los valores simulados,  $\bar{O}$  es el promedio de los valores observados, y  $n$  es el número de datos. Los valores entre 0.0 y 1.0 generalmente se consideran niveles aceptables de desempeño, mientras que valores inferiores a 0.0 indican que el valor medio observado es mejor que el valor simulado, lo que indica un desempeño inaceptable (Golmohammadi et al., 2014) (Cuadro 16).

Cuadro 16. Rangos de desempeño del Índice de Nash (NSE) para valores mensuales (Moriasi et al., 2007).

Rango de desempeño	NSE
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.0$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$

La Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) mostrado en la Ecuación (7) indica una coincidencia perfecta entre los valores observados y pronosticados cuando es igual a 0 (cero), con valores RMSE crecientes que indican una coincidencia cada vez más pobre. Singh, Knapp, Arnold, and Demissie (2005) declararon que los valores de RMSE inferiores a la mitad de la desviación estándar de los datos observados (medidos) ( $DESVEST_{(Obs)}$ ) podrían considerarse bajos e indicativos de una buena predicción del modelo.

$$RMSE = \left[ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \right] \quad (7)$$

El Porcentaje de Sesgo (PBIAS) señalado en la Ecuación (8) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o más pequeños que sus

contrapartes observadas (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1999). El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación de modelo precisa (Golmohammadi et al., 2014). Los valores positivos indican un sesgo de subestimación, y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación (Gupta et al., 1999).

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (8)$$

Los rangos de desempeño propuestos del PBIAS se muestran en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Rangos de desempeño del PBIAS para valores mensuales (Moriasi et al., 2007).

Rango de desempeño	PBIAS
Muy bueno	PBIAS < ±10
Bueno	±10 ≤ PBIAS < ±15
Satisfactorio	±15 ≤ PBIAS < ±25
Insatisfactorio	PBIAS ≥ ±25

### 3.3. Resultados y discusión

En la Figura 7 se observa el mapa del modelo de cuenca con los elementos hidrológicos generados en HEC-HMS.

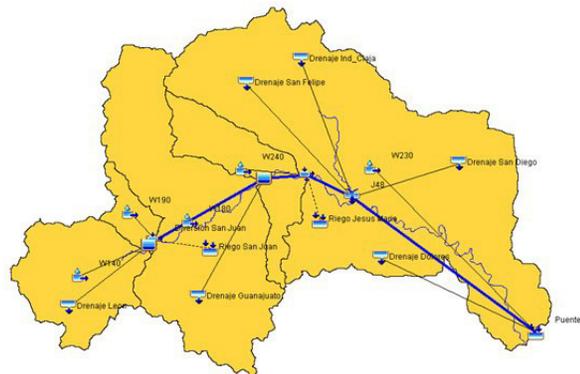


Figura 7. Modelo esquemático HEC-HMS generado para la cuenca alta Laja-Peñuelitas hasta la estación hidrométrica Puente Dolores.

En el Cuadro 18 se observan los parámetros optimizados del evento de calibración (c1) del 29 de agosto al 27 de septiembre del 2007.

Cuadro 18. Parámetros optimizados para el evento de calibración.

Parámetro		Valor inicial	Rango de calibración	Aplicación	Valor calibrado	
Subcuenca	Pérdida (Número de curva SCS)	Número de curva	CN ajustado H.A + slp	+/- 20 %	Todas las subcuencas	0.96015
		Abstracciones iniciales (Ia)	0.20	0.10 - 0.30	Todas las subcuencas	0.2
	Transformar (Hidrograma unitario SCS)	Tiempo de retraso	CNLag	Sin modificación	Todas las subcuencas	Sin modificación
		Tipo de gráfico	Standard (PRF 484)	PRF 100 - PRF 600	Todas las subcuencas	Standard (PRF 484)
	Flujo base (Recesión)	Descarga inicial	0.00	Sin modificación	Todas las subcuencas	Sin modificación
		Constante de recesión	0.85	0.8 - 0.9	Todas las subcuencas	0.85
	Proporción flujo umbral	0.1	0.05 - 0.15	Todas las subcuencas	0.1	
Cauce	Muskingum	K	6.079	+/- 20 %	R20	6.9494
			28.149	+/- 20 %	R30	29.6050
			12.803	+/- 20 %	R110	12.699
			1.615	+/- 20 %	R200	1.3488
			4.142	+/- 20 %	R250	2.4542
	x	0.2	0.0 - 0.3	Todos los tramos	0.2	
Rendimiento del modelo				<b>Nash</b>	<b>0.768</b>	
				<b>RMSE</b>	<b>4.466</b>	
				<b>PBIAS</b>	<b>20.626</b>	

En el Cuadro 19 se muestra los números de curva del SCS y los corregidos por humedad antecedente por subcuenca.

Cuadro 19. Números de curva a nivel subcuenca por serie de INEGI y ajustados por humedad antecedente para cada evento de simulación.

Subcuenca	CN SCS	CN SCS	CN SCS	c1	CN + ajuste H. A.			
	Serie IV	Serie V	Serie VI		v1	v2	v3	v4
W140	81.9	81.9	81.8	66.7	66.2	82.7	79.3	65.4
W180	77.8	77.8	77.8	71.7	66.9	78.8	67.0	60.3
W190	83.2	83.2	82.4	88.4	80.3	72.1	79.4	66.1
W230	79.3	79.3	79.3	71.1	67.4	75.4	68.8	62.1
W240	80.2	80.2	80.2	78.6	72.4	76.2	72.5	63.3

En el Cuadro 20 se muestra los números de curva corregidos por humedad antecedente adicionando la corrección por pendiente y el ajuste por calibración por subcuenca.

Cuadro 20. Números de curva ajustados por humedad antecedente (H.A) + pendiente (slope) y por calibración por subcuenca por evento de simulación.

Subcuenca	CN + ajuste (H. A. & slope)					CN + ajuste (H.A & slope & calibración)				
	c1	v1	v2	v3	v4	c1	v1	v2	v3	v4
W140	70.4	70.0	85.3	82.2	69.2	67.6	67.2	81.9	78.9	66.5
W180	75.5	71.3	81.9	71.4	65.1	72.5	68.5	78.6	68.6	62.5
W190	90.0	82.9	75.2	82.0	69.7	86.4	79.6	72.2	78.8	66.9
W230	73.1	69.7	77.3	71.1	64.6	70.2	67.0	74.2	68.2	62.0
W240	81.4	75.9	79.1	76.0	67.4	78.1	72.9	76.0	73.0	64.7

En la Figura 8 se observa el comportamiento generado de los caudales observados vs simulados durante la calibración ambos a nivel horario (2 horas).

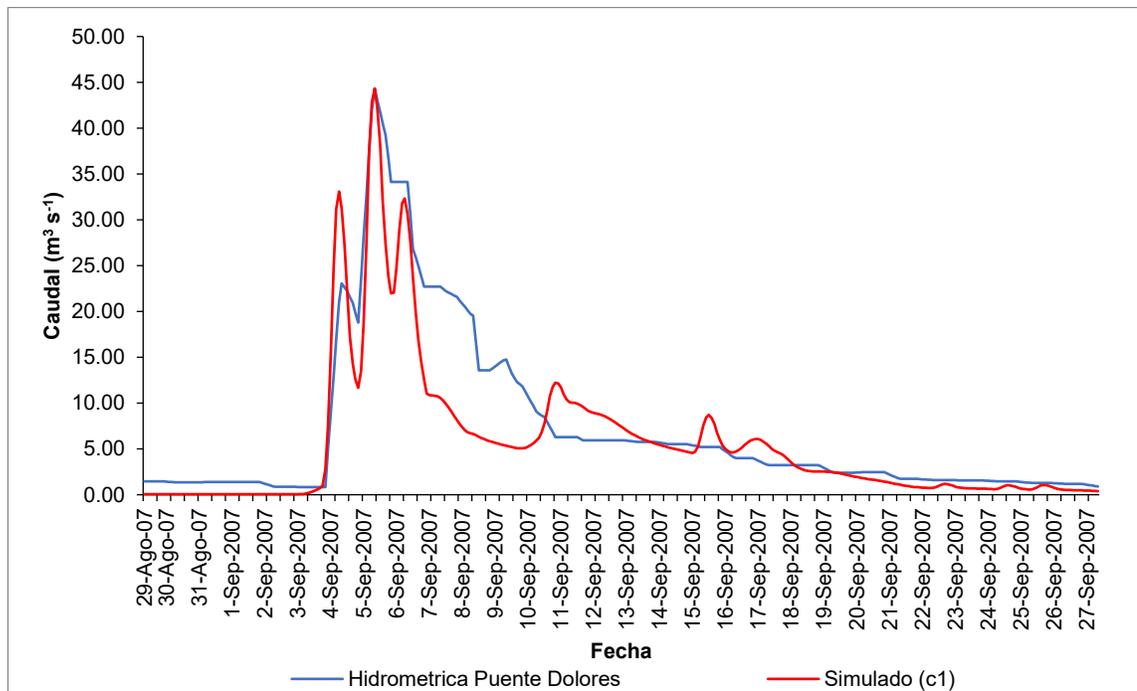


Figura 8. Caudal observado vs caudal simulado del evento c1 a nivel horario.

Los resultados del proceso de validación se presentan a continuación: v1 (Figura 9), v2 (Figura 10), v3 (Figura 11) y v4 (Figura 12), a nivel horario (2 horas).

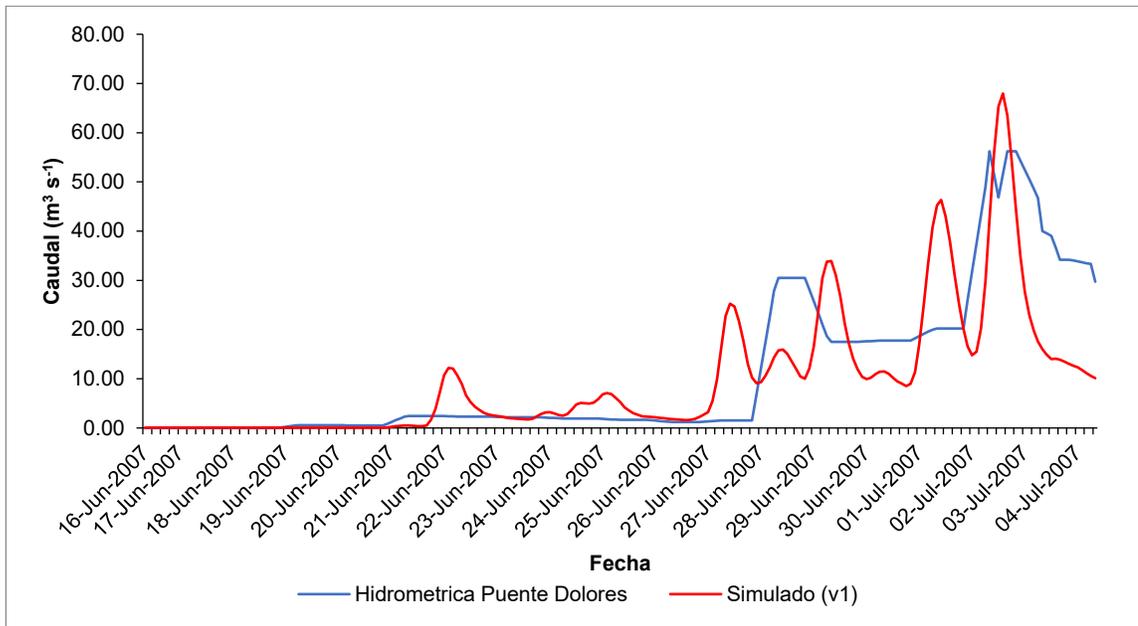


Figura 9. Caudal observado vs caudal simulado para el evento v1 a nivel horario.

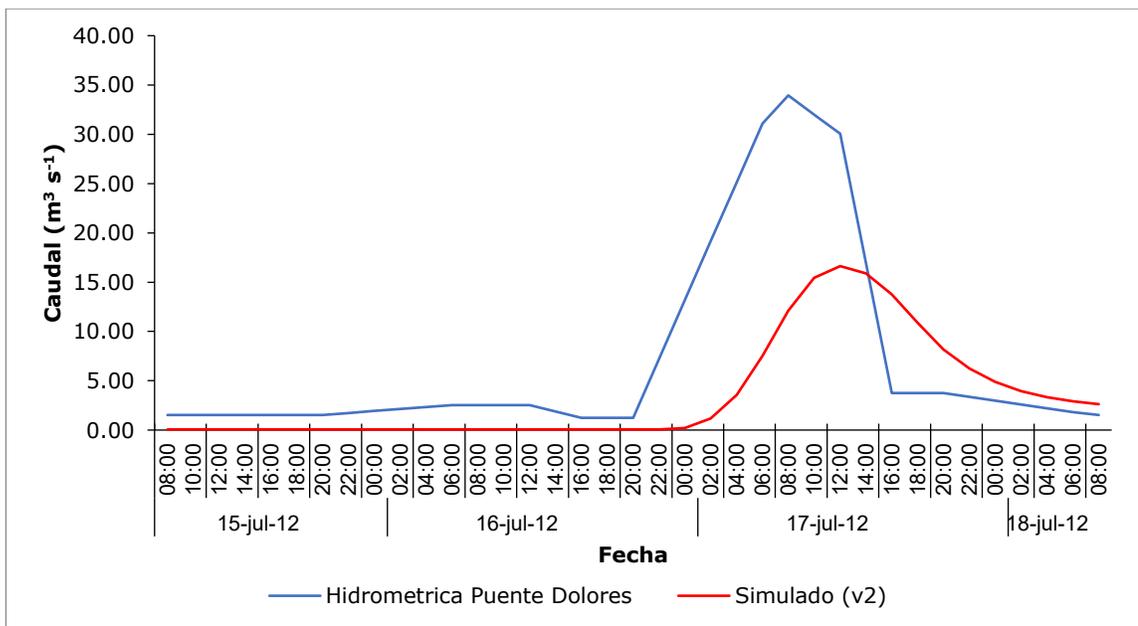


Figura 10. Caudal observado vs caudal simulado para el evento v2 a nivel horario.

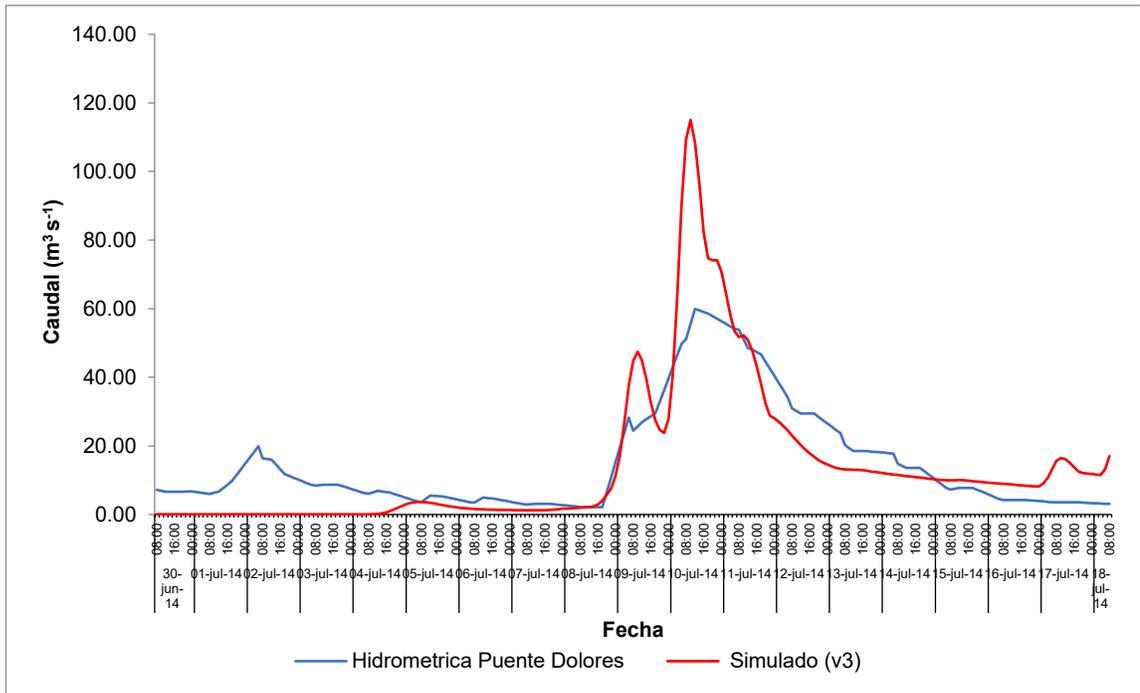


Figura 11. Caudal simulado vs caudal observado para el evento v3 a nivel horario.

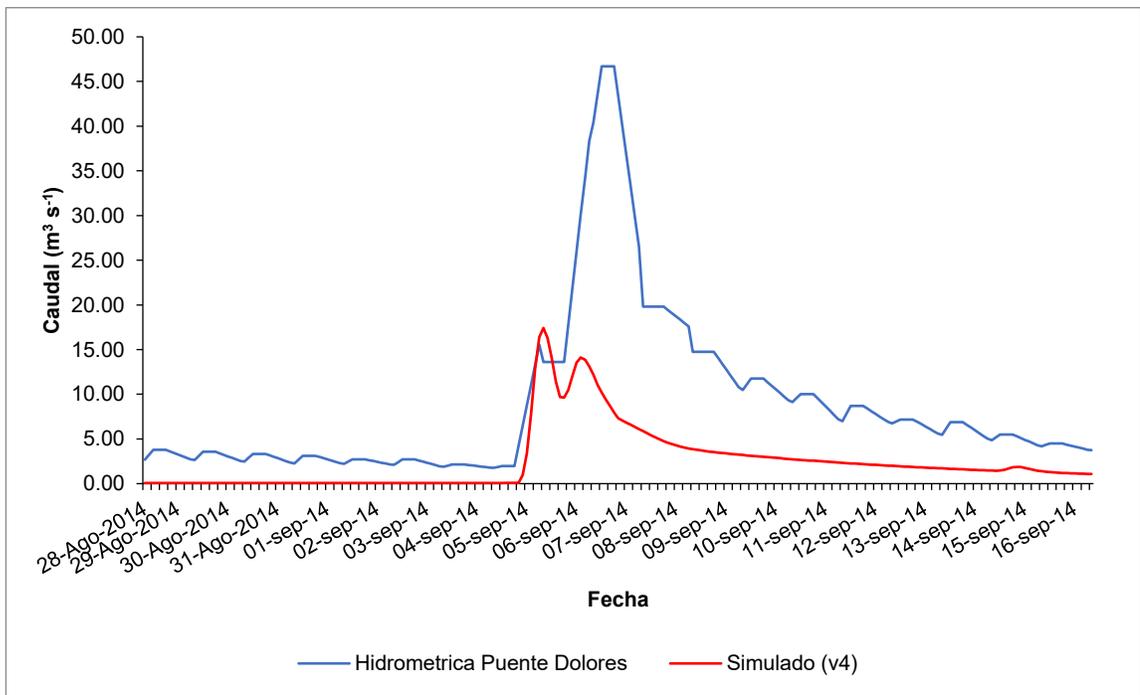


Figura 12. Caudal simulado vs caudal observado para el evento v4 a nivel horario.

Los rendimientos generados para cada evento de simulación se presentan en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Resumen de estadísticas.

Indicador	Evento				
	c1	v1	v2	v3	v4
Caudal pico observado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	44.3	56.2	33.9	59.9	46.7
Caudal pico simulado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	44.3	68.0	16.6	115.0	17.4
Nash	0.768	0.542	0.268	0.496	-0.020
RMSE	4.466	10.396	8.610	11.015	9.596
PBIAS	20.626	12.546	51.430	7.423	71.850
$(0.5) * \text{STDEV}_{(\text{Obs})}$	4.641	7.697	5.101	7.775	4.762

El evento c1 correspondiente a la calibración del modelo presentó el mejor comportamiento del modelo al obtener un índice de Nash de 0.768, y de acuerdo con Moriasi et al. (2007) ingresó a la categoría de un muy buen desempeño el modelo. Se obtuvo un RMSE (4.466) el cual es un valor cercano a cero y representa menos de la mitad de la desviación estándar de los datos observados ( $\text{DESVEST}_{(\text{Obs})} = 4.641$ ) lo que es indicativo de una buena predicción del modelo. PBIAS (20.626) indica un sesgo de subestimación general del modelo, y es considerado como un desempeño satisfactorio de acuerdo con Moriasi et al. (2007). Se observó una excelente representación del caudal pico observado vs caudal pico simulado. El evento v1 presentó el mejor rendimiento a nivel validación, con un índice de Nash de 0.542 siendo su desempeño considerado de acuerdo con Moriasi et al. (2007) como satisfactorio, adicionalmente presentó la menor diferencia entre el caudal pico observado vs simulado para un evento de validación. Sin embargo, con un mayor RMSE (10.396) y ser este valor superior a la mitad de la desviación estándar de los datos observados ( $\text{DESVEST}_{(\text{Obs})} = 7.697$ ) señala una menor predicción del modelo. Presentó un PBIAS (12.546) que indica un menor sesgo de subestimación a comparación del evento calibrado señalando su desempeño como bueno de acuerdo a Moriasi et

al. (2007). El evento v4 obtuvo el menor rendimiento del modelo a nivel validación con un índice de Nash de -0.020 considerado de acuerdo con Moriasi et al. (2007) como insatisfactorio. Se obtuvo un RMSE (9.596) el cual es superior a la mitad de la desviación estándar de los datos observados ( $DESVEST_{(Obs)} = 4.762$ ) lo que es indicativo de una menor predicción del modelo. Un PBIAS de 71.850 indica el mayor sesgo de subestimación a comparación de todos eventos simulados colocándolo en la categoría de desempeño insatisfactorio (Moriasi et al., 2007). En el evento v3 se observó una sobreestimación del caudal pico simulado vs observado, sin embargo, la curva de ascenso y descenso antes y después del pico presentó un buen comportamiento con respecto al caudal observado. En los eventos v2 y v4 a pesar de presentar una subestimación en el cálculo de los caudales pico, se observó una semejanza marcada en el comportamiento del hidrograma simulado vs observado. Esta diferencia entre el caudal pico simulado vs caudal observado pudiera estar influenciada por la ausencia de información real en el nivel de las presas del modelo, ya que dichos cuerpos de agua es posible que presentaran niveles mayores a los estimados indirectamente y con ello la aportación de agua al caudal del río aumentaría. El método recesión utilizado para representar el flujo base demostró generar buenos resultados al simular el comportamiento de éste en la cuenca de estudio, el cual disminuye de manera gradual en el brazo de descenso del hidrograma. En México, este método no ha sido textualmente utilizado en publicaciones de revistas científicas, solamente mencionado limitadamente por Pereyra et al. (2016) a través del cálculo de una constante de recesión para su cuenca. La consideración del flujo base en la modelación HEC-HMS en México a través de artículos ha sido abordada a través de Miranda-Aragón, Ibáñez-Castillo, Valdez-Lazalde, y Hernández-De la Rosa (2009) en el cual el método seleccionado fue sin contribución del flujo base en el hidrograma de la subcuenca ya que era una cuenca sin datos de este tipo, considerando sólo el flujo directo; Juárez-Méndez,

Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, y Arellano-Monterrosas (2009) señalaron la inclusión del flujo base en la teoría del hidrograma unitario para la conversión de lámina escurrida a caudales en la forma de hidrograma; Meza-Prieto y Aparicio (2018) determinaron la contribución del flujo base en el hidrograma resultante mediante un modelo de depósitos líneas y aludido parcialmente en Gaytán, de Anda, y Nelson (2008) en el cual se asumió que las contribuciones netas de agua subterránea al Lago Santa Ana en Zacatecas eran insignificantes, en comparación con las fuentes de escurrimiento, precipitación y flujo de arroyos o sumideros de evaporación. Asimismo el ingreso al modelo HEC-HMS de la aportación de agua al cauce a través de drenaje urbano en cuencas semiurbanas como la cuenca alta Laja-Peñuelitas no ha sido extensamente considerada en publicaciones científicas, solo siendo contemplada por Whitten, Hann, Robles-Morua, Mayer, and Vivoni (2014).

### **3.4. Conclusiones**

El ajuste combinado del número de curva por humedad antecedente y pendiente resultó ser funcional para la cuenca alta Laja-Peñuelitas hasta la estación hidrométrica Puente Dolores, no obstante, se identificó que una vez realizada la corrección por calibración a los números de curva ajustados por humedad antecedente y pendiente, estos números de curva tienden a los valores generados ajustados solamente por humedad antecedente, este fenómeno producido posiblemente por la marcada tendencia plana en la orografía de la cuenca. En la cuenca alta Laja-Peñuelitas no se observaron cambios significativos de los usos del suelo y vegetación a lo largo de las tres series de INEGI utilizando la escala 1: 250 000, por lo tanto, no se puede atribuir en su totalidad las diferencias en el comportamiento de los hidrogramas simulados en cada uno de los eventos de simulación por efecto del cambio de uso del suelo. La información hidrometeorológica incompleta es un problema recurrente al que

se enfrentan tanto investigadores como profesionales en materia hidrológica en nuestro país. Debido a que las simulaciones fueron hechas con la información disponible, la efectividad del modelo puede estar sujeta a mejorar, sin embargo, este trabajo brinda un modelo con un alto grado de aceptación para su utilización por parte de los tomadores de decisiones a nivel local, estatal o federal. En México solo presas con grandes volúmenes cuentan con información detallada de los niveles del vaso a lo largo del año, en este trabajo se utilizó una estimación indirecta de los niveles de almacenamiento replicando el comportamiento de la presa aguas abajo más próxima con disponibilidad de datos, sin embargo es importante que las instancias estatales o federales generen políticas para la toma de datos en presas de menor tamaño y con ello contar con información más precisa que conlleve a mejorar la precisión de los modelos hidrológicos. Constante Mensual (Constant Monthly) es el método comúnmente utilizado para representar el flujo base en una cuenca con HEC-HMS, el cual se basa en el ingreso de un caudal constante mensual para cada subcuenca, no obstante, en cuencas donde el cauce principal presenta un comportamiento intermitente, el método de recesión es una alternativa, ya que el efecto de la precipitación y almacenamiento del suelo variará la cantidad y distribución del caudal base a lo largo de los eventos simulados y representa una mejor alternativa que no incluir el flujo base en eventos de larga duración. El método peso ponderado utilizado en el modelo meteorológico se basa en la distribución de la lluvia a través de Polígonos de Thiessen para cada una de las subcuencas, la cuenca alta Laja-Peñuelitas es un área particularmente plana y siendo México un país predominantemente montañoso, la efectividad de este método en cuencas con esta última característica podría ser limitada a las áreas del centro-norte y llanuras costeras. Asimismo, es importante mencionar que en este trabajo se dispuso de información útil en sólo cinco EMAS para una cuenca de 1683 km<sup>2</sup>, las cuales podrían no reflejar con precisión la distribución espacial de la

precipitación, exhortando con ello el incremento en la red de monitoreo meteorológico y a su vez el mantenimiento de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales. La corrección combinada del número de curva de escurrimiento por humedad antecedente y pendiente para la cuenca alta Laja-Peñuelitas generó resultados satisfactorios, aunque su utilización en cuencas montañosas con pendientes altas podría ser limitada. Por lo que ahora este modelo calibrado pudiera utilizarse para el diseño de estructuras, definición de zonas federales y análisis de cambio climático, por citar algunas aplicaciones. Dentro del presente trabajo al incluir localidades con el servicio público de drenaje se realizaron diversas consideraciones propias de una cuenca urbana al incluir estimaciones de la demanda de agua y posterior aportación al cauce del río vía alcantarillado. Desde luego que, en cuencas completamente rurales no se harían estas consideraciones de drenaje urbano. Se exhorta a las instituciones de orden federal, estatal y municipal a la recolección de información hidrológica detallada (datos de comportamiento de presas medianas-pequeñas, cuantificaciones de drenaje urbano, extracciones en la cuenca de agua para usos urbano, industrial y agropecuario), asimismo como el establecimiento-mantenimiento de instalaciones dedicadas a la recolección de información hidroclimática; esto con el fin de incentivar y mejorar-investigaciones que ayuden tanto a autoridades y población en general.

### **3.5. Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de este artículo.

Al Comité Estatal de Aguas de Guanajuato (CEAG) por el apoyo en el otorgamiento de información de las estaciones meteorológicas automáticas a su cargo.

### 3.6. Literatura citada

- Aparicio M, F. J. (2017). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, D.F: Limusa.
- Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2012). *Hydrology and Floodplain Analysis*. (5th ed.). Pearson Upper Saddle River, NJ, USA.
- CEAG. (2015). El Agua subterránea en Guanajuato. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. [http://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/agua\\_subterranea.pdf](http://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/agua_subterranea.pdf). 15-May-2020.
- CEAG. (2016). Disponibilidad y gestión. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. <http://agua.guanajuato.gob.mx/disponibilidad.php#consumo>. 15-May-2020.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.
- CONAGUA. (1987). *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*. México, D.F: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2012). Sistema de Seguridad de Presas. Comisión Nacional del Agua. <https://presas.conagua.gob.mx/inventario/>. 02-Abr-2020.
- CONAGUA. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado*. México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108), Estado de Guanajuato*. Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA. (2019a). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, BANDAS. Comisión Nacional del Agua. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada BANDAS.htm>. 01-May-2019.
- CONAGUA. (2019b). Disponibilidad por acuíferos. Comisión Nacional del Agua. <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/guanajuato/guanajuato.html>. 10-Mar-2020.
- Consejo Consultivo del Agua. (2001). El Agua en Guanajuato. Consejo Consultivo del Agua A. C. <https://www.aguas.org.mx/sitio/publicaciones/el-agua-en-guanajuato/el-agua-en-guanajuato.pdf>. 15-May-2020.
- ESRI. (2012). *ArcGis 10.1*. Redlands, CA, USA.: Environmental Systems Research Institute.

- Felman, A. D. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS: Technical Reference Manual* (A. D. Felman, Ed.). Davis, CA: U.S Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Gaytán, R., De Anda, J., & Nelson, J. (2008). Computation of changes in the runoff regimen of the Lake Santa Ana watershed (Zacatecas, Mexico). *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 13, 155–167. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2008.00364.x>
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., & Rudra, R. (2014). Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, 1, 20–39. <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>
- Google LLC. (2020). *Google Earth Pro*. <https://www.google.com/earth/>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4, 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Halwatura, D., & Najim, M. M. M. (2013). Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. *Environmental Modelling & Software*, 46, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.006>
- IMTA. (1993). *Aportaciones en alcantarillado: Informe final, proyecto UI-9302*. Jiutepec, Morelos.
- INEGI. (1998). *Conjunto de datos vectoriales de la carta Edafológica, escala 1:250 000, serie I*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825234621>
- INEGI. (2005). *II Censo de Población y Vivienda 2005*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2005/01-Abr-2020>.
- INEGI. (2009). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, serie IV (Conjunto Nacional) (1a ed.; Dirección General de Geografía y Medio Ambiente - INEGI, Ed.)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825233396>
- INEGI. (2010a). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/01-Abr-2020>.
- INEGI. (2010b). *Siatl: Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas 3.2*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#). 01-Sept-2020.
- INEGI. (2013a). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del Suelo y*

- Vegetación, escala 1:250 000, serie V (Conjunto Nacional)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825570460>
- INEGI. (2013b). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, CEM. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevaciones/mex/>. 01-May-2019.
- INEGI. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, serie VI (Capa Unión)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459>
- Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L. A., Pérez-Nieto, S., & Arellano-Monterrosas, J. L. L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 69–76.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H. (1982). *Hydrology for engineers*. New York, NY: McGraw-Hill.
- McCuen, R. H. (2004). *Hydrologic analysis and design* (Third). Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice-Hall.
- Meza-Prieto, B., & Aparicio, J. (2018). Evaluación del potencial hidroenergético a pequeña escala en cuencas hidrológicas con un modelo lluvia-escurrimiento. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(1), 69–87. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-01-05>
- Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Hernández-de la Rosa, P. (2009). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río Grande, Tlachapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia*, 43, 333–334.
- Mishra, B. K., Rafiei Emam, A., Masago, Y., Kumar, P., Regmi, R. K., & Fukushi, K. (2018). Assessment of future flood inundations under climate and land use change scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S1105–S1115. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12311>
- 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.
- Muthukrishnan, S., Harbor, J., Lim, K. J., & Engel, B. A. (2006). Calibration of a simple rainfall-runoff model for long-term hydrological impact evaluation. *URISA-WASHINGTON DC-*, 18(2), 35–42.
- 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–

- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Grassland, soil and water research laboratory of agricultural research service and blackland research center at Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. USA: Texas Water Resources Institute.
- NRCS. (2007). Hydrographs. In *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*. United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service.
- Olechnowicz, B., & Weinerowska-Bords, K. (2014). Impact of Urbanization on Stormwater Runoff from a Small Urban Catchment: Gdańsk Małomiejska Basin Case Study. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 61(3–4), 141–162. <https://doi.org/10.1515/heem-2015-0009>
- Pereyra D, D., Hoyos R, C., Pereyra C, K., Filobello N, U., Pérez S, A., & Ramírez G, V. (2016). Escurrimiento generado por tormentas intensas en Veracruz , México: Estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(6), 37–65.
- Pilgrim, D. H., & Cordery, I. (1992). Flood runoff. In D. R. Maidment (Ed.), *Handbook of hydrology*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Salas S, M. A., & Jiménez E, M. (2007). *Inundaciones* (1a ed.). México, D.F: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., & Karlovits, G. (2018). *Hydrologic modeling system (HEC-HMS): User's manual Version 4.3*. Davis, CA: U.S Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC).
- Singh, J., Knapp, H. V., Arnold, J. G., & Demissie, M. (2005). Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 343–360. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03740.x>
- Tucci, C. E. M. (2007). *Gestión de inundaciones urbanas*. Porto Alegre, Brasil.
- USACE. (2013). *HEC-GeoHMS 10.1*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- USACE. (2018). *HEC-HMS 4.3*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/>
- USDA-NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds: Technical Release 55*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.
- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., & Arévalo-

- Galarza, G. (2018). Kinematic wave hydrologic model of the Turbio River basin, Guanajuato, Mexico. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 10(1), 33–47. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.07.012>
- Whitten, G., Hann, M., Robles-Morua, A., Mayer, A. S., & Vivoni, E. R. (2014). Enhancing the link between surface and groundwater models for climate change assessment of water supply and demand in Northwest Mexico. *7th International Congress on Environmental Modelling and Software*, 1615–1622. San Diego, California, USA.
- Williams, J. R. (1995). The EPIC model. In V. P. Singh (Ed.), *Computer models of watershed hydrology* (pp. 909–1000). Highlands Ranch, CO.: Water Resources Publications.
- Zhu, Z., Chen, Z., Chen, X., & He, P. (2016). Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. *Science of The Total Environment*, 553, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.025>

## 4. CAPÍTULO IV

### TENDENCIAS EN LA PRECIPITACIÓN DIARIA DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, GUANAJUATO, MÉXICO

#### TRENDS IN DAILY PRECIPITATION IN THE UPPER LAJA-PEÑUELITAS BASIN, GUANAJUATO, MEXICO

Jorge Jaimes Rodríguez<sup>1\*</sup>, Laura Alicia Ibáñez Castillo<sup>1</sup>, Gustavo Antonio Arévalo Galarza<sup>2</sup>, Mario Alberto Vázquez Peña<sup>1</sup>, Alejandro Ismael Monterroso Rivas<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Chapingo, Estado de México, CP: 56230. <sup>2</sup>Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Chapingo, Estado de México, CP: 56230.

\*Autor para correspondencia email: jorgejrdz@gmail.com.

#### Resumen

Detectar cambios en el comportamiento de la precipitación, temperatura o cualquier variable atmosférica es fundamental para los tomadores de decisiones. El identificar tendencias en el comportamiento histórico de las estaciones meteorológicas brinda información para el comportamiento futuro del clima. El presente trabajo analiza los cambios en los extremos de precipitación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas en el estado de Guanajuato, utilizando los índices de cambio climático desarrollados por el equipo de expertos en detección e índices de cambio climático. Se analizó un periodo de 36 años (1982-2017) utilizando datos diarios de precipitación, seleccionando estaciones meteorológicas convencionales con menos de 25 % de datos perdidos, sometiendo estas bases de datos a un proceso de control de calidad de datos y homogeneización, obteniendo 11 índices de precipitación a través del programa RClimDex. Los resultados muestran una tendencia estadística no significativa (62.09 %) y significativa ascendente (14.05 %), indicando que en la cuenca alta Laja-Peñuelitas, es posible establecer el mantenimiento y ligero aumento en el comportamiento y cantidad de la precipitación.

**Palabras clave:** cambio climático, homogeneización, RClimDex.

---

Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Autor: M.I. Jorge Jaimes Rodríguez. Director de Tesis: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo.

## **Abstract**

Detecting changes in the behavior of precipitation, temperature or any atmospheric variable is essential for decision makers. Identifying trends in the historical behavior of weather stations provides information for future climate behavior. The present paper analyzes the changes in the extremes of precipitation in the upper Laja-Peñuelitas basin in the state of Guanajuato, using the climate change indices developed by the team of experts on climate change detection and indices. A period of 36 years (1982-2017) was analyzed using daily precipitation data, selecting conventional weather stations with less than 25 % of lost data, subjecting these databases to a process of data quality control and homogenization, obtaining 11 precipitation indices through the RCLimDex program. The results show a statistical non-significant (62.09 %) and significant (14.05 %) upward trend, indicating that in the upper Laja-Peñuelitas basin, it is possible to establish the maintenance and slight increase in the behavior and amount of precipitation.

**Keywords:** climate change, homogenization, RCLimDex,

---

Doctoral Thesis in Engineering, Postgraduate Degree in Agricultural Engineering and Integral Use of Water, Chapingo Autonomous University.

Author: M.I. Jorge Jaimes Rodríguez.

Advisor: Ph. D. Laura Alícia Ibáñez Castillo.

#### **4.1. Introducción**

La implementación exitosa de las estrategias de adaptación al cambio climático depende en gran medida de la detección precisa y oportuna de los cambios del clima a nivel regional y local en diferentes partes del mundo (Adger *et al.*, 2005). En algunas regiones de México, los efectos esperados del cambio climático serán un incremento de temperatura mayor que 3 °C y una disminución en la precipitación del orden de 15 %, estos cambios del clima, en esas regiones, disminuirán el escurrimiento superficial y la recarga de acuíferos lo que hará peor los problemas del crecimiento poblacional y económico (Martínez y Patiño, 2012). En algunas otras regiones del país es posible que se presenten tendencias del clima diferentes, debido a las características del área y factores antropogénicos. Para detectar, por regiones y en cuencas específicas, esos cambios climáticos, es necesario calcular índices de cambio climático para regiones específicas de México.

Los índices derivados de los datos diarios son un intento de extraer información objetivamente de las observaciones meteorológicas que responden a preguntas sobre los extremos que afectan a muchos sistemas humanos y naturales (Zhang *et al.*, 2011). El equipo de expertos en detección e índices de cambio climático (IPCC) ha coordinado un conjunto de 11 índices de precipitación y 16 índices de temperatura, adoptados desde el cuarto informe de evaluación (AR4) del IPCC (Yan *et al.*, 2014). Para calcular los índices se requieren series de tiempo de variables climáticas largas y sin discontinuidades (Persson *et al.*, 2007). Estos pueden ser calculados en el programa RClimDex (Zhang y Yang, 2004b).

En este trabajo se tiene interés en determinar la tendencia de la precipitación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas; a través, de la generación de índices de cambio climático en precipitación. Dicho interés surge ante la necesidad de estar preparados en el espacio y tiempo de la cuenca, ya sea para enfrentar

inundaciones o adaptarse a las sequías. Las inundaciones y las sequías pueden afectar la producción agrícola y la seguridad de la población. En este trabajo, la zona de estudio tiene una disponibilidad de 36 años de datos diarios de temperatura y lluvia.

## **4.2. Materiales y métodos**

### **4.2.1. Área de estudio**

La cuenca alta Laja-Peñuelitas para este estudio fue definida hasta la estación hidrométrica 12715 Puente Dolores (Figura 1). Está delimitada dentro de las coordenadas 101° 31' 60.00" latitud oeste y 100° 51' 60.00" longitud oeste; 21° 6' 0.00" latitud norte y 21° 33' 60.00" longitud oeste, cubriendo una superficie de 1683 km<sup>2</sup>, de acuerdo con INEGI (2010) se encuentra ubicada en el estado de Guanajuato, México, en la región hidrológica número 12 Lerma-Santiago y en específico en la parte alta de la subcuenca RH12Ha Laja - Peñuelitas. La altitud en la zona de estudio varía de los 2963 a los 1890 msnm. El río de La Laja cruza la parte oriental de la ciudad de Dolores Hidalgo, Guanajuato.

La mayor parte de la cuenca (61%) cuenta con un clima semiseco templado, siendo el restante templado subhúmedo (INEGI, 2008). La precipitación anual promedio es de 558 mm, siendo concentrada mayormente en los meses de junio a octubre. Los usos del suelo y vegetación predominantes en la cuenca alta Laja-Peñuelitas son la vegetación de pastizal natural-inducido (34%) y la agricultura de temporal (30%) (INEGI, 2016). Los suelos Feozem, en su mayoría arcillosos, representan 70% del área de la cuenca de estudio (INEGI, 1998).

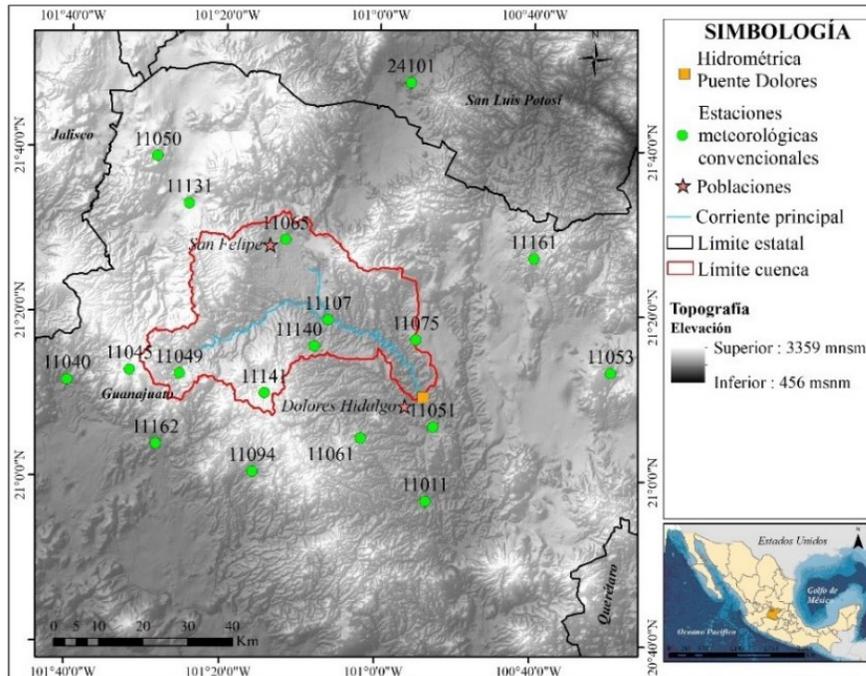


Figura 1. Ubicación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

#### 4.2.2. Datos climáticos y fuentes

Se utilizó información climática del Servicio Meteorológico Nacional a través de estaciones climatológicas convencionales dentro y cercanas a la cuenca (SMN, 2019). Se realizó un primer filtro seleccionando las estaciones que no rebasaron más de 25 % ( $< 25\%$ ) de datos perdidos de precipitación (Arriaga y Cavazos, 2010) esto efectuado para un periodo de 36 años continuos (1982-2017). Un segundo filtro consistió en la verificación de la continuidad de la serie de datos, eliminando las estaciones climatológicas que poseían un año o más sin información como lo aplicado por Zarazúa *et al.* (2014), omitiendo este criterio para aquellas estaciones que por su ubicación eliminarlas representaba un vacío de información para una área específica de la cuenca.

Un tercer filtro fue la eliminación de estaciones meteorológicas redundantes, esto generado por la proximidad de estas en una misma área geográfica. El control

de calidad de los datos es un paso necesario antes del análisis de la variación de temperatura y precipitación porque los valores atípicos erróneos pueden afectar seriamente las tendencias (Yan *et al.*, 2014). El control de calidad fue realizado usando el programa RClimDex (Zhang y Yang, 2004b), para cada base de datos de las estaciones meteorológicas seleccionadas. El control de calidad consistió en identificar valores atípicos como cantidades de precipitación diaria menores que cero, valores de precipitación demasiado grandes, problemas de redondeo, etc.

La homogeneización de los datos consistió en 1) verificación de los cambios partiendo de la presencia de estos en cada una de las estaciones objetivo vs comportamiento de estas las estaciones meteorológicas cercanas; 2) el análisis de los valores de la prueba estadística  $PF_{MAX}$ ; y 3) la justificación de los cambios debido a fenómenos climáticos externos tales como el Niño/Niña. Una vez detectados los puntos de cambio se realizó el proceso de homogeneización de la serie de datos con ajuste por cuantiles QM (Quantile Matching Algorithm) en los casos donde las series no resultaron homogéneas (Wang y Feng, 2013). La información sobre cómo el software detecta inconsistencias y efectúa el proceso de homogeneización es proporcionada por Wang y Feng (2013). Las estaciones analizadas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas consideradas para la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Núm	Clave	Nombre	Latitud (grados)	Longitud (grados)	Altitud (m)	Datos perdidos <sup>x</sup> 1982-2017 (%)	Homogeneizada
1	11011	Cinco Señores	20.958	-100.893	2062	2.06	Si
2	11040	Los Castillos	21.195	-101.668	1865	0.27	

3	11045	Media Luna	21.217	-101.534	2221	4.22	
4	11049 <sup>z</sup>	Nuevo Valle Moreno	21.211	-101.426	2247	2.09	Si
5	11050	Ocampo	21.650	-101.480	2253	3.00	
6	11051	Peñuelitas	21.108	-100.878	1906	0.53	
7	11053	Pozos	21.220	-100.496	2206	9.99	Si
8	11061	San Antonio	21.084	-101.034	2090	12.51	
9	11065 <sup>z</sup>	San Felipe (DGE)	21.484	-101.200	2100	24.75	
10	11075	Soledad nueva	21.283	-100.917	2011	21.61	Si
11	11094	Guanajuato (DGE)	21.014	-101.266	2008	3.26	
12	11107 <sup>z</sup>	La Quemada	21.323	-101.107	2003	13.71	
13	11131	Las Trojes	21.555	-101.409	2198	13.46	
14	11140 <sup>z</sup>	El Carbón	21.269	-101.136	2115	3.82	Si
15	11141 <sup>z</sup>	Ciénega de Negros	21.173	-101.242	2475	1.34	
16	11161	El Vergel	21.450	-100.664	2192	3.95	Si
17	11162	Comanjilla	21.068	-101.475	1898	1.38	
18	24101	Villa de Reyes	21.804	-100.933	1820	12.55	Si

<sup>z</sup>Estaciones dentro de la cuenca; \*Para la variable precipitación.

#### 4.2.3. Tendencias en precipitación

Se utilizó el software RClimDex (Zhang y Yang, 2004b), para estimar las tendencias en precipitación (Cuadro 2). El procedimiento seguido fue el indicado en Zhang y Yang (2004b) empezando por hacer ajustes en el número de días que se rebasa un valor de lluvia 'nn', Rnn. Los valores de lluvia a ser superados, 'nn' y analizados, en acorde a los valores que suelen presentarse en la zona, fueron los siguientes: 1) 22.3 mm; 2) 37.3 mm; 3) 30 mm; 4) 40 mm; 5) 50 mm; 6) 60 mm; y 7) 70 mm. Lo último ya que el rango de 70 mm a 150 mm de lluvia máxima acumulada en 24 horas es catalogado como lluvia intensa y también

usado por el Centro Nacional de Prevención y Desastres (CENAPRED) en México en su clasificación de los diferentes tipos de precipitación (Prieto *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Definiciones de los índices de cambio climático en precipitación<sup>2</sup>.

Índice	Descripción del nombre	Definición	Unidades
RX1day	Cantidad máxima de precipitación en un día	Máximo anual de precipitación en 1 día	mm
RX5day	Cantidad máxima de precipitación en 5 días	Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
SDII	Índice simple de intensidad diaria	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por la precipitación $\geq 1.0$ mm) en un año	mm d <sup>-1</sup>
R10	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que la precipitación $\geq 10$ mm	d
R20	Número de días con precipitación muy intensa	Número de días en un año en que la precipitación $\geq 20$ mm	d
Rnn	Número de días sobre nn mm	Número de días en un año en que la precipitación $\geq nn$ mm	d
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días secos consecutivos con RR < 1 mm	d
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días húmedos consecutivos con RR $\geq 1$ mm	d
R95p	Días muy húmedos	Precipitación anual total en que RR > 95 percentil	mm
R99p	Días extremadamente húmedos	Precipitación anual total en que RR > 99 percentil	mm
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos)	Precipitación anual total en los días húmedos (RR $\geq 1$ mm)	mm

<sup>2</sup>Las abreviaciones son las siguientes: RR = precipitación diaria, un día húmedo es definido cuando RR  $\geq 1$  mm y un día seco cuando RR < 1 mm; nn = parámetro definido por el usuario en milímetros (mm) (Zhang y Yang, 2004a; Zhang y Yang, 2004b; Vázquez, 2010; Ruiz *et al.*, 2020).

### 4.3. Resultados y discusión

En la Figura 2 se presenta el número de estaciones meteorológicas ( $n = 18$ ) y las tendencias positivas o negativas observadas en los índices de cambio climático definidos en el Cuadro 2. Los resultados muestran tanto aquellos índices con tendencia significancia estadística ( $p \leq 0.05$ ), así como de los que se mantienen con una pendiente de la recta= 0 (sin tendencia) para el periodo 1982-2017. Los resultados de la (Figura 2) fueron clasificados en cinco categorías ( $p \leq 0.05$ ) de acuerdo con: (+) incremento no significativo, (++) incremento significativo, (-) decremento no significativo, (--) decremento significativo y (S/T) sin tendencia significativa. En la parte inferior izquierda de la Figura 2, se muestran los símbolos de dicha tendencia estadística.

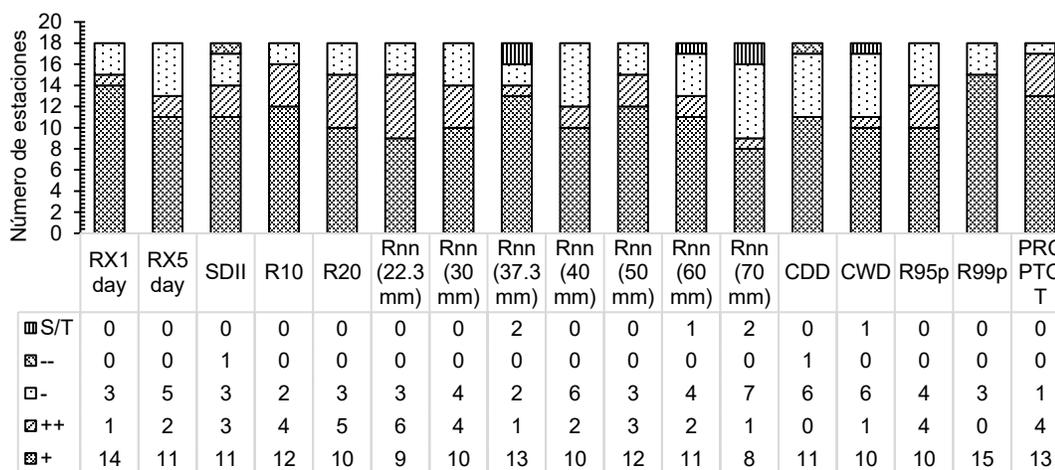


Figura 2. Tendencias en los índices para las 18 estaciones meteorológicas en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Se observó la presencia de tres tipos de tendencias: no significativa ascendente (62.09 %), no significativa descendente (21.24 %) y significativa ascendente (14.05 %). Este fenómeno mixto encontrado también en Aguilar *et al.* (2005) al existir un aumento no significativo de la precipitación, con patrones espaciales muy mixtos de tendencias positivas y negativas cuando se estudiaron las

estaciones individuales. En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de las estaciones meteorológicas que presentaron tendencia significativa (incremento o decremento) en el valor máximo anual de lluvia en 24 h (RX1day).

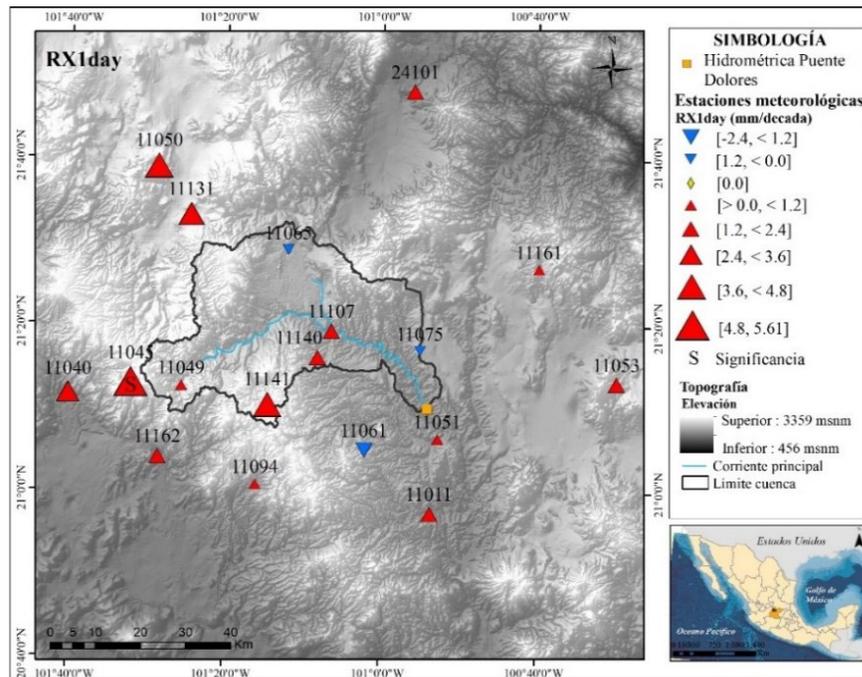


Figura 3. Tendencia del índice de lluvia máxima en 24 horas (RX1day).

El índice RX1day solo presentó tendencia ascendente estadísticamente significativa para la estación 11045 Media Luna con  $5.61 \text{ mm década}^{-1}$ , ubicada del lado del municipio de León, Guanajuato, en la parte alta de la cuenca (aproximadamente a 2470 msnm). En el resto de las estaciones meteorológicas de la parte alta (Las Trojes, Salvatierra, y del lado de San Miguel de Allende, Guanajuato) existe una tendencia ascendente no significativa generalizada.

Al analizar las tendencias de índices climáticos, si el referente son los criterios generales para el país, se pudiera concluir que no hay tendencias significativas ascendentes en la lluvia máxima en 24 h, pero si se analiza desde el punto de vista de las desviaciones estándar de los propios datos de la cuenca bajo estudio,

se observará lo siguiente. En la Figura 4 se muestra un análisis para cuatro índices de cambio climático basados en ver su variación con respecto a la desviación estándar, alrededor de cada círculo se observan las claves de las estaciones meteorológicas y los círculos son que tanto se alejan en desviaciones estándar de las medias aritméticas

Por ejemplo, en la Figura 4a se muestran los valores promedio anuales del índice RX1day y su ubicación respecto a las desviaciones estándar ( $\sigma$ ) de la media de los valores de las estaciones de la cuenca. Desde el punto de vista geográfico de la cuenca, las estaciones 11011, 11040, 11094, 11141 presentaron un incremento por encima del promedio de dos desviaciones estándar y la estación 11131 con una disminución de dos desviaciones estándar para el índice RX1day. La Figura 4b, Figura 4c y Figura 4d muestran un análisis similar, basado en desviaciones estándar, para los índices de precipitación total anual, número de días con lluvia mayor o igual a 70 mm y número de días con lluvia mayor o igual a 20 mm.

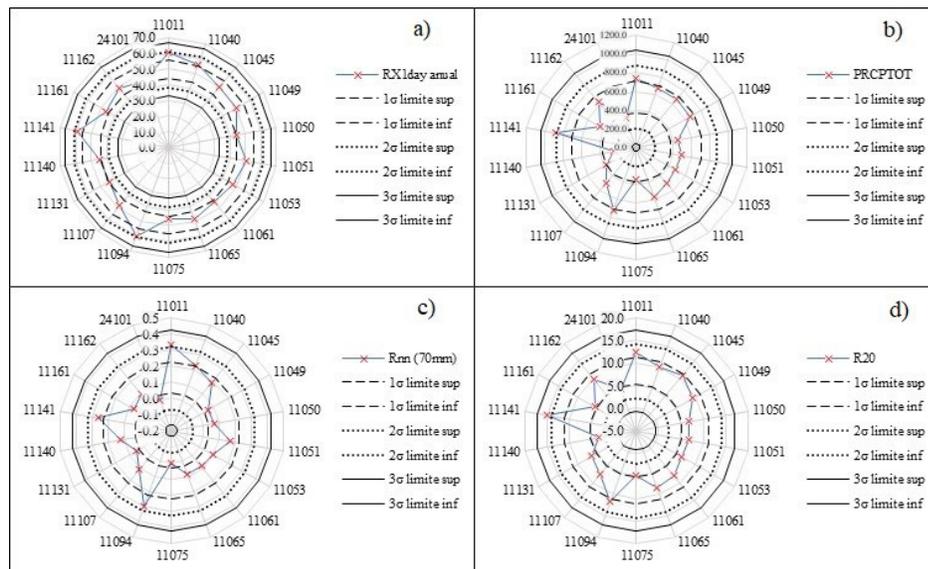


Figura 4. Valores promedio de los índices RX1day (a); PRCPTOT (b); Rnn (70 mm) (c); R20 (d).

En la Figura 5 se observa la distribución espacial de las estaciones meteorológicas que presentaron tendencia significativa en la cuenca alta Laja-Peñuelitas para los índices de cambio climático RX5day (cantidad máxima de precipitación en 5 días), SDII (intensidad diaria de la lluvia), PRCPTOT (precipitación total anual en los días húmedos) y Rnn (70 mm).

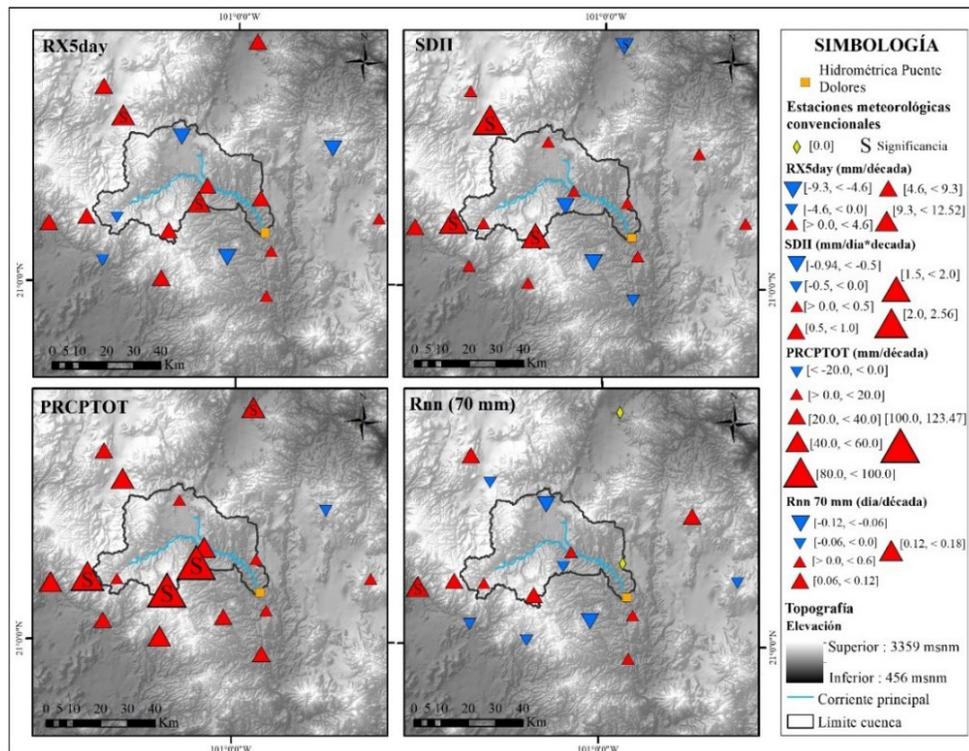


Figura 5. Tendencia de las estaciones meteorológicas ante los índices RX5day (superior izquierda); SDII (superior derecha.); PRCPTOT (inferior derecha); Rnn 70 mm (inferior derecha).

Resulta importante analizar la intensidad de la lluvia, porque en general se comenta que, por el cambio climático, los eventos de lluvia serán más intensos, se analiza la lluvia máxima en cinco días, porque es un criterio al momento de calcular escurrimientos en una cuenca. En la Figura 5, en general, hay un mayor incremento en la tendencia de los índices de intensidad y de lluvia anual; un poco de incremento en lluvia en cinco días y en general, no hay cambio significativo

de número de días con lluvia igual o mayor a 70 mm, el cual ya es un valor de una gran lluvia en esta cuenca.

Como contraste a lo que ocurre en esta zona de Guanajuato, Aguilar *et al.* (2005) encontraron para zonas en el Norte de México, que el PRCPTOT no presentó una tendencia significativa, a pesar de que el número de estaciones con tendencias positivas fue mayor, encontrándose un número considerable de pendientes negativas, agrupadas alrededor de las estaciones más al norte de México y alrededor de las ubicadas en el lado suroeste del istmo centroamericano promediando estos patrones una tendencia positiva no significativa de 8.7 mm década<sup>-1</sup> de 1961 a 2003.

El índice Rnn (70 mm) presentó tendencia ascendente estadísticamente significativa para la estación 11040 (0.16 días década<sup>-1</sup>), presentándose un fenómeno mixto de reducción e incremento no significativo para la cuenca. En la Figura 6 se ilustra la distribución espacial de las estaciones meteorológicas que presentaron tendencia significativa en la cuenca alta Laja-Peñuelitas para los índices de cambio climático R10, R20, Rnn (22.3 mm) y Rnn (37.3 mm). El índice R10 mostró una tendencia ascendente estadísticamente significativa para las estaciones 11045 (4.58 días década<sup>-1</sup>), 11140 (3.78 días década<sup>-1</sup>), 11141 (4.41 días década<sup>-1</sup>) y 24101 (2.08 días década<sup>-1</sup>).

Se observa que el índice R20 presentó una influencia regional en la parte media-alta de la cuenca, marcada por la tendencia ascendente estadísticamente significativa para las estaciones 11040 (1.29 días década<sup>-1</sup>), 11 045 (3.44 días década<sup>-1</sup>), 11131 (1.93 días década<sup>-1</sup>), 11140 (1.81 días década<sup>-1</sup>) y 11141 (2.73 días década<sup>-1</sup>), que lo convierte en el segundo índice con mayor cantidad de estaciones significativas; indicando que el número de días en un año con lluvia fuerte basado en el criterio de Prieto *et al.* (2010) se está incrementando, esto

tendrá un importante efecto en el futuro en el aumento del número de escurrimientos con caudales elevados.

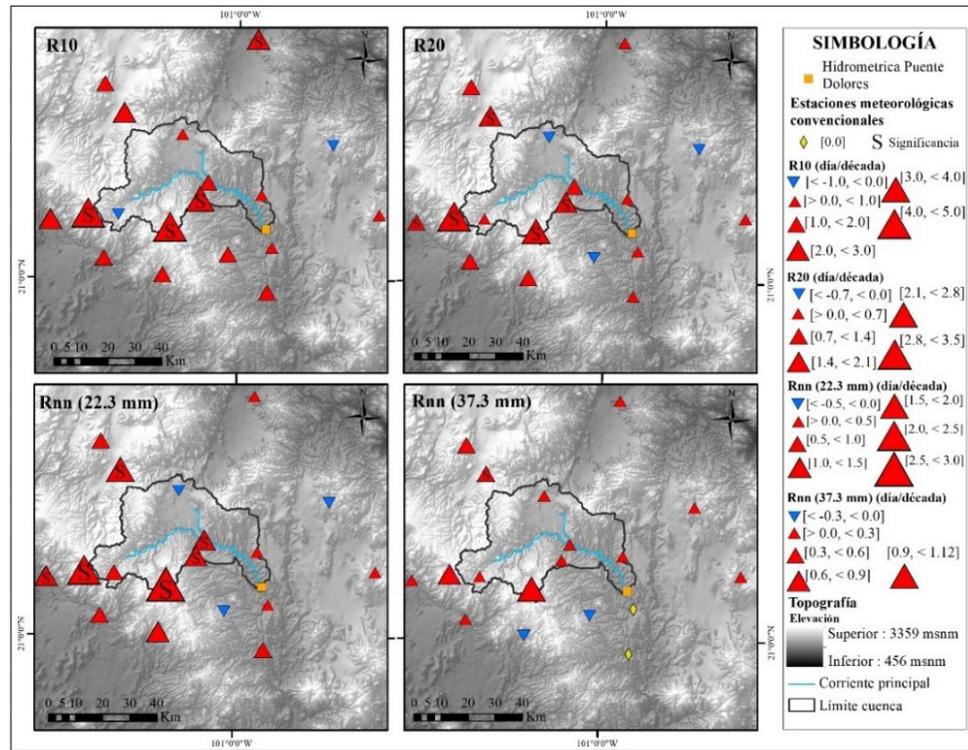


Figura 6. Tendencia de las estaciones meteorológicas ante los índices R10 (superior izquierda.); R20 (superior derecha); Rnn 22.3 mm (inferior izquierda); Rnn 37.3 mm (inferior derecha).

De los 11 índices de cambio climático en precipitación para la cuenca alta Laja-Peñuelitas, el índice Rnn (22.3 mm) fue el que más estaciones con tendencia ascendente estadísticamente significativa obtuvo, con las estaciones 11040 (1.12 días década<sup>-1</sup>), 11045 (2.11 días década<sup>-1</sup>), 11107 (1.24 días década<sup>-1</sup>), 11131 (1.8 días década<sup>-1</sup>), 11140 (1.23 días década<sup>-1</sup>) y 11141 (2.99 días década<sup>-1</sup>), marcado por la estación 11107 ubicada al centro de la cuenca, identificándose un patrón regional de incremento en la parte media-alta de la cuenca.

Kachok y Ivanova (2019) calcularon diversos índices para la Reserva de la Biosfera El Vizcaino en Baja California Sur durante el periodo 1960-2012 presentando el índice CWD una tendencia al aumento al igual que R20 y PRCPTOT, este último fenómeno que se repite en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

En los estados más cercanos al área de estudio, como lo presentado por Núñez y García (2018) para 48 estaciones del estado de Jalisco próximo a la cuenca alta Laja-Peñuelitas para el periodo 1980-2010 calcularon cinco índices de precipitación, identificando tendencias positivas para los índices: PRCPTOT (54 % de la estaciones) con una tendencia promedio de 7.2 mm década<sup>-1</sup>, índice SDII (77 %) y una tendencia promedio de 0.4 mm día<sup>-1</sup> década<sup>-1</sup>, RX1day (73 %) con 3.9 mm década<sup>-1</sup>, CDD (85 %) con 11.6 días década<sup>-1</sup>, presentando estos índices para la cuenca alta Laja-Peñuelitas en la tendencia general el mismo comportamiento. En contraparte con tendencia negativa el índice CWD (67 %) presentando un valor promedio de -0.4 días década<sup>-1</sup>, este fenómeno siendo diferente para la cuenca en el cual se presentó una mayor cantidad de eventos positivos que negativos.

Pita y Ortega (2020) para Zacatecas, cercano a la cuenca alta Laja-Peñuelitas, para el periodo (1976-2015), el índice PRCPTOT mostró un incremento con valores significativos en ciertas áreas (una de ellas, la zona más cercana a la cuenca de estudio), esto concordando con los resultados de este trabajo, en el cual a pesar de no ser un fenómeno completamente significativo, la tendencia es al incremento, el análisis de tendencias espaciales indicó que los CDD aumentaron en todo el estado, con la excepción de dos áreas muy locales, una de ellas cercana a la cuenca alta Laja-Peñuelitas, presentando estas áreas pendientes negativas.

Sin embargo, la significancia estadística espacial y temporal de este índice fue baja, no obstante, en la cuenca de estudio y en especial en la parte norte de la

misma el fenómeno tiende al incremento, aunque siendo no significativo; finalmente identificaron un aumento de la precipitación máxima diaria (RX1day) en los últimos años, comportamiento que se presenta de igual manera en la cuenca alta Laja-Peñuelitas, aunque de manera no significativa.

Ruiz *et al.* (2020) obtuvieron 11 índices de cambio climático para el estado de Aguascalientes, cercano en dirección este a la cuenca alta Laja-Peñuelitas en un rango de 70 km, encontrando en pequeñas zonas del este y norte del estado un aumento en las precipitaciones en 1 y 5 días (RX1day y RX5day), en el este y en el sur aumentaron tanto la intensidad de las lluvias como el número de días con fuertes precipitaciones; en una zona muy pequeña al este, la precipitación total anual también muestra evidencia de un aumento. Dichos comportamientos en la región este del estado concordantes con los resultados obtenidos en este estudio.

Martínez y Patiño (2012) mencionan que en las latitudes en las que se ubica México, los efectos esperados del cambio climático será una disminución en la precipitación; sin embargo, el presente trabajo muestra un incremento (significativo o no significativo) de la lluvia, esto principalmente visualizado a través de los índices PRCPTOT, R10, R20 y Rnn para la zona de estudio.

Pita y Ortega (2020) señalan que los resultados son generalmente consistentes cuando se analizan lugares o áreas adyacentes con condiciones climáticas similares, pero pueden diferir para cuencas hidrográficas remotas o regiones con diferentes condiciones climáticas, un ejemplo de ello es lo mostrado por Velasco *et al.* (2015), los cuales empleando dos estaciones meteorológicas cercanas a 38 km en los límites del estado de Puebla y Tlaxcala el periodo de 1970 a 2012 encontraron para el índice PRCPTOT incremento y decremento, a pesar de su corta distancia. Kotlarski *et al.* (2017); Zittis (2017) de la misma manera indican, que las tendencias relacionadas con las precipitaciones no son claras y existen

diferencias significativas de un país a otro, lo que indica que los cambios globales en esta variable climática no son homogéneos en todo el mundo.

#### **4.4. Conclusiones**

El presente estudio fue diseñado para identificar los cambios y tendencias en los extremos climáticos en la cuenca alta Laja-Peñuelitas utilizando índices extremos relacionados con la precipitación para el período 1982-2017. Los índices de cambio climático son herramientas viables que permiten la obtención de tendencias a partir de registros históricos y con estas proyectar tendencias futuras de incremento o decremento en precipitación, que se pueden utilizar como insumo para estudios que tengan como objetivo determinar cambios en el clima y los efectos de estos en materia hidrológica, biológica, social, etc.

El análisis climático de la cuenca alta Laja-Peñuelitas mostró tendencias en extremos climáticos de precipitación no estudiados previamente en esta área particular de México, destacando que, la cuenca alta Laja-Peñuelitas presenta la tendencia general al incremento de los fenómenos de lluvia. Es recomendable que futuros estudios en la cuenca alta Laja Peñuelitas se oriente tanto al comportamiento futuro de la precipitación a través de la utilización de modelos de circulación general (GCM), así como a la obtención de los índices de cambio climático en temperatura y con ello generar un mejor panorama en el comportamiento de los extremos climáticos.

Los índices de cambio climático (lluvia anual total, lluvia máxima en 24 h, intensidad diaria de la lluvia, lluvia en cinco días consecutivos y número de días con lluvia intensa y muy intensa) mostraron una tendencia de ascenso en la cuenca alta Laja-Peñuelitas, esto último resulta de gran importancia para considerar en el diseño de obras hidráulicas y en materia de prevención de inundaciones.

#### 4.5. Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de este artículo.

#### 4.6. Literatura citada

- Adger, W. N.; Arnell, N. W. and Tompkins, E. L. 2005. Adapting to climate change: perspectives across scales. *Global Environmental Change*. 15(2):75-76. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2005.03.001>.
- Arriaga, R. S. and Cavazos, T. 2010. Regional trends of daily precipitation indices in northwest México and southwest united states. *J. Geophys. Res.* 115(D14):1-10. <https://doi.org/10.1029/2009jd013248>.
- INEGI. 1998. Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica, escala 1:250 000, serie i. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825234621>.
- INEGI. 2008. Conjunto de datos vectoriales, unidades climáticas, escala 1:1 000 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>.
- INEGI. 2010. Siatl: simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas 3.2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#)
- INEGI. 2016. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI (Capa Unión). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459>.
- Kachok, R. e Ivanova, A. 2019. Índices de cambio climático en la reserva de la biosfera El Vizcaíno, Baja California Sur, México (1960-2012). *Rev. Brasil. Climatol.* 24(15):67-93.
- Kotlarski, S.; Szabó, P.; Herrera, S.; Rätty, O.; Keuler, K.; Soares, P. M.; Cardoso, R. M.; Bosshard, T.; Pagé, C.; Boberg, F.; Gutiérrez, J. M.; Isotta, F. A.; Jaczewski, A.; Kreienkamp, F.; Liniger, M. A.; Lussana, C. and Pianko, K. 2017. Observational uncertainty and regional climate model evaluation: a pan-European perspective. *Inter. J. Climatol.* 39(9):3730-3749. <https://doi.org/10.1002/joc.5249>.
- Martínez, A. P. F. y Patiño, G. C. 2012. Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 3(1):5-

20.

- Núñez, G. G. y García, S. J. 2018. Análisis de la calidad de datos y la tendencia de algunos índices de precipitación en el estado de Jalisco. *Rev. Internac. Estadís. Geograf.* 9(2):14-27.
- Persson, G.; Barring, L.; Kjellström, E.; Strandberg, G. and Rummukainen, M. 2007. Climate indices for vulnerability assessments. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. S-601 76 Norrköping, Sweden. Report RMK Num. 111. 64 p.
- Prieto, G. R.; Avendaño, G. M. A. y Matías, R. L. G. 2010. Tormentas severas. In: serie fascículos. Centro Nacional de Prevención de Desastres-Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. 1a (Ed). Ciudad de México. 54 p.
- SMN. 2019. Base de datos climatológica. Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/>.
- Vázquez, A. J. L. 2010. Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México. Instituto Nacional de Ecología- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1ª (Ed.). México, DF. 88 p.
- Velasco, H. M.; Morales, A. T.; Estrella, C. N. G., Díaz, R. R.; Juárez, S. J. P.; Hernández, V. M. y Bernal, M. R. 2015. Tendencias y variabilidad de índices de cambio climático: enfoque agrícola en dos regiones de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(7):1587-1599.
- Wang, X. L. and Feng, Y. 2013. RHtests-dlyPrcp user manual. Climate research division, atmospheric science and technology directorate, science and technology branch, environment Canada. Toronto, Ontario, Canada. 17 p.
- Yan, G.; Qi, F.; Wei, L.; Aigang, L.; Yu, W.; Jing, Y.; Aifang, C.; Yamin, W.; Yubo, S. and Qianqian, M. 2014. Changes of daily climate extremes in loess plateau during 1960-2013. *Quaternary International.* 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.08.052>.
- Zarazúa, V. P.; Ruiz, C. J. A.; Ramírez, O. G.; Medina, G. G.; Rodríguez, M. V. M.; De la Mora, O. C.; Flores, L. H. y Durán, P. N. 2014. Índices de extremos térmicos en las llanuras costeras del Golfo Sur en México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* (10):1843-1857.
- Zhang, X.; Alexander, L.; Hegerl, G. C.; Jones, P.; Tank, A. K.; Peterson, T. C.; Trewin, B. and Zwiers, F. W. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wires climate change.* 2(6):851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.
- Zhang, X., and Yang, F. 2004a. RClimDex (1.0) manual del usuario. (Traduc.). Santos, J. L. Centro internacional para la investigación del fenómeno del

Niño Ciifen. Guayaquil, Ecuador. 22 p.

Zhang, X. y Yang, F. 2004b. Rclimindex (1.0) user manual. Climate Research Branch, Environment Canada. Downsview, Ontario, Canada. 23 p.

Zittis, G. 2017. Observed rainfall trends and precipitation uncertainty in the vicinity of the Mediterranean, middle East and North Africa. *Theor. Appl. Climatol.* 134(3 4):1207-1230. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2333-0>.

## 5. CAPÍTULO V

### RESPUESTA DE LA CUENCA ALTA LAJA-PEÑUELITAS, ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y USO DEL SUELO

### RESPONSE OF THE UPPER LAJA-PEÑUELITAS WATERSHED, TO SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE AND LAND USE

#### Resumen

El cambio climático y el cambio de uso del suelo y vegetación han sido reconocidos como uno de los principales potenciadores de la presencia cada vez mayor de fenómenos hidrometeorológicos extremos (inundaciones, sequías, etc.). Utilizando el modelo hidrológico calibrado en HEC-HMS para la cuenca alta Laja-Peñuelitas del año 2007, el presente trabajo analizó la sensibilidad del hidrograma calibrado ante cambios potenciales en el clima (incrementos en precipitación en 10 %, 20 % y 30 %) y de uso del suelo y vegetación (incremento y decremento en 10 % en el número de curva de escurrimiento) partiendo de información de índices de cambio climático obtenidos a través del programa RClimDex y del análisis en el comportamiento espacial del uso del suelo y vegetación en diferentes series de INEGI en la cuenca de estudio respectivamente. Los resultados indican que tanto los incrementos por separado en precipitación como en el número de curva de escurrimiento aumentaron de manera importante el comportamiento del hidrograma calibrado, presentando un efecto aun mayor ante la combinación climática y de gestión del suelo, con un máximo caudal pico de  $131.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  representando un aumento del 195.76 % respecto al caudal pico calibrado, indicando que un aumento potencial ya sea en la precipitación futura y las superficies impermeables en la cuenca intensificara el escurrimiento generado en el área de estudio. No obstante, los resultados muestran que un incremento en las superficies con mayor permeabilidad a través de actividades de reforestación, agroforestería y prácticas de conservación amortiguarían los efectos del incremento potencial en precipitación. El conocer el comportamiento de la cuenca ante el potencial cambio climático y de uso del suelo y vegetación brindará a los tomadores de decisiones y poseedores de los recursos naturales de información valiosa para la prevención, gestión y mitigación de los efectos dañinos de inundaciones o sequías.

**Palabras clave:** Modelación hidrológica, hidrograma, HEC-HMS, RClimDex.

---

Tesis de Doctorado en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: M.I. Jorge Jaimes Rodríguez. Director de Tesis: Dra. Laura Alcía Ibáñez Castillo.

## **Abstract**

Climate change and land use and vegetation change have been recognized as one of the main drivers of the increasing presence of extreme hydro-meteorological phenomena (floods, droughts, etc.). Using the hydrological model calibrated in HEC-HMS for the upper Laja-Peñuelitas watershed in 2007, the present work analyzed the sensitivity of the calibrated hydrograph to potential changes in the climate (increases in precipitation in 10 %, 20 %, and 30 %) and of land use and vegetation (10 % increase and decrease in the number of runoff curve) based on information on climate change indices obtained through the RClimDex program and the analysis of the spatial behavior of land use and vegetation in different INEGI series in the study watershed respectively. The results indicate that both the separate increases in precipitation and in the number of runoff curve significantly increased the behavior of the calibrated hydrograph, presenting an even greater effect in the face of the climatic and soil management combination, with a maximum peak flow of  $131.1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  representing an increase of 195.76 % with respect to the calibrated peak flow, indicating that a potential increase in either future precipitation and impervious surfaces in the watershed will intensify the runoff generated in the study area. However, the results show that an increase in the areas with greater permeability through reforestation, agroforestry, and conservation practices would cushion the effects of the potential increase in precipitation. Knowing the behavior of the watershed in the face of potential climate change and land use and vegetation will provide decision makers and owners of natural resources with valuable information for the prevention, management, and mitigation of the damaging effects of floods or droughts.

**Keywords:** Hydrological modeling, hydrogram, HEC-HMS, RClimDex.

## **5.1. Introducción**

Diversos estudios en México, a partir de la generación de escenarios climáticos, coinciden en señalar que se presentarán variaciones de temperatura y precipitación con distinta intensidad y frecuencia, que a su vez incrementarían la vulnerabilidad social de las comunidades con una menor capacidad de adaptación ante eventos extremos, la disponibilidad del recurso hídrico en las cuencas hidrológicas, así como la producción de alimentos (Arreguín, López, Rodríguez, & Montero, 2015).

El cambio climático y el cambio de uso del suelo son factores clave que determinan cambios en los procesos hidrológicos en las cuencas (Marhaento et al., 2018). Se han realizado numerosos estudios para evaluar los impactos del uso de la tierra y el cambio climático en los recursos hídricos (Legesse, Vallet-Cuolomb, & Gasse, 2003; Li, Liu, Zhang, & Zheng, 2009; Mango, Melesse, McClain, Gann, & Setegn, 2011; Marhaento, Booij, & Hoekstra, 2017; Mishra et al., 2018; Shrestha & Htut, 2016; Tripathi, Sengupta, Patra, Chang, & Jung, 2014; Wang, 2014; Zhang, Nan, Xu, & Li, 2016). Se espera que los cambios en los patrones de precipitación en condiciones del cambio climático aumenten la intensidad y la frecuencia de las inundaciones y sequías en muchas regiones (Asadieh & Krakauer, 2017; Hirabayashi et al., 2013).

Tales cambios también pueden tener efectos secundarios. Por ejemplo, combinados con cambios en la vegetación, también conducirán a la desestabilización de las laderas y, por lo tanto, potencialmente más inundaciones repentinas y deslaves de tierra (Gariano & Guzzetti, 2016). La mayoría de los hallazgos muestran que los cambios en el uso del suelo y el clima afectan los procesos hidrológicos como la evapotranspiración, la interceptación y la infiltración, lo que resulta en alteraciones espaciales y temporales de los patrones de flujo

superficial y subterráneo (Bruijnzeel, 2004; Khoi & Suetsugi, 2014; Legesse et al., 2003; Marhaento, Booij, Rientjes, & Hoekstra, 2017; Thanapakpawin et al., 2007).

Una mejor estimación de las respuestas hidrológicas tanto al cambio de uso del suelo como a la variabilidad climática, y la separación de sus efectos es de gran importancia para la planeación del uso del suelo y la gestión de los recursos hídricos, específicamente para las grandes cuencas hidrográficas dominadas por la agricultura (Neupane & Kumar, 2015).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca alta Laja-Peñuelitas, Guanajuato, México, ante escenarios de cambio climático y de uso del suelo y vegetación. Comprender la vulnerabilidad al riesgo de inundaciones a través del modelado hidrológico en múltiples escenarios de cambios en los niveles de precipitación y de cobertura de la tierra, brindará información valiosa a los tomadores de decisiones a nivel local, estatal y/o federal y con ello la generación de políticas de prevención y gestión de riesgos.

## **5.2. Materiales y métodos**

### **5.2.1. Área de estudio**

La cuenca alta Laja-Peñuelitas para este estudio fue definida hasta la estación hidrométrica 12715 "Puente Dolores", está delimitada dentro de las coordenadas 101°31'60.00"O y 100°51'60.00"O; 21°6'0.00"N y 21°33'60.00"N, cubriendo una superficie de 1683 km<sup>2</sup>, de acuerdo con INEGI (2010) se encuentra ubicada en el estado de Guanajuato, México, en la Región Hidrológica número 12 Lerma-Santiago y en específico en la parte alta de la subcuenca RH12Ha Laja-Peñuelitas, representando un 23.42 % de la misma. La altitud varía de los 1890 msnm hasta 2963 msnm (Figura 1). La altitud varía de los 1890 hasta 2963 msnm. El río de La Laja cruza la parte oriental de la ciudad de Dolores Hidalgo, Guanajuato. La cuenca de estudio posee una pendiente media de 14.33 %.

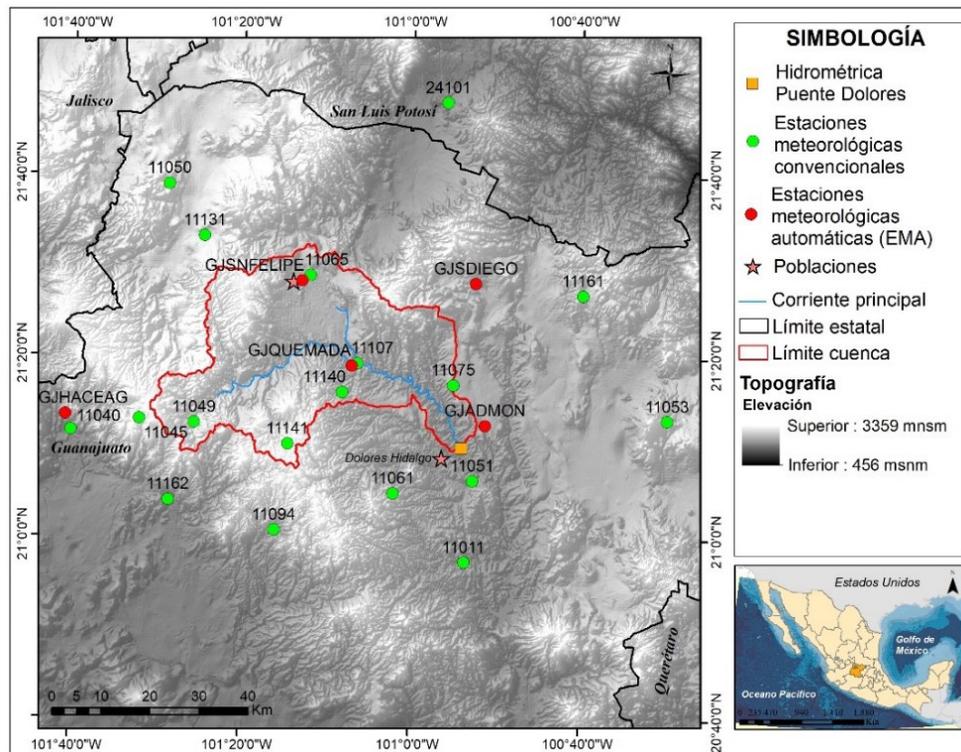


Figura 1. Ubicación de la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

La mayor parte de la cuenca (61.26 %) cuenta con un clima semiseco templado, siendo el restante templado subhúmedo (INEGI, 2008). La precipitación anual ponderada (periodo 1981-2010) es de 558 mm, concentrada mayormente en los meses de junio a octubre. Los usos del suelo y vegetación predominantes en la cuenca alta Laja-Peñuelitas es la vegetación de pastizal natural-inducido (33.90 %) y la agricultura de temporal (30.32 %) (INEGI, 2016). Los suelos Feozem representan un 69.68 % del área de la cuenca de estudio (INEGI, 1998).

### 5.2.2. Modelado hidrológico

Para el presente estudio se utilizó el modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System) versión 4.3 (USACE, 2018) junto con la extensión GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling Extension) (USACE, 2013), versión para ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012) disponibles

gratuitamente en la página del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

El Cuadro 1 enumera la información hidroclimática y geoespacial utilizada para el modelo hidrológico calibrado, obtenida de organismos tanto federales como locales. Para identificar los números de curva de escurrimiento, se utilizaron diversas fuentes tales como las tablas originales del USDA-NRSC (United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service), CONAGUA y la base de datos del programa SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (CONAGUA, 1987; Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011; USDA-NRCS, 1986).

Cuadro 1. Información empleada en el modelo hidrológico calibrado.

<b>Tipo</b>	<b>Periodo</b>	<b>Extensión espacial</b>	<b>Fuente</b>
Modelo digital de elevaciones (DEM)	2013	15 m	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (INEGI, 2013b)
Uso del suelo y vegetación	Serie IV	1:250 000	Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación de la carta F14-7 (INEGI, 2009)
Suelos	Serie I	1:250 000	Conjunto de datos vectoriales de la carta edafológica F14-7 (INEGI, 1998)
Precipitación horaria	2007	Estaciones meteorológicas automáticas (EMA) – 2 h	Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG)
Datos hidrométricos	2007	Estación hidrométrica 12715 “Puente Dolores”	BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales) (CONAGUA, 2019a)
Presas	2007	Cuenca de estudio	Sistema de Seguridad de Presas (CONAGUA, 2012)

Riego	2007	Cuenca de estudio	Sistema de Seguridad de Presas (CONAGUA, 2012) Estimación a partir de datos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía),
Drenaje	2007	Cuenca de estudio	CONAGUA (Comisión Nacional de Agua) e IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) y CEAG
Extracciones agua potable	2007	Cuenca de estudio	CEAG y Sistema de Seguridad de Presas (CONAGUA, 2012)

Los números de curva generados para cada subcuenca fueron ajustados de acuerdo con las condiciones particulares de humedad antecedente y pendiente. Se seleccionaron los siguientes métodos de cálculo (Scharffenberg et al., 2018): Lámina de lluvia a lámina escurrida (Número de curva de escurrimiento del SCS (Soil Conservation Service); Transformación de lámina escurrida a hidrograma (Hidrograma unitario sintético del SCS); Flujo base (Recesión) y Tránsito de avenidas en cauces (Muskingum).

La distribución espacial de la precipitación fue realizada mediante el método peso ponderado (Gage Weigth) (Scharffenberg et al., 2018), partiendo de la ubicación espacial de las EMA (Figura 1).

El modelo fue calibrado para el evento del 29 de agosto del 2007 al 27 de septiembre del 2007. Se optó por una combinación de optimización manual y determinista (basada en rangos establecidos (mediante la función objetivo porcentaje de error en la descarga máxima “Percent Error in Peak Discharge”, la cual tiene como motivación minimizar la diferencia entre el valor del flujo pico observado y simulado). La representación esquemática de la cuenca se presenta en la Figura 2.

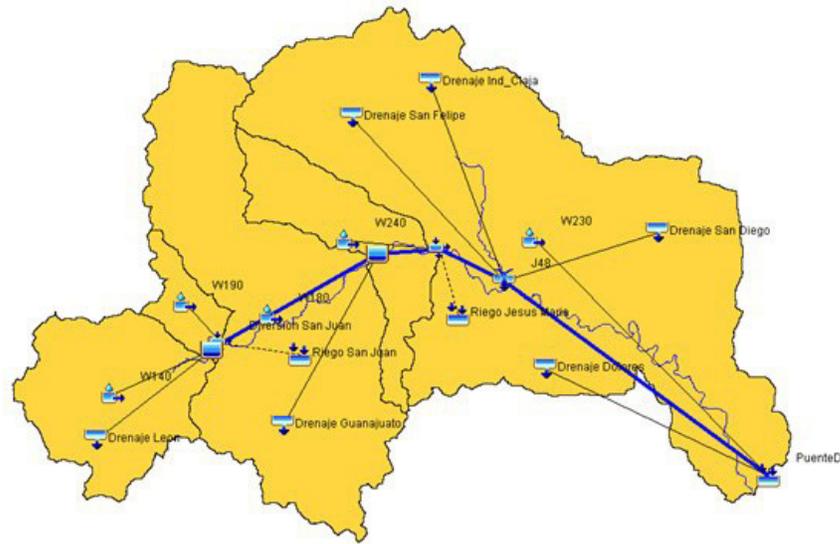


Figura 2. Modelo esquemático HEC-HMS generado para la cuenca alta Laja-Peñuelitas hasta la estación hidrométrica Puente Dolores.

El Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) o índice de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje de Sesgo (PBIAS) fueron utilizados por su amplia utilización en la evaluación de rendimientos en modelos hidrológicos. El NSE mostrando en la Ecuación (1) varía entre  $-\infty$  y 1. Indica una coincidencia perfecta entre los valores observados y los pronosticados cuando  $NSE = 1$ .

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

Donde  $S_i$  es el valor simulado en el tiempo  $i$ ,  $O_i$  es el valor observado en el tiempo  $i$ ,  $\bar{S}_i$  es el promedio de los valores simulados,  $\bar{O}$  es el promedio de los valores observados, y  $n$  es el número de datos. Los valores entre 0.0 y 1.0 generalmente se consideran niveles aceptables de rendimiento, mientras que valores inferiores a 0.0 indican que el valor medio observado es mejor que el valor simulado, lo que indica un rendimiento inaceptable (Golmohammadi et al., 2014) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rangos de desempeño del Índice de Nash (NSE) para valores mensuales (Moriasi et al., 2007).

<b>Rango de desempeño</b>	<b>NSE</b>
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.0$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) señalado en la Ecuación (2) indica una coincidencia perfecta entre los valores observados y pronosticados cuando es igual a 0 (cero), con valores RMSE crecientes que indican una coincidencia cada vez más pobre. Singh, Knapp, Arnold, and Demissie (2005) declararon que los valores de RMSE inferiores a la mitad de la desviación estándar de los datos observados (medidos) ( $DESVEST_{(Obs)}$ ) podrían considerarse bajos e indicativos de una buena predicción del modelo.

$$RMSE = \left[ \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \right] \quad (2)$$

El porcentaje de sesgo (PBIAS) mostrado en la Ecuación (3) mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grandes o más pequeños que sus contrapartes observadas (Gupta et al., 1999). El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud que indican una simulación de modelo precisa (Golmohammadi et al., 2014). Los valores positivos indican un sesgo de subestimación, y los valores negativos indican un sesgo de sobreestimación (Gupta et al., 1999).

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \quad (3)$$

Los rangos de desempeño propuestos del PBIAS se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Rangos de desempeño del PBIAS para valores mensuales (Moriassi et al., 2007).

Rango de desempeño	PBIAS
Muy bueno	PBIAS < ±10
Bueno	±10 ≤ PBIAS < ±15
Satisfactorio	±15 ≤ PBIAS < ±25
Insatisfactorio	PBIAS ≥ 25

### 5.2.3. Índices de cambio climático en precipitación

Después de un proceso de control de calidad de datos y homogeneización utilizando información climática del Servicio Meteorológico Nacional a través de estaciones climatológicas convencionales dentro y cercanas a la cuenca para el periodo 1982-2017, se obtuvieron 11 índices de cambio climático en precipitación para la cuenca alta Laja-Peñuelitas (Figura 3) a través del programa RClimDex (X. Zhang & Yang, 2004b).

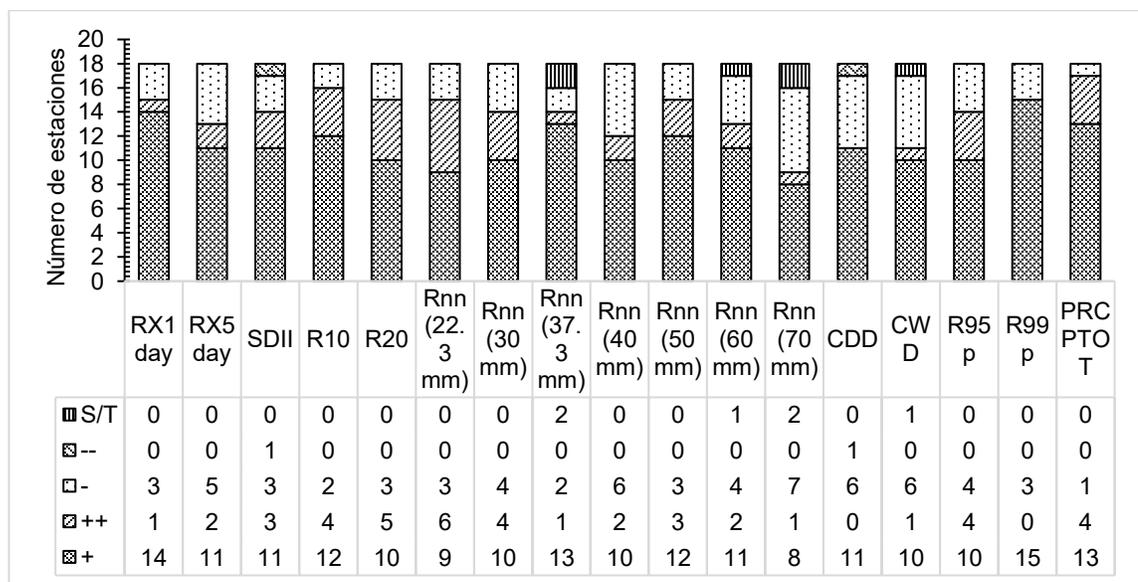


Figura 3. Resumen de tendencias en los índices para la cuenca alta Laja-Peñuelitas; (+) tendencia de incremento no significativa, (++) tendencia de incremento significativa, (-) tendencia de decremento no significativa, (--) tendencia de decremento significativa, (S/T) sin tendencia. Significancia estadística (p-valúe ≤ 0.05).

De los 11 índices de cambio climático en precipitación se observa que, a pesar de no existir una marcada tendencia significativa ascendente, la cuenca alta Laja-Peñuelitas presenta la tendencia general al incremento de los fenómenos de lluvia; esto evidenciando que, en caso de ocurrir un cambio en la precipitación, las señales descartan un escenario de reducción en los fenómenos de lluvia.

#### 5.2.4. Cambios de uso del suelo y vegetación

Para el análisis del cambio del uso del suelo y vegetación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas se utilizó información del Conjunto de datos vectoriales de las cartas de uso del suelo y vegetación INEGI F14-7, escala 1:250 000, serie III (INEGI, 2005a), serie IV (INEGI, 2009) y serie V (INEGI, 2013a), asimismo del Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000, serie VI Conjunto Nacional de INEGI (INEGI, 2016). La información presente de la serie III a serie IV corresponde a información cartográfica del periodo 2002 a 2014 (13 años). Los usos del suelo y vegetación fueron agrupados en 15 categorías basadas en características comunes (Cuadro 4 y Figura 4).

Cuadro 4. Usos de suelo y vegetación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

No	Uso del suelo y vegetación	CLAVE	Porcentaje del área de la cuenca			
			Serie III	Serie IV	Serie V	Serie VI
1	Agricultura de riego	AGRC	3.94	4.02	3.99	3.97
2	Agricultura de temporal	AGRR	31.05	30.17	30.22	30.32
3	Asentamientos humanos	AH	0.22	0.25	0.25	0.38
4	Bosque de encino	OAK	9.91	9.85	9.90	9.82
5	Bosque de encino/vegetación secundaria arbustiva	BQSC	6.74	7.77	7.57	8.06
6	Bosque de encino-pino/vegetación secundaria arbustiva	BQPSC	0.79	0.79	0.79	0.85
7	Bosque de pino	PINE	4.38	4.38	4.38	4.34

8	Bosque de pino/vegetación secundaria arbustiva	BPSC	1.27	1.22	1.22	1.21
9	Bosque mixto (pino-encino-pino)	FRST	2.75	2.75	2.75	2.73
10	Cuerpos de agua	H20	0.83	0.83	0.83	0.95
11	Matorral xerófilo	MXPM	1.73	1.54	1.54	1.54
12	Matorral xerófilo/vegetación secundaria arbustiva	MXSC	1.60	1.83	1.83	1.66
13	Pastizal natural e inducido	PAST	17.14	17.06	17.17	15.78
14	Pastizal natural/vegetación secundaria arbustiva	PNSC	17.64	17.55	17.56	18.12
15	Área desprovista de vegetación	BARR	0.00	0.00	0.00	0.28

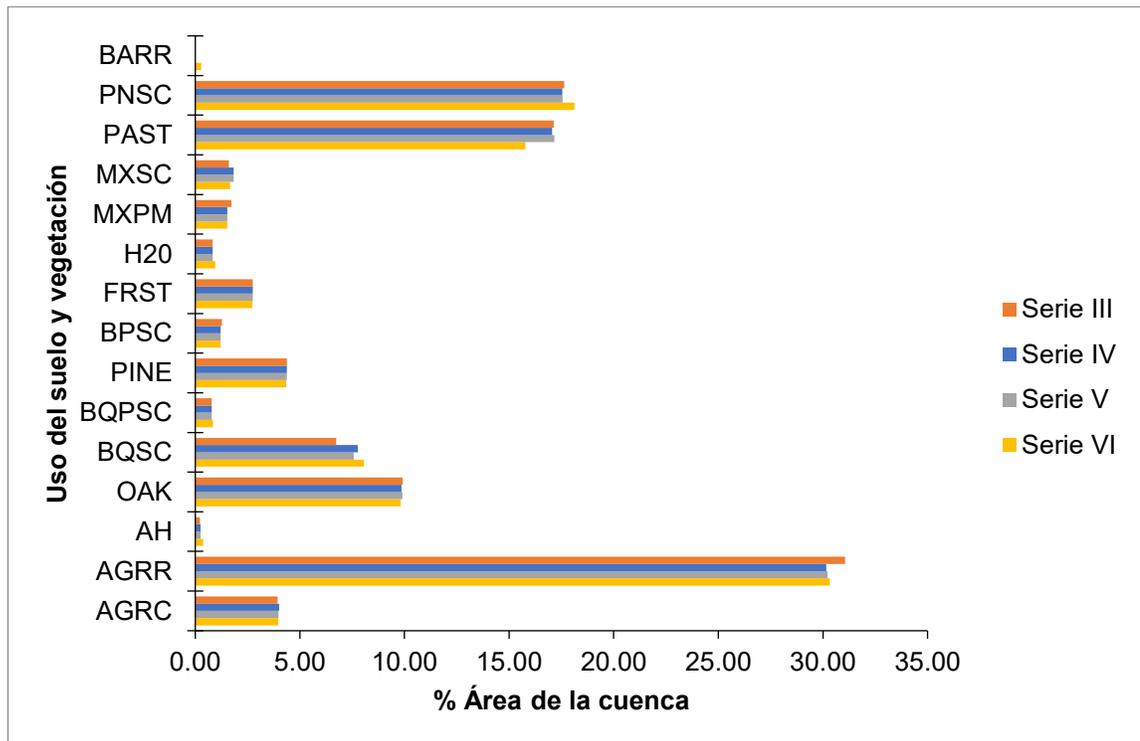


Figura 4. Comportamiento de la superficie de los usos del suelo y vegetación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

En la Figura 5 se muestra la distribución espacial de los usos del suelo y vegetación (Usv) en la cuenca alta Laja-Peñuelitas a lo largo de 13 años.

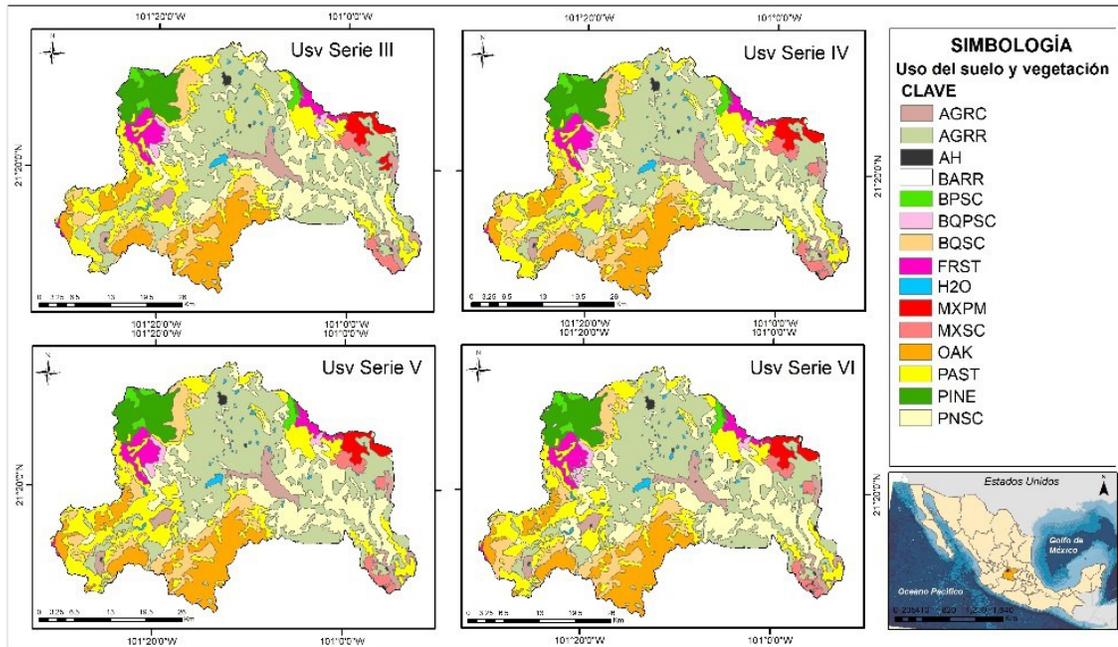


Figura 5. Evolución de los usos del suelo y vegetación serie III a serie VI de INEGI en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

### 5.2.5. Respuesta hidrológica ante escenarios de cambio climático y uso del suelo y vegetación

Simular la respuesta hidrológica de una cuenca a diferentes condiciones de escenario implica calibrar y validar un modelo hidrológico usando las condiciones presentes y ejecutar el modelo con parámetros y datos de entrada correspondientes a las condiciones del escenario propuesto y comparar las dos simulaciones (Legesse et al., 2003).

En México, la respuesta hidrológica de las cuencas ante el cambio de uso del suelo y vegetación ha sido abordada en revistas científicas a través del análisis de: a) diferencias en los valores del número de curva de escurrimiento (CN) de información histórica de uso del suelo y vegetación (Miranda-Aragón, Ibáñez-

Castillo, Valdez-Lazalde, & Hernández-de la Rosa, 2009; Juárez-Méndez, Ibáñez-Castillo, Pérez-Nieto, & Arellano-Monterrosas, 2009), b) impacto de diferentes condiciones de la vegetación en los valores de número de curva de escurrimiento (Velásquez, Muñoz, Sánchez, Macías, & Flores, 2013), c) coeficientes de escurrimiento a través de información histórica de uso del suelo y vegetación (Mendoza, Bocco, Granados, & Bravo, 2002), d) mediciones in situ en diferentes usos del suelo y vegetación (Muñoz-Villers et al., 2015).

En contraparte la respuesta hidrológica ante el cambio climático se ha estudiado a través de: a) diferencias en la respuesta a partir de información histórica (González-Villela, Martínez, & Sepúlveda, 2018), b) reducción porcentual futura en precipitación (Chamizo-Checa et al., 2018), c) aplicación de escenarios de modelos de circulación general (GCM) (López-García, Manzano, & Ramírez, 2017; Molina-Navarro et al., 2016; Pereyra et al., 2016; Velázquez-Zapata, Troin, & Dávila-Ortiz, 2017; Velázquez-Zapata & Troin, 2020).

Sin embargo, el análisis combinado del cambio climático y uso del suelo y vegetación no ha sido plenamente abordado. Para analizar como los potenciales cambios en el clima y las condiciones de cobertura pueden variar el caudal en la cuenca representado a través del comportamiento en la forma hidrograma, el modelo calibrado se ejecutó con parámetros modificados de precipitación (cambio climático) y número de curva de escurrimiento (uso del suelo y vegetación).

Partiendo de la evidencia global generada a partir de los índices de cambio climático en precipitación, la cual descarta escenarios de reducción en la precipitación en la cuenca, se propuso la modificación del modelo hidrológico calibrado mediante incrementos porcentuales de precipitación (Smith & Pitts, 1997) en 10 %, 20 % y 30 % (un procedimiento análogo efectuado por Tripathi et al. (2014)). Se realizó lo indicado anteriormente para dos situaciones: a)

incremento de la lluvia registrada a cada dos horas durante el evento de calibración en todas las EMA; b) incremento de la lluvia registrada a cada dos horas durante el evento de calibración en las EMA localizadas dentro del área de influencia de las estaciones meteorológicas convencionales que presentaron incrementos estadísticamente significativos en el índice Rnn 22.3 mm (número de días en un año en que la precipitación fue mayor o igual a 22.3 mm) (Figura 6); representando este valor la lluvia máxima diaria ponderada para la cuenca del evento calibrado del 29 de agosto del 2007 al 27 de septiembre del 2007.

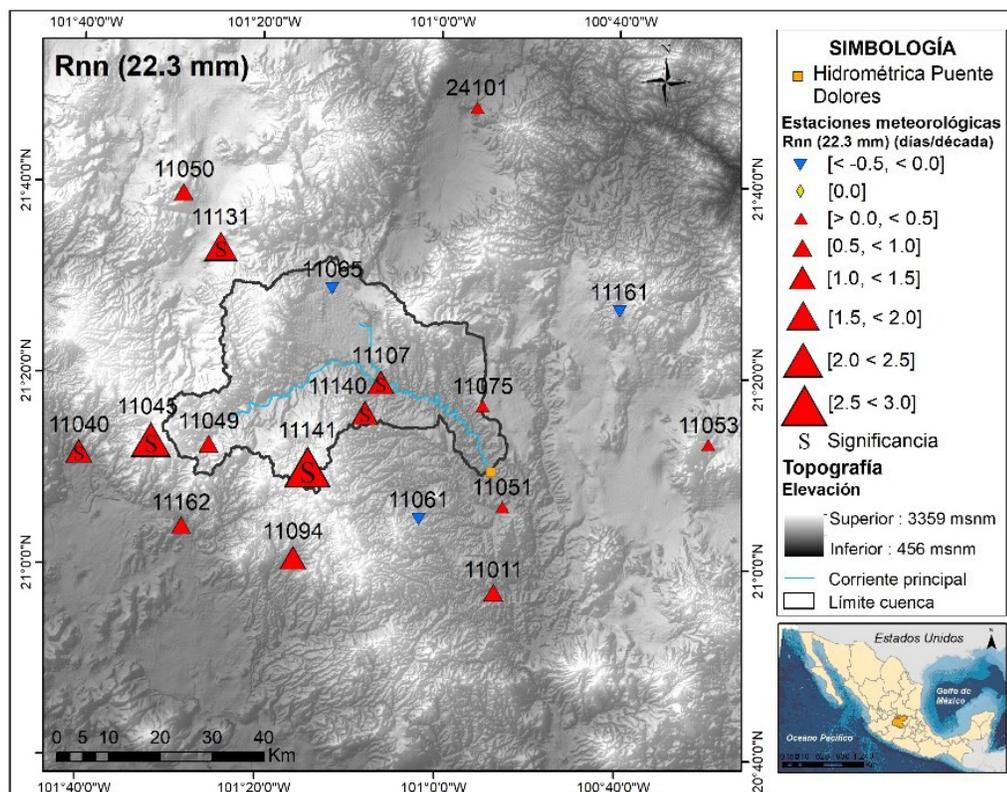


Figura 6. Índice Rnn (22.3 mm) para la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Los polígonos de Thiessen para representar el área de influencia de las estaciones meteorológicas convencionales utilizadas para obtención de los índices de cambio climático, junto con la localización de las EMA del modelo hidrológico calibrado se observa en la Figura 7.

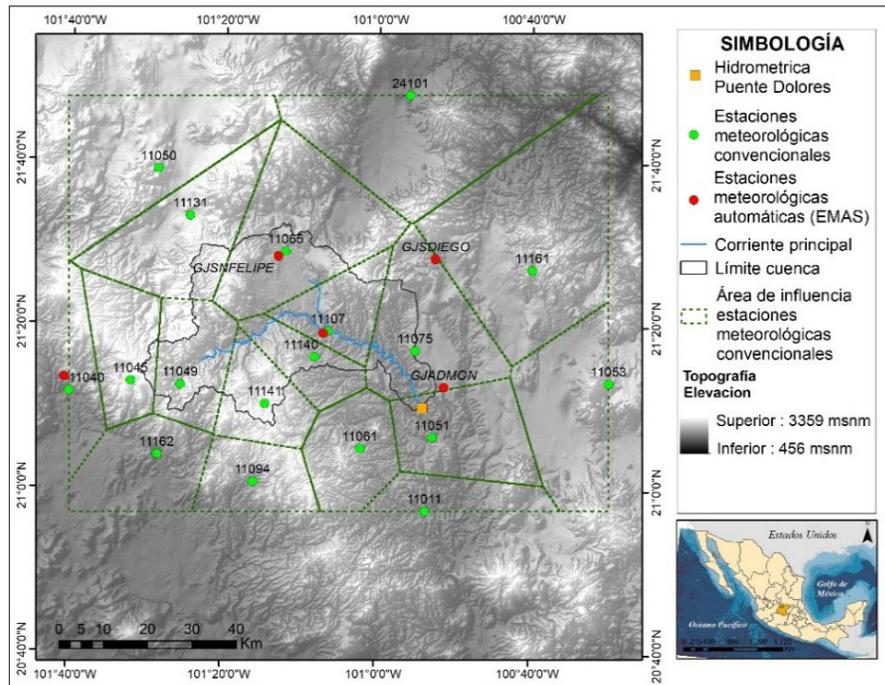


Figura 7. Ubicación y área de influencia de las estaciones meteorológicas convencionales y localización de las EMAS en la cuenca alta Laja-Peñuelitas.

Las estaciones meteorológicas automáticas seleccionadas para los incrementos-decrementos porcentuales personalizados en la precipitación del evento calibrado se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Incrementos personalizados a partir del índice Rnn (22.3 mm).

EMA	Peso de la EMA en el modelo calibrado	Ubicación dentro del área de influencia estación meteorológica convencional:	Incremento-decremento porcentual
GJADMON	0.0793	11075	no
GJHACEAG	0.0845	11040	si
GJQUEMADA	0.4641	11107	si
GJSDIEGO	0.0402	11075	no
GJSNFELIPE	0.3319	11065	no

Cabe destacar que Prieto, Avendaño, y Matías (2010) catalogan el rango de 20 mm a 70 mm de lluvia máxima acumulada en 24 horas como lluvia fuerte, y es

usado por el Centro Nacional de Prevención y Desastres en México en su clasificación de los diferentes tipos de precipitación. Es importante mencionar que la EMA “GJHACEAG” no registro lluvia durante el evento calibrado, por lo tanto, los incrementos en los datos de precipitación no representaron ningún efecto en las simulaciones.

De la información de uso del suelo y vegetación recopilada, se observa una disminución de la superficie destinada a las actividades agrícolas y ganaderas (agricultura de temporal, agricultura de riego y pastizales) y una recuperación del área cubierta por bosques de pino y encino. No obstante, se aprecia un incremento en la superficie urbana y desprovista de vegetación, señales del incremento poblacional y el grado de deterioro en diversas regiones de la cuenca alta Laja-Peñuelitas. Para analizar los efectos del cambio del uso de suelo y vegetación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas se consideró un aumento y reducción de 10 % en los valores del número de curva de escurrimiento a nivel subcuenca en el modelo hidrológico calibrado, considerando tanto un escenario de incremento y de reducción en la superficie con características cada vez más impermeables en la cuenca de estudio (Cuadro 6).

Cuadro 6. Comportamiento de los valores del número de curva en el modelo hidrológico calibrado ante incremento y decremento potencial del 10 %.

<b>Subcuenca</b>	<b>CN calibrado</b>	<b>CN +10 %</b>	<b>CN -10 %</b>
W140	67.58	74.34	60.82
W180	72.46	79.71	65.22
W190	86.39	95.02	77.75
W230	70.23	77.26	63.21
W240	78.11	85.92	70.30

Finalmente, se evaluó la sensibilidad del modelo calibrado ante diversas combinaciones de incrementos porcentuales en precipitación e incrementos-decrementos en el número de curva de escurrimiento, esto a través del análisis

del hidrograma calibrado vs hidrogramas de escenarios potenciales; se evaluó cada uno de los rendimientos a través de la Diferencia en el Pico (PDIFF), Porcentaje de Error en el Pico (PEP) y Porcentaje de Sesgo (PBIAS). La Diferencia en el Pico (PDIFF) mostrada en la Ecuación (4) registra en unidades reales qué tan bien el valor de salida más alto en el conjunto de datos modelados coincide con el valor registrado más alto en el conjunto de datos observados; la métrica es positiva si un modelo subestima los valores reales o negativa si un modelo sobreestima los valores reales (Dawson, Abrahart, & See, 2007).

$$PDIFF = \max(O_i) - \max(S_i) \quad (4)$$

Porcentaje de Error en el Pico (PEP) señalado en la Ecuación (5) comprende la diferencia entre el valor más alto en el conjunto de datos modelados y el valor más alto en el conjunto de datos observados, hecho en relación con la magnitud del valor más alto en el conjunto de datos observados, y expresado como un porcentaje; para un modelo perfecto, el resultado sería cero; la métrica se ha ajustado intercambiando los valores observados y modelados en el numerador para que las subestimaciones produzcan un valor positivo y las sobreestimaciones produzcan un valor negativo, es decir, equivalente a PDIFF (Dawson et al., 2007).

$$PEP = 100 * \frac{\max(O_i) - \max(S_i)}{\max(O_i)} \quad (5)$$

PDIFF (Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1998) y PEP (Dawson et al., 2007) tienen como objetivo caracterizar la diferencia entre el pico observado y el modelado, sin embargo, no evalúan si los picos ocurrieron al mismo tiempo; en consecuencia, en caso de que ocurran múltiples eventos en una serie de tiempo dada, primero se deben etiquetar los picos correspondientes (Hauduc et al., 2015).

### 5.3. Resultados y discusión

#### 5.3.1. Modelo hidrológico calibrado

En la Figura 8 se muestra el caudal observado en la estación hidrométrica vs caudal simulado del modelo calibrado para la cuenca alta Laja-Peñuelitas, ambas a nivel horario (2 horas).

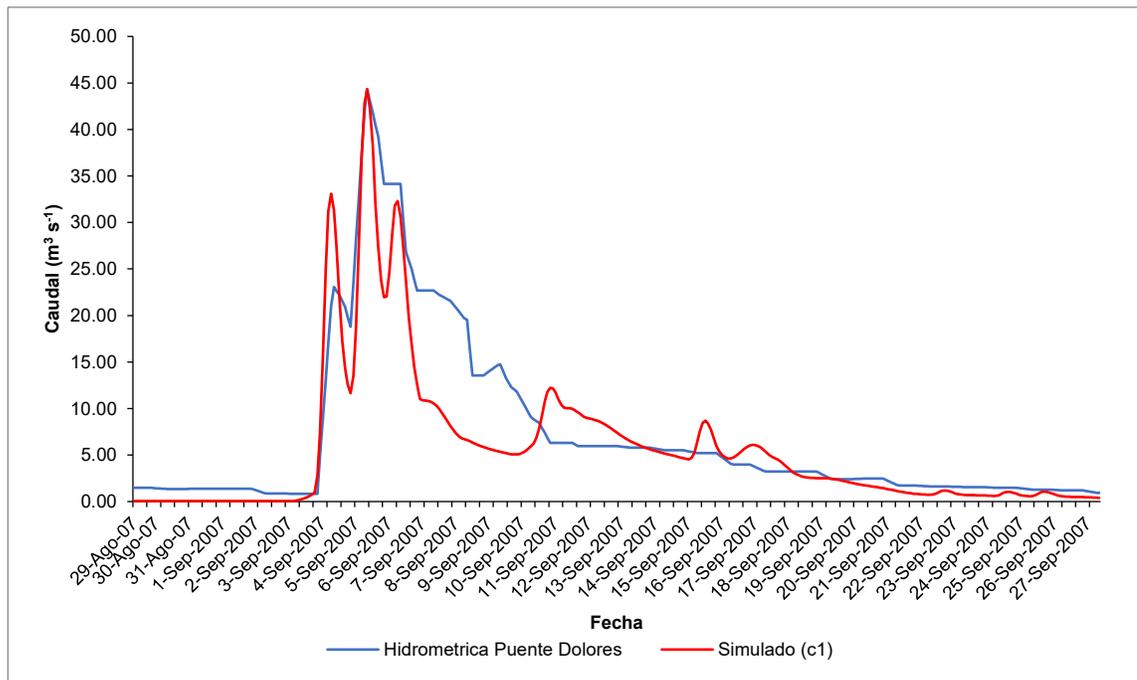


Figura 8. Comparación del caudal observado vs caudal simulado calibrado.

En el Cuadro 7 y Cuadro 8 se observan los parámetros optimizados del evento de calibración (c1) del 29 de agosto al 27 de septiembre del 2007.

Cuadro 7. Parámetros optimizados en HEC-HMS.

Parámetro		Valor inicial	Rango de calibración	Aplicación	Valor calibrado
Subcuenca	Pérdida (Número de curva SCS)	CN ajustado H.A + slp	+/- 20 %	Todas las subcuencas	0.96015
	Abstracciones iniciales (Ia)	0.20	0.10 - 0.30	Todas las subcuencas	0.2

Transformar (Hidrograma unitario SCS)		Tiempo de retraso	CNLag	Sin modificación	Todas las subcuencas	Sin modificación
		Tipo de gráfico	Standard (PRF 484)	PRF 100 - PRF 600	Todas las subcuencas	Standard (PRF 484)
Flujo base (Recesión)		Descarga inicial	0.00	Sin modificación	Todas las subcuencas	Sin modificación
		Constante de recesión	0.85	0.8 - 0.9	Todas las subcuencas	0.85
		Proporción flujo umbral	0.1	0.05 - 0.15	Todas las subcuencas	0.1
Cauce	Muskingum		6.079	+/- 20 %	R20	6.9494
			28.149	+/- 20 %	R30	29.6050
			12.803	+/- 20 %	R110	12.699
			1.615	+/- 20 %	R200	1.3488
			4.142	+/- 20 %	R250	2.4542
			x	0.2	0.0 - 0.3	Todos los tramos
Rendimiento del modelo					<b>Nash</b>	<b>0.768</b>
					<b>RMSE</b>	<b>4.466</b>
					<b>PBIAS</b>	<b>20.626</b>

El evento c1 correspondiente a la calibración del modelo obtuvo un índice de Nash de 0.768, y de acuerdo con Moriasi et al. (2007) ingresó a la categoría de un muy buen desempeño el modelo. Se obtuvo un RMSE (4.466) el cual es un valor cercano a cero y representa menos de la mitad de la desviación estándar de los datos observados ( $DESVEST_{(Obs)} = 4.641$ ) lo que es indicativo de una buena predicción del modelo. PBIAS (20.626) indica un sesgo de subestimación general del modelo, y es considerado como un desempeño satisfactorio de acuerdo con Moriasi et al. (2007). Se observó una excelente representación del caudal pico observado vs caudal pico simulado.

Cuadro 8. Números de curva ajustados por humedad antecedente (H.A), pendiente (slope) y por calibración para el evento de calibración.

Subcuenca	CN SCS Serie IV	CN + ajuste H. A.	CN + ajuste (H. A. & slope)	CN + ajuste (H.A & slope & calibración)
W140	81.9	66.7	70.4	67.6
W180	77.8	71.7	75.5	72.5
W190	83.2	88.4	90.0	86.4
W230	79.3	71.1	73.1	70.2
W240	80.2	78.6	81.4	78.1

### 5.3.2. Efectos del cambio climático y uso del suelo y vegetación

En la Figura 9 se muestra el comportamiento del hidrograma calibrado vs hidrograma con incrementos en 10 %, 20 % y 30 % en la lluvia registrada durante el evento de calibración a nivel general (incremento en todas las EMA), y a nivel personalizado a partir del índice Rnn (incremento en las EMA seleccionadas).

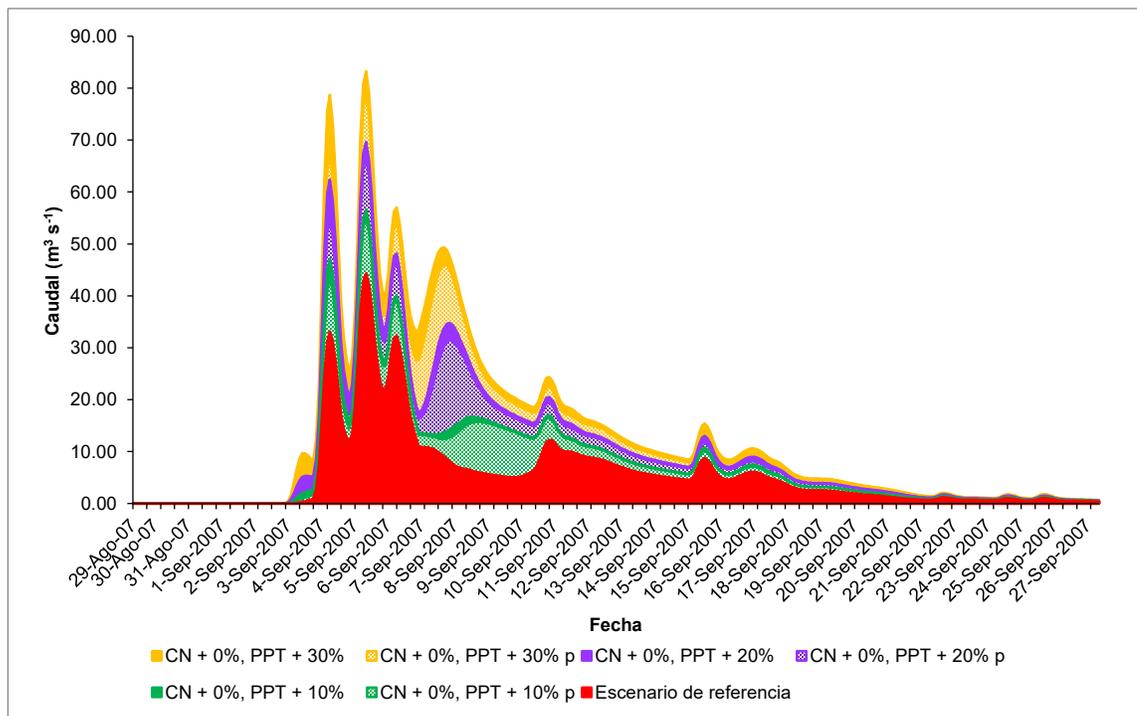


Figura 9. Flujo de salida modelado ante escenarios potenciales de cambio climático (incrementos en precipitación generalizados y personalizados).

En el Cuadro 9 se observa que los aumentos de precipitación en tan solo 10 % provocaron un incremento en el caudal pico de  $56.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y  $55.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  representando un aumento del 27.71 % y 24.06 % con respecto al caudal pico calibrado. Un incremento del 20 % representó un caudal pico de  $69.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y  $66.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  y la presencia de una elevación del caudal sobre la curva de recesión (7 de septiembre del 2007).

Cuadro 9. Comportamiento del caudal pico ante incrementos porcentuales en precipitación.

Escenario	Incremento evento de precipitación EMA	Caudal pico (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	PDIFF	PEP	PBIAS
Escenario de referencia	----	44.3	---	---	---
CN + 0 %, PPT + 10 %	general	56.6	-12.28	-27.71	-41.83
CN + 0 %, PPT + 10 % p	personalizado	55.0	-10.67	-24.06	-35.55
CN + 0 %, PPT + 20 %	general	69.6	-25.32	-57.12	-87.31
CN + 0 %, PPT + 20 % p	personalizado	66.5	-22.14	-49.96	-73.53
CN + 0 %, PPT + 30 %	general	83.3	-38.95	-87.88	-136.64
CN + 0 %, PPT + 30 % p	personalizado	78.7	-34.36	-77.52	-113.71

Un incremento potencial de 30 % en la precipitación generó un comportamiento en el caudal máximo de 83.3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y 78.7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> representando un incremento con respecto al caudal pico del modelo calibrado representado por el PEP del 87.88 % y 77.52 %. Se observan a través del índice PDIFF sobreestimaciones de 10.67 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> hasta 38.95 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> respecto al caudal pico calibrado. Los valores negativos de PBIAS indican un sesgo de sobreestimación de los escenarios potenciales (incrementos en precipitación) respecto al escenario de referencia.

En la Figura 10 se observa el comportamiento del hidrograma calibrado vs hidrograma con incrementos en 10 %, 20 % y 30 % en la lluvia registrada durante el evento de calibración a nivel general e incrementos en 10 % en el número de curva de escurrimiento, y el hidrograma con incrementos a nivel personalizado a partir del índice Rnn (incremento en las EMAS seleccionadas) y del 10 % en el número de curva de escurrimiento.

En el Cuadro 10 se observa que el incremento del 10 % en los valores de CN sin modificar los valores de precipitación incrementaron el caudal pico en 74.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, lo que representa un aumento del 66.96 % (PEP) respecto al alcanzado en el modelo calibrado. Esto muestra que un incremento del 10 % en el número de curva de escurrimiento, presenta un efecto mayor que un incremento en 20 % en la precipitación de manera independiente.

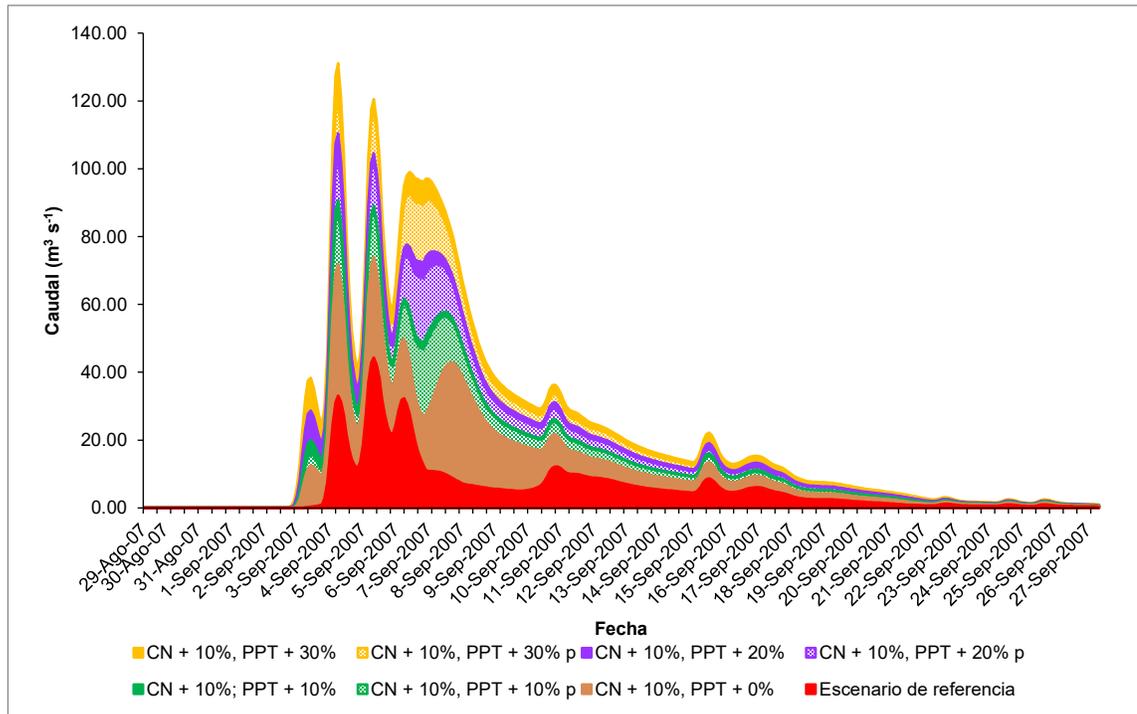


Figura 10. Flujo de salida modelado ante escenarios potenciales de cambio climático (incrementos en CN y en precipitación generalizados y personalizados).

Cuadro 10. Comportamiento del caudal pico ante incrementos porcentuales en precipitación y número de curva.

Evento	Incremento evento de precipitación EMA	Caudal pico ( $m^3 s^{-1}$ )	PDIFF	PEP	PBIAS
Escenario de referencia	----	44.3	---	---	---
CN + 10 %, PPT + 0 %	ninguno	74.0	-29.68	-66.96	-113.21
CN + 10 %, PPT + 10 %	general	90.7	-46.35	-104.57	-171.18
CN + 10 %, PPT + 10 % p	personalizado	87.7	-43.37	-97.84	-161.78
CN + 10 %, PPT + 20 %	general	110.4	-66.12	-149.18	-234.59
CN + 10 %, PPT + 20 % p	personalizado	103.0	-58.71	-132.45	-213.80
CN + 10 %, PPT + 30 %	general	131.1	-86.77	-195.76	-300.62
CN + 10 %, PPT + 30 % p	personalizado	120.0	-75.72	-170.83	-268.78

El comportamiento en el caudal máximo se acrecentó por el efecto combinado de incrementos en la precipitación (30 %) y CN (10 %), alcanzando un máximo de  $131.1 m^3 s^{-1}$  y  $120.0 m^3 s^{-1}$ , representando un 195.8 % (PEP) y 170.8 % (PEP) de

aumento respecto al caudal máximo del modelo calibrado. Los valores del PDIFF muestran un incremento del caudal pico calibrado desde  $29.68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  hasta  $86.77 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Los valores negativos de PBIAS indican un sesgo de sobreestimación aun mayor que los presentados en el cuadro anterior, mostrando el impacto del incremento combinado del número de curva de escurrimiento y precipitación.

En la Figura 11 se observa el comportamiento del hidrograma calibrado vs hidrograma con incrementos en 10 %, 20 % y 30 % en la lluvia registrada durante el evento de calibración a nivel general y reducción en 10 % en el número de curva de escurrimiento, y el hidrograma con incrementos a nivel personalizado a partir del índice Rnn (incremento en las EMAS seleccionadas) y reducción en 10 % en el número de curva de escurrimiento.

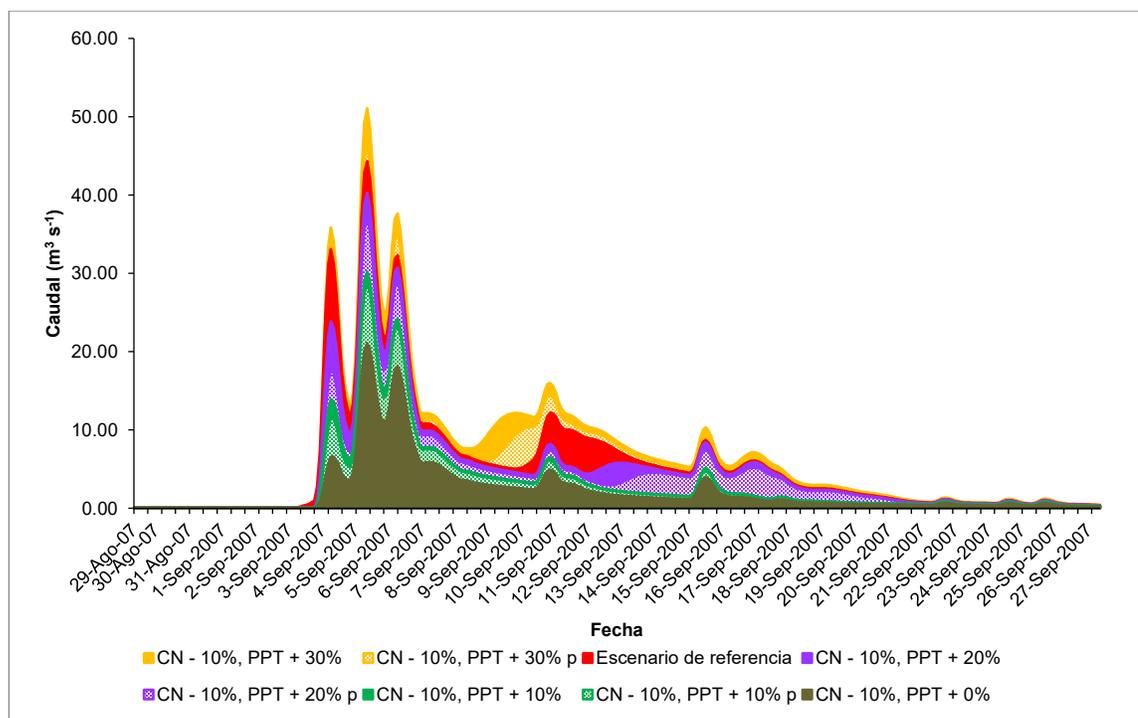


Figura 11. Flujo de salida modelado ante escenarios potenciales de cambio climático (reducción en CN e incrementos en precipitación generalizados y personalizados).

Se observa en el Cuadro 11 que una reducción del 10 % en CN sin modificar los valores de precipitación generó un comportamiento en el caudal pico de 21.1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> representando una reducción del 52.4 % (PEP) con respecto al caudal pico calibrado. Un incremento del 10 % en CN y 20 % en precipitación tanto de manera general (40.3 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) o personalizada (37.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), y una reducción en 10 % del CN y aumento personalizado del 30 % en precipitación, fueron las simulaciones que presentaron una mayor similitud al comportamiento del caudal pico del modelo calibrado, presentando una reducción en el caudal máximo de 9.1 % y 16.4 % y un aumento del 4.2 % respectivamente visualizados a través del PEP. Los valores PDIFF muestran un comportamiento diverso en el caudal pico, observando subestimaciones de 4.05 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> y sobreestimaciones de 6.75 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Cuadro 11. Comportamiento del caudal pico ante decremento en 10 % el número de curva e incrementos porcentuales en precipitación.

Evento	Incremento evento de precipitación EMA	Caudal pico (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	PDIFF	PEP	PBIAS
Escenario de referencia	----	44.3	---	---	---
CN – 10 %, PPT + 0 %	ninguno	21.1	23.23	52.40	60.36
CN – 10 %, PPT + 10 %	general	30.2	14.08	31.77	44.37
CN – 10 %, PPT + 10 % p	personalizado	28.7	15.67	35.36	47.81
CN – 10 %, PPT + 20 %	general	40.3	4.05	9.14	15.30
CN – 10 %, PPT + 20 % p	personalizado	37.0	7.29	16.44	25.31
CN – 10 %, PPT + 30 %	general	51.1	-6.75	-15.22	-20.44
CN – 10 %, PPT + 30 % p	personalizado	46.2	-1.88	-4.24	-4.36

La reducción en las superficies impermeables (reforestación, agroforestería, etc.) reflejadas a través del número de curva de escurrimiento, crean una disminución importante en el flujo de salida, presentando el potencial de mitigar el desarrollo y efecto de inundaciones en un futuro.

Un mejor manejo del uso del suelo y vegetación en la cuenca es pertinente, pero resultará más significativo la implementación de regulaciones estrictas en las políticas de cambio de uso del suelo con relación a el establecimiento de grandes

obras de infraestructura e incrementos en la mancha urbana, y programas como Producción para el Bienestar de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Social, que en circunstancias especiales podrían alentar la deforestación al incentivar el pago por el incremento en la superficie de cultivos de maíz, frijol, trigo harinero, arroz, amaranto, chíá, caña de azúcar, café y por ende, una menor superficie forestal.

No obstante, existen diversos programas tales como “Sembrando Vida” de la Secretaría del Bienestar y los programas de apoyo para el desarrollo forestal sustentable y de compensación ambiental de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) que incentivan a los dueños y poseedores de los terrenos en la cuenca al cuidado e incremento de la superficie forestal (por ejemplo, CONAFOR (2018) menciona que entregó de manera simbólica seis millones de pesos a beneficiarios del Programa Nacional Forestal 2018, dichos apoyos fueron canalizados a proyectos que se desarrollaron en zonas forestales de los municipios de Guanajuato, San Diego de la Unión y San Felipe en la cuenca de estudio, los beneficiarios ejecutaron los proyectos que formaron parte de la asignación 2018 bajo los conceptos de compensación ambiental, servicios ambientales hidrológicos, inversión para el comercio y la industria forestal dirigido a empresas forestales comunitarias, restauración integral, mantenimiento de zonas restauradas, auditoría anual internacional y auditoría preventiva inicial 2018).

Es importante destacar que los efectos de un potencial cambio de uso del suelo generó un mayor impacto en los caudales pico que los efectos potenciales de un cambio climático en precipitación para el modelo calibrado, no obstante, el número y distribución de las estaciones meteorológicas automáticas utilizadas para la modelación hidrológica puede ser un factor limitante para simular con

precisión la influencia de los cambios en precipitación sobre los caudales de salida.

En México, una de las principales limitantes en la modelación hidrológica es la escases de información climática y/o la mala distribución de las estaciones meteorológicas tanto automáticas como convencionales, mismas que se concentran mayormente cerca de centros urbanos, dejando sin información a las zonas serranas y/o de difícil acceso en las cuencas en el país y con ello la afectación en la precisión de la simulación de la respuesta hidrológica presente y/o futura.

Finalmente, la respuesta hidrológica tendrá una importancia diferente dependiendo de la zona del país y su relación con el componente social, siendo de vital importancia principalmente en las regiones sureste y centro de México, zonas que recurrentemente sufren ante los estragos de las inundaciones y que presentan una alta tasa poblacional.

#### **5.4. Conclusiones**

El análisis de los efectos potenciales del cambio climático y uso del suelo y vegetación en la cuenca alta Laja-Peñuelitas mostraron que un incremento en los valores del número de curva de escurrimiento a causa de un potencial cambio de uso del suelo generará una mayor repercusión en el caudal máximo del hidrograma que su contraparte de precipitación.

El efecto combinado de la expansión de las superficies impermeables en la cuenca y tormentas cada vez más severas pueden incrementar cerca de un 200 % los valores registrados en el caudal pico, siendo una señal de alerta para los tomadores de decisiones a nivel local, estatal y federal ante el riesgo de inundación y/o daños en la infraestructura de la cuenca.

El efecto personalizado de los aumentos en precipitación partiendo de la distribución espacial del índice de cambio climático “Rnn 22.3 mm” que mide número de días en que la precipitación es mayor o igual a 22.3 mm, es menor al efecto generalizado de incrementos en precipitación, no obstante, ambos son valores muy cercanos.

Ante las potenciales repercusiones de un cambio climático en precipitación (incrementos), una forma de atenuación sería el incremento de las superficies con características de mayor permeabilidad, mediante la implementación de prácticas agroforestales, reforestación y el continuo cuidado y mantenimiento de la superficie forestal.

### **5.5. Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo otorgado para la realización de este artículo.

Al Comité Estatal de Aguas de Guanajuato (CEAG) por el apoyo en el otorgamiento de información de las estaciones meteorológicas automáticas a su cargo.

### **5.6. Literatura citada**

Arreguín C, F. I., López P, M., Rodríguez L, O., & Montero M, M. J. (2015). *Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Asadieh, B., & Krakauer, N. Y. (2017). Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 5863–5874. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5863-2017>

Bruijnzeel, L. A. (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104, 185–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.015>

Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A. J., González-Ramírez, C. A., Suárez-Sánchez, J., & Muñoz-Nava, H. (2018). El cambio

- climático y la disponibilidad agua en sub-cuencas del Valle del Mezquital, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 5(5), 40–51.
- CONAFOR. (2018). Entrega CONAFOR 6 mdp en Guanajuato para desarrollo forestal sustentable. <https://www.gob.mx/conafor/prensa/entrega-conafor-6-mdp-en-guanajuato-para-desarrollo-forestal-sustentable>. 15-Ago-2021.
- CONAGUA. (1987). *Instructivo de hidrología para determinar la avenida máxima ordinaria asociada a la delimitación de la zona federal*. México, D.F: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2012). Sistema de Seguridad de Presas. Comisión Nacional del Agua. <https://presas.conagua.gob.mx/inventario/>. 02-Abr-2020.
- CONAGUA. (2019). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, BANDAS. Comisión Nacional del Agua [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada BANDAS.htm](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm). 01-May-2019.
- Dawson, C. W., Abrahart, R. J., & See, L. M. (2007). HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling & Software*, 22(7), 1034–1052. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.008>
- ESRI. (2012). *ArcGis 10.1*. Redlands, CA, USA.: Environmental Systems Research Institute.
- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Golmohammadi, G., Prasher, S., Madani, A., & Rudra, R. (2014). Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. *Hydrology*, 1, 20–39. <https://doi.org/10.3390/hydrology1010020>
- González-Villela, R., Martínez M, M. J., & Sepúlveda S, J. S. (2018). Effects of climate change on the environmental flows in the Conchos River (Chihuahua, Mexico). *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.10.004>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751–763. <https://doi.org/10.1029/97WR03495>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4, 135–143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))

- Hauduc, H., Neumann, M. B., Muschalla, D., Gamerith, V., Gillot, S., & Vanrolleghem, P. A. (2015). Efficiency criteria for environmental model quality assessment: A review and its application to wastewater treatment. *Environmental Modelling & Software*, 68(3), 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.02.004>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- INEGI. (1998). *Conjunto de datos vectoriales de la carta Edafológica, escala 1:250 000, serie I*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825234621>
- INEGI. (2005). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1: 250 000, serie III (Continuo Nacional) (1a ed.; Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática - INEGI, Ed.)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825231903>
- INEGI. (2008). *Conjunto de datos vectoriales Unidades Climáticas, escala 1:1 000 000*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI. (2009). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, serie IV (Conjunto Nacional) (1a ed.; Dirección General de Geografía y Medio Ambiente - INEGI, Ed.)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825233396>
- INEGI. (2010). Siatl: Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas 3.2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#). 01-Sept-2020.
- INEGI. (2013a). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, serie V (Conjunto Nacional)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825570460>
- INEGI. (2013b). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, CEM. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevaciones/mex/>. 01-May-2019.
- INEGI. (2016). *Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, serie VI (Capa Unión)*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598459>
- Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L. A., Pérez-Nieto, S., & Arellano-Monterrosas, J. L. L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 69–76.

- Khoi, D. N., & Suetsugi, T. (2014). The responses of hydrological processes and sediment yield to land-use and climate change in the Be River Catchment, Vietnam. *Hydrological Processes*, 28, 640–652. <https://doi.org/10.1002/hyp.9620>
- Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., & Gasse, F. (2003). Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 275, 67–85. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00019-2)
- Li, Z., Liu, W., Zhang, X., & Zheng, F. (2009). Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 377, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.007>
- López-García, T. G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 105–114.
- Mango, L. M., Melesse, A. M., McClain, M. E., Gann, D., & Setegn, S. G. (2011). Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 2245–2258. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2245-2011>
- Marhaento, H., Booij, M. J., & Hoekstra, A. Y. (2017). Attribution of changes in stream flow to land use change and climate change in a mesoscale tropical catchment in Java, Indonesia. *Hydrology Research*, 48(4), 1143–1155. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.110>
- Marhaento, H., Booij, M. J., & Hoekstra, A. Y. (2018). Hydrological response to future land-use change and climate change in a tropical catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 63(9), 1368–1385. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1511054>
- Mendoza, M., Bocco, G., Granados, E. L., & Bravo, M. (2002). Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, (49), 92–117.
- Miranda-Aragón, L., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdez-Lazalde, J. R., & Hernández-de la Rosa, P. (2009). Modelación hidrológica empírica del gasto de 100 años de periodo de retorno del río Grande, Tlachapa, Guerrero en dos escenarios de uso del suelo. *Agrociencia*, 43, 333–334.
- Mishra, B. K., Rafiei Emam, A., Masago, Y., Kumar, P., Regmi, R. K., & Fukushi,

- K. (2018). Assessment of future flood inundations under climate and land use change scenarios in the Ciliwung River Basin, Jakarta. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S1105–S1115. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12311>
- Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., Ramírez-Hernández, J., Mungaray-Moctezuma, A., & Sastre-Merlín, A. (2016). Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. *Agricultural Water Management*, 175, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.10.029>
- 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.
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Marín-Castro, B., Gómez-Tagle, A., ... Bruijnzeel, L. A. (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque*, 36(3), 395–407.
- 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.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Grassland, soil and water research laboratory of agricultural research service and blackland research center at Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. USA: Texas Water Resources Institute.
- Neupane, R. P., & Kumar, S. (2015). Estimating the effects of potential climate and land use changes on hydrologic processes of a large agriculture dominated watershed. *Journal of Hydrology*, 529, 418–429. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.050>
- Pereyra D, D., Hoyos R, C., Pereyra C, K., Filobello N, U., Pérez S, A., & Ramírez G, V. (2016). Escurrimiento generado por tormentas intensas en Veracruz , México: Estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(6), 37–65.
- Prieto G, R., Avendaño G, M. A., & Matías R, L. G. (2010). Tormentas Severas. In *Serie Fascículos* (1a ed.). Ciudad de México: Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.
- Scharffenberg, B., Bartles, M., Brauer, T., Fleming, M., & Karlovits, G. (2018). *Hydrologic modeling system (HEC-HMS): User's manual Version 4.3*. Davis, CA: U.S Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic

Engineering Center (CEIWR-HEC).

- Shrestha, S., & Htut, A. Y. (2016). Land Use and Climate Change Impacts on the Hydrology of the Bago River Basin, Myanmar. *Environmental Modeling & Assessment*, 21(6), 819–833. <https://doi.org/10.1007/s10666-016-9511-9>
- Singh, J., Knapp, H. V., Arnold, J. G., & Demissie, M. (2005). Hydrological modeling of the Iroquois river watershed using HSPF and SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 343–360. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03740.x>
- Smith, J. B., & Pitts, G. J. (1997). Regional climate change scenarios for vulnerability and adaptation assessments. *Climatic Change*, 36, 3–21. <https://doi.org/10.1023/A:1005300731681>
- Thanapakpawin, P., Richey, J., Thomas, D., Rodda, S., Campbell, B., & Logsdon, M. (2007). Effects of landuse change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. *Journal of Hydrology*, 334, 215–230. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.012>
- Tripathi, R., Sengupta, S. K., Patra, A., Chang, H., & Jung, I. W. (2014). Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA. *Applied Geography*, 46, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.11.007>
- USACE. (2013). *HEC-GeoHMS 10.1*. Davis, CA: US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
- USACE. (2018). *HEC-HMS 4.3*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/>
- USDA-NRCS. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds: Technical Release 55*. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture.
- Velásquez V, M. A., Muñoz V, J. A., Sánchez C, I., Macías R, H., & Flores L, H. E. (2013). Simulación del impacto del manejo sobre la respuesta hidrológica en una cuenca de pastizal parcialmente instrumentada. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, XII(1), 7–12. <https://doi.org/10.5154/r.rchsza.2012.06.033>
- Velázquez-Zapata, J. A., & Troin, M. (2020). Incertidumbre en la evaluación del impacto del cambio climático en dos cuencas mexicanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(1), 1–36. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-01-01>
- Velázquez-Zapata, J. A., Troin, M., & Dávila-Ortiz, 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. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.030>

Wang, X. (2014). Advances in separating effects of climate variability and human activity on stream discharge: An overview. *Advances in Water Resources*, 71, 209–218. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.06.007>

Zhang, L., Nan, Z., Xu, Y., & Li, S. (2016). Hydrological Impacts of Land Use Change and Climate Variability in the Headwater Region of the Heihe River Basin, Northwest China. *PLOS ONE*, 11(6), e0158394. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158394>

Zhang, X., & Yang, F. (2004). *RClimDex (1.0) User Manual*. Ontario, Canada: Climate Research Branch, Environment Canada.