



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO COAHUAYANA, JALISCO, MÉXICO

TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

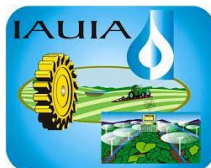
PEDRO GIRÓN MÉNDEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO



APROBADA



Chapingo, Estado de México, octubre de 2022

MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO
COAHUAYANA, JALISCO, MÉXICO

Tesis realizada por **Pedro Girón Méndez** bajo la supervisión del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

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

DIRECTOR:



DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR:



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR:



DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

CONTENIDO

CONTENIDO.....	ii
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
DEDICATORIAS	xi
AGRADECIMIENTOS	xii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	xiii
RESUMEN GENERAL	xiv
GENERAL ABSTRACT	xv
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Literatura citada	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Ciclo hidrológico	5
2.2 Cuenca hidrográfica.....	6
2.3 Precipitación y su medición	7
2.4 La Misión de Medición de Precipitación Global	10
2.5 Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG)	11
2.6 Modelos hidrológicos	13
2.7 Número de curva de escurrimiento	15
2.8 Hidrograma unitario de Clark	18
2.9 Hidrograma unitario modificado de Clark.....	20
2.10 Método de Muskingum	23

2.11	HEC-HMS.....	25
2.11.1	El modelo de la cuenca.....	26
2.11.2	El modelo meteorológico.....	27
2.11.3	Especificaciones de control.....	28
2.12	Criterios de evaluación	28
2.13	Calibración del modelo hidrológico	30
2.14	Literatura citada.....	31
3.	EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN IMERG EN MÉXICO.....	36
3.1	Resumen	36
3.2	Abstract.....	37
3.3	Introducción	38
3.4	Materiales y métodos.....	40
3.4.1	Descripción de la zona de estudio.....	40
3.4.2	Datos de precipitación del producto IMERG	41
3.4.3	Datos de precipitación de las estaciones meteorológicas	42
3.4.4	Procesamiento de los datos	44
3.4.5	Indicadores estadísticos de evaluación.....	44
3.4.6	Indicadores en función de la elevación y categorización de las intensidades de precipitación	46
3.5	Resultados y discusión	47
3.5.1	Análisis horario.....	47
3.5.2	Análisis diario	50

3.5.3	Evaluación de los productos IMERG de acuerdo con la elevación de la estación meteorológica e intensidades de precipitación.....	54
3.6	Conclusiones	59
3.7	Literatura citada	59
4.	MODELO HIDROLÓGICO CON IMÁGENES IMERG EN LA CUENCA DEL RÍO COAHUAYANA, JALISCO, MÉXICO	64
4.1	Resumen	64
4.2	Abstract.....	65
4.3	Introducción	66
4.4	Materiales y métodos.....	68
4.4.1	Zona de estudio.....	68
4.4.2	Fuentes de información.....	68
4.4.3	Modelación hidrológica.....	71
4.4.4	Obtención de entradas al modelo.....	76
4.4.5	Calibración del modelo hidrológico en HEC-HMS 4.8.....	77
4.4.6	Ajuste de bondad del modelo hidrológico.....	78
4.4.7	Resultados y discusión.....	80
4.4.8	Conclusiones.....	86
4.5	Literatura citada	86

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Cuadro 1. Grupos hidrológicos de suelo.....	17
Cuadro 2. Métodos del modelo de cuenca.	27
Cuadro 3. Métodos del modelo meteorológico.	28
Cuadro 4. Ecuaciones y valores óptimos de los indicadores estadísticos.	29
Cuadro 5. Tabla de contingencia de posibles eventos.....	29
Cuadro 6. Clasificación para el índice de eficiencia NSE en la evaluación de modelos.	30

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN IMERG EN MÉXICO

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas automáticas y convencionales del SMN en la zona de estudio.....	43
Cuadro 2. Eventos hidrometeorológicos seleccionados en la zona de estudio.	44
Cuadro 3. Ecuaciones y valores óptimos para los indicadores estadísticos.	45
Cuadro 4. Tabla de contingencia de posibles eventos.....	46
Cuadro 5. Indicadores de los tres productos de precipitación IMERG (IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F) a escala horaria.	49
Cuadro 6. Métricas estadísticas de los tres productos de precipitación IMERG (IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F) a escala diaria.	52
Cuadro 7. Estimaciones de los parámetros (β_0 , β_1) del modelo de regresión lineal, el coeficiente de determinación (R^2) y el valor p correspondiente.	56
Cuadro 8. Coeficiente de NSE para las diferentes intensidades en cada evento a escala diaria.....	57

CAPÍTULO 4. MODELO HIDROLÓGICO CON IMÁGENES IMERG EN LA CUENCA DEL RÍO COAHUAYANA, JALISCO, MÉXICO

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas del SMN en la cuenca del río Coahuayana.	69
Cuadro 2. Eventos hidrometeorológicos seleccionados para modelar la cuenca del río Coahuayana.....	71
Cuadro 3. Ecuaciones y valores óptimos de cada indicador estadístico.....	78
Cuadro 4. Clasificación recomendada del coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) para la evaluación de modelos hidrológicos.	79
Cuadro 5. Características de las subcuencas de la zona de estudio.....	81
Cuadro 6. Número de curva de escurrimiento optimizado para cada evento. ..	81
Cuadro 7. Tiempo de concentración optimizado para cada evento.	82
Cuadro 8. Resultados de los modelos hidrológicos calibrados para la cuenca del río Coahuayana.	83
Cuadro 9. Diferencias entre valores máximos observados y modelados.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Figura 1. Principales componentes del ciclo hidrológico en unidades relativas a un volumen anual en precipitación terrestre de 100.	6
Figura 2. Estaciones climatológicas operando del SMN.	9
Figura 3. Estaciones meteorológicas automáticas del SMN.	9
Figura 4. Esquema de clasificación de modelos hidrológicos	14
Figura 5. Principales elementos de un hidrograma unitario.	18
Figura 6. a) Isócronas; b) Histograma tiempo-área.....	20
Figura 7. Modelo conceptual del hidrograma unitario de Clark.	20
Figura 8. Modelo conceptual del hidrograma unitario distribuido de Clark modificado.....	21
Figura 9. Esgurrimiento superficial de una cuenca.	23
Figura 10. Almacenamiento durante el paso de una avenida.	24
Figura 11. Esquema del procedimiento de calibración.	31

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN IMERG EN MÉXICO

Figura 1. Localización del área de estudio y distribución espacial de las estaciones meteorológicas.	41
Figura 2. Precipitación estimada por IMERG versus precipitación observada por las estaciones meteorológicas para los eventos de 2018, 2020 y 2021.	48
Figura 3. NSE, R^2 , RMSE ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), POD y FAR de los productos IMERG a escala horaria.....	48
Figura 4. Gráficas de caja de NSE, R^2 , RMSE ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), POD y FAR a escala horaria.....	50

Figura 5. Precipitación estimada por IMERG <i>versus</i> precipitación observada por las estaciones meteorológicas para los eventos de 2011, 2013, 2015 y 2018.	51
Figura 6. Precipitación estimada por IMERG <i>versus</i> precipitación observada por las estaciones meteorológicas para los eventos de 2020 y 2021.	52
Figura 7. NSE, R^2 , RMSE ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$), POD y FAR de los productos IMERG a escala diaria.....	52
Figura 8. Gráficas de caja de NSE, R^2 , RMSE ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$), POD y FAR a escala diaria.	54
Figura 9. Relación entre el NSE y R^2 para el producto IMERG-E y la elevación de las estaciones meteorológicas a escala diaria del evento de 2011.....	56
Figura 10. R^2 , RMSE ($\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$), POD y FAR para las diferentes intensidades en cada evento a escala diaria.	58

CAPÍTULO 4. MODELO HIDROLÓGICO CON IMÁGENES IMERG EN LA CUENCA DEL RÍO COAHUAYANA, JALISCO, MÉXICO

Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Coahuayana y estaciones hidrometeorológicas.....	69
Figura 2. Modelo conceptual del hidrograma unitario distribuido de Clark modificado (Kull y Feldman, 1998).....	74
Figura 3. a) Tipo de textura; b) uso del suelo y vegetación; c) número de curva de escurrimiento en la cuenca del río Coahuayana.	77
Figura 4. Esquema del procedimiento de calibración (USACE, 2000).....	78
Figura 5. Subcuencas del río Coahuayana hasta la estación Callejones.	80
Figura 6. Precipitación acumulada con imágenes de lluvia IMERG-L para el evento: a) del 19 al 31 de julio de 2010; b) del 20 al 30 de octubre de 2015; c) del 20 al 27 de agosto de 2021.	84
Figura 7. a) Hidrograma de la estación Callejones; b) ajuste de bondad entre lo observado y modelado en el evento del 19 al 31 de julio de 2010.....	85

Figura 8. a) Hidrograma de la estación Callejones; b) ajuste de bondad entre lo observado y modelado en el evento del 20 al 30 de octubre de 2015.	85
Figura 9. a) Hidrograma de la estación Callejones; b) ajuste de bondad entre lo observado y modelado en el evento del 20 al 27 de agosto de 2021.	85

DEDICATORIAS

A Dios.

A mi compañera de vida Silvia Berenice Castillo por su tiempo y apoyo incondicional para que yo pueda terminar este trabajo.

A mi madre Luvia Méndez Cruz y a mi padre Pedro Girón López.

A mis hermanos y hermanas: Daniel, Alejandro, Auria y Griselda.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por los recursos económicos otorgados para la realización de mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA), por contribuir a mi formación académica y profesional.

A la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo por guiarme durante el proyecto de investigación, por su tiempo, apoyo incondicional y experiencia para culminar este proyecto.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por sus comentarios, tiempo y experiencia para enriquecer este proyecto de investigación.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña por sus comentarios tan asertivos y su tiempo para este proyecto.

DATOS BIOGRÁFICOS



FOTO

Datos personales

Nombre: Pedro Girón Méndez

Fecha de nacimiento: 23 de abril de 1995

Lugar de nacimiento: Ejido Campet, Ocosingo, Chiapas

No. de Cartilla militar: D-4731137

CURP: GIMP950423HCSRND07

Profesión: Ingeniero en Irrigación

Cédula profesional: 12865897

Desarrollo Académico

Licenciatura: Ingeniería en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, generación 2015-2019.

RESUMEN GENERAL

MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA CUENCA DEL RÍO COAHUAYANA JALISCO, MÉXICO

La precipitación es una entrada clave en la modelación hidrológica. Por ello se necesita conocer con exactitud la magnitud y la distribución de la precipitación, tanto en el tiempo como en el espacio. Este trabajo se realizó en la cuenca del río Coahuayana, ubicada en los estados de Jalisco, Colima y Michoacán. Se hizo una evaluación de las imágenes de satélite de lluvia IMERG en seis eventos máximos de precipitación a través de la comparación con datos observados de precipitación en tierra. Se desarrolló un modelo hidrológico de parámetros distribuidos a nivel horario con el programa HEC-HMS; se utilizaron las imágenes de lluvia IMERG-L como datos de entrada. Los métodos seleccionados para el modelo hidrológico son el número de curva y el hidrograma unitario modificado de Clark. El producto IMERG-L presentó valores altos del coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) en la estimación de la precipitación horaria. El producto IMERG-F presentó valores altos de NSE en la estimación de la precipitación diaria. En general, los productos IMERG presentaron valores altos de NSE en escala temporal diaria. En tres de los cinco eventos, los resultados de la modelación hidrológica fueron satisfactorios; el coeficiente de NSE osciló entre 0.39 y 0.77; el R^2 osciló entre 0.51 y 0.86. Se concluyó que las imágenes de satélite de lluvia IMERG son una buena alternativa como datos de entrada en un modelo hidrológico distribuido, en especial en lugares donde la información horaria de precipitación medida en tierra es escasa o inexistente.

Palabras clave: GPM, IMERG, estimaciones de precipitación por satélite, modelo hidrológico distribuido, HEC-HMS.

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

Autor: Pedro Girón Méndez

Director: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

GENERAL ABSTRACT

HYDROLOGIC MODELLING IN THE COAHUAYANA RIVER BASIN IN JALISCO, MEXICO

The rainfall data is a relevant input to hydrologic models. It is important to know the area and time of both the amount and distribution of precipitation. This research was done in the Coahuayana river basin located in Mexican states of Jalisco, Colima and Michoacan. An evaluation of IMERG rainfall satellite images of six maximum events was done by comparing them with the rainfall land data recorded. An hourly hydrological model was constructed with the HEC-HMS software; rainfall satellite images IMERG-L were used as input data. Runoff curve number and modified Clark unit hydrograph were the HEC-HMS methods selected. The IMERG-L product presented high Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) coefficients for the hourly rainfall estimation. The IMERG-F product presented high NSE for the daily rainfall estimation. In general, the IMERG products presented high NSE in daily temporal scale. The hydrological modelling results were satisfactory in three out of five events; The NSE oscillated between 0.39 and 0.77, and the R^2 oscillated between 0.51 and 0.86. It was concluded that rainfall satellite images IMERG are a good alternative as input data to an hourly distributed hydrological model where measured land data are unavailable or scarce.

Keywords: GPM, IMERG, rainfall satellite image estimation, distributed hydrological model, HEC-HMS.

Master's Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Pedro Girón Méndez

Advisor: Dra. Laura Alicia Ibáñez-Castillo

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Debido a su ubicación geográfica, México se encuentra sujeto a gran variedad de fenómenos hidrometeorológicos, como las inundaciones y sequías, que afectan diversas actividades económicas como la agricultura y ganadería o incluso pueden provocar la pérdida de vidas humanas (CENAPRED, 2021). En el análisis de estos fenómenos extremos en tiempo real es importante tener una cuantificación confiable de la precipitación, tanto en el tiempo como en el espacio (Zubieta, Laqui, y Lavado, 2018).

Aunque México cuenta con una red de estaciones meteorológicas convencionales y automáticas, los datos de precipitación son insuficientes o inexistentes. Además, los datos presentan diversos problemas como: errores al momento de su captura o registro en papel, series no homogéneas y baja disponibilidad (CONAGUA, 2013).

Para resolver el problema de la escasez de datos de lluvia medidos a nivel del suelo, en los últimos años se han utilizado productos de precipitación basados en satélites que proporcionan imágenes con una alta resolución espacial y temporal (Bui, Ishidaira, y Shaowei, 2019).

Entre la variedad de productos satelitales disponibles en línea para estimar la precipitación, se encuentran las imágenes de la misión Global Precipitation Measurement (GPM), Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Las imágenes tienen una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ que cubren una banda de 60°N - 60°S con resolución temporal de media hora (Hou et al., 2014; Tan, Huffman, Bolvin, y Nelkin, 2019).

Para utilizar las imágenes de satélite de lluvia, por ejemplo en un sistema de alerta temprana de inundaciones, se necesita realizar una evaluación con respecto a las mediciones realizadas a nivel del suelo (Retalis, Katsanos, Tymvios, y Michaelides, 2020). Una vez que se conoce la exactitud con la que las imágenes estiman la magnitud y distribución espacial de la precipitación, pueden ser integradas en un modelo hidrológico distribuido para simular el

proceso de lluvia-escurrimiento (Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, y Borga, 2016). Un modelo distribuido, dividiendo la cuenca en microcuencas o celdas, considera la variabilidad espacial de las características fisiográficas y la precipitación (Méndez-Antonio, Soto-Cortés, Rivera-Trejo, y Caetano, 2014). Además, un modelo horario de pronóstico lluvia-escurrimiento sirve para conocer con certeza el momento en que se presentará un caudal máximo y para la implementación de medidas de protección o control de inundaciones (Merino-Jiménez, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, y Vázquez-Peña, 2021). El modelo se puede desarrollar con el Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU (HEC-HMS) (USACE, 2000).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar las imágenes de satélite de lluvia IMERG y su implementación en un modelo hidrológico de pronóstico lluvia-escurrimiento en la cuenca del río Coahuayana, Jalisco, México. En la evaluación de las imágenes se consideraron tres criterios: escala temporal, topografía e intensidad de la precipitación. El modelo de pronóstico se desarrolló con el método de número de curva de escurrimiento y el método del hidrograma unitario modificado de Clark con el programa HEC-HMS.

Esta tesis está estructurada en cuatro capítulos: el primero, y presente, es la introducción general; el segundo, corresponde a la revisión de literatura; el tercero corresponde al artículo *Evaluación de los productos de precipitación IMERG en México* donde se evaluó las estimaciones de precipitación través de la comparación con datos observados en tierra, además se analizó la influencia de la topografía y la intensidad de la precipitación; el cuarto corresponde al artículo *Modelo hidrológico con imágenes IMERG en la cuenca del río Coahuayana, Jalisco, México* donde se evaluó el hidrograma producido por el modelo hidrológico con imágenes de satélite de lluvia como entrada a través de la comparación con datos observados de caudales.

1.1 Literatura citada

Bui, H. T., Ishidaira, H., y Shaowei, N. (2019). Evaluation of the use of global

- satellite–gauge and satellite-only precipitation products in stream flow simulations. *Applied Water Science*, 9(3), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0931-y>
- CENAPRED. (2021). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México*. Ciudad de México, México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/36-DIAGNOSTICODEPELIGROSEIDENTIFICACINDERIESGOSDEDESASTRE SENMXICO.PDF>
- CONAGUA. (2013). *Manual para el control de inundaciones* (2da ed.). Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua. https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/manual_para_el_contr_d6bbce9f.pdf
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., y Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Mei, Y., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., y Borga, M. (2016). Evaluating satellite precipitation error propagation in runoff simulations of mountainous basins. *Journal of Hydrometeorology*, 17(5), 1407–1423. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0081.1>
- Méndez-Antonio, B., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F., y Caetano, E. (2014). Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 83–101. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000100006
- Merino-Jiménez, E., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., y Vázquez-Peña, M. A. (2021). Hourly hydrologic modeling in the upper basin of the Fuerte River, Sinaloa, Mexico. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1), 53–76. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2020.11.085>
- Retalis, A., Katsanos, D., Tymvios, F., y Michaelides, S. (2020). Comparison of GPM IMERG and TRMM 3B43 Products over Cyprus. *Remote Sensing*, 12(19), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs12193212>
- Tan, J., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., y Nelkin, E. J. (2019). IMERG V06: Changes to the morphing algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(12), 2471–2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>
- USACE. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. [https://www.hec.usace.army.mil/software/hech-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hech-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_(CPD-74B).pdf)

Zubieta, R., Laqui, W., y Lavado, W. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca del Río Ilave a partir de datos de precipitación observada y de satélite, periodo 2011-2015, Puno, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 85–105. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-04>

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un modelo conceptual que describe el movimiento del agua entre la tierra y la atmósfera en sus diferentes estados como gas, líquido o sólido. El ciclo hidrológico se puede analizar a diferentes escalas, pero resulta útil empezar por la escala global y después a una unidad más pequeña, como la cuenca hidrográfica (Davie, 2008). La Figura 1 es una representación esquemática del ciclo hidrológico.

De acuerdo con Subramanya (2008), el agua de los océanos se evapora y se desplaza hacia arriba formando nubes; gran parte de las nubes precipitan en los océanos en forma de lluvia y otra parte es impulsada hacia las zonas terrestres por los vientos; allí se condensan y precipitan en forma de lluvia, nieve, granizo, aguanieve, etc. La precipitación puede ser interceptada por la vegetación, estructuras y modificaciones de la superficie, desde donde puede evaporarse o bajar a la superficie del suelo. Una parte del agua que llega a la superficie del suelo se infiltra y otra parte se desplaza sobre la pendiente natural del terreno. Campos-Aranda (1998) menciona que tanto el escurrimiento superficial como el agua subterránea se mueve hacia las zonas bajas debido a la gravedad y después de un tiempo, ambos integran el escurrimiento total de un cauce para fluir hacia los océanos.

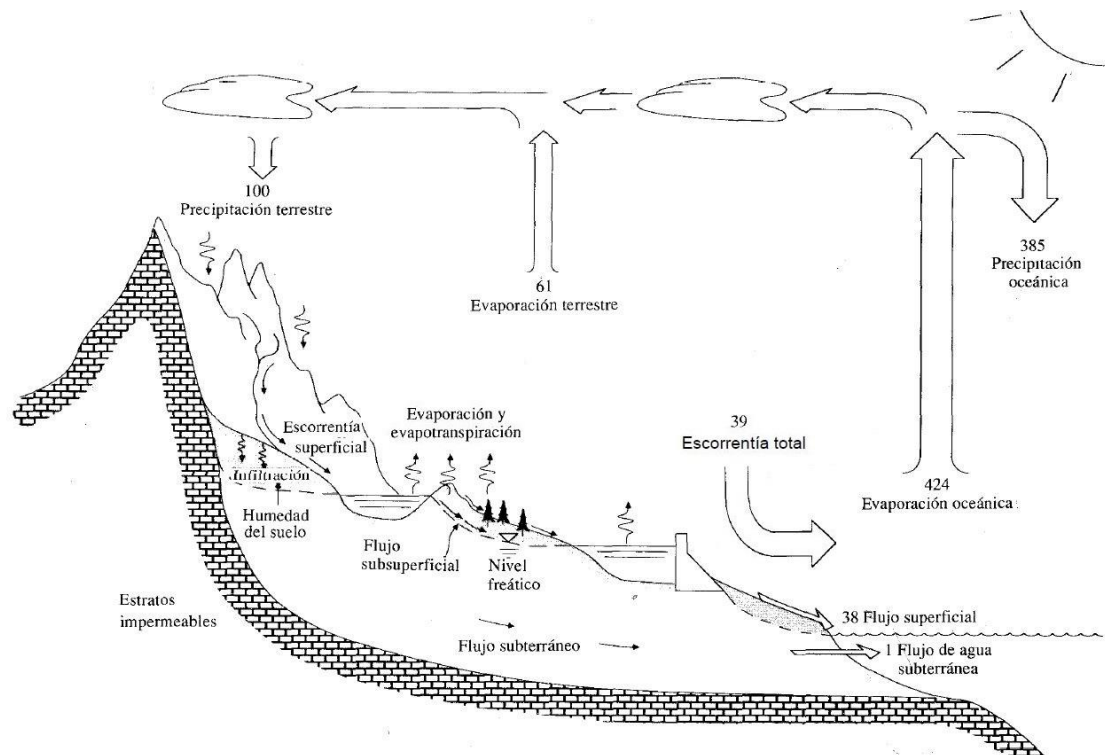


Figura 1. Principales componentes del ciclo hidrológico en unidades relativas a un volumen anual en precipitación terrestre de 100.

Nota: Tomada y adaptada de *Hidrología aplicada* (p. 3), por Chow, Maidment, y Mays, 1994, Bogotá: McGraw Hill.

2.2 Cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es la superficie de tierra drenada por un río y sus tributarios. En la cuenca se desarrollan diversas actividades económicas, como la agricultura, la acuicultura, la industria y el turismo, que alteran y aceleran el ciclo hidrológico natural. Los seres humanos alteran la cuenca a través de acciones como la deforestación, construcción de presas, cambio del uso de suelo y otras infraestructuras, mismos que aumentan el riesgo de inundación de las zonas bajas. La vegetación, como un componente importante de la cuenca, es un medio de intercambio de agua de la tierra a la atmósfera (Singh, 2017).

De acuerdo con Davie (2008), la cuenca hidrográfica es la unidad espacial más común para estudios hidrológicos y puede definirse como la zona de tierra donde el agua que cae en cualquier punto se mueve cuesta abajo hacia un punto central de salida.

En el mismo sentido, Dingman (2015) menciona que una cuenca hidrográfica es el área que topográficamente aporta toda el agua que pasa por una sección transversal de un cauce (la salida). Las características de la cuenca, como el tipo y uso del suelo, la geología y la topografía, determinan la magnitud, el momento y calidad del agua de las corrientes superficiales y de las aguas subterráneas.

2.3 Precipitación y su medición

La precipitación de las gotas de agua en suspensión que forman las nubes se produce en forma de lluvia, nieve, granizo y aguanieve. Las precipitaciones se forman a partir del levantamiento de masas de aire húmedo dentro la atmósfera, lo que provoca el enfriamiento y la condensación de la humedad. Para que la precipitación se produzca es necesario lo siguiente: (1) la masa de aire debe enfriarse, (2) las gotas de agua deben condensarse alrededor de los núcleos, (3) las gotas deben aumentar su tamaño y (4) un mecanismo causará una densidad suficiente de las gotas para que la precipitación caiga al suelo (Chin, 2013).

De acuerdo con Robinson y Ward (2017), el levantamiento es la principal causa de enfriamiento y de precipitación, por ello, se puede utilizar la siguiente clasificación según las condiciones meteorológicas que causan el movimiento vertical del aire:

1. Precipitación frontal: el aire cálido y húmedo se eleva sobre una cuña de aire más frío y denso. Los frentes fríos tienen pendientes pronunciadas en la superficie frontal que dan lugar a un levantamiento rápido y lluvias fuertes de corta duración. En cambio, los frentes cálidos tienen pendientes menos pronunciadas, lo que origina un levantamiento y enfriamiento gradual, lo que provoca lluvias menos intensas de mayor duración.
2. Precipitación convectiva: una masa de aire más caliente que el aire circundante se eleva debido a su menor densidad. El aire caliente sigue subiendo y sufre un enfriamiento (Subramanya, 2008), originando lluvias fuertes de corta duración.

3. Precipitación Orográfica: las masas de aire húmedo se elevan debido a la presencia de barreras como cadenas montañosas y, en consecuencia, sufrir enfriamiento, condensación y precipitación. En las cadenas montañosas, las laderas de barlovento tienen lluvias fuertes y las de sotavento, ligeras.

Actualmente, los métodos más utilizados para cuantificar las precipitaciones son los pluviómetros, radares meteorológicos y productos basados en satélites (Guo et al., 2016). En el caso de México, los datos de precipitación de los pluviómetros y pluviógrafos son escasos o inexistentes debido a la distribución desigual en el territorio. La escasez de datos de precipitación, tanto en el tiempo como en el espacio, dificulta realizar trabajos relacionadas a la administración de los recursos hídricos y control de inundaciones, como el desarrollo de sistemas de alarma temprana o el diseño de estructuras hidráulicas (Magaña-Hernández, Bâ, y Guerra-Cobián, 2013).

En México, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene una red instalada de 5466 estaciones climatológicas, de las cuales 2927 están operando (Figura 2) y 2539 están suspendidas. Además, administra la información de 286 estaciones meteorológicas automáticas y de acuerdo con el tipo de estructura donde van montadas las estaciones, 189 son estaciones sinópticas meteorológicas (ESIMEs) y 97 son estaciones meteorológicas automáticas (EMAs), como se muestra en la Figura 3. También administra 76 observatorios meteorológicos para observar y transmitir datos meteorológicos en tiempo real; 15 estaciones de radio sondeo para cuantificar la presión, temperatura, humedad y viento de las capas altas de la atmósfera; 13 radares meteorológicos para conocer la intensidad de la precipitación, el desplazamiento, altura y densidad de las nubes, así como la velocidad y dirección del viento; y una estación terrena que recibe cada cinco minutos imágenes del satélite meteorológico GOES-16 (Satélite Ambiental Funcional Geoestacionario por sus siglas en inglés) de 16 diferentes bandas: dos visibles, 11 infrarrojas y tres de vapor de agua cubriendo América

del Norte, el Caribe y Centro América. Con estas imágenes se puede estimar la precipitación (SMN, 2022).

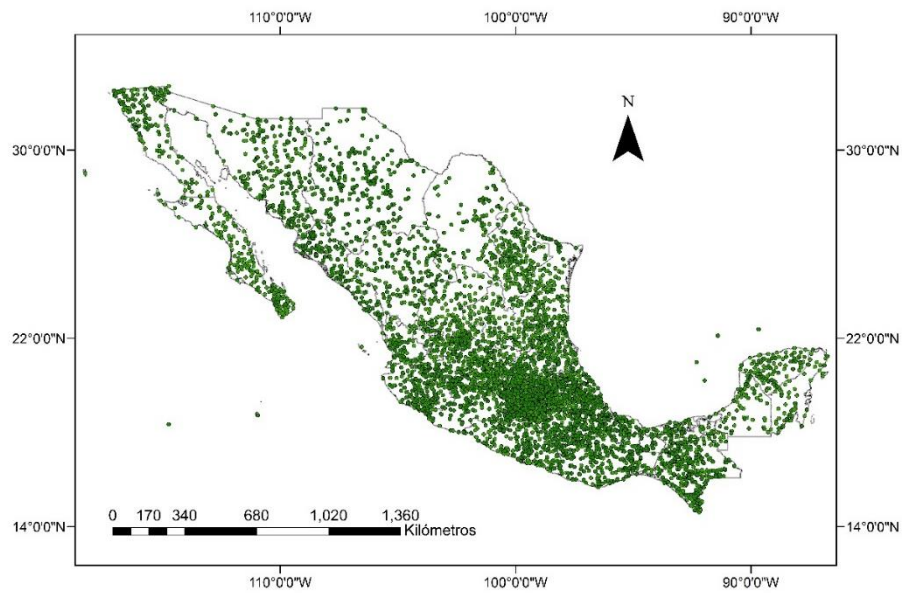


Figura 2. Estaciones climatológicas operando del SMN.
Nota: Elaboración propia con datos del SMN.

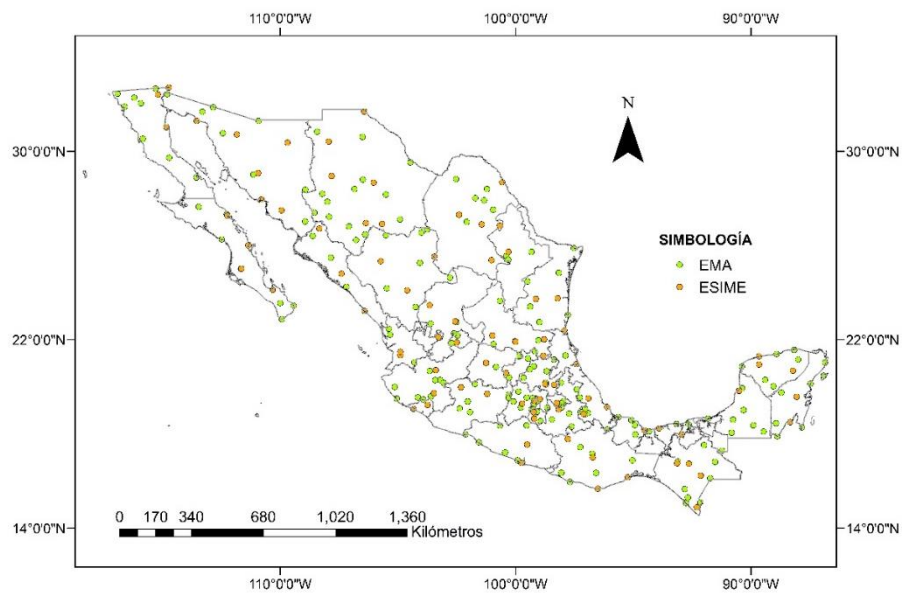


Figura 3. Estaciones meteorológicas automáticas del SMN.
Nota: Elaboración propia con datos del SMN.

2.4 La Misión de Medición de Precipitación Global

La misión de Medición de Precipitación Global (GPM por sus siglas en inglés) es un proyecto internacional de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA por sus siglas en inglés) y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA por sus siglas en inglés) para proporcionar mejores estimaciones de precipitación con cobertura global y reemplazar la Misión de Medición de Lluvia Tropical (TRMM por sus siglas en inglés). El GPM tiene cuatro componentes claves: un satélite principal (GPM Core), la constelación GPM, el Sistema de Procesamiento de Precipitaciones (PSS por sus siglas en inglés) y el equipo de validación a nivel del suelo del GPM (Huffman, Bolvin, Nelkin, y Tan, 2020).

El satélite principal (GPM Core) fue lanzado el 27 de febrero de 2014 en órbita no polar con una inclinación de 65° , un tiempo de revisita de 1 a 2 horas y una altitud de 407 km (Huffman, Bolvin, Nelkin, et al., 2020). El GPM Core lleva un radar de precipitación de frecuencia dual (DPR por sus siglas en inglés) y un generador de imágenes de microondas (GMI por sus siglas en inglés) (Hou et al., 2014).

El DPR es un instrumento que realiza mediciones de la estructura de la precipitación en tres dimensiones a través de un radar de precipitación de dos bandas: Ka (KaPR) a 35.5 GHz y Ku (KuPR) a 13.6 GHz. KuPR y KaPR tienen una resolución espacial de cinco kilómetros y una resolución vertical de 250 m con anchos de barrido de 245 y 120 km, respectivamente. Dentro del ancho de barrido de 120 km, ambos radares adquieren información simultáneamente, por ello, KaPR tendrá resolución vertical de 500 m. La banda Ku del DPR detecta precipitaciones a partir Sde $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ y la banda Ka a partir de $0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (Hou et al., 2014).

El instrumento GMI es un radiómetro de microondas pasivo de barrido cónico con 13 canales que van de 10 a 183 GHz. El reflector principal del GMI gira a 32 rpm formando un sector de 140° con un ancho de barrido de 885 km. Las resoluciones

van de 19.4 x 32.3 km (canal 10.65 GHz) a 4.4 x 7.3 km (canal 183.31 GHz) (Hou et al., 2014).

De acuerdo con Hou et al. (2014), el objetivo de la misión satelital GPM es proporcionar una nueva generación de estimaciones de lluvia y nieve desde el espacio. Las estimaciones están disponibles en tiempo casi real (es decir, dentro de las tres horas de observación) y pueden ser utilizadas para diversas aplicaciones, como el pronóstico de inundaciones, monitoreo de la ubicación de las tormentas, monitoreo de agua dulce, estimación de los rendimientos de los cultivos y monitoreo de las condiciones ambientales que pueden dar lugar a la aparición de enfermedades transmitidas por vectores.

La constelación GPM está conformada por los satélites: DMSP F17/F18 (Defense Meteorological Satellite Program - U.S. Dept. of Defense), NOAA 20 (National Oceanic and Atmospheric Administration), MetOp A/B/C (Meteorological Operational - European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites), Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership - NASA/NOAA), GPM Core Observatory (NASA/JAXA), Megha-Tropiques (Centre National D'Etudes Spatiales / Indian Space Research Organisation), NOAA 18/19 (NOAA) y GCOM-W1 (Global Change Observation Mission Water 1 - JAXA) (NASA, 2019).

2.5 Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG)

El Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) es un algoritmo que realiza la intercalibración, combinación e interpolación de todas las estimaciones de precipitación provenientes de los sensores de microondas de los satélites de la constelación GPM, de los sensores infrarrojos calibrados por microondas, del análisis de mediciones de precipitación a nivel del suelo y otros estimadores de precipitación del TRMM y GPM (Huffman, Bolvin, Braithwaite, et al., 2020).

El algoritmo IMERG utiliza los datos de los sensores de microondas pasivos (PMW por sus siglas en inglés) de los satélites de órbita baja (LEO por sus siglas en inglés) para estimar la precipitación con alto grado de precisión. Debido a la

baja densidad de los satélites LEO, IMERG utiliza los datos de los sensores infrarrojos (IR) de los satélites geoestacionarios (GEO por sus siglas en inglés). IMERG aumenta la cobertura espacial de las estimaciones de precipitación mediante dos formas. La primera, los datos PMW-LEO son transformados por una interpolación lineal siguiendo el movimiento estimado de la precipitación. La segunda, los datos IR-GEO se incluyen utilizando un filtro de Kalman para la estimación de la precipitación cuando los datos PMW-LEO son muy escasos. Adicionalmente, los análisis de las mediciones de precipitación a nivel del suelo se utilizan para la regionalización y corrección del sesgo de las estimaciones de los satélites (Huffman, Bolvin, Braithwaite, et al., 2020).

El IMERG es un algoritmo unificado de los Estados Unidos que proporciona las imágenes de satélite de lluvia IMERG. Las estimaciones de precipitación de los sensores de microondas pasivos de los satélites que integran la constelación GPM se calculan utilizando la versión 2017 del algoritmo Goddard Profiling (GPROF2017), luego se cuadriculan e intercalibran con el producto GPM Combined Radar Radiometer Analysis y se combinan en celdas de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ cada media hora (Huffman, Bolvin, Nelkin, et al., 2020).

Las ejecuciones del IMERG dan como resultado tres productos de precipitación: el producto multisatélite “Early” que está disponible 4 horas después de la hora de observación; el producto “Late” que está disponible 14 horas después de la hora de observación y el producto “Final” que está disponible 3.5 meses después del mes de observación. Los tres productos tienen una resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ con resolución temporal de media hora (Huffman, Bolvin, Nelkin, et al., 2020).

El Centro de Climatología de Precipitaciones Globales (GPCC por sus siglas en inglés) se creó en 1989 con el propósito de realizar análisis de alta calidad de las mediciones convencionales de precipitación en tierra. IMERG utiliza dos productos mensuales del GPCC para la corrección del sesgo del producto “Final”: V8 Full Data Analysis (1998-2016) y V6 Monitoring Product (2017 – actualidad). El Monitoring Product se publica dos meses después del mes de observación y

se basa en el Synoptic Weather Report (SYNOP) y Monthly Climatological Data (CLIMAT) recibidos de 7000-8000 estaciones de todo el mundo (Huffman, Bolvin, Braithwaite, et al., 2020).

2.6 Modelos hidrológicos

Las investigaciones recientes en hidrología, de acuerdo con Dingman (2002), están dirigidas a mejorar nuestra capacidad de predecir los efectos del cambio climático y del uso del suelo en el balance hidrológico, en predecir el nivel de los acuíferos, la variabilidad de los escurrimientos y la calidad del agua. Estas y otras aplicaciones de la hidrología a problemas prácticos de diseño y pronóstico, se requieren el uso de modelos hidrológicos.

Un modelo hidrológico es un sistema físico o algoritmo matemático que intenta reproducir real o simbólicamente los aspectos esenciales del funcionamiento de una parte del ciclo hidrológico (Dingman, 2015).

Una clasificación de modelos hidrológicos es la que propone Singh (1988) citado por Vargas-Castañeda, Ibáñez-Castillo, y Arteaga-Ramírez (2015), la cual se muestra en la Figura 4. Un modelo físico (o de laboratorio) es una construcción tangible a escala que representa una parte del mundo natural. Se han utilizado estos modelos para comprender los problemas relacionados a la hidráulica y la mecánica de fluidos, y comúnmente se utilizan para ayudar a diseñar obras hidráulicas. Por otra parte, un modelo matemático es un conjunto de ecuaciones que representan el comportamiento cuantitativo de un sistema. Por el aumento de la disponibilidad de computadoras más potentes, técnicas de modelación y programas, el modelo matemático es el más utilizado en la hidrología, que suelen ser más baratos y flexibles (Dingman, 2002).

Los modelos hidrológicos concentrados utilizan promedios espaciales para las características fisiográficas y la precipitación en la cuenca, por ello, la respuesta en la salida de la cuenca se ve afectada únicamente por la variabilidad temporal. Por otra parte, los modelos hidrológicos distribuidos consideran explícitamente la

variabilidad espacial tanto de las propiedades físicas como de la precipitación, esto se logra dividiendo la cuenca en microcuencas o celdas (Méndez-Antonio et al., 2014)

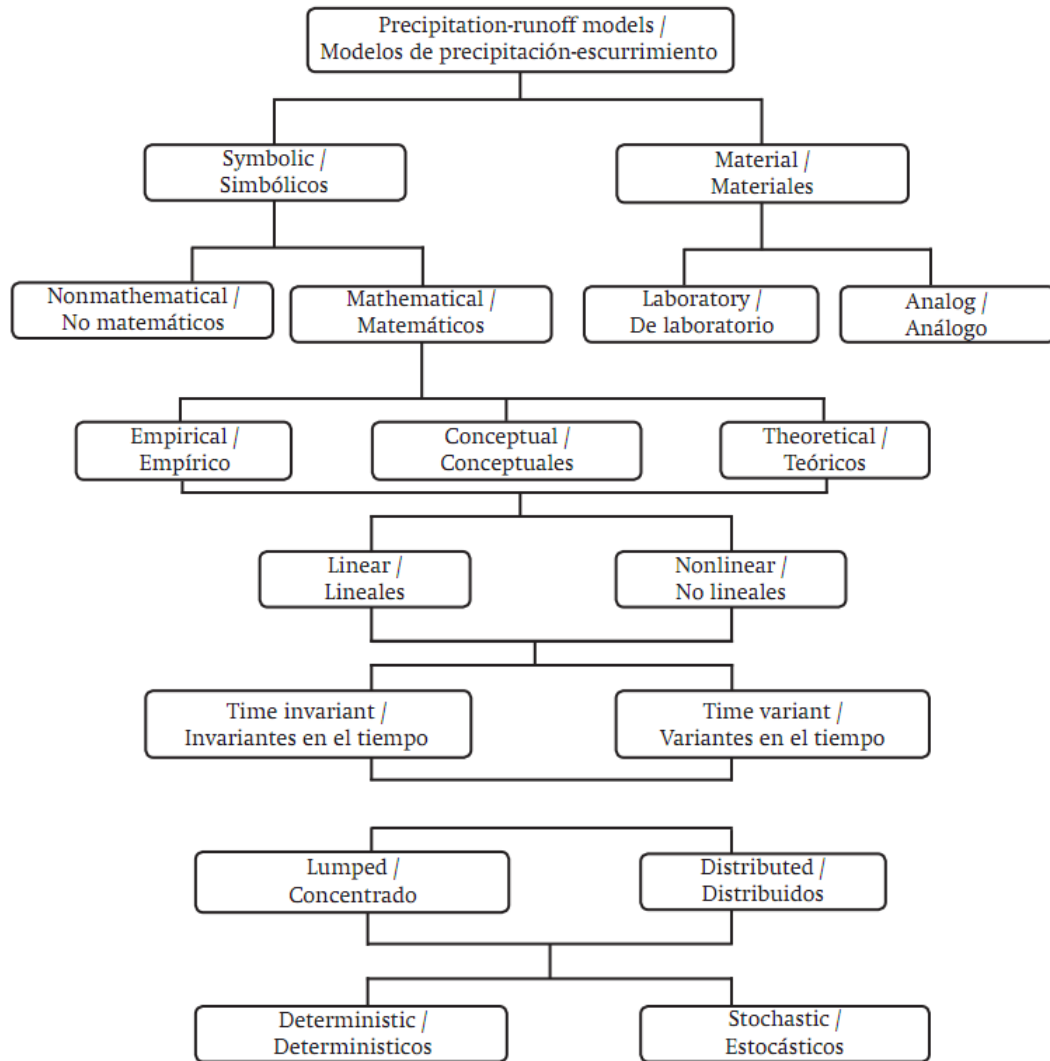


Figura 4. Esquema de clasificación de modelos hidrológicos

Nota: Tomada de "Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling" (p. 9), por Vargas-Castañeda et al., 2015, *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7 (1).

De acuerdo con Vieux (2004), algunas desventajas de los modelos hidrológicos concentrados son las siguientes:

- 1) Es difícil la derivación de parámetros a escala de subcuencas porque el escurrimiento no está disponible en cada salida.
- 2) El número de subcuencas puede afectar el rendimiento del modelo.

- 3) En cada subcuenca no se representa la variación de los parámetros porque se promedian o ignoran.

Una ventaja de los modelos hidrológicos distribuidos es que permiten analizar la influencia de los diferentes elementos, como el cambio de uso de suelo y vegetación, en la respuesta a la salida de la cuenca (Méndez-Antonio et al., 2013).

2.7 Número de curva de escurrimiento

El método de número de curva de escurrimiento fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés) y se describe detalladamente en el Manual Nacional de Ingeniería (SCS, 2004). Es un método conceptual que se caracteriza por ser simple, predecible y estable utilizado ampliamente en EE.UU y otros países para la estimación de los escurrimientos directos en función de las precipitaciones. Este método se basa en un solo parámetro, el número de curva de escurrimiento (CN), que a su vez depende de las propiedades físicas de la cuenca, como el grupo hidrológico del suelo (A, B, C y D), uso y tipo del suelo, condición de la superficie (pobre, regular y bueno) y condiciones de humedad antecedente (Ponce y Hawkins, 1996).

El método de número de curva (CN) se basa en la ecuación del balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales (SCS, 2004). De acuerdo con Phetprayoon (2015), la primera hipótesis iguala la precipitación total (P) a la suma de abstracciones iniciales (I_a), infiltración real (F) y el escurrimiento directo (Q); y la segunda hipótesis muestra la relación entre I_a y la retención o infiltración potencial máxima (S). En la Ecuación (1) se presenta el balance hídrico; en la Ecuación (2) la hipótesis de igualdad proporcional y en la Ecuación (3) la relación entre I_a y S (SCS, 2004).

$$P = I_a + F + Q \tag{1}$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$I_a = \lambda S \quad (3)$$

Donde P es la precipitación total (mm); I_a son las abstracciones iniciales (mm); F es la infiltración acumulada excluyendo a I_a (mm); Q es el escurrimiento directo (mm); S es la retención potencial máxima de infiltración (mm); y λ es un parámetro regional que depende de factores climáticos y geológicos.

Combinando la ecuación del balance hídrico y la hipótesis de igualdad proporcional, el método del número de curva se representa en la Ecuación (4):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (4)$$

El Servicio de Conservación de Suelos (2004) menciona que a partir de datos experimentales de cuencas, se encontró una relación empírica entre la retención potencial máxima y las abstracciones iniciales, esta relación se representa como:

$$I_a = 0.2 S \quad (5)$$

Por lo tanto, sustituyendo la Ecuación (5) en (4), se obtiene:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P - 0.2S) + S} \quad (6)$$

Sujeto a $P > 0.2 S$, de otra forma $Q=0$.

Además, la retención potencial máxima (S) de una cuenca está relacionada con el número de curva (CN), que es una función del uso del suelo, los tratamientos del suelo, el tipo de suelo y condiciones de humedad antecedente de la cuenca. El valor de S en mm puede obtenerse a partir de CN utilizando la relación (Phetprayoon, 2015):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (7)$$

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1986) señala que el número de curva varía en función del tipo de cobertura, grupo hidrológico (A, B, C y D) y de las condiciones de humedad antecedente en la cuenca. En el Cuadro 1 se presenta la relación entre el grupo hidrológico del suelo (A, B, C y D) y la textura del suelo.

Cuadro 1. Grupos hidrológicos de suelo.

Grupo Hidrológico del suelo	Textura de suelo
A	Arenas con poco limo y arcilla; suelos muy permeables.
B	Arenas finas y limos.
C	Arenas muy finas y limos, suelos con alto contenido de arcilla.
D	Arcilla en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables.

Nota: Tomado de *Fundamentos de hidrología de superficie* (p. 189), por Aparicio-Mijares, 1992, Ciudad de México, México: Limusa.

Por otra parte, Aparicio-Mijares (1992) menciona que se puede realizar una corrección al número de curva por condiciones de humedad antecedente. Esta corrección se realiza de acuerdo con la cantidad de lluvia acumulada cinco días antes de una tormenta, de la siguiente manera: si la lluvia es menor a 25 mm, corrección A; si la lluvia es mayor a 25 y menor a 50 mm, sin corrección; si la lluvia es mayor a 50 mm, corrección B.

Para llevar a cabo las correcciones mencionadas, Chow et al. (1994) plantea las siguientes ecuaciones:

$$\text{Corrección A} = \frac{4.2CN}{10 - 0.058CN} \quad (8)$$

$$\text{Corrección } B = \frac{23CN}{10 + 0.13CN} \quad (9)$$

2.8 Hidrograma unitario de Clark

Aparicio-Mijares (1992) define el hidrograma unitario como el hidrograma de escurrimiento resultante de una unidad de lluvia efectiva o en exceso, de duración variable y distribuida uniformemente sobre una cuenca; los elementos principales de un hidrograma unitario se presentan en la Figura 5. Sherman (1932) desarrolló el método del hidrograma unitario y está basado en las siguientes hipótesis (Gribbin, 2014) :

- La lluvia es constante a lo largo del tiempo.
- La lluvia está distribuida uniformemente sobre la cuenca.
- El hidrograma resultante de una lluvia de exceso mayor o menor a la unidad es proporcional al hidrograma resultante de una unidad; este es el principio de proporcionalidad.
- Un hidrograma puede ser el resultado de la suma de dos o más hidrogramas unitarios trazados en el mismo eje temporal.

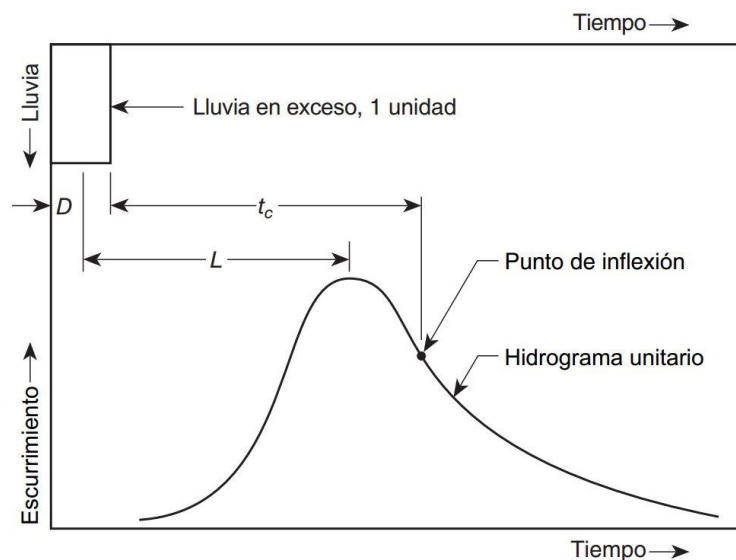


Figura 5. Principales elementos de un hidrograma unitario.

Nota: Tomada y adaptada de *Introduction to hydraulics and hydrology with applications for stormwater management* (p. 196), por Gribbin, 2014, NY, USA: Delmar.

El método de Clark (1945), también conocido como el método del histograma tiempo-área, tiene como objetivo desarrollar un hidrograma unitario sintético, a partir de la aplicación de una unidad de lluvia en exceso sobre la cuenca. La lluvia en exceso sufre una traslación mediante un histograma tiempo-área (Figura 6) y una atenuación de los resultados anteriores a través de un depósito lineal a la salida de la cuenca (Subramanya, 2008). La Figura 7 muestra un modelo conceptual del método de Clark.

El histograma tiempo-descarga se puede transitar por el método de Muskingum, presentada en la Ecuación (10). Se necesita la estimación de la constante de almacenamiento K y $x = 0$, porque se utiliza un embalse lineal.

$$S = K[xI + (1 - x)O] \quad (10)$$

La ecuación del método de Muskingum sería ahora la Ecuación (11):

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (11)$$

Donde $C_0 = (0.5\Delta t)/(K + 0.5\Delta t)$; $C_1 = (0.5\Delta t)/(K + 0.5\Delta t)$; $C_2 = (K - 0.5\Delta t)/(K + 0.5\Delta t)$; I_1 e I_2 son caudales de entrada antes y después del intervalo de tiempo Δt ; O_1 y O_2 son caudales de salida antes y después del intervalo de tiempo Δt .

Se nota que $C_0 = C_1$. Además, los caudales de entrada se derivan del histograma $I_1 = I_2$ para cada Δt . Así, la Ecuación (11) se convierte en:

$$O_2 = 2C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (12)$$

El recorrido del histograma tiempo-área por la Ecuación (12) da las ordenadas del hidrograma unitario instantáneo para la cuenca. Algunos autores, utilizan la letra R para expresar el valor de la constante de almacenamiento.

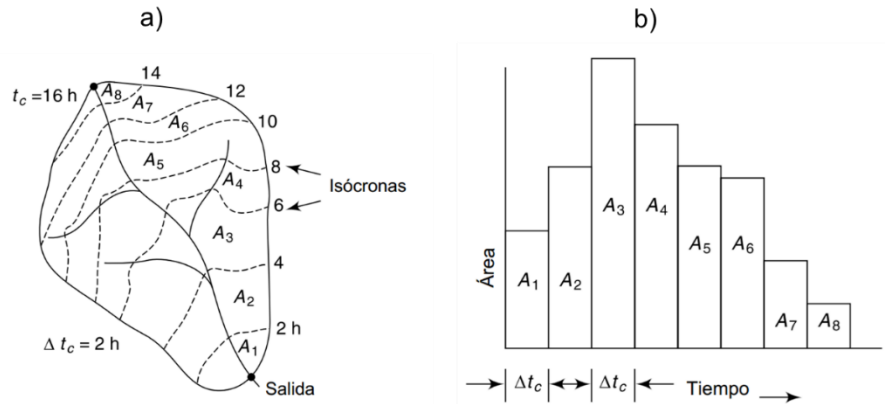


Figura 6. a) Isócronas; b) Histograma tiempo-área.

Nota: Tomada y adaptada de *Engineering hydrology* (p. 298), por Subramanya, 2008, New Delhi, USA: McGraw Hill.

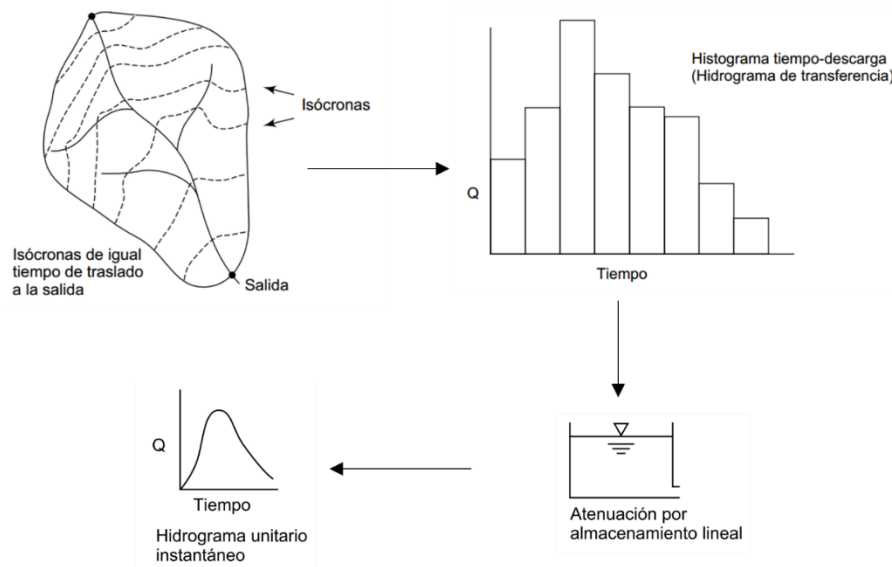


Figura 7. Modelo conceptual del hidrograma unitario de Clark.

Nota: Tomada y adaptada de "Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff" (p. 10), por Kull y Feldman, 1998, *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1).

2.9 Hidrograma unitario modificado de Clark

Kull y Feldman (1998) señalan que el método del hidrograma unitario modificado de Clark consiste en trasladar la lluvia en exceso de cada celda hasta la salida de la cuenca de acuerdo con el tiempo de viaje de la celda que se analiza, suponiendo una velocidad de flujo constante. Posteriormente, el flujo de salida de cada celda sufre una atenuación a través de un depósito lineal (Figura 8). Los mismos autores indican que el tiempo de viaje de cada celda se obtiene con la Ecuación (13):

$$t_{celda} = T_c \left(\frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \right) \quad (13)$$

Donde t_{celda} es el tiempo de viaje de la celda analizada hasta la salida de la cuenca (h); d_{celda} es la distancia de viaje de la celda hasta la salida de la cuenca (m); $d_{m\acute{a}x}$ es la distancia de viaje de la celda más alejada de la salida de la cuenca (m); T_c es el tiempo de concentración de la cuenca (h).

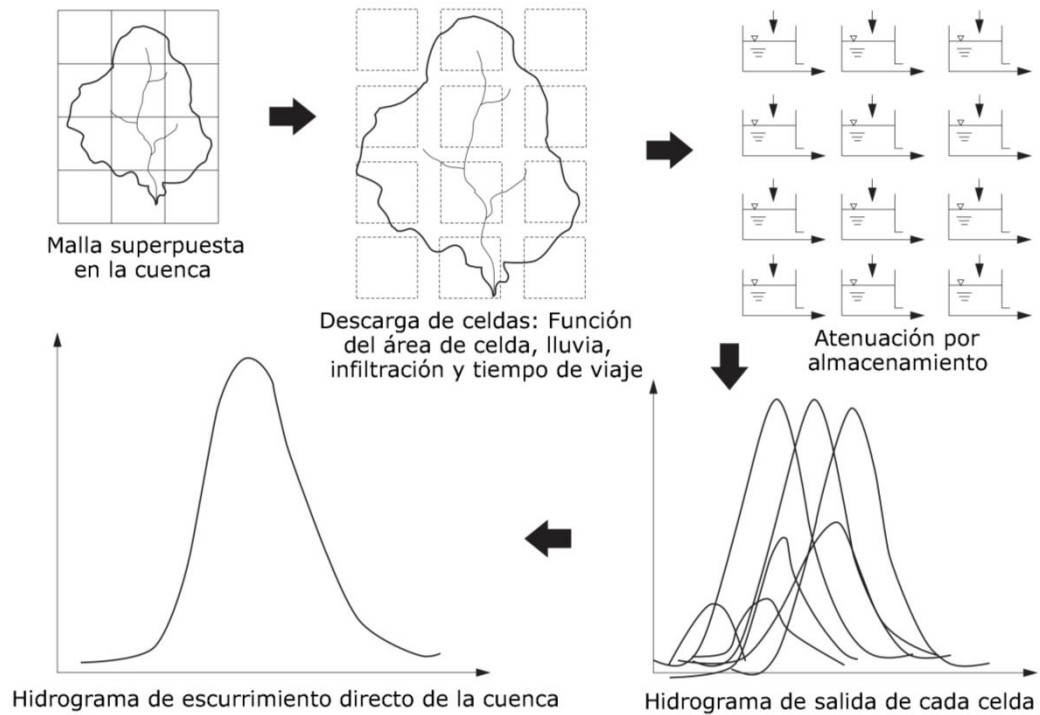


Figura 8. Modelo conceptual del hidrograma unitario distribuido de Clark modificado.

Nota: Tomada y adaptada de "Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff" (p. 14), por Kull y Feldman, 1998, *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1).

Para transformar la lluvia en exceso en escurrimiento con el método de Clark modificado se necesitan dos parámetros: el tiempo de concentración (T_c) y el coeficiente de almacenamiento (R) (para un depósito lineal) (Peters y Easton, 1996).

El tiempo de concentración, de acuerdo con McCuen (1998), tiene dos definiciones comúnmente aceptadas. La primera, T_c se define como el tiempo que tarda una partícula de agua del punto más alejado de la cuenca en llegar a la salida. La segunda, T_c se define como la diferencia de tiempo entre el final de

la lluvia en exceso y el punto de inflexión (Figura 9). El T_c se puede estimar con la ecuación de Kirpich presentada en la Ecuación (14) (Karamouz, Nazif, y Falahi, 2013):

$$T_c = 0.00325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (14)$$

Donde T_c es el tiempo de concentración (h); L es la longitud del cauce principal (m); S es la pendiente del cauce principal (m/m).

De acuerdo con Subramanya (2008), el depósito lineal en la salida se supone descrito por $S = RQ$, donde R es la constante de almacenamiento. El valor R se puede estimar considerando el punto de inflexión P_i de un hidrograma de escurrimiento (Figura 9). Es este punto, el caudal de entrada al canal I ha cesado. La ecuación de continuidad:

$$I - Q = \frac{dS}{dt}$$

Se convierte en:

$$-Q = \frac{dS}{dt} = R \frac{dQ}{dt}$$

Por lo tanto:

$$R = -Q_i / (dQ/dt)_i \quad (15)$$

De otra forma, el coeficiente de almacenamiento (R) se puede estimar dividiendo el volumen bajo del hidrograma después del segundo punto de inflexión (curva de recesión) y el valor del caudal en este punto (USACE, 1982). La ecuación para estimar el valor de R es:

$$R = \frac{\int_{P_i}^{\infty} Q(t) dt}{Q_{P_i}} \quad (16)$$

Donde R es coeficiente de almacenamiento; $\int_{P_i}^{\infty} Q(t)$ es el volumen bajo del hidrograma después del segundo punto de inflexión; Q_{P_i} es el valor del caudal en el punto de inflexión.

Donde el sufijo i se refiere al punto de inflexión, y R puede estimarse a partir de un hidrograma de escurrimiento conocido de la cuenca, como se muestra en la Figura 9.

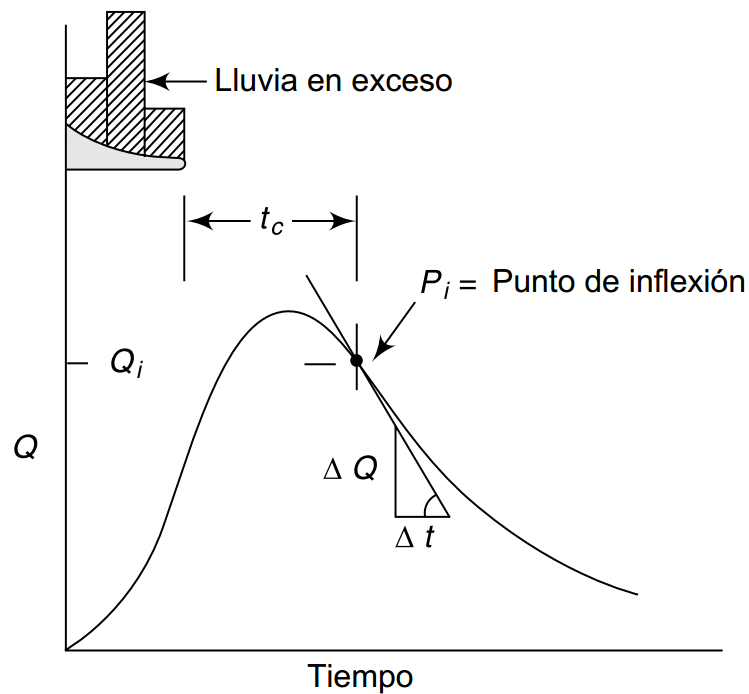


Figura 9. Escurrimiento superficial de una cuenca.

Nota: Tomada y adaptada de *Engineering hydrology* (p. 298), por Subramanya, 2008, New Delhi, USA: McGraw Hill.

En el mismo sentido, Zimmermann (2003) indica que debido a la escasez de datos de caudales, se puede utilizar la siguiente ecuación empírica:

$$R = c \cdot T_c \quad (17)$$

Donde c varía entre 0.5 a 0.8. Para fines prácticos, según Domínguez et al. (2008), el coeficiente de almacenamiento se puede estimar a partir de $c = 0.6$ en la Ecuación (17).

2.10 Método de Muskingum

La superficie del agua en un tramo del canal no es paralela al fondo sino que también varía con el tiempo (Figura 10). Considerando un tramo del canal con un flujo de crecida, el volumen total almacenado puede ser considerado como almacenamiento en prisma y en cuña (Subramanya, 2008).

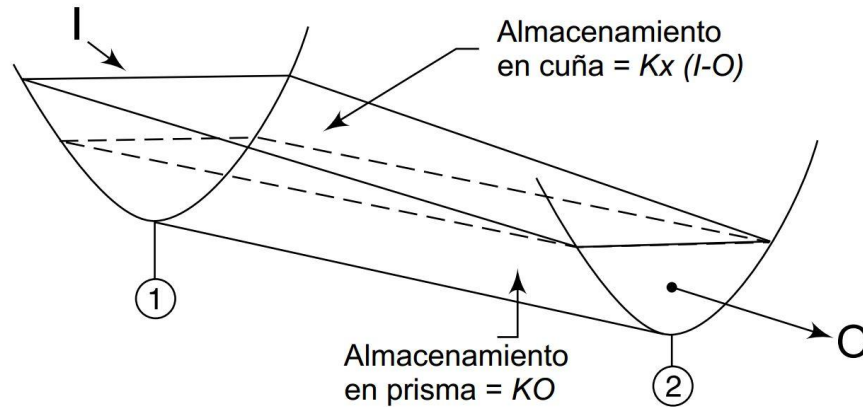


Figura 10. Almacenamiento durante el paso de una avenida.

Nota: Tomada y adaptada de *Engineering hydrology* (p. 291), por Subramanya, 2008, New Delhi, USA: McGraw Hill.

De acuerdo con McCuen (1998), el método de Muskingum se basa en la ecuación de tránsito (18) y (19) la función de almacenamiento .

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{S_2 - S_1}{\Delta t} \quad (18)$$

$$S = xKI^{m/d} + (1 - x)KO^{m/d} \quad (19)$$

Donde S es el almacenamiento en el tramo; I es el caudal de entrada; O es el caudal de salida; K es la constante de tiempo del viaje; x es el factor de ponderación. Dado que $m/d = 1$, la Ecuación (19) se reduce a:

$$S = K[xI + (1 - x)O] \quad (20)$$

Sustituyendo la Ecuación (20) en la Ecuación (18) da:

$$\frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} = \frac{K[xI_2 + (1 - x)O_2] - K[xI_1 + (1 - x)O_1]}{\Delta t} \quad (21)$$

Resolviendo la Ecuación (21) para O_2 :

$$O_2 = C_0 I_2 + C_1 I_1 + C_2 O_1 \quad (22)$$

Donde

$$C_0 = \frac{-Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (23)$$

$$C_1 = \frac{Kx + 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (24)$$

$$C_2 = \frac{K - Kx - 0.5\Delta t}{K - Kx + 0.5\Delta t} \quad (25)$$

La suma de los tres coeficientes muestra que:

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (26)$$

Con la Ecuación (22) se puede realizar el tránsito de la avenida por el tramo dados Δt y los valores de K y x .

De acuerdo con Aparicio-Mijares (1992), el valor de Δt , para el tránsito de una avenida por un vaso, debe cumplir con la condición de $\Delta t \leq 0.1 t_p$, donde t_p es el tiempo de pico. El mismo autor menciona que el parámetro K se puede obtener con la Ecuación (27):

$$K = \frac{L}{\omega} \quad (27)$$

Donde L es la longitud del tramo (m) y ω es la velocidad media de la onda ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). A la vez, el valor de ω se puede calcular como 1.5 veces la velocidad media del agua en el tramo, y esta última se puede obtener de acuerdo con la pendiente del cauce principal; además, a falta de información, recomienda utilizar un valor de 0.2 para x .

2.11 HEC-HMS

El Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-HMS por sus siglas en inglés) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE por sus siglas en inglés) es un programa diseñado para simular los procesos de precipitación y escurrimiento de las cuencas hidrográficas. El programa permite resolver los diferentes problemas relacionados a la hidrología de inundaciones, suministro de agua de grandes cuencas y la producción de escurrimiento de pequeñas cuencas urbanas o naturales. Los hidrogramas de escurrimiento obtenidos del programa se pueden utilizar directamente o junto con otro programa para estudios de disponibilidad de agua, drenaje urbano, pronóstico de caudales, impacto del cambio de uso de suelo, diseño de obras hidráulicas y reducción de daños por inundaciones (USACE, 2021).

Una ejecución de simulación se compone de un modelo de la cuenca, un modelo meteorológico y especificaciones de control. Los resultados de una ejecución de simulación se pueden visualizar como gráficos, tablas de resumen y tablas de series de tiempo a través del mapa del modelo de la cuenca (USACE, 2021).

2.11.1 El modelo de la cuenca

El modelo de la cuenca es la representación de las propiedades físicas de la cuenca y la red de corrientes. Los elementos hidrológicos están conectados entre sí para formar la representación del sistema de corrientes y son los siguientes: subcuenca, tramo de corriente, unión, embalse, fuente, sumidero y derivación. Cada elemento hidrológico puede utilizar uno o más modelos matemáticos para describir un proceso físico que ocurre en la cuenca (USACE, 2021).

De acuerdo con Estrada-Sifontes y Pacheco-Moya (2012), el programa HEC-HMS tiene una variedad de métodos para el cálculo de pérdidas, para la transformación de la lluvia en exceso en escurrimiento directo, para representar el flujo base y el tránsito en cauces (Cuadro 2). Además, las simulaciones se pueden realizar a nivel de eventos o en forma continua.

Cuadro 2. Métodos del modelo de cuenca.

Pérdida	Transformación	Flujo base	Tránsito
Déficit y constantes	Hidrograma unitario de Clark	Recesión delimitada	Onda cinemática
Exponencial	Onda cinemática	Constante mensual	Retraso
Green y Ampt	Hidrograma unitario modificado de Clark	Depósito lineal	Retraso y K
Inicial y constante	Hidrograma unitario del SCS	Boussinesq no lineal	Puls modificado
Número de curva del SCS	Hidrograma unitario de Snyder	Recesión	Muskingum
Smith Parlange	Curva S especificado por el usuario		Muskingum-Kunge
Contabilidad del suelo	Hidrograma unitario especificado por el usuario		Profundidad normal
Número de curva del SCS en cuadrícula			

Nota: Elaboración propia con datos tomado de *HEC-HMS User's Manual Versión 4.8*, por USACE, 2021, United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

2.11.2 El modelo meteorológico

Los modelos meteorológicos tienen el propósito de preparar las condiciones meteorológicas límite sobre la cuenca durante una simulación. Si el modelo de cuenca contiene subcuencas, se debe elegir un método de precipitación. El método de precipitación solo estima la cantidad de lluvia y nieve que cae sobre la cuenca. En caso de utilizar el hidrograma unitario modificado de Clark, se debe utilizar el método de precipitación en cuadrícula. Si el modelo de cuenca se configuró para simulación continua, entonces el modelo meteorológico debe incluir la evapotranspiración (USACE, 2021). Los métodos de precipitación y evapotranspiración se enlistan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Métodos del modelo meteorológico.

Precipitación	Evapotranspiración
Frecuencia de la tormenta	Anual
Pluviómetros	Hamon
Precipitación en cuadrícula	Hargreaves
Inverso de la distancia	Promedio mensual
Tormenta hipotética	Priestley Taylor
Hietograma especificado	Penman Monteith
Tormenta estándar	Evapotranspiración especificada

Nota: Elaboración propia con datos tomado de *HEC-HMS User's Manual Versión 4.8*, por USACE, 2021, United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

2.11.3 Especificaciones de control

Su propósito principal es especificar la fecha y hora de inicio, la fecha y hora de finalización de las simulaciones, y qué intervalo de tiempo se utiliza en la simulación (USACE, 2021).

2.12 Criterios de evaluación

Los indicadores estadísticos más utilizados en la evaluación de modelos son el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970); el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del cuadrado medio del error (RMSE, por sus siglas en inglés) (Vargas-Castañeda et al., 2015). Además, en la evaluación de las imágenes de satélite de lluvia IMERG, se utilizó el índice de probabilidad de detección (POD por sus siglas en inglés) y el índice de falsas alarmas (FAR por sus siglas en inglés). Estos indicadores estadísticos han sido utilizados por Hordofa, Leta, Alamirew, Kawo, y Chukalla (2021), Ma et al. (2020) y Tang et al. (2020). En el Cuadro 4 se muestran las ecuaciones, valor óptimo y rango de valores de los indicadores mencionados. Los índices POD y FAR se calculan a partir de los valores de a , b y c , como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 4. Ecuaciones y valores óptimos de los indicadores estadísticos.

Indicadores	Ecuación	Valor óptimo	Rango de valores	Unidad
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{est})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}$	1	$(-\infty, 1)$	-
R ²	$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{est} - \bar{Y}^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - \bar{Y}^{obs})^2}$	1	$(0, 1)$	-
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{est})^2}$	0	$(0, \infty)$	mm
POD	$POD = \frac{a}{a + c}$	1	$(0, 1)$	-
FAR	$FAR = \frac{b}{a + b}$	0	$(0, 1)$	-

Nota: Tomada y adaptada de “Evaluation and Hydrological Utility of the GPM IMERG Precipitation Products over the Xinfengjiang River Reservoir Basin, China” (p. 6), por Li, Chen, Deng, Zhang, y Chen, 2021, *Remote Sensing*, 13(5).

Donde Y^{est} es el valor estimado y Y^{obs} es el valor observado en el tiempo t , y n es el número de observaciones en el periodo considerado. $\bar{Y}^{obs}$ es el promedio de los datos observados.

Cuadro 5. Tabla de contingencia de posibles eventos.

		Estación meteorológica en tierra	
		Precipitación	Sin precipitación
IMERG	Precipitación	a	b
	Sin precipitación	c	d

Nota: Tomada y adaptada de “Evaluation of error in IMERG precipitation estimates under different topographic conditions and temporal scales over Mexico” (p. 5), por Mayor, Tereshchenko, Fonseca-Hernández, Pantoja, y Montes, 2017, *Remote Sensing*, 9(5).

Moriasi et al. (2007) proponen una clasificación para el índice de eficiencia NSE en la evaluación de modelos hidrológicos, el cual se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Clasificación para el índice de eficiencia NSE en la evaluación de modelos.

Clasificación	NSE
Muy bueno	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$
Bueno	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$
Satisfactorio	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$
Insatisfactorio	$\text{NSE} \leq 0.50$

Nota: Tomada y adaptada de "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations" (p. 891), por Moriasi et al., (2007), *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 20(3).

2.13 Calibración del modelo hidrológico

La calibración consiste en ajustar cada parámetro del modelo para que el hidrograma producido por el programa se ajuste al hidrograma observado en la cuenca. La calibración se puede realizar mediante dos formas: la primera es utilizando la técnica de prueba y error (observando visualmente que el hidrograma obtenido se ajuste al hidrograma observado); y la segunda es utilizar el módulo de optimización incorporado en el programa (Magaña-Hernández et al., 2013). El módulo de optimización en el programa HEC-HMS sigue el procedimiento que se muestra en la Figura 11.

De acuerdo con USACE (2021), para comparar un hidrograma observado con un hidrograma calculado, el programa HEC-HMS calcula un índice de ajuste de bondad. Los algoritmos incorporados en el programa buscan los parámetros del modelo que brinden el mejor valor de un índice, también conocidos como función objetivo. Según las necesidades del análisis, se puede utilizar una de las diferentes funciones objetivos incluidos en el programa: autocorrelación del primer retraso, máximo de residuos absolutos, máximo de residuos cuadrados, media de residuos absolutos, media de residuos cuadrados, raíz del cuadrado medio del error con ponderación por el pico, raíz del cuadrado medio del error, suma de residuos absolutos, suma de residuos cuadrados, varianza de residuos absolutos, varianza de residuos cuadrados, coeficiente de determinación y Nash-Sutcliffe. Se proporcionan dos métodos de búsqueda en el programa HEC-HMS:

el algoritmo de gradiente univariado y el algoritmo de Nelder y Mead. El primero, evalúa y ajusta un parámetro durante la optimización, mientras que el segundo evalúa al menos dos parámetros simultáneamente y determina qué parámetro ajustar.

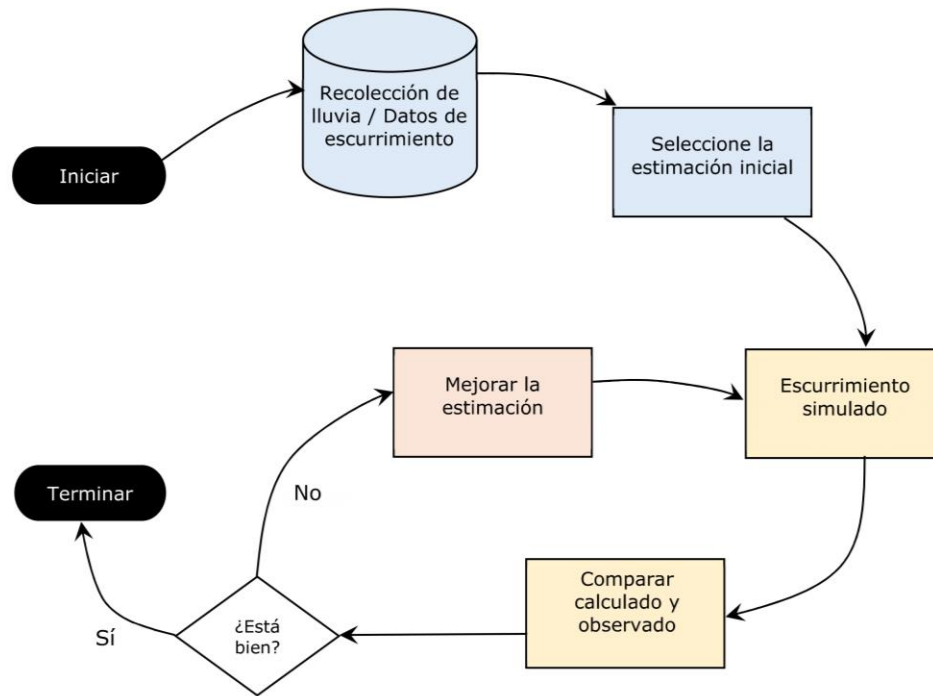


Figura 11. Esquema del procedimiento de calibración.

Nota: Tomada y adaptada de *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual* (p. 95), por USACE, 2000, United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.

2.14 Literatura citada

- Aparicio-Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Ciudad de México, México: Limusa.
- Campos-Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (3ra ed.). San Luis Potosí, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Chin, D. A. (2013). *Water-Resources Engineering* (3rd ed.). New Jersey, USA: Pearson.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada* (1ra ed.). Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
- Clark, C. O. (1945). Storage and the unit hydrograph. *American Society of Civil Engineers*, 110(2261), 1419–1446.

- Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology* (2nd ed.). New York, USA: Routledge.
- Dingman, S. L. (2002). *Physical Hydrology* (2nd ed.). Illinois, USA: Waveland Press Inc.
- Dingman, S. L. (2015). *Physical Hydrology* (3rd. ed.). Illinois, USA: Waveland Press Inc.
- Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., y Carrizosa, E. E. (2008). *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4687.5287>
- Estrada-Sifontes, V., y Pacheco-Moya, R. M. (2012). Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(1), 71–80. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382012000100008
- Gribbin, J. E. (2014). *Introduction to hydraulics and hydrology with applications for stormwater management* (4th ed.). NY, USA: Delmar.
- Guo, H., Chen, S., Bao, A., Behrangi, A., Hong, Y., Ndayisaba, F., Hu, J., y Stepanian, P. M. (2016). Early assessment of Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement over China. *Atmospheric Research*, 176–177, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.020>
- Hordofa, A. T., Leta, O. T., Alamirew, T., Kawo, N. S., y Chukalla, A. D. (2021). Performance Evaluation and Comparison of Satellite-Derived Rainfall Datasets over the Ziway Lake Basin, Ethiopia. *Climate*, 9(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/cli9070113>
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., y Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., y Xie, P. (2020). *NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 6*. Greenbelt, MD, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA). https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V06.pdf
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., y Tan, J. (2020). *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation*. Greenbelt, MD, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA). https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/2020-10/IMERG_doc_201006.pdf

- Karamouz, M., Nazif, S., y Falahi, M. (2013). *Hydrology and hydroclimatology: Principles and applications*. Florida, USA: CRC Press.
- Kull, D. W., y Feldman, A. D. (1998). Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1), 9–19. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:1(89))
- Li, X., Chen, Y., Deng, X., Zhang, Y., y Chen, L. (2021). Evaluation and Hydrological Utility of the GPM IMERG Precipitation Products over the Xinfengjiang River Reservoir Basin, China. *Remote Sensing*, 13(5), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs13050866>
- Ma, M., Wang, H., Jia, P., Tang, G., Wang, D., Ma, Z., y Yan, H. (2020). Application of the GPM-IMERG products in flash flood warning: A case study in Yunnan, China. *Remote Sensing*, 12(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12121954>
- Magaña-Hernández, F., Bâ, K. M., y Guerra-Cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia*, 47(8), 739–752. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30229642001>
- Mayor, Y. G., Tereshchenko, I., Fonseca-Hernández, M., Pantoja, D. A., y Montes, J. M. (2017). Evaluation of error in IMERG precipitation estimates under different topographic conditions and temporal scales over Mexico. *Remote Sensing*, 9(5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs9050503>
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design* (2nd ed.). New Jersey, USA: Pearson.
- Méndez-Antonio, B., Caetano, E., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F. G., Carvajal Rodríguez, R. A., y Watts, C. (2013). Weather Radar Data and Distributed Hydrological Modelling: An Application for Mexico Valley. *Open Journal of Modern Hydrology*, 03(02), 79–88. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2013.32011>
- Méndez-Antonio, B., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F., y Caetano, E. (2014). Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 83–101. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000100006
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van-Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- NASA. (2019). *The GPM Constellation*. Greenbelt, MD, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA) Goddard Space Flight Center (GSFC). <https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/constellation>
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

- Peters, J. C., y Easton, D. J. (1996). Runoff simulation using radar rainfall data. *Journal of the American Water Resources Association*, 32(4), 753–760. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb03472.x>
- Phetprayoon, T. (2015). Application of GIS-based Curve Number Method for Runoff Estimation in Agricultural-Forest Watershed, Thailand. *KKU Research Journal*, 20(2), 155–167. <https://doi.org/10.14456/kkurj.2015.13>
- Ponce, V. M., y Hawkins, R. H. (1996). Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1), 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1996\)1:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1996)1:1(11))
- Robinson, M., y Ward, R. C. (2017). *Hydrology. Principles and processes*. London, UK: IWA Publishing.
- SCS. (2004). Hydrology. En *National Engineering Handbook*. Washington, DC, USA: Soil Conservation Service.
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from Rainfall by Unit-Graph Method. *Engineering News Record*, 108(14), 501–505. https://archive.org/details/sim_enr_1932-04-07_108_14/page/504/mode/2up
- Singh, V. P. (Ed.). (2017). *Handbook of Applied Hydrology* (2nd ed.). USA: McGraw Hill Education.
- SMN. (2022). *Funciones y objetivos del SMN*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/funciones-y-objetivos>
- Subramanya, K. (2008). *Engineering hydrology* (3rd ed.). New Delhi, USA: McGraw Hill.
- Tang, S., Li, R., He, J., Wang, H., Fan, X., y Yao, S. (2020). Comparative evaluation of the GPM IMERG early, late, and final hourly precipitation products using the CMPA data over Sichuan Basin of China. *Water*, 12(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12020554>
- USACE. (1982). *Hydrologic Analysis of Ungaged Watershed Using HEC-1*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-15.pdf>
- USACE. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. [https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_(CPD-74B).pdf)
- USACE. (2021). *HEC-HMS User's Manual Versión 4.8*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.8/preface>
- USDA. (1986). *Urban hydrology for small wathersheds TR-55*. United States Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.p

df

- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L. A., y Arteaga-Ramírez, R. (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 5–21. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.03.002>
- Vieux, B. E. (2004). *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS. Water Science and Technology Library* (2nd ed.). USA: Kluwer Academic Publishers.
- Zimmermann, E. D. (2003). A generalization of Clark's IUH for flatland areas with strong human interventions. *Journal of Environmental Hydrology*, 11(2), 1–14. <http://hydroweb.com/jeh/jeh2003/zimmer.pdf>

3. EVALUACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PRECIPITACIÓN IMERG EN MÉXICO

3.1 Resumen

En este estudio se realizó la evaluación de los productos de precipitación de la última Versión 6 del algoritmo Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) en una región de México que comprende los estados de Jalisco, Colima y Michoacán durante los eventos de precipitación extrema ocurridos en octubre 2011, septiembre 2013, octubre 2015, octubre 2018, agosto 2020 y agosto 2021. Se utilizaron dos escalas temporales para la precipitación, diaria y horaria. Además, se analizaron los datos del IMERG en función de la elevación de las estaciones meteorológicas automáticas y convencionales ubicadas dentro del área de estudio, utilizadas como estaciones de referencia en tierra. Los resultados muestran que los productos IMERG tienen valores altos de NSE en resolución de escala temporal diaria. El producto IMERG-L presentó los valores más altos de NSE para estimar la precipitación horaria. El producto IMERG-F presentó los valores más altos de NSE para datos de lluvia diaria. Mientras que las estimaciones de precipitación horaria alcanzaron un NSE de 0.38, las estimaciones de precipitación diaria alcanzaron un NSE de 0.73. También se encontró que los productos IMERG tienen valores altos de NSE sobre las elevaciones de terreno más bajas de la zona de estudio.

Palabras clave: Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG), estimaciones de precipitación por satélite, POD, FAR.

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

Autor: Pedro Girón Méndez

Director: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

EVALUATION OF IMERG PRECIPITATION PRODUCTS OVER MÉXICO

3.2 Abstract

This study presents an assessment of the precipitation products of the latest Version 6 of the Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) algorithm in a region of Mexico that includes the states of Jalisco, Colima and Michoacán during the extreme precipitation events occurred in October 2011, September 2013, October 2015, October 2018, August 2020 and August 2021. Two time scales were used, daily scale and hourly scale. Additionally, IMERG data was analyzed based on the elevation of the automatic and conventional weather stations located within the study area, used as ground reference stations. Results showed that IMERG products have high NSE values at daily time scale resolution. The IMERG-L product presented the highest NSE values to estimate hourly precipitation. The IMERG-F product presented the highest NSE values for daily rainfall data. Whereas hourly precipitation estimates reached an NSE of 0.38, daily precipitation estimates reached an NSE of 0.73. Furthermore, IMERG products have higher NSE values over the lower ground elevations of the study area.

Key words: Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG), rainfall satellite image estimation, POD, FAR.

Master's Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Pedro Girón Méndez

Advisor: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

3.3 Introducción

Como un componente principal del ciclo hidrológico, la precipitación es una de las variables más importantes en el campo de la hidrometeorología (Jiang y Bauer-Gottwein, 2019; Rodrigues et al., 2021). La información confiable y oportuna sobre la distribución de esta variable, tanto en el tiempo como en el espacio, es esencial para la modelación hidrológica, la gestión de los recursos hídricos y aplicaciones agrícolas (Bui et al., 2019; Ramsauer, Weiß, y Marzahn, 2018). En la actualidad, los tres métodos más usados para cuantificar las precipitaciones son: pluviómetros, radares meteorológicos y productos basados en satélites (Guo et al., 2016). Cabe destacar que en México también se tienen pluviógrafos y estaciones meteorológicas automáticas (EMAs). Aunque cuando se presentan eventos máximos de lluvia, las EMAs suelen fallar por una falta apropiada de calibración y/o mantenimiento; y tanto pluviógrafos como EMAs presentan una cobertura insuficiente. Las observaciones convencionales de las estaciones pluviométricas suelen proporcionar las mediciones más directas y exactas en las ubicaciones de los pluviómetros (Duan, Liu, Tuo, Chiogna, y Disse, 2016). Sin embargo, la distribución espacial desigual, la densidad insuficiente y una menor cobertura espacial de los pluviómetros dificultan el uso de esta fuente para varias aplicaciones (Jing, Zhang, Jiang, y Zhao, 2017; Omranian, Sharif, y Tavakoly, 2018). Los radares meteorológicos pueden incrementar el alcance de las observaciones de las precipitaciones y tener una alta resolución espacial. Sin embargo, debido a la forma indirecta en que miden la precipitación, los radares meteorológicos están sujetos a varios errores, incluidos los efectos relacionados con la estructura del suelo y los ecos (Da-Silva et al., 2021; Liu, Du, Yang, y Wang, 2020). Los productos de precipitación basados en satélites no son tan exactos como las de los pluviómetros o los radares meteorológicos, pero tienen la ventaja de proporcionar estimaciones continuas con una alta resolución temporal y una cobertura espacial global, particularmente en las regiones montañosas y las zonas poco pobladas (X. Li, O, Wang, Liu, y Huang, 2021; Sharifi, Steinacker, y Saghafian, 2016). Entre ellos se encuentran los datos de la misión Global Precipitation Measurement (GPM), Integrated Multi-satellitE

Retrievals for GPM (IMERG). GPM es una misión satelital lanzada por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) el 28 de febrero de 2014 para sustituir la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) y proporcionar una nueva generación de observaciones de precipitaciones y nevadas desde el espacio (Hou et al., 2014). En la última Versión 06 de IMERG, el algoritmo fusiona los datos recogidos durante el funcionamiento del satélite TRMM (2000-2015) con los datos recogidos durante el funcionamiento del satélite GPM (2014-presente), permitiendo el uso de los datos IMERG con una serie temporal relativamente larga (P. Li et al., 2021).

Los productos IMERG (de ejecución temprana, tarde y final; IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F) tienen una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ a nivel global y múltiples resoluciones temporales (que van desde media hora). El producto IMERG-E y el producto IMERG-L están disponibles 4 h y 12 h después de la observación, mientras que el IMERG-F está disponible 3.5 meses después (Tan et al., 2019).

Aunque los productos de precipitación basados en satélites son capaces, en general, de captar la variabilidad y la magnitud de las precipitaciones, todavía no pueden estimar con exactitud las variaciones de las precipitaciones localizadas. Por lo tanto, es necesario realizar una evaluación de los productos de precipitación con respecto a las mediciones realizadas en tierra (Retalis et al., 2020).

P. Li et al. (2021) realizaron la evaluación de los productos de precipitación de la última Versión 06 del algoritmo IMERG a escala diaria desde 2001 hasta 2016, en Jinan, China. Encontraron que con un R^2 alto y un RMSE bajo, el producto IMERG-F se comportó mejor que IMERG-E e IMERG-L a escala diaria, mensual y anual. A escala diaria, los tres productos IMERG tienen mejor capacidad de detectar las precipitaciones menores de $20 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$.

En México, Mayor et al. (2017) evaluaron el producto IMERG-F Versión 03 sobre una región durante el periodo comprendido entre abril de 2014 y octubre de 2015 utilizando diferentes escalas temporales (horaria, diaria y estacional). El producto mostró un mejor desempeño en escala temporal diaria y estacional. Además, encontraron que el producto IMERG-F tiende a mejorar la detección de las precipitaciones y a reducir los errores de magnitud sobre la parte alta de la zona de estudio.

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar los productos de precipitación basados en satélites GPM IMERG Versión 06 sobre una región de México. En la evaluación de los productos se consideraron tres aspectos: evaluar el rendimiento a diferentes escalas temporales de precipitación (horaria y diaria), evaluar el impacto de la topografía sobre los productos y evaluar el rendimiento a diferentes intensidades de precipitación. Se ha utilizado como referencia la red de estaciones meteorológicas automáticas (EMA) y estaciones meteorológicas convencionales (EMC) ubicadas dentro de esta región. Es importante señalar que en este trabajo se tiene especial interés en los productos IMERG-E e IMERG-L, pensando que pudieran usarse en un modelo de pronóstico lluvia-escurrimiento. La utilidad del producto IMERG-F pudiera ser para apoyar la creación de una base de datos que tiene datos faltantes de lluvia o una región del mundo que solo tenga como opción de datos históricos, la que proporcionan los productos IMERG-F.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se muestra en la Figura 1. Esta zona corresponde a la cuenca del Río Coahuayana que forma parte de la Región Hidrológica 16 Armería-Coahuayana y abarca parte de los estados de Jalisco, Colima y Michoacán. Geográficamente se ubica entre las longitudes oeste $103^{\circ}48'$ y $102^{\circ}55'$, y latitud norte $20^{\circ}1'$ y $18^{\circ}39'$. Cuenta con una superficie de $7,332 \text{ km}^2$ hasta la estación hidrométrica Callejones; la altura máxima es de 4,260 msnm (metros sobre el

nivel del mar) y la mínima en la estación Callejones es de 16 msnm; la precipitación media anual es de 940 mm y la temperatura media anual de 20.7°C (SMN, 2021c). En la zona de estudio se encuentran dos presas con fines de almacenamiento: Presa Solidaridad con capacidad de 220 millones de m³ y Presa El Carrizo con capacidad de 47.27 millones de m³ (CONAGUA, 2012).

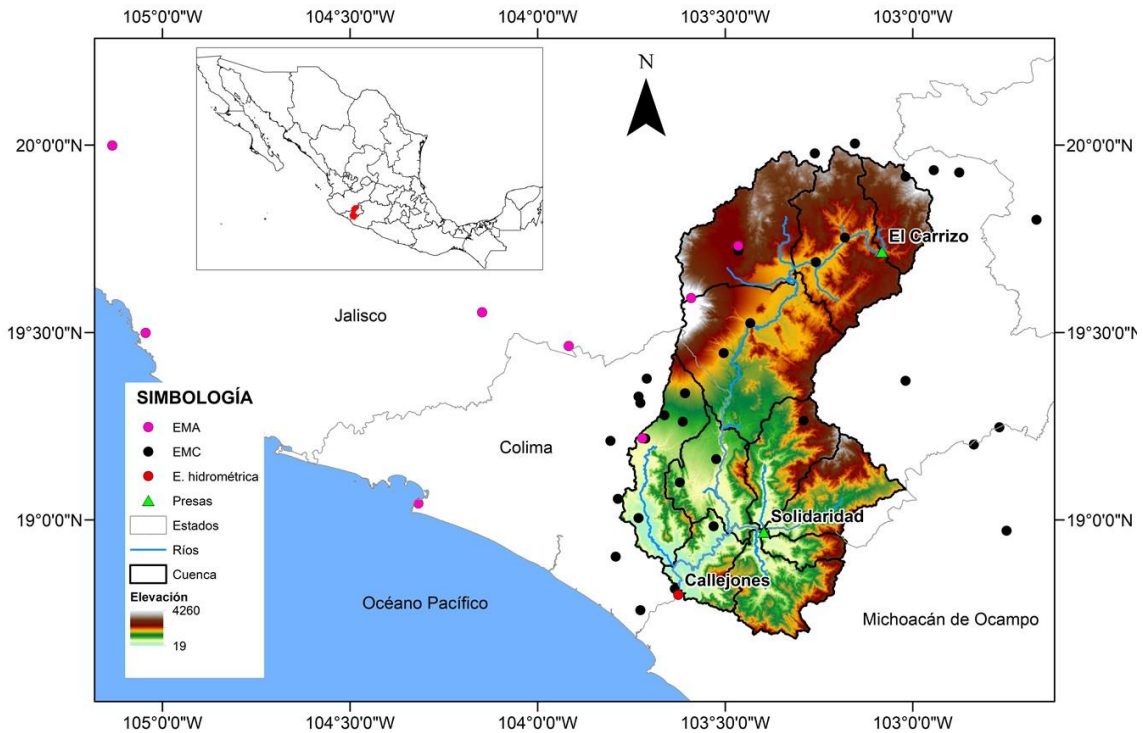


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución espacial de las estaciones meteorológicas.

3.4.2 Datos de precipitación del producto IMERG

El producto Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) fue creado a través de la intercalibración, unión e interpolación de todas las estimaciones de precipitación de microondas por satélite, junto con las estimaciones de sensores infrarrojos (IR) calibrados por microondas, análisis de pluviómetros y otros estimadores de precipitación que fueron desarrollados para la misión TRMM y GPM. La Versión 06 del producto IMERG es el más reciente de GPM con resolución espacial de 0.1° x 0.1° y con múltiples resoluciones temporales. El producto cubre una banda de 60°S-60°N para el periodo de junio 2000 a la

actualidad (Huffman, Bolvin, Braithwaite, et al., 2020). El producto IMERG-E se produce con la primera ejecución del algoritmo IMERG disponible 4 h después de la hora de observación y es adecuada para aplicaciones en tiempo real como la predicción de inundaciones repentinas. Cuando el algoritmo IMERG se ejecuta por segunda vez se genera el producto IMERG-L disponible 12 h después y puede utilizarse para la gestión de los recursos hídricos. El producto IMERG-F está disponible 3.5 meses después del momento de observación calibrada con datos auxiliares como pluviómetros y está destinada a aplicaciones de investigación (Tan et al., 2019). En este estudio se utilizó el producto IMERG con resolución temporal de media hora y se encuentra disponible de forma abierta en el sitio web Global Precipitation Measurement (Recuperado de <https://gpm.nasa.gov/data/directory>). Para la descarga del producto IMERG-E e IMERG-L se utilizó el programa FileZilla y la dirección jsimpsonftp.sps.eosdis.nasa.gov, mientras que para el producto IMERG-F se utilizó la dirección arthurhouftp.sps.eosdis.nasa.gov. Todos los datos del IMERG se convirtieron al tiempo local de la zona de estudio, es decir, la hora universal (UTC) – 5 horas. La precipitación acumulada de cada 30 min se convirtió en precipitación acumulada horaria y diaria.

3.4.3 Datos de precipitación de las estaciones meteorológicas

Los datos de precipitación se obtuvieron de las estaciones meteorológicas automáticas (SMN, 2021b) y de las estaciones meteorológicas convencionales (SMN, 2021a). En total se utilizaron 33 estaciones meteorológicas convencionales y 8 estaciones meteorológicas automáticas (Cuadro 1). La precipitación acumulada cada 10 min se convirtió en precipitación acumulada horaria y diaria.

De acuerdo con datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2022), se eligieron seis eventos (Cuadro 2) debido a la incidencia de fenómenos hidrometeorológicos máximos en la zona de estudio desde el Océano Pacífico.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas automáticas y convencionales del SMN en la zona de estudio.

Estación	Administración /Tipo	Estado	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Escala
Ciudad Guzmán	SMN/EMA	Jalisco	-103.465	19.731	1520	10 min
Chamelacuixmala	SMN/EMA	Jalisco	-105.045	19.499	84	10 min
Colima	SMN/EMA	Colima	-103.721	19.218	448	10 min
Nevado de Colima	SMN/EMA	Jalisco	-103.591	19.592	3461	10 min
Sierra de Manantlán I	SMN/EMA	Jalisco	-103.917	19.464	2491	10 min
Sierra de Manantlán II	SMN/EMA	Jalisco	-104.148	19.554	2282	10 min
Manzanillo	SMN/EMA	Colima	-104.318	19.044	3	10 min
Río Tomatlán	SMN/EMA	Jalisco	-105.134	19.999	141	10 min
6002 Buenavista	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.613	19.262	622	24 h
6003 Callejones	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.634	18.816	30	24 h
6005 Cerro de Ortega	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.726	18.759	19	24 h
6007 Comala	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.731	19.329	735	24 h
6008 Coquimatlán	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.806	19.211	354	24 h
6009 Cuauhtémoc	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.607	19.338	922	24 h
6010 Estapilla	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.531	18.983	350	24 h
6013 La Salada	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.786	19.056	360	24 h
6040 Colima	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.713	19.217	500	24 h
6042 Ixtlahuacán	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.731	19.005	194	24 h
6043 Tepames	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.621	19.100	469	24 h
6052 E.T.A. 254 Comala	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.726	19.312	706	24 h
6059 Laguna de Alcuahue	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.792	18.902	48	24 h
6062 Cofradia de Suchitlán	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.709	19.377	860	24 h
6071 Trapichillos	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.524	19.162	552	24 h
6073 Trapiche	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.662	19.279	663	24 h
14029 Concepción de Buenos Aires	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.261	19.978	1639	24 h
14030 Ciudad Guzmán	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.465	19.718	1515	24 h
14034 Contla	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.181	19.753	1160	24 h
14086 La Manzanilla de la Paz	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.154	20.004	2050	24 h
14099 Mazamitla	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.019	19.916	2240	24 h
14118 Quito	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.433	19.525	1045	24 h
14129 San Marcos	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.504	19.445	1120	24 h
14141 Ingenio Tamazula	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.258	19.688	1450	24 h
14160 Valle de Juárez	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-102.944	19.933	1960	24 h
14180 Quitupán	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-102.876	19.927	1660	24 h
14348 Jilotlán	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.019	19.371	740	24 h
16039 Piedras Blancas	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.769	19.247	419	24 h
16043 El Puerto	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.67	19.801	1640	24 h
16158 El Cajón	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.75	18.971	296	24 h
16264 Presa Los Olivos	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.837	19.201	379	24 h
14112 Presa Trojes	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.395	18.967	360	24 h

Nota: Estación Meteorológica Automática (EMA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Cuadro 2. Eventos hidrometeorológicos seleccionados en la zona de estudio.

Tormentas	Nombre	Inicio evento	Fin evento	Duración (días)	Número de estaciones	Precipitación máxima acumulada en 24 h (mm)
2011	Huracán Jova	09/10/2011 08:00	21/10/2011 08:00	12	27	374.4
2013	Tormenta tropical Manuel	13/09/2013 08:00	21/09/2013 08:00	8	31	319.2
2015	Huracán Patricia	14/10/2015 08:00	31/10/2015 08:00	17	30	342.0
2018	Huracán Willa	18/10/2018 08:00	25/10/2018 08:00	7	7	237.6
2020	Tormenta tropical Hernán	24/08/2020 08:00	30/08/2020 08:00	6	6	257.2
2021	Huracán Nora	25/08/2021 08:00	31/08/2021 08:00	6	7	273.6

3.4.4 Procesamiento de los datos

La evaluación consiste en comparar los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas con las estimaciones de los productos IMERG, por lo que se necesita realizar algún tipo de interpolación. Con la finalidad de evitar la modificación de los datos observados de las estaciones meteorológicas, se plantea utilizar una técnica de interpolación de cuadrícula a punto. Se utiliza el método de interpolación bilineal sobre las estimaciones de los productos IMERG para extraer el dato de la precipitación en los puntos específicos que corresponden a las ubicaciones de las estaciones meteorológicas. El método de interpolación bilineal utiliza el promedio ponderado de la distancia de los valores de las cuatro cuadrículas más cercanas al punto de interés para dar una estimación (Mayor et al., 2017).

3.4.5 Indicadores estadísticos de evaluación

Se utilizaron seis indicadores estadísticos para evaluar la exactitud de los productos IMERG en diferentes escalas temporales (horaria y diaria). Los indicadores estadísticos utilizados con mayor frecuencia en la evaluación de modelos son el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970); el

coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del cuadrado medio del error (RMSE, por sus siglas en inglés) (Vargas-Castañeda et al., 2015); el índice RMSE-desviación estándar de las observaciones (RSR) que incorpora un índice de error y un factor de normalización (Moriassi et al., 2007); la probabilidad de detección (POD, por sus siglas en inglés) mide la fracción de eventos de precipitación detectados correctamente por IMERG con respecto al número total de eventos de precipitación observados en tierra y el índice de falsas alarmas (FAR, por sus siglas en inglés) mide la fracción de eventos de precipitación detectados incorrectamente con respecto al número total de eventos detectados por IMERG. Estos indicadores han sido utilizados anteriormente en evaluación de productos de precipitación (Hordofa et al., 2021; Ma et al., 2020; Mahgoub, Amin, Hemdan, y Basiony, 2019; Tang et al., 2020). En el Cuadro 3 se muestran las fórmulas y los valores óptimos de estos indicadores. Los indicadores POD y FAR pueden calcularse a partir de los valores de a , b y c , que se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 3. Ecuaciones y valores óptimos para los indicadores estadísticos.

Indicador	Ecuación	Valor óptimo	Rango de valores	Unidad
NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (P_t^{obs} - P_t^{est})^2}{\sum_{t=1}^n (P_t^{obs} - \bar{P}^{obs})^2}$	1	$(-\infty, 1)$	-
R^2	$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (P_t^{est} - \bar{P}^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (P_t^{obs} - \bar{P}^{obs})^2}$	1	$(0, 1)$	-
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (P_t^{obs} - P_t^{est})^2}$	0	$(0, \infty)$	mm
RSR	$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}}$	0	$(0, \infty)$	-
POD	$POD = \frac{a}{a + c}$	1	$(0, 1)$	-
FAR	$FAR = \frac{b}{a + b}$	0	$(0, 1)$	-

En estas ecuaciones, P^{est} son las precipitaciones estimadas por IMERG y P^{obs} son las precipitaciones observadas en las estaciones meteorológicas en el tiempo t , y n es el número de observaciones en el periodo considerado. $\bar{P}^{obs}$ es

la media de las precipitaciones observadas. $STDEV_{obs}$ es la desviación estándar de las precipitaciones observadas.

Moriasi et al. (2007) clasifican el índice de Nash-Sutcliffe (NSE) como: muy bueno $0.75 < NSE \leq 1.00$, bueno $0.65 < NSE \leq 0.75$, satisfactorio $0.50 < NSE \leq 0.65$ e insatisfactorio $NSE \leq 0.50$; los mismos autores señalan que un valor de RSR igual o menor a 0.7 es satisfactorio. Condom, Rau, y Espinoza (2011) señalan que un valor de R^2 igual o superior a 0.5 es satisfactorio. Liu et al. (2020) señalan que un índice de probabilidad de detección (POD) igual o superior a 0.5 es satisfactorio. Mazzoglio, Laio, Balbo, Boccardo, y Disabato (2019) señalan que un índice de falsas alarmas (FAR) igual o menor a 0.5 es satisfactorio.

Cuadro 4. Tabla de contingencia de posibles eventos.

		Estación meteorológica en tierra		
		Precipitación	Sin precipitación	Total
IMERG	Precipitación	a	b	a+b
	Sin precipitación	c	d	c+d
	Total	a+c	b+d	Total

Donde a es el número de eventos de precipitación detectados simultáneamente por la estación meteorológica en tierra y el producto IMERG, b es el número de eventos de precipitación detectados por IMERG pero no por la estación meteorológica, c es el número de eventos de precipitación detectados por la estación meteorológica pero no por IMERG, y d es el número de eventos de precipitación que ni la estación meteorológica ni el producto IMERG detectaron.

3.4.6 Indicadores en función de la elevación y categorización de las intensidades de precipitación

Se utilizó un modelo de regresión lineal simple para explicar la dependencia entre los indicadores de evaluación y la elevación de las estaciones meteorológicas, Ecuación (1):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (1)$$

Donde y representa el indicador de evaluación; β_0 es la intersección; β_1 es la pendiente y x representa la elevación de las estaciones (en km).

Se aplicó la prueba de t de Student para verificar si la pendiente (β_1) de la regresión lineal simple es o no significativamente distinta de cero, Ecuación (2), adoptando una significancia estadística del 5%.

$$H_0: \beta_1 = 0 \quad \text{versus} \quad H_a: \beta_1 \neq 0 \quad (2)$$

Además, se clasificó la intensidad de precipitación (I) diaria en cuatro categorías basados en el comportamiento de la precipitación observada: precipitación ligera ($0 < I \leq 20 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$), precipitación fuerte ($20 < I \leq 70 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$), precipitación intensa ($70 < I \leq 150 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$) y precipitación torrencial ($I > 150 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$). Esta clasificación, hasta cierto punto, sigue aquella propuesta por el Centro Nacional de Prevención de Desastres en México (CENAPRED, 2021).

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Análisis horario

Como se muestra en la Figura 2 y 3, el producto IMERG-L presentó valores mayores de NSE, que oscila entre 0.10 y 0.38, en los eventos de 2018, 2020 y 2021 en comparación con IMERG-E e IMERG-F. El producto IMERG-L presentó valores mayores de R^2 en los eventos de 2018 y 2021 (0.15 y 0.42, respectivamente) y valores bajos de RMSE (2.88 y $3.19 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente) en comparación con IMERG-E e IMERG-F. El R^2 de IMERG-F (0.37) del evento de 2020 es mayor que IMERG-E e IMERG-L (0.25 y 0.31, respectivamente).

La probabilidad de detección (POD) fue superior al 0.66 en los tres productos IMERG. El producto IMERG-F registra mejor probabilidad de detección en los eventos de 2020 y 2021 (0.87 y 0.93, respectivamente). En el caso del índice de falsas alarmas (FAR), el producto IMERG-F presentó el valor mínimo (0.43) en el evento de 2018.

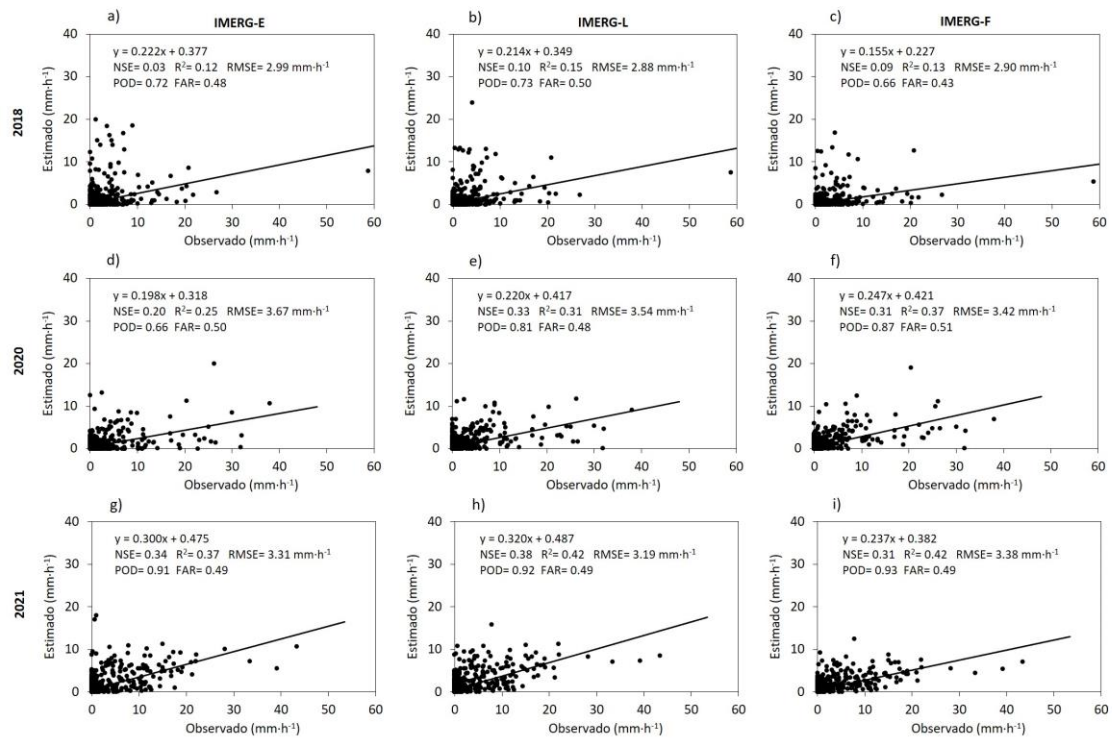


Figura 2. Precipitación estimada por IMERG versus precipitación observada por las estaciones meteorológicas para los eventos de 2018, 2020 y 2021.

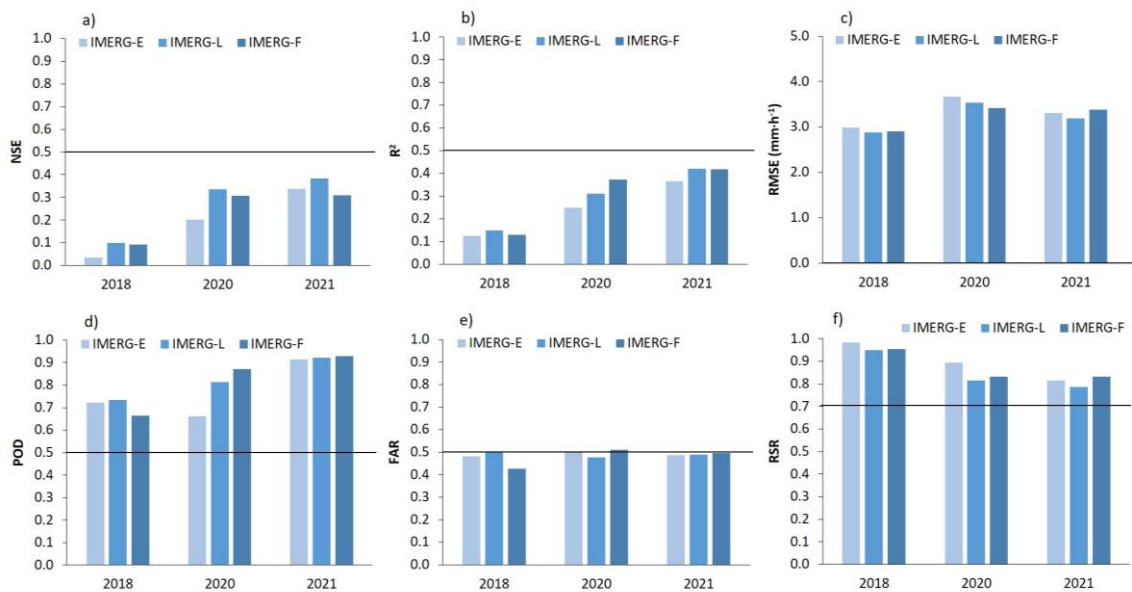


Figura 3. NSE, R², RMSE (mm-h⁻¹), RSR, POD y FAR de los productos IMERG a escala horaria. La línea negra sólida representa el valor satisfactorio.

En el Cuadro 5 se presenta detalladamente los indicadores de los eventos de 2018, 2020 y 2021 a escala horaria. De acuerdo con la clasificación del índice de Nash-Sutcliffe (NSE), los productos IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F del evento de 2018, 2020 y 2021 son insatisfactorios. Sin embargo, los valores de NSE son mayores a 0, es decir, la precipitación obtenida de las imágenes de satélite es mejor que utilizar la media aritmética de las precipitaciones observadas en tierra.

Cuadro 5. Indicadores de los tres productos de precipitación IMERG (IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F) a escala horaria.

Evento	Producto	a	b	c	d	Total	NSE	R ²	RMSE (mm·h ⁻¹)	RSR	POD	FAR
2018	IMERG-E	292	270	113	501	1176	0.03	0.12	2.99	0.98	0.72	0.48
	IMERG-L	297	295	108	476		0.10	0.15	2.88	0.95	0.73	0.50
	IMERG-F	269	199	136	572		0.09	0.13	2.90	0.95	0.66	0.43
2020	IMERG-E	183	184	94	403	864	0.20	0.25	3.67	0.89	0.66	0.50
	IMERG-L	225	205	52	382		0.33	0.31	3.54	0.82	0.81	0.48
	IMERG-F	241	252	36	335		0.31	0.37	3.42	0.83	0.87	0.51
2021	IMERG-E	243	230	23	512	1008	0.34	0.37	3.31	0.81	0.91	0.49
	IMERG-L	245	235	21	507		0.38	0.42	3.19	0.79	0.92	0.49
	IMERG-F	247	242	19	500		0.31	0.42	3.38	0.83	0.93	0.49

Nota: el valor de a, b, c y d se obtienen del Cuadro 4, del Capítulo 3 (pág. 45).

En la Figura 4 se presenta información de las estaciones meteorológicas únicamente de los eventos de 2018, 2020 y 2021. En la Figura 4 se observa que el producto IMERG-L tiene buen ajuste a los datos horarios de precipitación medidos en tierra en los eventos de 2018, 2020 y 2021. En términos de RMSE, el producto IMERG-L presentó los valores más bajos en los eventos de 2018 y 2021. El producto IMERG-F presentó mejor probabilidad de detección (POD) en los eventos de 2020 y 2021. El producto IMERG-L presentó los valores más bajos del índice de falsas alarmas (FAR) en los eventos de 2018 y 2021.

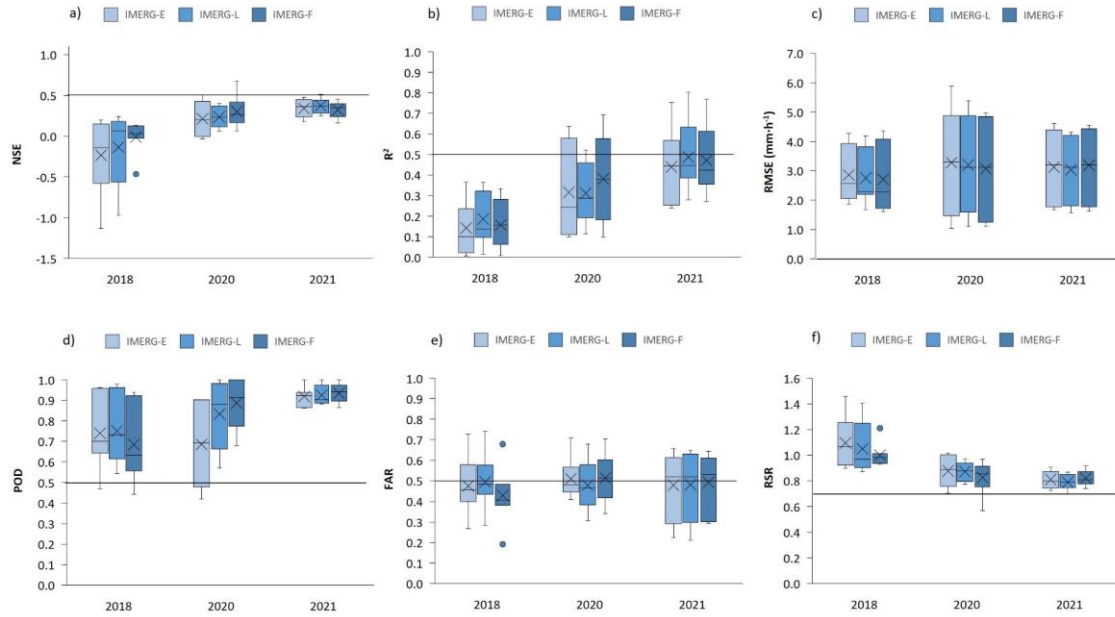


Figura 4. Gráficas de caja de NSE, R^2 , RMSE ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), RSR, POD y FAR a escala horaria. La línea negra sólida representa el valor satisfactorio.

3.5.2 Análisis diario

Como se muestra en la Figura 5, 6 y 7, el producto IMERG-F presentó valores mayores de NSE, que oscila entre 0.43 y 0.73, en los eventos de 2011, 2013, 2015 y 2020 en comparación con IMERG-E e IMERG-L. El producto IMERG-L presentó buen ajuste a los datos de precipitación diaria en el evento de 2021.

En términos de R^2 , el producto IMERG-F tuvo valores mayores, que oscila entre 0.55 y 0.79, en los eventos de 2013, 2020 y 2021. Mientras que el producto IMERG-L tuvo valores mayores de R^2 en los eventos de 2011 y 2018 (0.34 y 0.87, respectivamente). En el caso de RMSE, el producto IMERG-F presentó valores bajos, que oscila entre 26.13 y 44.02 $\text{mm}\cdot\text{día}^{-1}$, en los eventos de 2011, 2013, 2015 y 2020. De manera similar, P. Li et al. (2021), Yu, Leng, Python, y Peng (2021) encontraron que IMERG-F presentó valores mayores de R^2 y valores bajos de RMSE en comparación con IMERG-E e IMERG-L en escala temporal diaria y mensual. La probabilidad de detección (POD) fue superior al 0.80 en los tres productos; siendo el producto IMERG-E con mejor probabilidad de detección, que oscila entre 0.89 y 0.99, en los eventos de 2013, 2015, 2018 y 2021. En el caso

del índice de falsas alarmas (FAR), el producto IMERG-L presentó valores bajos, que oscila entre 0.06 y 0.32, en los eventos de 2011, 2013, 2015, 2020 y 2021.

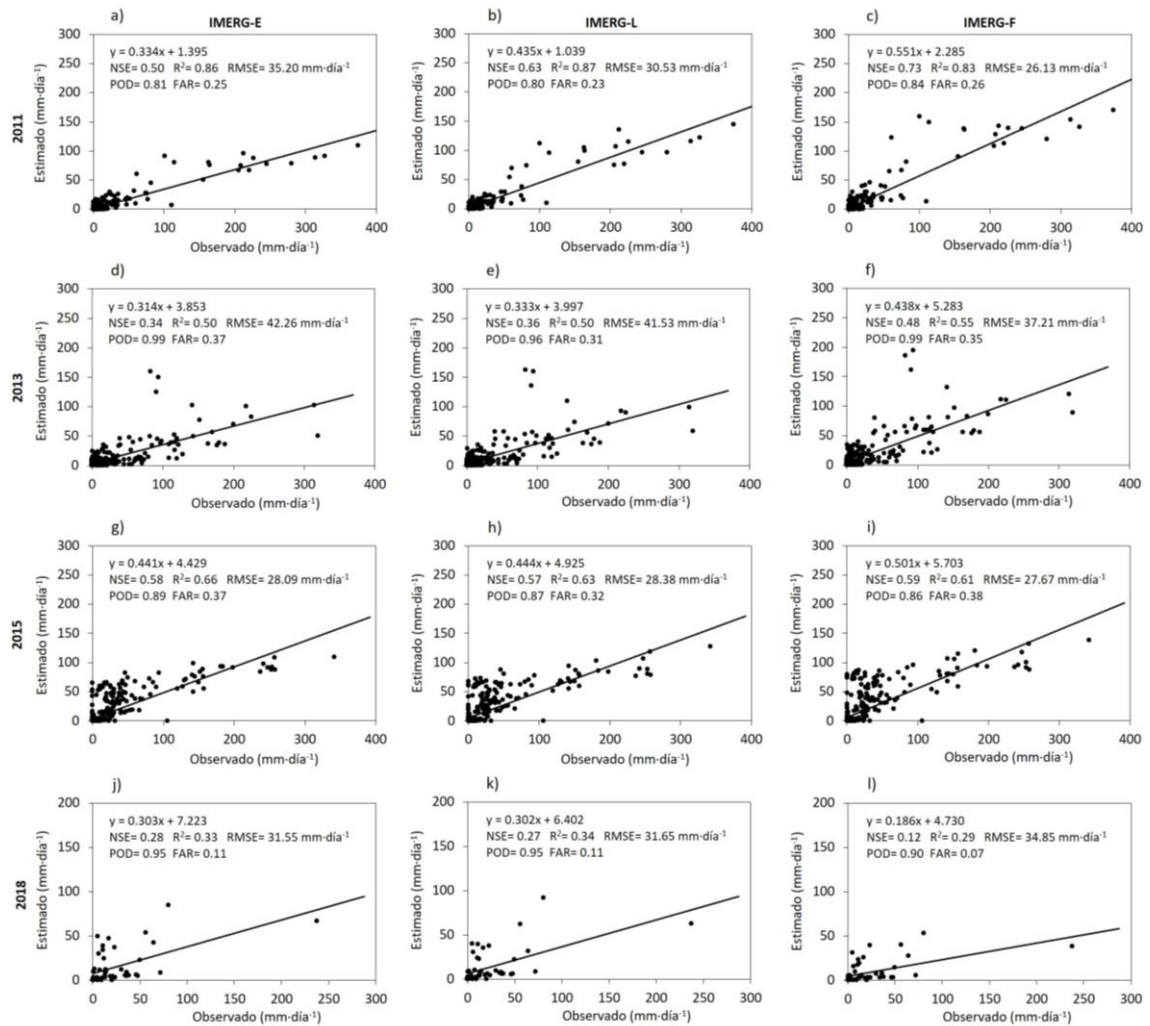


Figura 5. Precipitación estimada por IMERG *versus* precipitación observada por las estaciones meteorológicas para los eventos de 2011, 2013, 2015 y 2018.

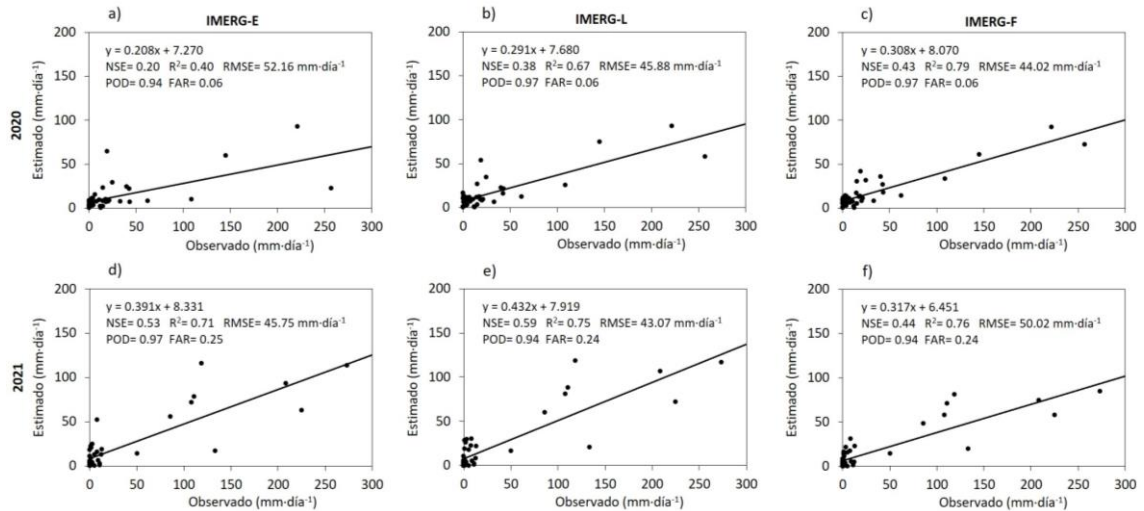


Figura 6. Precipitación estimada por IMERG *versus* precipitación observada por las estaciones meteorológicas para los eventos de 2020 y 2021.

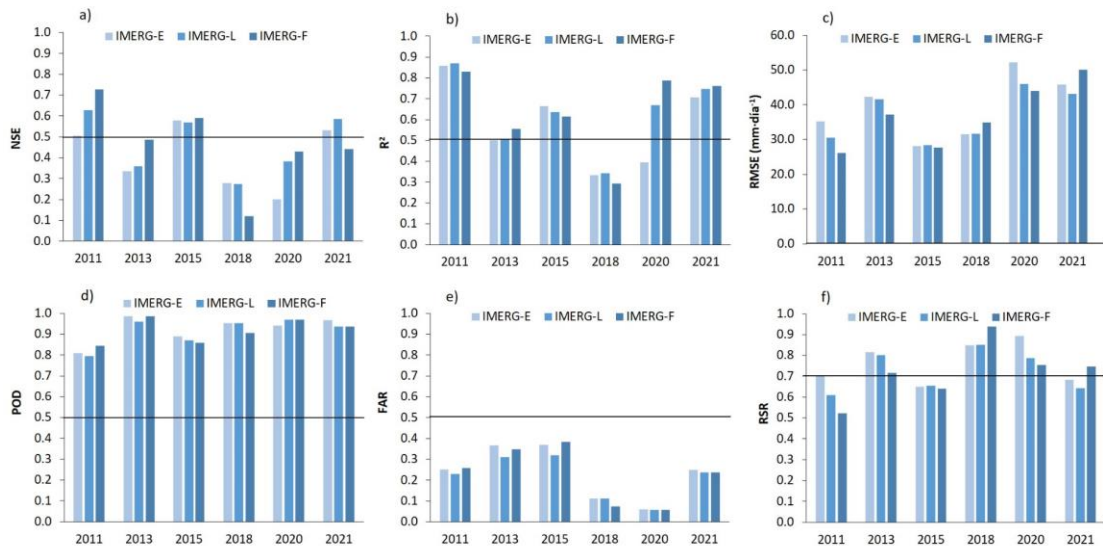


Figura 7. NSE, R², RMSE (mm·día⁻¹), RSR, POD y FAR de los productos IMERG a escala diaria. La línea negra sólida representa el valor satisfactorio.

En el Cuadro 6 se presenta detalladamente los indicadores estadísticos de los eventos de 2011, 2013, 2015, 2018, 2020 y 2021 a escala diaria. De acuerdo con la clasificación del índice de Nash-Sutcliffe (NSE), los productos IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F del evento de 2013, 2018, 2020 y el producto IMERG-F del evento de 2021 son insatisfactorios; los productos IMERG-E e IMERG-L del evento de 2011, 2015, 2021 y el producto IMERG-F de 2015 son satisfactorios; y el producto IMERG-F de 2011 es bueno.

Como se observa en la Figura 8, el producto IMERG-F presentó valores mayores de NSE y POD en los eventos de 2011, 2013, 2015 y 2020, y valores mayores de R^2 en los eventos de 2011, 2013 y 2021 con menor variación de los resultados de las estaciones meteorológicas. El producto IMERG-F presentó valores bajos de FAR en los eventos de 2018, 2020 y 2021, y valores bajos de RMSE en los eventos de 2011, 2013, 2015 y 2020.

Cuadro 6. Métricas estadísticas de los tres productos de precipitación IMERG (IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F) a escala diaria.

Evento	Producto	a	b	c	d	Total	NSE	R^2	RMSE (mm·día ⁻¹)	RSR	POD	FAR
2011	IMERG-E	98	33	23	170	324	0.50	0.86	35.20	0.70	0.81	0.25
	IMERG-L	97	29	25	173		0.63	0.87	30.53	0.61	0.80	0.23
	IMERG-F	103	36	19	166		0.73	0.83	26.13	0.52	0.84	0.26
2013	IMERG-E	150	87	2	8	247	0.34	0.50	42.26	0.82	0.99	0.37
	IMERG-L	146	66	6	29		0.36	0.50	41.53	0.80	0.96	0.31
	IMERG-F	150	80	2	15		0.48	0.55	37.21	0.72	0.99	0.35
2015	IMERG-E	145	85	18	261	509	0.58	0.66	28.09	0.65	0.89	0.37
	IMERG-L	142	67	21	279		0.57	0.63	28.38	0.66	0.87	0.32
	IMERG-F	140	87	23	259		0.59	0.61	27.67	0.64	0.86	0.38
2018	IMERG-E	40	5	2	2	49	0.28	0.33	31.55	0.85	0.95	0.11
	IMERG-L	40	5	2	2		0.27	0.34	31.65	0.85	0.95	0.11
	IMERG-F	38	3	4	4		0.12	0.29	34.85	0.94	0.90	0.07
2020	IMERG-E	32	2	2	0	36	0.20	0.40	52.16	0.89	0.94	0.06
	IMERG-L	33	2	1	0		0.38	0.67	45.88	0.79	0.97	0.06
	IMERG-F	33	2	1	0		0.43	0.79	44.02	0.75	0.97	0.06
2021	IMERG-E	30	10	1	1	42	0.53	0.71	45.75	0.68	0.97	0.25
	IMERG-L	29	9	2	2		0.59	0.75	43.07	0.64	0.94	0.24
	IMERG-F	29	9	2	2		0.44	0.76	50.02	0.75	0.94	0.24

Nota: el valor de a, b, c y d se obtienen del Cuadro 4, del Capítulo 3 (pág. 45).

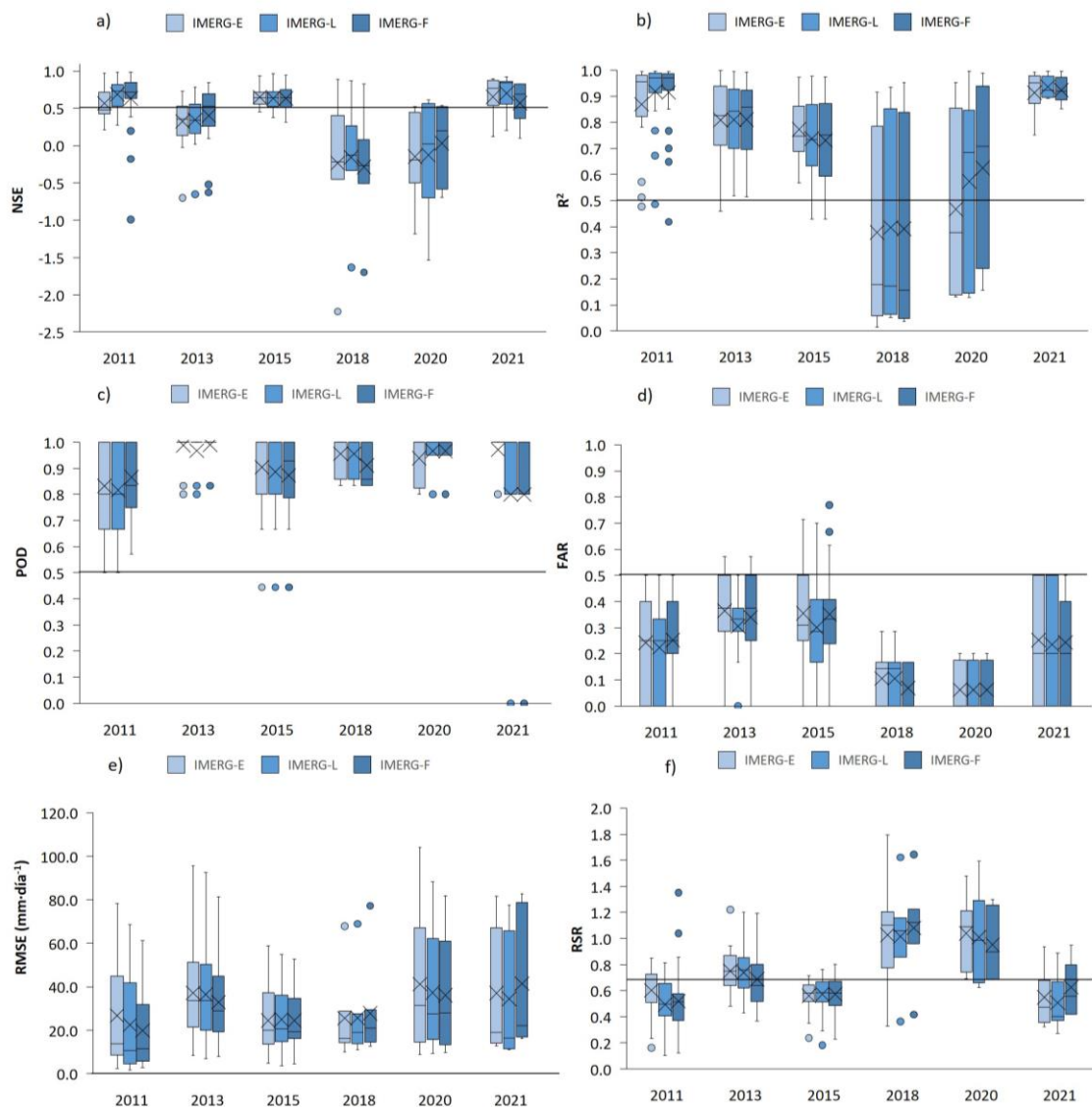


Figura 8. Gráficas de caja de NSE, R^2 , RMSE (mm·día⁻¹), RSR, POD y FAR a escala diaria. La línea negra sólida representa el valor satisfactorio.

3.5.3 Evaluación de los productos IMERG de acuerdo con la elevación de la estación meteorológica e intensidades de precipitación

En la Figura 9 se muestran las gráficas de dispersión de los indicadores NSE y R^2 contra la elevación de las estaciones meteorológicas del producto IMERG-E del evento de 2011. Estas gráficas de dispersión también se hicieron para RMSE, POD y FAR para los eventos de 2011, 2013, 2015, 2018, 2020 y 2021, y para los productos IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F con información a escala diaria.

En el Cuadro 7 se presentan los parámetros β_0 y β_1 del modelo de regresión lineal, el coeficiente de determinación (R^2) y el valor p de los eventos y productos IMERG con tendencia significativa ($p < 0.05$).

Se encontró una tendencia negativa en la métrica NSE en el producto IMERG-E del evento de 2011 (Figura 9a), IMERG-L del evento de 2020 y los tres productos IMERG del evento de 2021, es decir, que las estaciones que se encuentran en la parte baja de la zona de estudio alcanzaron valores mayores de NSE. De manera similar, el indicador R^2 presentó una tendencia negativa en los tres productos IMERG del evento de 2011 (Figura 9b).

Los valores de RMSE de los tres productos IMERG del evento de 2011 disminuyeron conforme la elevación de las estaciones aumentó, presentando los valores mínimos en la parte alta de la zona de estudio, a excepción, del producto IMERG-L del evento de 2021.

Los valores que corresponden a FAR de los productos IMERG-E e IMERG-F del evento de 2011 también presentaron el mismo comportamiento que NSE y R^2 , señalando que los productos de precipitación tienden a detectar falsamente la precipitación en la parte baja de la zona de estudio. Los valores de POD señalan que los tres productos IMERG del evento de 2011, tienden a detectar correctamente la precipitación en la parte alta de la zona de estudio, a excepción del producto IMERG-E del evento de 2013. El estudio realizado en México por Mayor et al. (2017) demuestra que el FAR disminuye con el aumento de la altitud mientras que el POD aumenta con el aumento de la altitud.

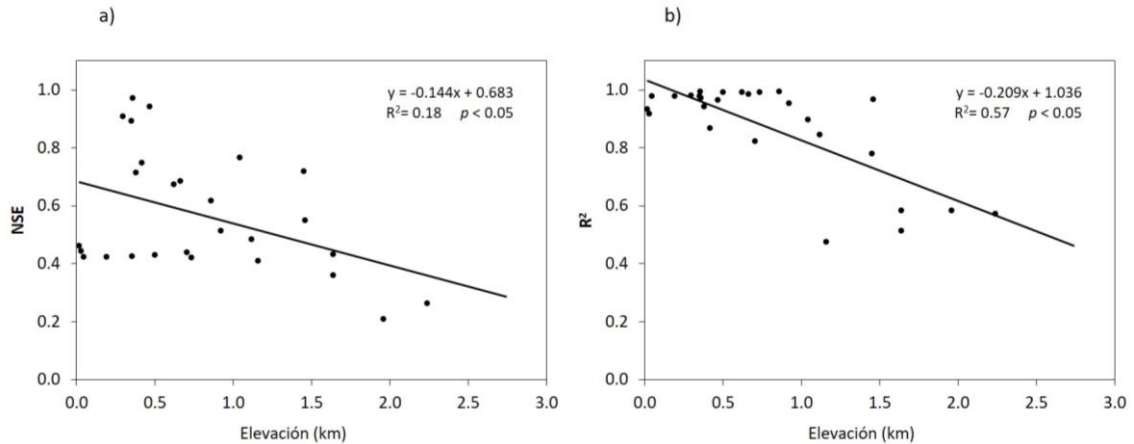


Figura 9. Relación entre el NSE y R^2 para el producto IMERG-E y la elevación de las estaciones meteorológicas a escala diaria del evento de 2011.

Cuadro 7. Estimaciones de los parámetros (β_0 , β_1) del modelo de regresión lineal, el coeficiente de determinación (R^2) y el valor p que corresponde a β_1 .

Métricas	Tormentas	Producto	β_0	β_1	R^2	valor p
NSE	2011	IMERG-E	0.683	-0.144	0.18	<0.05
	2020	IMERG-L	0.475	-0.469	0.75	<0.05
		IMERG-E	0.835	-0.154	0.59	<0.05
	2021	IMERG-L	0.880	-0.152	0.68	<0.05
		IMERG-F	0.752	-0.156	0.61	<0.05
R^2		IMERG-E	1.036	-0.209	0.57	<0.05
	2011	IMERG-L	1.027	-0.135	0.43	<0.05
		IMERG-F	1.030	-0.144	0.42	<0.05
RMSE (mm·día ⁻¹)		IMERG-E	39.435	-15.838	0.17	<0.05
	2011	IMERG-L	34.631	-15.204	0.19	<0.05
		IMERG-F	31.457	-14.432	0.26	<0.05
	2021	IMERG-L	16.134	15.780	0.60	<0.05
		IMERG-E	0.747	0.107	0.15	<0.05
POD	2011	IMERG-L	0.730	0.108	0.15	<0.05
		IMERG-F	0.787	0.098	0.17	<0.05
	2013	IMERG-E	1.010	-0.026	0.15	<0.05
FAR		IMERG-E	0.347	-0.131	0.21	<0.05
	2011	IMERG-F	0.342	-0.113	0.21	<0.05

De acuerdo con el Cuadro 8 el producto IMERG-L en el evento de 2011 presentó el valor más alto de NSE en precipitación menor a 20 mm·día⁻¹ (0.32), mientras que las precipitaciones mayores a 20 mm·día⁻¹ obtuvieron valores por debajo de 0. El producto IMERG-F presentó los valores de NSE más cercanos a 0 en los eventos de 2018, 2020 y 2021 en precipitación menor a 20 mm·día⁻¹.

Cuadro 8. Coeficiente de NSE para las diferentes intensidades en cada evento a escala diaria.

Tormentas	Intensidad de precipitación	IMERG-E	IMERG-L	IMERG-F
2011	Ligera	0.28	0.32	-0.01
	Fuerte	-2.81	-2.30	-2.46
	Intensa	-10.74	-9.21	-10.10
	Torrencial	-5.60	-3.88	-2.34
2013	Ligera	-0.11	-0.23	-1.04
	Fuerte	-3.70	-3.41	-2.77
	Intensa	-11.21	-10.51	-8.58
	Torrencial	-7.13	-6.95	-5.02
2015	Ligera	-5.13	-6.62	-10.44
	Fuerte	-1.53	-1.54	-2.34
	Intensa	-3.52	-3.63	-2.83
	Torrencial	-5.78	-5.71	-4.69
2018	Ligera	-3.76	-2.44	-0.86
	Fuerte	-3.48	-3.71	-4.79
2020	Ligera	-2.02	-1.56	-0.79
	Fuerte	-3.26	-2.62	-1.98
2021	Ligera	-7.28	-5.86	-2.80
	Intensa	-13.07	-11.18	-15.60
	Torrencial	-27.51	-24.54	-34.79

Como se muestra en la Figura 10a, el producto IMERG-F presentó valores mayores de R^2 en precipitación menor a $20 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$, que oscila entre 0.15 y 0.37, en los eventos de 2011, 2015, 2020 y 2021; y el producto IMERG-E presentó valores mayores de R^2 en precipitación mayor a $150 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$, que oscila entre 0.40 y 0.52, en los eventos de 2011, 2015 y 2021.

En precipitación diaria menor a 20 mm, el producto IMERG-F presentó valores bajos de RMSE (Figura 10b), que oscila entre 7.93 y $8.72 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$, en los eventos de 2018, 2020 y 2021; el producto IMERG-L en el evento de 2011 ($3.81 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$) y el producto IMERG-E en los eventos de 2013 y 2015 (6.02 y $9.82 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$, respectivamente). En precipitación diaria mayor a 150 mm, el producto IMERG-F presentó valores bajos de RMSE, que oscila entre 118 y $133 \text{ mm} \cdot \text{día}^{-1}$, en los eventos de 2011, 2013 y 2015.

El producto IMERG-E presentó valores mayores de POD (Figura 10c) en precipitación diaria menor a 20 mm, que oscila entre 0.75 y 0.95, en los eventos de 2015, 2018 y 2021; y el producto IMERG-F presentó valores mayores, que oscila entre 0.76 y 0.99, en los eventos de 2011, 2013 y 2020. Los tres productos IMERG alcanzaron valores de POD cercanos a 1 en precipitación diaria mayor a 1 en 20 mm. El producto IMERG-L presentó valores bajos de FAR (Figura 10d) en precipitación diaria menor a 20 mm, que oscila entre 0.09 y 0.59, en los eventos de 2011, 2013, 2015, 2020 y 2021. Los tres productos IMERG alcanzaron valores de FAR cercanos a 0 en precipitación diaria mayor a 20 mm.

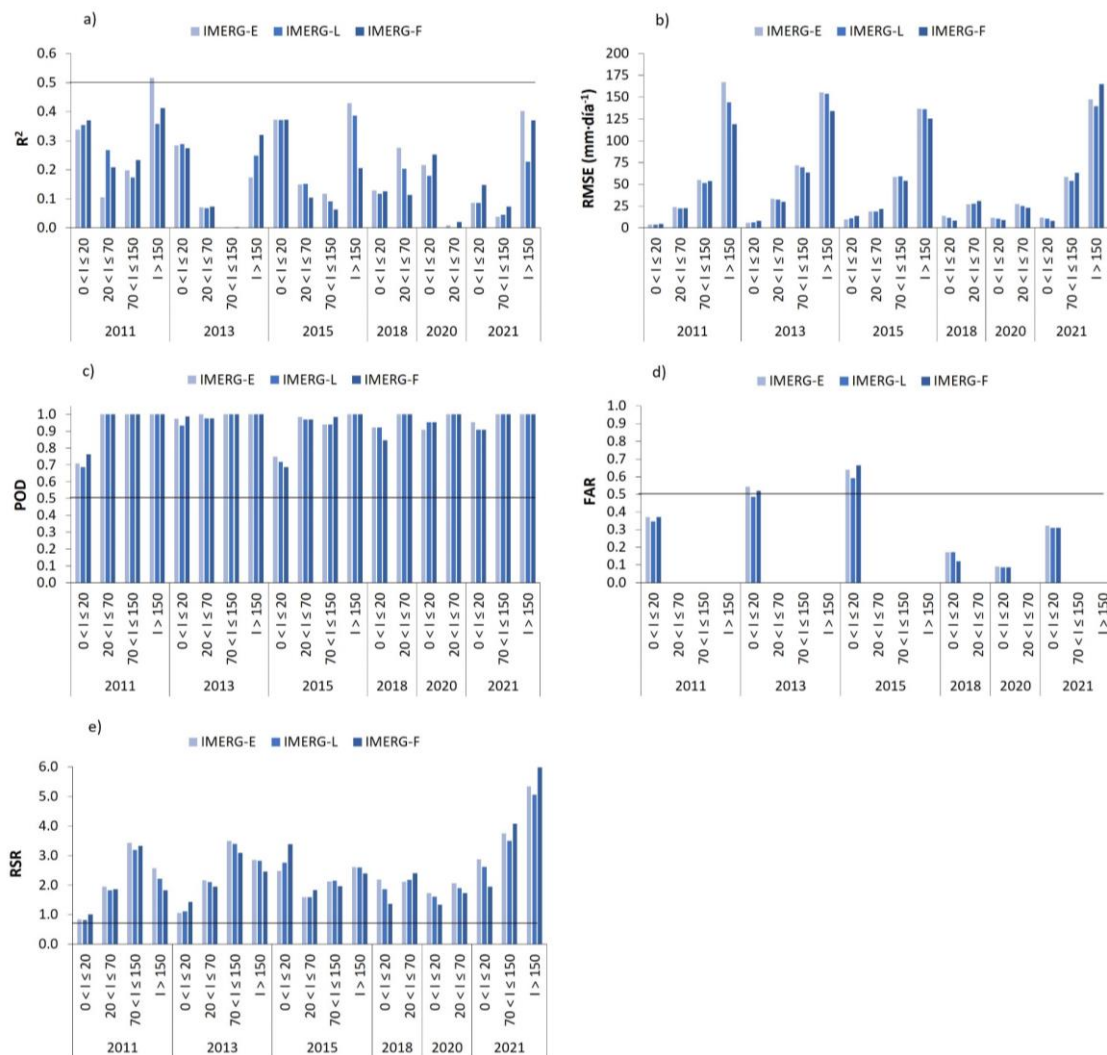


Figura 10. R^2 , RMSE ($\text{mm} \cdot \text{día}^{-1}$), RSR, POD y FAR para las diferentes intensidades en cada evento a escala diaria. La línea negra sólida representa el valor satisfactorio.

3.6 Conclusiones

En este estudio, se evaluó la capacidad que tienen los productos IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F de la última Versión 06 del algoritmo IMERG para estimar la precipitación en eventos de precipitación extrema utilizando estaciones meteorológicas automáticas y convencionales como datos de referencia en diferentes escalas de tiempo (horaria y diaria).

Las imágenes de satélite de lluvia IMERG-L tienen buen ajuste a los datos horarios de precipitación medidos en tierra. Las imágenes de satélite de lluvia IMERG-F tienen buen ajuste a los datos diarios de precipitación medidos en tierra. En general, los tres productos de precipitación IMERG tienen buen ajuste a los datos de precipitación en escala temporal diaria y en las estaciones meteorológicas ubicadas en la parte baja de la zona de estudio.

Los productos IMERG registran mejor probabilidad de detección (POD) en las estaciones meteorológicas que se encuentran en la parte alta de la zona de estudio.

Las imágenes de satélite de lluvia IMERG-F tienen buen ajuste a las precipitaciones diarias menores a 20 mm y el producto IMERG-E tiene buen ajuste a las precipitaciones diarias mayores a 150 mm.

Los productos IMERG-E e IMERG-F registran mejor probabilidad de detección (POD) en precipitaciones diarias menores a 20 mm; el producto IMERG-L obtiene los valores de FAR más bajos en precipitaciones diarias menores a 20 mm; y los tres productos IMERG detectan correctamente las precipitaciones diarias mayores a 20 mm, es decir, POD de 1 y FAR de 0.

3.7 Literatura citada

Bui, H. T., Ishidaira, H., y Shaowei, N. (2019). Evaluation of the use of global satellite–gauge and satellite-only precipitation products in stream flow simulations. *Applied Water Science*, 9(3), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0931-y>

- CENAPRED. (2021). *Tormentas Severas*. Ciudad de México, México: Centro Nacional de Prevención de Desastres. <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/189-FASCCULOTORMENTASSEVERAS.PDF>
- CONAGUA. (2012). *Sistema de Seguridad de Presas*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua. https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre_presa.aspx
- Condom, T., Rau, P., y Espinoza, J. C. (2011). Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998-2007. *Hydrological Processes*, 25(12), 1924–1933. <https://doi.org/10.1002/hyp.7949>
- Da-Silva, N. A., Webber, B. G. M., Matthews, A. J., Feist, M. M., Stein, T. H. M., Holloway, C. E., y Abdullah, M. F. A. B. (2021). Validation of GPM IMERG Extreme Precipitation in the Maritime Continent by Station and Radar Data. *Earth and Space Science*, 8(7), 1–18. <https://doi.org/10.1029/2021EA001738>
- Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiogna, G., y Disse, M. (2016). Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. *Science of the Total Environment*, 573, 1536–1553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.213>
- Guo, H., Chen, S., Bao, A., Behrangi, A., Hong, Y., Ndayisaba, F., Hu, J., y Stepanian, P. M. (2016). Early assessment of Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement over China. *Atmospheric Research*, 176–177, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.020>
- Hordofa, A. T., Leta, O. T., Alamirew, T., Kawo, N. S., y Chukalla, A. D. (2021). Performance Evaluation and Comparison of Satellite-Derived Rainfall Datasets over the Ziway Lake Basin, Ethiopia. *Climate*, 9(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/cli9070113>
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., y Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., y Xie, P. (2020). *NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 6*. Greenbelt, MD, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA). https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V06.pdf
- Jiang, L., y Bauer-Gottwein, P. (2019). How do GPM IMERG precipitation estimates perform as hydrological model forcing? Evaluation for 300 catchments across Mainland China. *Journal of Hydrology*, 572, 486–500.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.042>

- Jing, W., Zhang, P., Jiang, H., y Zhao, X. (2017). Reconstructing Satellite-Based Monthly Precipitation over Northeast China Using Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 9(8), 1–17. <https://doi.org/10.3390/rs9080781>
- Li, P., Xu, Z., Ye, C., Ren, M., Chen, H., Wang, J., y Song, S. (2021). Assessment on IMERG V06 precipitation products using rain gauge data in Jinan City, Shandong Province, China. *Remote Sensing*, 13(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs13071241>
- Li, X., O, S., Wang, N., Liu, L., y Huang, Y. (2021). Evaluation of the GPM IMERG V06 products for light rain over Mainland China. *Atmospheric Research*, 253, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105510>
- Liu, J., Du, J., Yang, Y., y Wang, Y. (2020). Evaluating extreme precipitation estimations based on the GPM IMERG products over the Yangtze River Basin, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 601–618. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1734103>
- Ma, M., Wang, H., Jia, P., Tang, G., Wang, D., Ma, Z., y Yan, H. (2020). Application of the GPM-IMERG products in flash flood warning: A case study in Yunnan, China. *Remote Sensing*, 12(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs12121954>
- Mahgoub, M., Amin, D., Hemdan, T., y Basiony, M. (2019). Assessment the Global Precipitation Measurement Mission (GPM) Rainfall Product over Sinai. *Al-Azhar University Civil Engineering Research Maganize (CERM)*, 41(1), 173–185. <https://www.azharcermjournal.com/CERMF1901/P19-01-13.pdf>
- Mayor, Y. G., Tereshchenko, I., Fonseca-Hernández, M., Pantoja, D. A., y Montes, J. M. (2017). Evaluation of error in IMERG precipitation estimates under different topographic conditions and temporal scales over Mexico. *Remote Sensing*, 9(5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs9050503>
- Mazzoglio, P., Laio, F., Balbo, S., Boccardo, P., y Disabato, F. (2019). Improving an extreme rainfall detection system with GPM IMERG data. *Remote Sensing*, 11(6), 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs11060677>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van-Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Omranian, E., Sharif, H. O., y Tavakoly, A. A. (2018). How Well Can Global Precipitation Measurement (GPM) Capture Hurricanes? Case Study: Hurricane Harvey. *Remote Sensing*, 10(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/rs10071150>

- Ramsauer, T., Weiß, T., y Marzahn, P. (2018). Comparison of the GPM IMERG Final Precipitation Product to RADOLAN Weather Radar Data over the Topographically and Climatically Diverse Germany. *Remote Sensing*, 10(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs10122029>
- Retalis, A., Katsanos, D., Tymvios, F., y Michaelides, S. (2020). Comparison of GPM IMERG and TRMM 3B43 Products over Cyprus. *Remote Sensing*, 12(19), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs12193212>
- Rodrigues, D. T., Santos-e-Silva, C. M., Dos-Reis, J. S., Palharini, R. S. A., Cabral-Júnior, J. B., Da-Silva, H. J. F., Mutti, P. R., Bezerra, B. G., y Gonçalves, W. A. (2021). Evaluation of the Integrated Multi-Satellite Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) Product in the São Francisco Basin (Brazil). *Water*, 13(19), 1–12. <https://doi.org/10.3390/w13192714>
- Sharifi, E., Steinacker, R., y Saghafian, B. (2016). Assessment of GPM-IMERG and Other Precipitation Products against Gauge Data under Different Topographic and Climatic Conditions in Iran: Preliminary Results. *Remote Sensing*, 8(2), 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs8020135>
- SMN. (2021a). *Información estadística climatológica*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- SMN. (2021b). *Información meteorológica*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- SMN. (2021c). *Sistema Clima Computarizado (CLICOM)*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. <http://clicom-mex.cicese.mx/malla/index.php>
- SMN. (2022). *Lluvias asociadas a ciclones tropicales*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/ciclones-tropicales/lluvias-asociadas-a-ciclones-tropicales>
- Tan, J., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., y Nelkin, E. J. (2019). IMERG V06: Changes to the morphing algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(12), 2471–2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>
- Tang, S., Li, R., He, J., Wang, H., Fan, X., y Yao, S. (2020). Comparative evaluation of the GPM IMERG early, late, and final hourly precipitation products using the CMPA data over Sichuan Basin of China. *Water*, 12(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12020554>
- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L. A., y Arteaga-Ramírez, R. (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 5–21. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.03.002>
- Yu, L., Leng, G., Python, A., y Peng, J. (2021). A comprehensive evaluation of

latest GPM IMERG V06 Early, Late and Final precipitation products across China. *Remote Sensing*, 13(6), 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs13061208>

4. MODELO HIDROLÓGICO CON IMÁGENES IMERG EN LA CUENCA DEL RÍO COAHUAYANA, JALISCO, MÉXICO

4.1 Resumen

La modelación hidrológica con precipitación estimada por imágenes de satélite considera la variabilidad temporal y espacial de la precipitación. El objetivo del presente trabajo fue modelar el proceso lluvia-escorrentía y calibrar algunos hidrogramas horarios de la cuenca del río Coahuayana, Jalisco, México. Se utilizaron imágenes de satélite de lluvia IMERG versión 6, durante los eventos máximos ocurridos en julio 2010, octubre 2011, septiembre 2013, octubre 2015 y agosto 2021. La cuenca se ubica en los estados de Jalisco, Colima y Michoacán con una superficie de 7 332 km². El modelo hidrológico se desarrolló con el programa HEC-HMS, y se calibró en la estación hidrométrica de la CONAGUA Callejones. Los métodos seleccionados para los cálculos son número de curva de escorrentía y el hidrograma unitario modificado de Clark. Los resultados obtenidos en tres de los cinco eventos fueron satisfactorios; el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) osciló entre 0.39 y 0.77; el R^2 osciló entre 0.51 y 0.86. Se concluyó que la integración de un modelo hidrológico horario con imágenes de satélite de lluvia IMERG-L son una buena alternativa en lugares donde la información horaria de lluvia medida en tierra es escasa o inexistente.

Palabras clave: Imágenes de satélite de lluvia IMERG, hidrograma unitario modificado de Clark, HEC-HMS, número de curva de escorrentía, eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

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

Autor: Pedro Girón Méndez

Director: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

HYDROLOGIC MODEL USING IMERG IMAGES IN THE COAHUAYANA RIVER WATERSHED, JALISCO, MÉXICO

4.2 Abstract

The hydrological modelling with satellite images rainfall data accounts by its spatial and temporal variability. The objectives of this work were to model the rainfall-runoff processes and calibrate some hourly hydrograph for Coahuayana watershed in Jalisco Mexico. The model used rainfall data coming from IMERG 06 satellite images. The maximum rainfall events modelled are those occurring in July 2010, October 2011, September 2013, October 2015 and August 2021. The watershed is in the Mexican states of Jalisco, Colima, and Michoacan, covering a surface of 7 332 km². The model was constructed with the US Army Corps of Engineers, HEC-HMS software. It was calibrated with the Callejones station outflow data. Among the internal methods selected in HEC-HMS are SCS runoff curve number and modified Clark unit hydrograph. Modeling results are good in three out of five maximum rainfall events; their efficiency coefficients modeling used were Nash-Sutcliffe (NSE), and determination coefficient (R^2). The NSE oscillated between 0.39 and 0.77; R^2 oscillated between 0.51 and 0.86. It was concluded that hydrological models using satellite image rainfall data IMERG-L are a good alternative in those places where hour rainfall data is inexistent or scarce.

Key words: IMERG satellite image rainfall data, modified Clark unit hydrograph, HEC-HMS, runoff curve number, Efficiency coefficient Nash-Sutcliffe NSE.

Master's Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Pedro Girón Méndez

Advisor: Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo

4.3 Introducción

La precipitación es un componente principal del ciclo del agua y una entrada clave de los modelos hidrológicos (Jiang y Bauer-Gottwein, 2019). En el análisis de eventos extremos en tiempo real, inundaciones y sequías, es importante tener una cuantificación confiable de la lluvia, espacial y temporalmente (Zubieta et al., 2018). Sin embargo, los datos horarios de lluvia medidos en tierra son muy escasos o incluso inexistentes debido a la limitada cobertura espacial de las estaciones meteorológicas automáticas (EMAs), o como últimamente sucede en México, las EMAs presentan fallas con frecuencia al momento de registrar lluvias máximas. Este problema representa un reto para los hidrólogos en la modelación hidrológica de una cuenca. La confianza de los resultados de la modelación depende generalmente de la disponibilidad confiable de datos hidrometeorológicos para la calibración y validación del modelo (Magaña-Hernández et al., 2013).

Durante las dos últimas décadas, los productos de precipitación basados en satélites con una amplia cobertura espacial y alta resolución temporal han proporcionado una solución potencial a la escasez de datos horarios de lluvia medidos en tierra (Bui et al., 2019).

Entre estos productos de precipitación basados en satélites, se encuentran los datos de la misión Global Precipitation Measurement (GPM), Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Esta misión fue lanzada por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) el 28 de febrero de 2014 como sucesora de la Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) para proporcionar observaciones de precipitaciones y nevadas en tiempo casi real (Hou et al., 2014). Las imágenes de satélite de lluvia IMERG versión 6 (de ejecución temprana, tarde y final; IMERG-E, IMERG-L e IMERG-F) están disponibles 4, 12 h y 3.5 meses después de la observación con una cobertura espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ a nivel global y resolución temporal de 30 minutos (Tan et al., 2019).

La integración de los productos de precipitación basados en satélites con modelos hidrológicos distribuidos constituye una solución potencial para simular procesos hidrológicos (Mei et al., 2016). Un modelo hidrológico distribuido divide la cuenca en microcuencas o celdas para considerar la variabilidad espacial de las propiedades físicas y la precipitación; también permite analizar la influencia de distintos elementos, como la vegetación y el uso de suelo, en la respuesta hidrológica. Además, el modelo distribuido permite obtener el caudal en cualquier punto de la cuenca, ya que se considera explícitamente la variación espacial de la precipitación, infiltración, pérdidas y escurrimiento (Méndez-Antonio et al., 2014). Entre los diferentes programas para construir un modelo hidrológico distribuido, el Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU (HEC-HMS) es un programa diseñado para simular los procesos de lluvia-escurrimiento y tránsito de caudales (USACE, 2000).

Espinosa-López, Ibáñez-Castillo, Arteaga-Ramírez, y Galeana-Pizaña (2020) utilizaron las imágenes de satélite de lluvia IMERG-L versión 5 en la modelación horaria, con el programa HEC-HMS, de la cuenca del río Huaynamota, México, con un área de 12 080 km², para tres eventos hidrometeorológicos. Estos autores obtuvieron un coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) máximo de 0.531 en la calibración del modelo. Concluyeron que la modelación hidrológica a partir de imágenes de satélite de lluvia IMERG-L es una buena opción en regiones donde se carece de datos horarios de lluvia medidos en tierra.

El presente trabajo tiene como objetivo simular y calibrar los caudales en la cuenca del río Coahuayana, Jalisco, México, a partir de imágenes de satélite de lluvia IMERG-L, mediante el método de número de curva de escurrimiento y el método del hidrograma unitario modificado de Clark, con el programa HEC-HMS, para eventos de lluvia máxima ocurridos en 2010, 2011, 2013, 2015 y 2021.

4.4 Materiales y métodos

4.4.1 Zona de estudio

La superficie de la cuenca del río Coahuayana, que forma parte de la región hidrológica 16 Armería-Coahuayana, es de 7 332 km² hasta la estación hidrométrica CONAGUA Callejones y está distribuida en los estados de Jalisco, Colima y Michoacán. La cuenca se localiza entre las coordenadas 103° 48' y 102° 55' de longitud oeste, y entre los 20° 1' y 18° 39' de latitud norte (Figura 1). La delimitación de la cuenca se realizó con base en el modelo digital de elevaciones con resolución de 15 m (INEGI, 2021c) y HEC-GeoHMS 10.3 de ArcGis; el rango de altitudes va de 16 a 4 260 msnm (metros sobre el nivel del mar). La cuenca tiene una pendiente media de 31.6 %; la pendiente del cauce principal es de 0.97 % y el tiempo de concentración de la cuenca es de 28 horas. Anualmente, la lluvia promedio es de 940.72 mm y la temperatura promedio de 20.74 °C (SMN, 2021c). La cuenca aporta escurrimientos a la presa Solidaridad con capacidad de 220 hm³ y a la presa El Carrizo con capacidad de 47.27 hm³ (CONAGUA, 2012), ambas se encuentran aguas arriba de la estación de aforo Callejones, a 30 y 116 km, respectivamente.

4.4.2 Fuentes de información

Las imágenes de satélite de lluvia de la versión 6 del producto IMERG Late (IMERG-L) tienen resolución temporal de 30 min y resolución espacial de 0.1° x 0.1°. Las imágenes de satélite de lluvia IMERG-L se encuentran disponibles 12 h después de la observación de forma libre en el sitio web Global Precipitation Measurement (Recuperado de <https://gpm.nasa.gov/data/directory>). Estas imágenes cubren una banda de 60°S-60°N para el periodo de junio 2000 al presente (Huffman, Bolvin, Braithwaite, et al., 2020). Para la descarga de las imágenes en formato raster se utilizó el programa FileZilla y la dirección jsimpsonftp.sps.eosdis.nasa.gov. Para convertir de hora universal (UTC) a hora local de la zona de estudio, se restó 5 h a las imágenes de satélite.

Los datos de precipitación se obtuvieron de las estaciones meteorológicas convencionales (EMC) (SMN, 2021a) y de las estaciones meteorológicas automáticas (EMA) (SMN, 2021b), ambas del servicio meteorológico nacional (SMN). La información de las estaciones meteorológicas se presenta en el Cuadro 1.

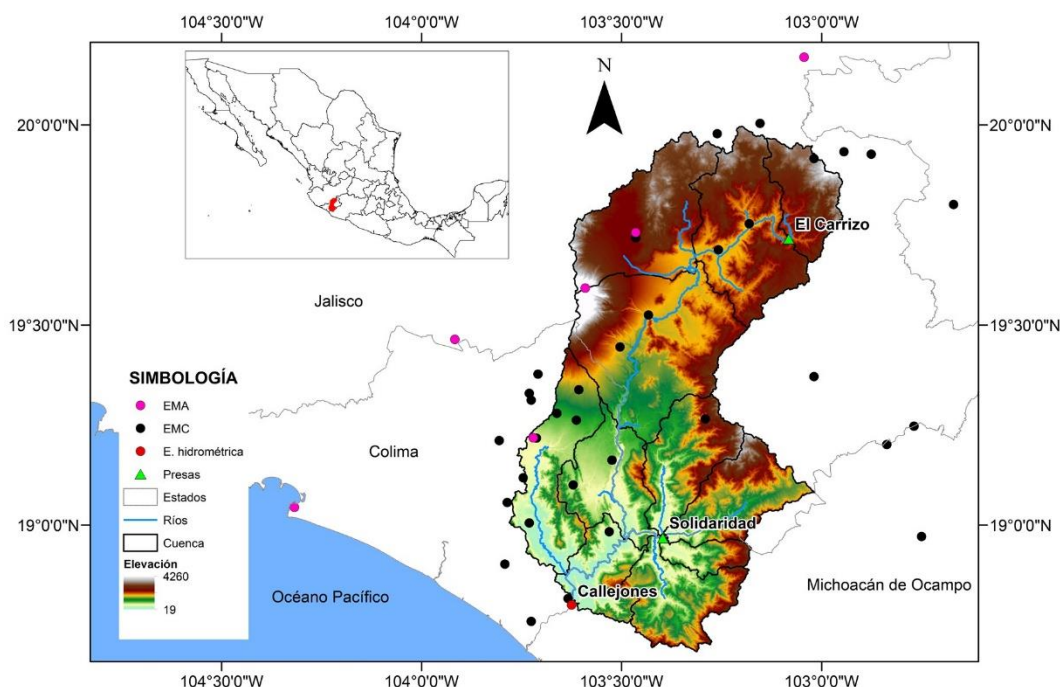


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Coahuayana y estaciones hidrometeorológicas.

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas del SMN en la cuenca del río Coahuayana.

Estación	Administración/Tipo	Estado	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)	Escala
Ciudad Guzmán	SMN/EMA	Jalisco	-103.465	19.731	1 520	10 min
Colima	SMN/EMA	Colima	-103.721	19.218	448	10 min
Nevado de Colima	SMN/EMA	Jalisco	-103.591	19.592	3 461	10 min
Sierra de Manantlán I	SMN/EMA	Jalisco	-103.917	19.464	2 491	10 min
Tizapán	SMN/EMA	Jalisco	-103.044	20.169	1 503	10 min
Manzanillo	SMN/EMA	Colima	-104.318	19.044	3	10 min
6002 Buenavista	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.613	19.262	622	24 h
6003 Callejones	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.634	18.816	30	24 h
6005 Cerro de Ortega	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.726	18.759	19	24 h
6007 Comala	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.731	19.329	735	24 h
6008 Coquimatlán	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.806	19.211	354	24 h

6009 Cuauhtémoc	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.607	19.338	922	24 h
6010 Estapilla	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.531	18.983	350	24 h
6013 La Salada	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.786	19.056	360	24 h
6015 Los Ortices	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.746	19.118	350	24 h
6040 Colima	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.713	19.217	500	24 h
6042 Ixtlahuacán	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.731	19.005	194	24 h
6043 Tepames	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.621	19.100	469	24 h
6052 E.T.A. 254 Comala	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.726	19.312	706	24 h
6059 Laguna de Alcuahue	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.792	18.902	48	24 h
6062 Cofradia de Suchitlán	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.709	19.377	860	24 h
6071 Trapichillos	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.524	19.162	552	24 h
6073 Trapiche	SMN/Pluviométrica	Colima	-103.662	19.279	663	24 h
14029 Concepción de Buenos Aires	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.261	19.978	1 639	24 h
14030 Ciudad Guzmán	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.465	19.718	1 515	24 h
14034 Contla	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.181	19.753	1 160	24 h
14086 La Manzanilla de la Paz	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.154	20.004	2 050	24 h
14099 Mazamitla	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.019	19.916	2 240	24 h
14118 Quito	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.433	19.525	1 045	24 h
14129 San Marcos	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.504	19.445	1 120	24 h
14141 Ingenio Tamazula	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.258	19.688	1 450	24 h
14160 Valle de Juárez	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-102.944	19.933	1 960	24 h
14180 Quitupán	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-102.876	19.927	1 660	24 h
14348 Jilotlán	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.019	19.371	740	24 h
16039 Piedras Blancas	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.769	19.247	419	24 h
16043 El Puerto	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.67	19.801	1 640	24 h
16158 El Cajón	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.75	18.971	296	24 h
16264 Presa Los Olivos	SMN/Pluviométrica	Michoacán	-102.837	19.201	379	24 h
14112 Presa Trojes	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.395	18.967	360	24 h
14336 El Guayabo	SMN/Pluviométrica	Jalisco	-103.291	19.265	1 460	24 h

Nota: Estación Meteorológica Automática (EMA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

Los datos de caudales observados de la estación Callejones se obtuvieron del banco nacional de datos de aguas superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2021a). La información sobre las presas de almacenamiento se obtuvo del sistema de información hidrológica (SIH) (CONAGUA, 2021b). La información de las tormentas seleccionadas para simular los caudales de la cuenca del río Coahuayana se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Eventos hidrometeorológicos seleccionados para modelar la cuenca del río Coahuayana.

Tormentas	Inicio	Fin	Duración (días)	Caudal máximo observado en Callejones ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
2010	19/07/2010 08:00	31/07/2010 08:00	12	398
2011	09/10/2011 08:00	19/10/2011 08:00	10	2 600
2013	13/09/2013 08:00	20/09/2013 08:00	7	690
2015	20/10/2015 08:00	30/10/2015 08:00	10	845
2021	20/08/2021 08:00	27/08/2021 08:00	7	237

Para generar el raster de número de curva de escurrimiento (CN) se utilizó el conjunto de datos vectorial edafológico escala 1:250 000 serie II (INEGI, 2021b) y el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250 000 serie VI (INEGI, 2021a).

4.4.3 Modelación hidrológica

Las simulaciones hidrológicas se realizaron en el programa HEC-HMS 4.8, con el método del número de curva de escurrimiento (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EE.UU para convertir la precipitación total sobre una superficie en lámina escurrida. El intervalo de tiempo de la modelación fue de 1 h. Merino-Jiménez et al. (2021) mencionan que un modelo hidrológico horario se construye como una herramienta de pronóstico con fines de protección civil y para tener información más certera del momento en que se presentará el caudal máximo; su construcción es importante en cuencas donde el tiempo de concentración es menor a 24 h, y en general, un modelo horario calibrado serviría para tomar decisiones.

El método de número de curva fue desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) del SCS y está documentado en detalle en el Manual Nacional de Ingeniería (SCS, 2004). En el manual, la lámina escurrida para un evento de lluvia dado se calcula mediante la Ecuación (1):

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (1)$$

Donde Q es la lámina escurrida (mm); P es la lámina precipitada (mm); S es la retención potencial máxima (mm); I_a es la abstracción inicial (mm).

A partir de datos experimentales de cuencas, se encontró una relación empírica entre S e I_a :

$$I_a = 0.2 S \quad (2)$$

Sustituyendo la Ecuación (2) en la Ecuación (1), se obtiene:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (3)$$

Donde $P > I_a$, de otra forma $Q=0$.

Además, el número de curva (CN) y la retención potencial máxima (S) en mm, se relacionan por:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

De acuerdo con el USDA (1986), la variabilidad del número de curva se debe al tipo de cobertura, grupo hidrológico del suelo (A, B, C o D) y condición de humedad antecedente. Este último se divide en tres: seca (I), promedio (II) y húmeda (III) (SCS, 2004).

Según la lámina de lluvia acumulada cinco días antes de la tormenta, la corrección al número de curva se realizó de la siguiente manera: si la lluvia es menor a 25 mm, corrección A; si la lluvia es mayor a 25 y menor a 50 mm, sin corrección; si la lluvia es mayor a 50 mm, corrección B (Aparicio-Mijares, 1992). La lluvia acumulada cinco días antes de la tormenta, se calculó con la información de lluvia de las estaciones meteorológicas convencionales y automáticas.

Las correcciones A y B, se realizaron de acuerdo con Chow et al. (1994):

$$\text{Corrección A} = \frac{4.2CN}{10 - 0.058CN} \quad (5)$$

$$\text{Corrección B} = \frac{23CN}{10 + 0.13CN} \quad (6)$$

Donde CN es el número de curva en condición de humedad antecedente promedio obtenido de USDA (1986).

La transferencia del escurrimiento se realiza con el método del hidrograma unitario modificado de Clark o ModClark (Kull y Feldman, 1998). El método consiste en trasladar el escurrimiento producido en cada celda hasta la salida de la cuenca después de transcurrir un intervalo de tiempo igual al tiempo de viaje desde la celda hasta salida (Figura 2). El tiempo de viaje de cada celda se calcula con la siguiente ecuación:

$$t_{celda} = T_c \left(\frac{d_{celda}}{d_{m\acute{a}x}} \right) \quad (7)$$

Donde t_{celda} es el tiempo de viaje de la celda (h); d_{celda} es la distancia de viaje de la celda hasta la salida de la cuenca (m); $d_{m\acute{a}x}$ es la distancia de viaje de la celda más distante de la salida (m); T_c es el tiempo de concentración de la cuenca (h).

El método ModClark requiere de la estimación de dos parámetros para calcular el hidrograma producido en la cuenca: el tiempo de concentración (T_c) y el coeficiente de almacenamiento (R).

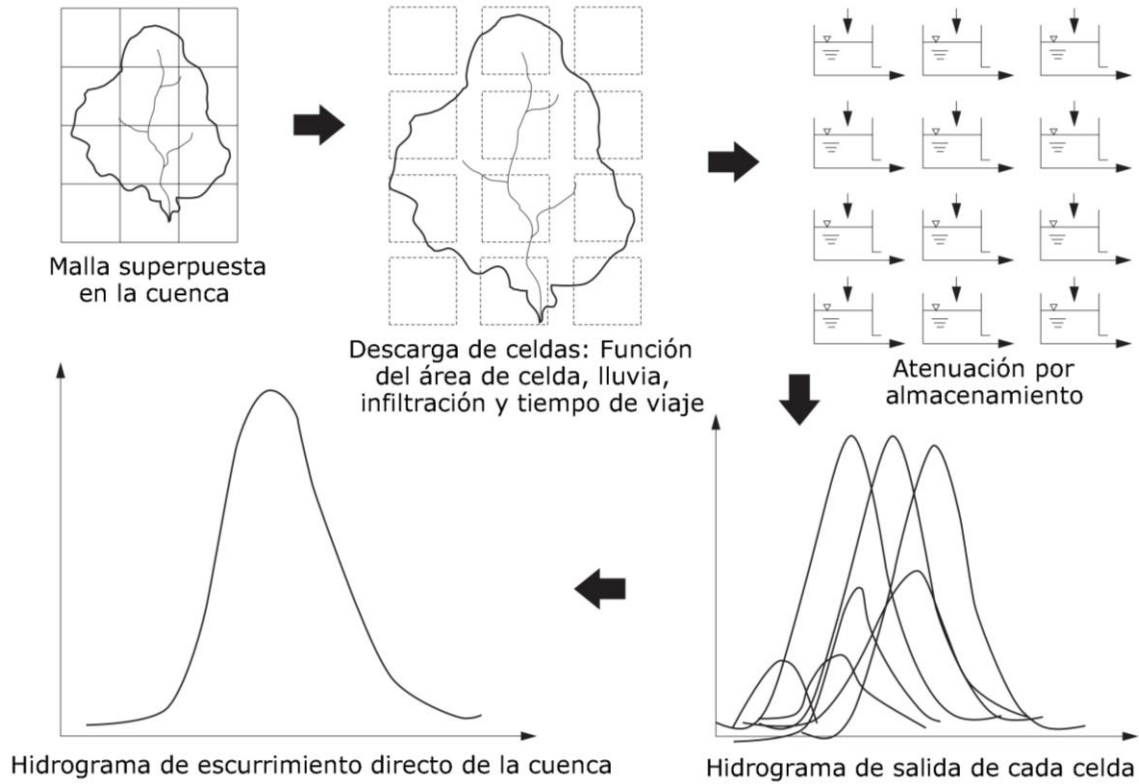


Figura 2. Modelo conceptual del hidrograma unitario distribuido de Clark modificado (Kull y Feldman, 1998).

El tiempo de concentración, de acuerdo con McCuen (1998), se define como el tiempo necesario para que una gota de agua llegue desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida de ésta. El T_c se estimó con la ecuación de Kirpich presentada en la Ecuación (8) (Karamouz et al., 2013):

$$T_c = 0.00325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (8)$$

Donde T_c es el tiempo de concentración (h); L es la longitud del cauce principal (m); S es la pendiente del cauce principal (m/m).

El coeficiente de almacenamiento (R) se puede estimar dividiendo el volumen bajo del hidrograma después del segundo punto de inflexión (curva de recesión) y el valor del caudal en este punto (USACE, 1982). La ecuación para estimar este coeficiente es:

$$R = \frac{\int_{PI}^{\infty} Q(t) dt}{Q_{PI}} \quad (9)$$

Donde R es coeficiente de almacenamiento; $\int_{PI}^{\infty} Q(t)$ es el volumen bajo del hidrograma después del segundo punto de inflexión; Q_{PI} es el valor del caudal en el punto de inflexión.

Según Zimmermann (2003), cuando los datos de caudales no están disponibles, se recomienda utilizar la siguiente ecuación empírica:

$$R = c \cdot T_c \quad (10)$$

Donde c varía entre 0.5 a 0.8. Para fines prácticos, según Domínguez et al. (2008), el coeficiente de almacenamiento se puede estimar como $R = 0.6 \cdot T_c$. En este estudio, el valor de R para cada subcuenca se estimó como $0.6 \cdot T_c$, pues generó el mejor ajuste en el proceso de calibración.

El tránsito de los escurrimientos hacia la salida de la cuenca se determinó con el método de Muskingum (Ecuación 11) (Karamouz et al., 2013). En este método, el hidrograma de salida en la parte baja de un río se calcula para un determinado hidrograma de entrada en la parte alta del mismo.

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (11)$$

Donde S es el almacenamiento en el tramo; I es el caudal de entrada; Q es el caudal de salida; K es la constante de tiempo del viaje; X es el factor de ponderación, que varía entre 0 a 1.

De acuerdo con Aparicio-Mijares (1992), el parámetro K se puede calcular como el tiempo de viaje del pico de la onda a lo largo del tramo:

$$K = \frac{L}{\omega} \quad (12)$$

Donde L es la longitud del tramo (m) y ω es la velocidad media de la onda ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). El mismo autor menciona que ω se puede calcular como 1.5 veces la velocidad media del agua en el tramo, y esta última se puede obtener de acuerdo con la pendiente del cauce principal. Aparicio-Mijares (1992) menciona que, a falta de información, se recomienda utilizar un valor de 0.2 para el factor de ponderación.

4.4.4 Obtención de entradas al modelo

La cuenca se delimitó con la extensión HEC-GeoHMS 10.3 de ArcGis, con base en el modelo digital de elevaciones obtenido del continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0) (INEGI, 2021c), y como punto de salida la estación hidrométrica 16022 Callejones con longitud oeste $103^{\circ} 37'$ y latitud norte $18^{\circ} 48'$ (CONAGUA, 2021a). Se determinaron las características de las subcuencas: área, pendiente, longitud del cauce principal, pendiente del cauce principal y el esquema hidrológico HMS, usando la metodología propuesta por USACE (2013).

El procesamiento de las imágenes de satélite de lluvia se realizó en ArcMap 10.3 de ArcGis. Las imágenes de satélite en formato raster con tamaño de celda de 2 km x 2 km se transformaron en formato ASCII. Con estas últimas, se generó un archivo con extensión *.dss con la herramienta asc2dssGrid.exe de Hec-GeoHMS 10.3 (USACE, 2016). Este archivo contiene los registros de lluvia de cada imagen de satélite para la tormenta en cuestión y se importó en HEC-HMS.

Para obtener el número de curva de escurrimiento (Figura 3), se generó un archivo en formato raster con el conjunto de datos vectorial edafológico serie II (INEGI, 2021b) y el conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie VI (INEGI, 2021a), aplicando la metodología propuesta por USACE (2013) en la extensión HEC-GeoHMS 10.3 de ArcGis.

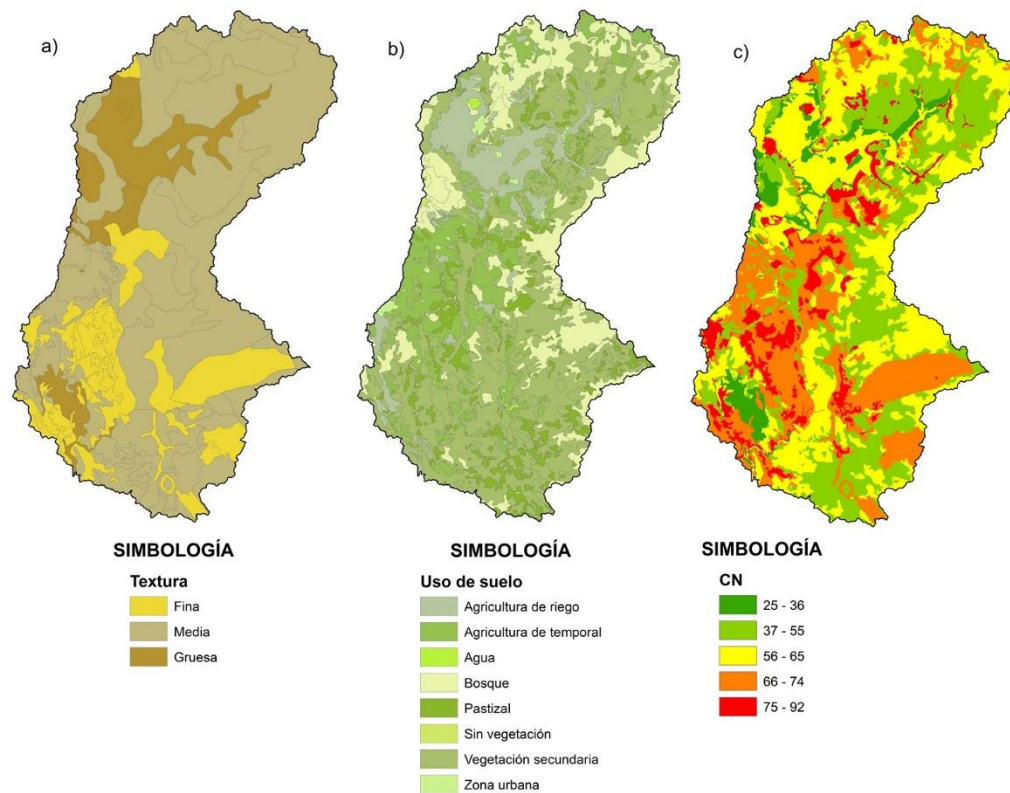


Figura 3. a) Tipo de textura; b) uso del suelo y vegetación; c) número de curva de escurrimiento en la cuenca del río Coahuayana.

4.4.5 Calibración del modelo hidrológico en HEC-HMS 4.8

La calibración consiste en ajustar el valor de cada parámetro del modelo para que el hidrograma obtenido en la simulación se ajuste al hidrograma observado en la cuenca. La calibración del modelo en HEC-HMS 4.8 se realizó con el módulo de optimización que, de manera general, sigue el procedimiento que se muestra en la Figura 4.

Se utilizó como algoritmo de búsqueda del valor óptimo de los parámetros del modelo con el método de Nelder y Mead (USACE, 2000). Este método utiliza un algoritmo simplex, para evaluar todos los parámetros de manera simultánea y determinar qué parámetro ajustar. La función objetivo mide el ajuste de bondad entre el hidrograma calculado y el hidrograma observado. Se utilizó la función objetivo de la raíz del cuadrado medio del error de ponderación del pico, que da

mayor peso a los caudales que están por arriba de la media y menor peso a los caudales debajo de la media.

Los parámetros que se optimizaron fueron el número de curva (CN) y el tiempo de concentración (T_c) de cada subcuenca, variando su valor hasta $\pm 20 \%$.

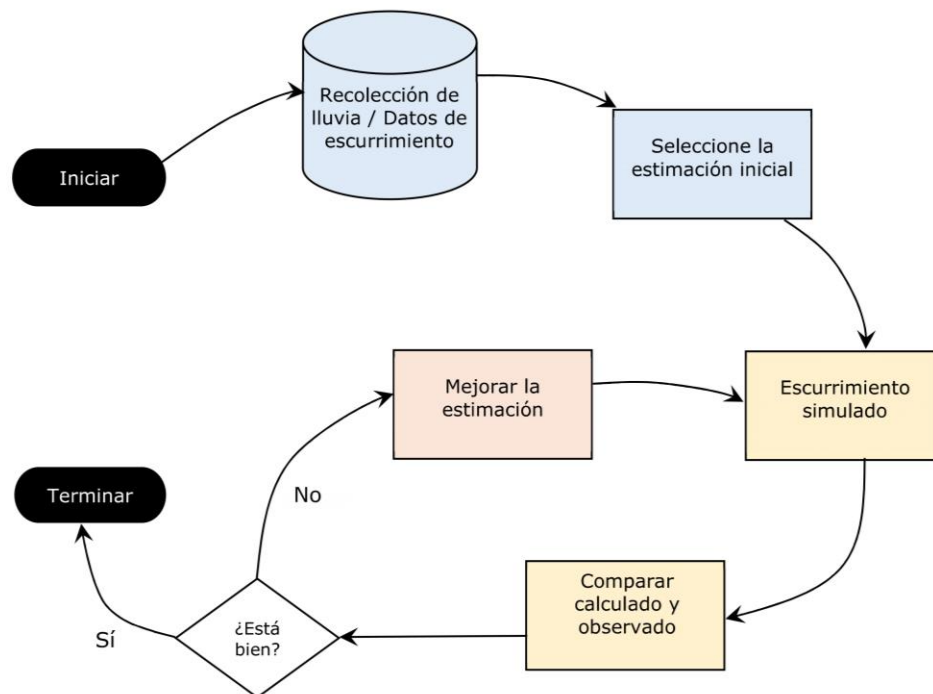


Figura 4. Esquema del procedimiento de calibración (USACE, 2000).

4.4.6 Ajuste de bondad del modelo hidrológico

Para evaluar la eficiencia del modelo hidrológico se utilizó: el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash y Sutcliffe, 1970); el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del cuadrado medio del error (RMSE) (Vargas-Castañeda et al., 2015); el índice RMSE-desviación estándar de las observaciones (RSR) que incorpora un índice de error y un factor de normalización (Moriasi et al., 2007). En el Cuadro 3 se detallan las ecuaciones y los valores óptimos de cada una.

Cuadro 3. Ecuaciones y valores óptimos de cada indicador estadístico.

Indicador	Ecuación	Valor óptimo	Rango de valores	Unidad
-----------	----------	--------------	------------------	--------

NSE	$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{mod})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}$	1	$(-\infty, 1)$	-
R ²	$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_t^{mod} - \bar{Q}^{obs})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - \bar{Q}^{obs})^2}$	1	$(0, 1)$	-
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_t^{obs} - Q_t^{mod})^2}$	0	$(0, \infty)$	m ³ ·s ⁻¹
RSR	$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}}$	0	$(0, \infty)$	-

En estas ecuaciones, Q^{mod} son los caudales modelados y Q^{obs} son los caudales observados en la estación hidrométrica en el tiempo t , y n es el número de observaciones en el periodo considerado. $\bar{Q}^{obs}$ es el promedio de los caudales observados. $STDEV_{obs}$ es la desviación estándar de los caudales observados.

Moriasi et al. (2007, 2015) recomiendan la siguiente clasificación para el índice de NSE, R² y RSR para evaluar simulaciones hidrológicas, la cual se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificación recomendada del coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) para la evaluación de modelos hidrológicos.

Clasificación	NSE	R ²	RSR
Muy bueno	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$0.85 < R^2 \leq 1.00$	$0.00 < RSR \leq 0.50$
Bueno	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Satisfactorio	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
Insatisfactorio	$NSE \leq 0.50$	$R^2 \leq 0.60$	$RSR > 0.70$

Estos autores señalan que los valores de NSE entre 0 y 1 se consideran aceptables, mientras que los valores de $NSE < 0$ indican que la media es un mejor predictor que el valor simulado, lo que significa que el modelo es ineficiente. Es importante señalar que el Cuadro 4 se refiere a modelos con escala de tiempo mensual, y el modelo de este trabajo es horario, por lo que es posible que la clasificación para modelos horarios debería ser menos severa, porque es más difícil pronosticar eventos horarios que mensuales.

4.4.7 Resultados y discusión

La Figura 5 muestra las subcuencas que corresponden a la modelación hidrológica, y sus características se presentan en el Cuadro 5. La cuenca del río Coahuayana tiene una pendiente media de 31.6 % y un número de curva promedio de 58.

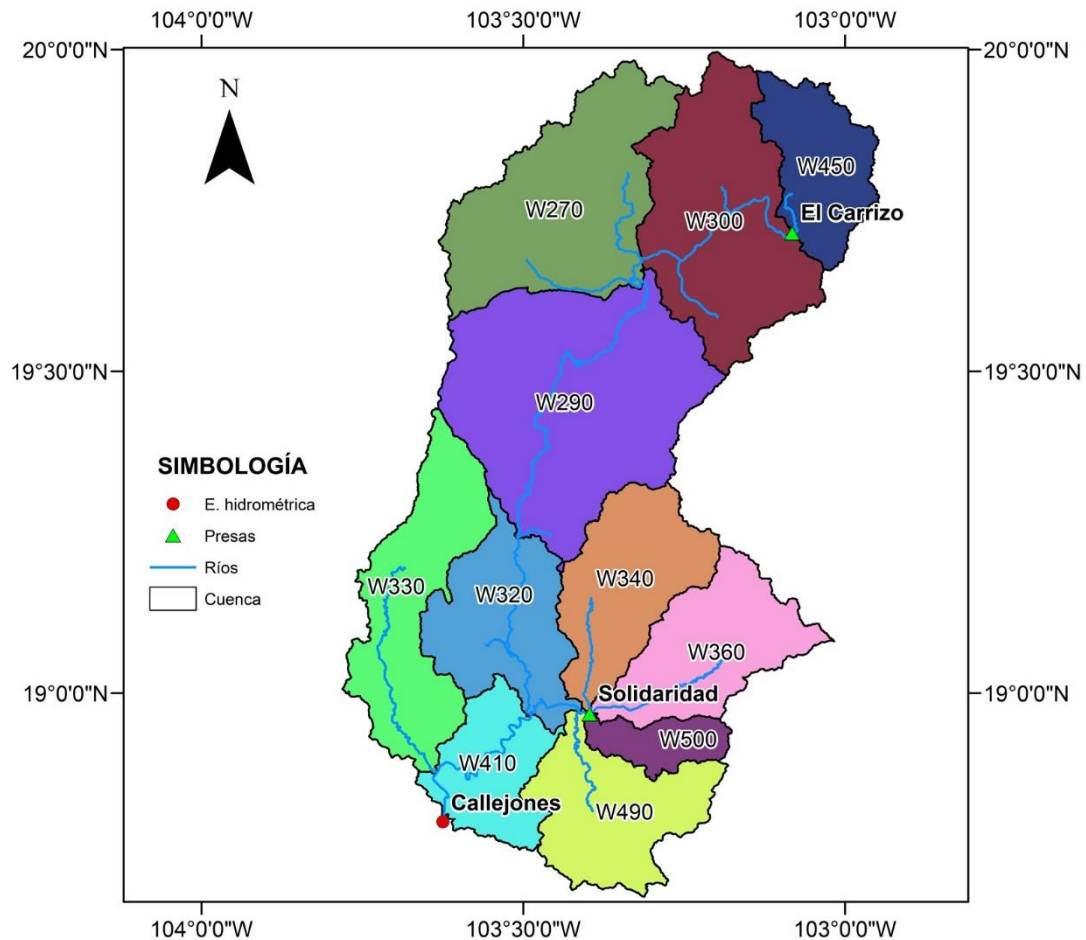


Figura 5. Subcuencas del río Coahuayana hasta la estación Callejones.

En el Cuadro 6 y 7 se muestran los valores de número de curva y tiempo de concentración obtenidos en la calibración para cada evento y su modificación respecto al valor inicial.

Cuadro 5. Características de las subcuencas de la zona de estudio.

Subcuenca	Área (km ²)	Pendiente (%)	Elevación media (m)	CN	Longitud del cauce (km)	Pendiente del cauce (m/m)	Tc (h)	R (h)
W300	973.1	31.5	1 567	53	60.6	0.020	7.0	4.2
W450	418.0	32.9	1 852	55	42.9	0.028	4.8	2.9
W270	954.8	21.6	1 801	57	65.2	0.021	7.4	4.4
W290	1421.5	26.5	1 303	59	104.6	0.015	11.9	7.1
W330	714.7	21.7	571	61	96.8	0.016	10.9	6.6
W340	583.7	38.2	1 057	57	63.1	0.031	6.1	3.7
W320	581.5	22.9	589	64	55.6	0.011	8.3	5.0
W360	566.0	41.7	1 148	61	72.0	0.033	6.6	4.0
W500	170.0	36.6	878	59	32.1	0.057	2.9	1.7
W410	387.9	34.1	472	60	52.3	0.022	6.1	3.7
W490	560.8	40.5	893	55	55.5	0.023	6.2	3.7

Nota: CN = Número de curva; Tc = Tiempo de concentración; R = Coeficiente de almacenamiento.

Cuadro 6. Número de curva de escurrimiento optimizado para cada evento.

Subcuenca	2010		2011		2013		2015		2021	
	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)
W360	58	11.1	54	19.4	64	19.4	46	13.0	47	15.4
W340	46	5.6	53	12.9	62	19.9	41	12.7	40	8.9
W330	57	13.9	55	14.0	43	-18.8	50	20.1	50	19.7
W320	59	19.1	56	20.0	52	-19.9	54	19.9	46	3.4
W500	59	3.0	45	19.9	35	-5.7	44	20.0	37	-4.5
W300	45	-19.9	49	16.8	53	-2.1	38	17.1	32	-11.2
W290	50	-12.6	70	20.0	69	-2.5	47	20.0	35	-13.1
W270	36	-20.0	65	19.7	55	-2.5	45	19.8	33	-13.1
W450	36	-15.6	46	18.6	54	1.7	41	18.8	45	-9.6
W410	51	-13.6	47	19.3	54	-7.8	47	18.4	33	-15.6
W490	44	-19.8	37	2.0	39	-3.0	41	19.8	31	-11.8

Nota: Mod. = modificación.

Cuadro 7. Tiempo de concentración optimizado para cada evento.

Subcuenca	2010		2011		2013		2015		2021	
	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)	Valor	Mod. (%)
W360	5.4	-18.7	7.1	7.1	6.4	-2.9	7.5	12.4	5.6	-15.9
W340	5.2	-14.7	6.9	11.8	5.2	-16.0	6.7	8.7	5.3	-14.4
W330	10.0	-8.3	11.7	7.2	9.2	-16.3	11.8	8.3	8.8	-19.4
W320	7.1	-13.7	8.9	8.0	7.5	-9.3	9.3	12.3	6.8	-18.3
W500	2.5	-11.8	3.2	12.7	2.7	-4.8	3.0	3.2	2.6	-9.8
W300	5.7	-19.0	7.6	8.9	5.7	-18.8	6.7	-4.6	6.5	-8.0
W290	9.7	-18.1	11.1	-6.1	10.8	-9.3	10.9	-7.9	10.3	-13.2
W270	8.0	8.3	7.7	3.8	8.8	19.9	6.4	-12.8	6.6	-10.8
W450	5.0	5.5	5.0	3.9	4.5	-4.9	4.2	-12.7	4.1	-13.3
W410	4.9	-19.7	6.7	8.9	5.0	-18.6	5.7	-6.9	5.4	-11.1
W490	6.0	-4.1	5.9	-5.0	6.4	2.0	5.7	-7.9	5.8	-7.0

Nota: Mod. = modificación.

En el Cuadro 8 se muestran los resultados de los modelos hidrológicos calibrados con las imágenes de satélite de lluvia. Los resultados muestran valores de NSE por encima de cero, que indican que el modelo hidrológico calibrado es mejor predictor que la media de los caudales observados. De acuerdo con la clasificación recomendada por Moriasi et al. (2007, 2015): el modelo hidrológico del evento de 2010 tiene un ajuste satisfactorio, el modelo del evento de 2013 tiene un ajuste bueno y el modelo del evento de 2015 tiene un ajuste muy bueno. Los coeficientes de NSE de tres de los cinco eventos modelados están por encima de 0.5, lo que significa que las imágenes de satélite de lluvia son una alternativa para la modelación hidrológica. Aunque es importante observar en el mismo Cuadro 8, que el modelo proporciona una lámina total escurrida durante el evento (L_{mod}) que es excelente al compararse con la lámina observada (L_{obs}). Recordar que la lámina escurrida multiplicada por el área de la cuenca, es el volumen total escurrido.

Los resultados demuestran que no existe una relación entre el ajuste del modelo y el caudal máximo observado. Se observa una relación positiva entre el coeficiente de NSE y el caudal máximo observado en los eventos de 2021 (0.49,

236.8 m³·s⁻¹), 2010 (0.61, 398.3 m³·s⁻¹), 2013 (0.73, 690 m³·s⁻¹) y 2015 (0.77, 845 m³·s⁻¹); sin embargo, el evento de 2011 (0.39, 2 600 m³·s⁻¹) contradice esta tendencia.

Aunque el evento de 2011 presentó un NSE de 0.39, su R² (0.61) fue mayor que el obtenido en el evento de 2021 (0.51) con un NSE de 0.49.

Cuadro 8. Resultados de los modelos hidrológicos calibrados para la cuenca del río Coahuayana.

Tormentas	Q _{obs} (m ³ ·s ⁻¹)	Q _{mod} (m ³ ·s ⁻¹)	L _{obs} (mm)	L _{mod} (mm)	NSE	R ²	RMSE (m ³ ·s ⁻¹)	RSR
2010	398	328	16.4	19.5	0.61	0.68	59	0.62
2011	2 600	841	40.0	34.6	0.39	0.61	532	0.78
2013	690	651	22.9	20.9	0.73	0.79	89	0.52
2015	845	774	26.1	18.2	0.77	0.86	107	0.48
2021	237	261	10.5	10.6	0.49	0.51	29	0.72

Los caudales máximos modelados subestimaron al caudal máximo observado en los eventos de 2010, 2011, 2013 y 2015 (Cuadro 9). Aunque el evento de 2011 presentó un NSE de 0.39, la diferencia entre láminas escurridas o volúmenes (13.3 %) fue menor que la diferencia obtenida en el evento de 2015 (30.4 %) con un NSE de 0.77. El evento de 2013 presentó la menor diferencia entre caudales con 5.7 % por debajo y después de 5 h del caudal máximo observado.

Cuadro 9. Diferencias entre valores máximos observados y modelados.

Tormentas	Fecha del caudal observado	Fecha del caudal modelado	Diferencia de ocurrencia (h)	Diferencia entre caudales (%)	Diferencia entre volúmenes (%)
2010	25/07/2010 06:00	25/07/2010 10:00	04:00	-17.6	19.1
2011	13/10/2011 06:00	13/10/2011 16:00	10:00	-67.7	-13.3
2013	17/09/2013 06:00	17/09/2013 11:00	05:00	-5.7	-9.0
2015	24/10/2015 06:00	24/10/2015 18:00	12:00	-8.4	-30.4
2021	22/08/2021 06:00	22/08/2021 12:00	06:00	10.3	0.4

La Figura 6a expone los datos procesados de lluvia a partir de las imágenes de satélite de lluvia para el evento del 19 al 31 de julio de 2010; la Figura 7 presenta la dinámica y magnitud de los caudales modelados y observados del evento de 2010; se encontró que el modelo sobreestimó los caudales entre el 28 y 30 de julio, por ello, el modelo alcanzó un NSE de 0.61.

La Figura 6b exhibe los datos procesados de lluvia a partir de las imágenes de satélite de lluvia para el evento del 20 al 30 de octubre de 2015; la Figura 8 expresa la dinámica y magnitud de los caudales modelados y observados del evento de 2015; se encontró que el modelo subestimó los caudales entre el 27 y 30 de octubre, por ello, el modelo alcanzó un NSE de 0.77.

La Figura 6c presenta los datos procesados de lluvia a partir de las imágenes de satélite de lluvia para el evento del 20 al 27 de agosto de 2021; la Figura 9 expresa la dinámica y magnitud de los caudales modelados y observados del evento de 2021; se encontró que el modelo sobreestimó los caudales entre el 25 y 27 de agosto, por ello, el modelo alcanzó un NSE de 0.49.

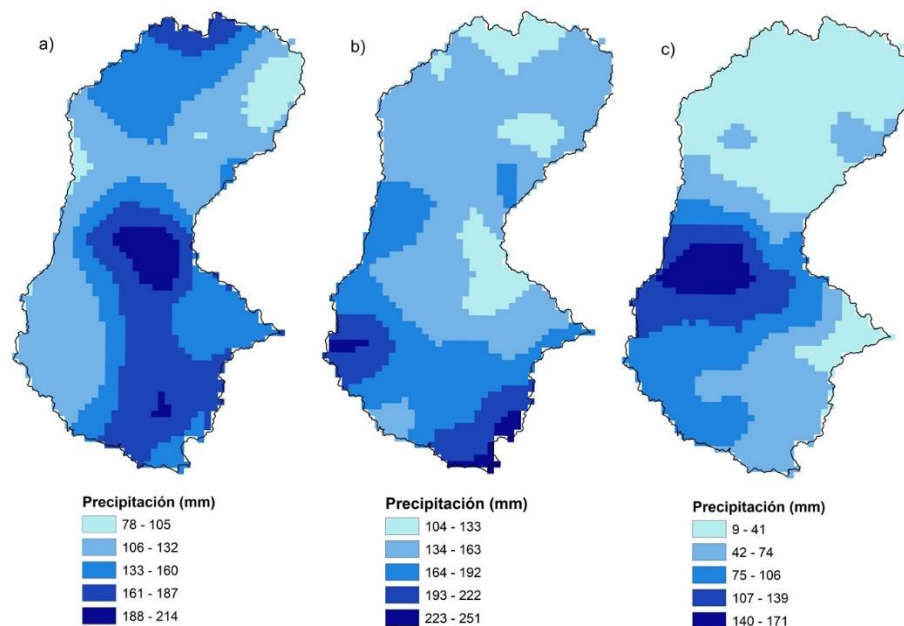


Figura 6. Precipitación acumulada con imágenes de lluvia IMERG-L para el evento: a) del 19 al 31 de julio de 2010; b) del 20 al 30 de octubre de 2015; c) del 20 al 27 de agosto de 2021.

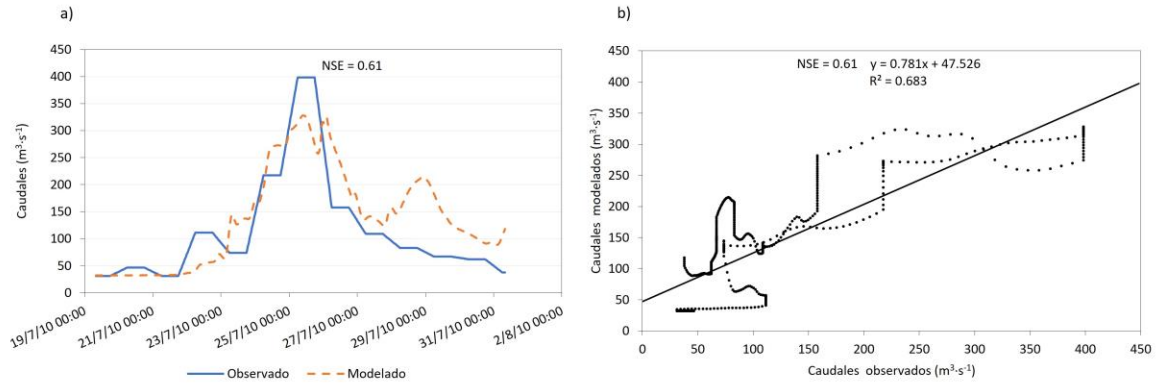


Figura 7. a) Hidrograma de la estación Callejones; b) ajuste de bondad entre lo observado y modelado en el evento del 19 al 31 de julio de 2010.

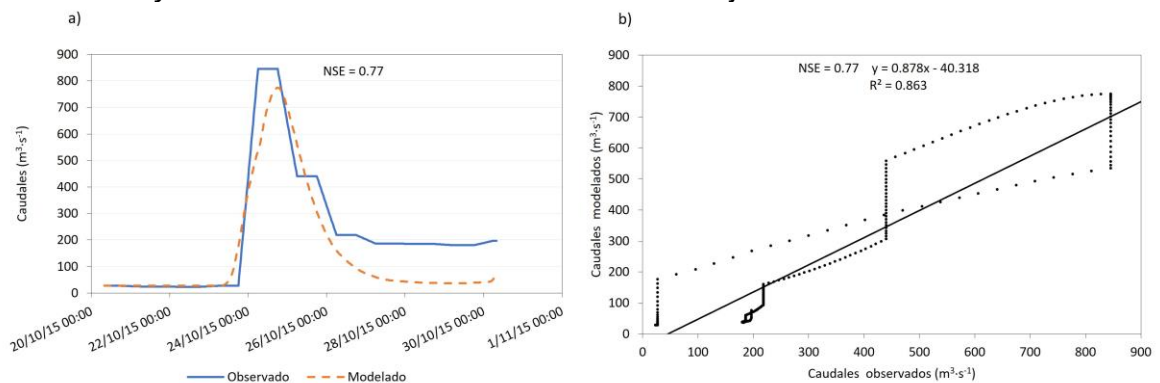


Figura 8. a) Hidrograma de la estación Callejones; b) ajuste de bondad entre lo observado y modelado en el evento del 20 al 30 de octubre de 2015.

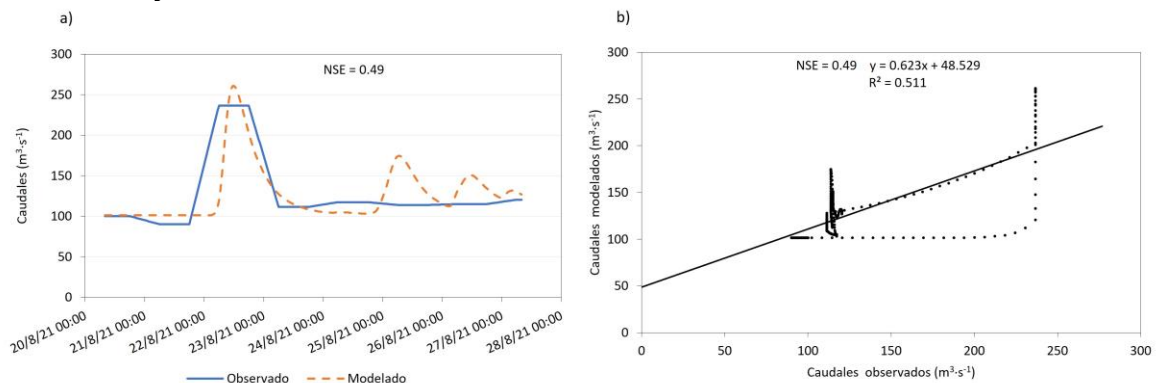


Figura 9. a) Hidrograma de la estación Callejones; b) ajuste de bondad entre lo observado y modelado en el evento del 20 al 27 de agosto de 2021.

Si se compara el NSE de 0.77 de este trabajo con el 0.531 del modelo hidrológico horario de Espinosa-López et al. (2020), para la cuenca del río Huaynamota, Nayarit, este trabajo presenta una ventaja. La duración de ambos eventos fue de 10 días, con un caudal máximo observado de 845 y 465.9 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para este y el otro trabajo, respectivamente. La superficie de la cuenca fue de 7 332 y 12 080

km², para este y el otro trabajo, respectivamente, por lo que el tamaño de la cuenca implica un reto para la distribución espacial de la precipitación.

4.4.8 Conclusiones

Los modelos hidrológicos distribuidos obtenidos a la salida de la cuenca del río Coahuayana, a partir de imágenes de satélite de lluvia IMERG-L y el programa HEC-HMS, con base en la metodología de número de curva para calcular las pérdidas y del hidrograma unitario modificado de Clark para los hidrogramas, es satisfactorio con base en los coeficientes de Nash-Sutcliffe, durante los eventos de precipitación máxima ocurridos en julio 2010, septiembre 2013 y octubre 2015.

Siendo la precipitación un dato de entrada importante en la modelación hidrológica, se recomienda la calibración de las imágenes de satélite de lluvia IMERG-L a partir de datos horarios de lluvia medidos en tierra.

Se concluye, a partir de los resultados obtenidos de la modelación horaria, que las imágenes de satélite de lluvia IMERG-L son una buena alternativa como entrada en la modelación hidrológica distribuida en lugares donde los datos horarios de lluvia medidos en tierra son escasos o inexistentes.

4.5 Literatura citada

- Aparicio-Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Ciudad de México, México: Limusa.
- Bui, H. T., Ishidaira, H., y Shaowei, N. (2019). Evaluation of the use of global satellite–gauge and satellite-only precipitation products in stream flow simulations. *Applied Water Science*, 9(3), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0931-y>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada* (1ra ed.). Bogotá, Colombia: McGraw Hill.
- CONAGUA. (2012). *Sistema de Seguridad de Presas*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua. https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre_presa.aspx
- CONAGUA. (2021a). *Banco nacional de datos de aguas superficiales*. Comisión Nacional del Agua. <https://sih.conagua.gob.mx/>
- CONAGUA. (2021b). *Sistema de información hidrológica*. Comisión Nacional del

Agua. <https://sih.conagua.gob.mx/>

- Domínguez, M. R., Esquivel, G. G., Méndez, A. B., Mendoza, R. A., Arganis, J. M. L., y Carrizosa, E. E. (2008). *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4687.5287>
- Espinosa-López, J. A., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R. A., y 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>
- Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., y Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(5), 701–722. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., y Xie, P. (2020). *NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD), Version 6*. Greenbelt, MD, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA). https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V06.pdf
- INEGI. (2021a). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación serie VI*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/#Descargas>
- INEGI. (2021b). *Conjunto de datos vectoriales edafológicos serie II*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#Descargas>
- INEGI. (2021c). *Continuo de elevaciones mexicano 3.0*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Jiang, L., y Bauer-Gottwein, P. (2019). How do GPM IMERG precipitation estimates perform as hydrological model forcing? Evaluation for 300 catchments across Mainland China. *Journal of Hydrology*, 572, 486–500. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.042>
- Karamouz, M., Nazif, S., y Falahi, M. (2013). *Hydrology and hydroclimatology: Principles and applications*. Florida, USA: CRC Press.
- Kull, D. W., y Feldman, A. D. (1998). Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(1), 9–19. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(1999\)4:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(1999)4:1(89))
- Magaña-Hernández, F., Bâ, K. M., y Guerra-Cobián, V. H. (2013). Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación

- derivada de radar. *Agrociencia*, 47(8), 739–752.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30229642001>
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design* (2nd ed.). New Jersey, USA: Pearson.
- Mei, Y., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., y Borga, M. (2016). Evaluating satellite precipitation error propagation in runoff simulations of mountainous basins. *Journal of Hydrometeorology*, 17(5), 1407–1423.
<https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0081.1>
- Méndez-Antonio, B., Soto-Cortés, G., Rivera-Trejo, F., y Caetano, E. (2014). Modelación hidrológica distribuida apoyada en radares meteorológicos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(1), 83–101.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000100006
- Merino-Jiménez, E., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., y Vázquez-Peña, M. A. (2021). Hourly hydrologic modeling in the upper basin of the Fuerte River, Sinaloa, Mexico. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 13(1), 53–76. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2020.11.085>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van-Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., y Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Nash, J. E., y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- SCS. (2004). Hydrology. En *National Engineering Handbook*. Washington, DC, USA: Soil Conservation Service.
- SMN. (2021a). *Información estadística climatológica*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- SMN. (2021b). *Información meteorológica*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- SMN. (2021c). *Sistema Clima Computarizado (CLICOM)*. Ciudad de México, México: Servicio Meteorológico Nacional. <http://clicom-mex.cicese.mx/malla/index.php>
- Tan, J., Huffman, G. J., Bolvin, D. T., y Nelkin, E. J. (2019). IMERG V06: Changes

- to the morphing algorithm. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(12), 2471–2482. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0114.1>
- USACE. (1982). *Hydrologic Analysis of Ungaged Watershed Using HEC-1*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-15.pdf>
- USACE. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. [https://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_\(CPD-74B\).pdf](https://www.hec.usace.army.mil/software/hechhms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_(CPD-74B).pdf)
- USACE. (2013). *HEC-GeoHMS geospatial hydrologic modeling extension: User's Manual Version 10.1*. United States Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf
- USACE. (2016). *Workshop: Application of HEC-HMS using gridded precipitation in watersheds outside of the United States*. https://www.hec.usace.army.mil/training/CourseMaterials/Mongolia_Workshop/Workshop_Mongolia.pdf
- USDA. (1986). *Urban hydrology for small wathersheds TR-55*. United States Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Vargas-Castañeda, G., Ibáñez-Castillo, L. A., y Arteaga-Ramírez, R. (2015). Development, classification and trends in rainfall-runoff modeling. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 7(1), 5–21. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2015.03.002>
- Zimmermann, E. D. (2003). A generalization of Clark's IUH for flatland areas with strong human interventions. *Journal of Environmental Hydrology*, 11(2), 1–14. <http://hydroweb.com/jeh/jeh2003/zimmer.pdf>
- Zubieta, R., Laqui, W., y Lavado, W. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca del Río Ilave a partir de datos de precipitación observada y de satélite, periodo 2011-2015, Puno, Perú. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5), 85–105. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-04>