



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río  
División de Estudios de Posgrado e Investigación



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA  
DEL RIO JAMAPA VERACRUZ, MÉXICO.”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA  
SILVANO POZOS SUÁREZ

DIRECTOR DE TESIS  
DRA. CLAUDIA ARACELI DÁVILA CAMACHO  
CO-DIRECTOR

DR. CLAUDIO HOYOS REYES  
ASESOR

DRA. MARÍA DEL REFUGIO CASTAÑEDA CHÁVEZ  
M. C. CHRISTIAN REYES VELÁZQUEZ

20 DE MAYO DEL 2023

BOCA DEL RIO, VERACRUZ.



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.

Tel. (229) 690 50 10 ext. 113 [depi\\_bdelrio@tecnm.mx](mailto:depi_bdelrio@tecnm.mx) | [tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [bdelrio.tecnm.mx](http://bdelrio.tecnm.mx)



2023  
AÑO DE  
**Francisco**  
**VILLA**  
EL REVOLUCIONARIO DEL PUEBLO



### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

**Número Registro: A-01312-150921**

En la ciudad de Boca del Río, Ver., siendo las 11:00 horas del día 24 del mes de mayo de 2023 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Consejo del Posgrado de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del ITBOCA, para examinar la Tesis de Grado titulada:

#### **"CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RIO JAMAPA VERACRUZ, MÉXICO."**

Que presenta el alumno:

**Silvano Pozos Suárez**  
Aspirante al Grado de:  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental**

Después de escuchar las opiniones sobre el documento escrito e intercambiar puntos de vista, los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes para su defensa ante el jurado correspondiente.

#### LA COMISIÓN REVISORA:

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. CLAUDIA ARACELI DAVILA CAMACHO**  
Director

  
\_\_\_\_\_  
**DR. CLAUDIO HOYOS REYES**  
Co-Director

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. MARÍA DEL REFUGIO CATAÑEDA CHÁVEZ**  
Asesor

  
\_\_\_\_\_  
**MC. CHRISTIAN REYES VELÁZQUEZ**  
Asesor





Boca del Río, Ver **20/MAYO/2023**

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**SILVANO POZOS SUÁREZ  
PASANTE DEL PROGRAMA MAESTRÍA EN  
CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
PRESENTE**

De acuerdo con el fallo emitido por los integrantes del Comité Revisor de la **TESIS PARA OBTENCIÓN DE GRADO**, desarrollada por usted cuyo título es:

**“CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA  
DEL RIO JAMAPA VERACRUZ, MÉXICO.” “**

Esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede **AUTORIZACIÓN** para que proceda a su impresión.

**ATENTAMENTE**  
*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*Por nuestros mares responderemos*

**DR. JUAN DAVID GARAY MARIN  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p. Coordinación del Programa MCIAMB  
c.c.p. Expediente





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Boca del Río, Veracruz, 18/enero/2023

Asunto: **CESION DE DERECHOS Y NO PLAGIO**

#### H. CONSEJO DE POSGRADO

**PROGRAMA DE POSGRADO MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA AMBIENTAL  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/ INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BOCA DEL RÍO  
PRESENTE**

En la Ciudad de Veracruz, Veracruz a los 18 días del mes enero de 2023. El que suscribe C. SILVANO POZOS SUÁREZ por mi propio derecho y en calidad de autor de la tesis titulada: CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO JAMAPA, VERACRUZ, MÉX. (en lo sucesivo la "TESIS") manifiesto que cedo a título gratuito la totalidad de los derechos patrimoniales de autor que sobre ella me corresponden, a favor del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo el "TecNM"). Lo anterior en términos de los antecedentes y consideraciones siguientes:

- I. Que la presente cesión de derechos de la "TESIS" se transfiere en virtud de lo estipulado en los establecido en los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México, sin reservarme acción legal de ningún tipo.
- II. Manifiesto bajo protesta de decir verdad, que la "TESIS" es original, inédita y propia, no existiendo impedimento de ninguna naturaleza para la cesión de derechos que se está haciendo, respondiendo además por cualquier acción de reivindicación, plagio u otra clase de reclamación que al respecto pudiera sobrevenir.
- III. Que la titularidad de derechos de autor de la "TESIS" en términos del artículo 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor (reproducción, en todas sus modalidades, transformación o adaptación, comunicación pública, distribución y en general cualquier tipo de explotación que de la "TESIS" se pueda realizar por cualquier medio conocido o por conocer, son propiedad única y exclusiva del "TecNM", adquiriendo el derecho de reproducción en todas sus modalidades, el derecho de transformación o adaptación, comunicación pública, distribución y en general cualquier tipo de uso que de la "TESIS" se pueda realizar por cualquier medio conocido o por conocer. La cesión de derechos se realiza con carácter permanente e irrevocable.
- IV. El TecNM podrá exhibir la "TESIS" a través de cualquier medio, en cualquier parte del mundo, incluso ser modificada, comprendida, traducida y de cualquier forma explotada en su totalidad o parcialidad.
- V. Que no he otorgado, ni otorgaré por ningún motivo, consentimiento alguno para la utilización de la "TESIS" por cualquier medio y su materialización en productos o servicios de cualquier naturaleza, a favor de ninguna persona física o moral, distinta a el "TecNM".



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.

Tel. (229) 690 5010 ext. 113 dep\_l\_bdelrio@tecnm.mx | tecnm.mx | bdelrio.tecnm.mx



2023  
Francisco  
VILLA



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Boca del Río  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

- VI. Estoy enterado del contenido y alcance legal de la presente cesión de derechos, firmando al final del presente documento para su certificación.

Señalo como correo electrónico para recibir futuras notificaciones: m21990016@bdelrio.tecnm.mx

Agradeciendo de antemano sus atenciones, le envío un cordial saludo

**ATENTAMENTE**

*Silvano Pozos Suárez*  
SILVANO POZOS SUÁREZ

NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE DE MAESTRIA

c.c.p. Archivo



Km. 12 Carretera Veracruz-Córdoba, Boca del Río, Ver. C.P. 94290.  
Tel. (229) 690 5010 ext. 113 depi\_bdelrio@tecnm.mx | technm.mx | bdelrio.tecnm.mx



2023  
AÑO DE  
**Francisco  
VILLA**  
EL REVOLUCIONARIO

## **AGRADECIMIENTOS**

Al programa de estudios de posgrado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Boca del Río por darme la oportunidad de ser parte de la comunidad académica y obtener el grado de maestría.

### **A mis directores de tesis**

La Doctora Claudia Araceli Dávila Camacho y al Doctor Claudio Hoyos Reyes por el apoyo incondicional que me brindaron en todo momento para la realización de esta tesis. Por su orientación tanto académica como personal para lograr este objetivo y desde luego por su amistad sincera.

### **A mis asesores**

La Doctora María del Refugio Castañeda Chávez y al Doctor Christian Reyes Velázquez por las asesorías, observaciones y recomendaciones sugeridas para que este trabajo sea de la mejor calidad posible, con un enfoque acorde con los ideales del instituto Tecnológico de Boca del Río. De manera especial al Doctor Pedro Cesar Reyna González por sus asesorías de SIG que fueron de gran utilidad para la elaboración de mapas en este trabajo.

### **A mis compañeros de trabajo**

María Elena Bravo Gasca, Roberto Zapata Ronzón, Ciro González Peña y Roel Jonathan Ayala Ruiz, del Centro Hidrometeorológico Regional de Boca del Río del Organismo de Cuenca Golfo Centro de la Comisión Nacional del Agua; así como al Ingeniero Miguel Ángel Gallegos Benites, Gerente de Meteorología y Climatología del Servicio Meteorológico Nacional, por el apoyo que me brindaron para poder realizar esta maestría, especialmente por facilitarme un horario laboral que permitiera tomar las clases.

Al Organismo de Cuenca Golfo Centro (OCGC) y al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) pertenecientes a la CONAGUA, por la información hidrológica y climatológica proporcionada para la realización de este trabajo de tesis.

A todas las personas y amigos cercanos que, de muchas maneras me motivaron para perseverar en mis estudios.

## **DEDICATORIA**

### **A mis Padres**

Edilberta Suárez Texon y Francisco Pozos García, porque sin su apoyo y ejemplo no habría llegado hasta aquí.

### **A mi esposa**

Esthela por acompañarme en todo este tiempo, animándome para concluir este proceso académico.

### **A mis hijos**

Aminadab, Kenia e Irene

## RESUMEN

La caracterización del patrón hidrológico del proceso lluvia-escorrentía de la cuenca del Río Jamapa es de gran ayuda para la planeación de una adecuada gestión sustentable del recurso hídrico. El objetivo fue caracterizar el patrón hidrológico del proceso lluvia-escorrentía con eventos de lluvias intensas ocurridas en la cuenca del Río Jamapa entre los años 1952 y 2014, utilizando un sistema de modelado hidrológico que tome en cuenta las características fisiográficas de la cuenca. Se examinó la aplicabilidad, capacidad e idoneidad del modelo HEC-HMS para el diagnóstico y/o predicción de avenidas asociadas a lluvias intensas ocurridas dentro de la cuenca. Los datos de entrada al modelo fueron tomados del Servicio Meteorológico Nacional (precipitación) y del Programa Nacional Contra Contingencias Hidráulicas (escorrentía), ambos pertenecientes a la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). Aunado a lo anterior, se realizó el análisis de la escorrentía con ayuda de las cartas de uso de suelo y vegetación, y edafología (INEGI 2022), para modelar numéricamente la escorrentía superficial de la cuenca del Río Jamapa. También se utilizó la combinación del sistema de modelo hidrológico y los sistemas de información geográfica. Se dispuso de las bases de datos de gastos ( $m^3/s$ ) observados de las estaciones hidrométricas Paso del Toro y el Tejar, de las cuales se eligieron diez eventos que superaron el promedio máximo mensual de  $136.40 m^3/s$  y de  $79.33 m^3/s$  para cada estación hidrométrica respectivamente.

**Palabras clave:** Precipitación, escorrentía, modelado hidrológico, modelo HEC-HMS, cuenca del Río Jamapa.

## ABSTRACT

The characterization of the hydrological pattern of the rainfall-runoff process of the Jamapa River basin is of great help for the planning of an adequate sustainable management of water resources. The objective was to characterize the hydrological pattern of the rainfall-runoff process with intense rainfall events occurred in the Jamapa River basin between the years 1952 and 2014, using a hydrological modeling system that takes into account the physiographic characteristics of the basin. The applicability, capacity and suitability of the HEC-HMS model for the diagnosis and/or prediction of floods associated with intense rainfall occurrences within the basin was examined. The input data for the model were taken from the National Meteorological Service (precipitation) and the National Program Against Hydraulic Contingencies (runoff), both belonging to the National Water Commission (CONAGUA). In addition, runoff analysis was carried out with the help of the land use and vegetation and edaphology charts (INEGI 2022), to numerically model the surface runoff of the Jamapa River basin. The combination of the hydrological model system and geographic information systems was also used. The databases of observed runoff (m<sup>3</sup>/s) from the Paso del Toro and El Tejar hydrometric stations were available, from which 10 events were chosen that exceeded the maximum monthly average of 136.40 m<sup>3</sup>/s and 79.33 m<sup>3</sup>/s for each hydrometric station, respectively.

**Keywords:** Precipitation, runoff, hydrologic modeling, HEC-HMS model, Jamapa River basin.

## ÍNDICE GENERAL

| <b>No.</b> | <b>Descripción</b>                          | <b>Página</b> |
|------------|---|---------------|
| 1          | INTRODUCCIÓN                                | 1             |
| 2          | MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL                  | 3             |
|            | 2.1 Teorías                                 | 3             |
|            | 2.2 Conceptos                               | 4             |
|            | 2.2.1 Hidrología                            | 4             |
|            | 2.2.2 Ciclo Hidrológico                     | 4             |
|            | 2.2.3 Escurrimiento                         | 5             |
|            | 2.2.4 Cuenca Hidrológica                    | 7             |
|            | 2.2.5 Precipitación                         | 8             |
|            | 2.3 Métodos de número de escurrimiento      | 10            |
|            | 2.4 Relación Lluvia-Escurrimiento           | 11            |
|            | 2.5 Modelación numérica hidrológica HEC-HMS | 11            |
| 3          | MARCO DE REFERENCIA                         | 13            |
|            | 3.1 Antecedentes                            | 13            |
|            | 3.2 Lugar de Estudio                        | 16            |
|            | 3.2.1 Hidrometría                           | 16            |
|            | 3.2.2 Edafología                            | 18            |
|            | 3.2.3 Uso de Suelo y Vegetación             | 19            |
|            | 3.3 Vacío del conocimiento                  | 19            |
|            | 3.4 Frontera del conocimiento               | 19            |
| 4          | PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN                   | 21            |
|            | 4.1 Situación Problemática                  | 21            |
|            | 4.2 Delimitación del problema               | 22            |
|            | 4.3 Planteamiento del problema              | 22            |
|            | 4.4 Justificación                           | 22            |
|            | 4.5 Pregunta de investigación               | 24            |
| 5          | HIPÓTESIS                                   | 25            |
| 6          | OBJETIVOS                                   | 25            |
|            | 6.1 General                                 | 25            |
|            | 6.2 Particulares                            | 25            |
| 7          | MATERIALES Y MÉTODOS                        | 26            |
|            | 7.1 Área de estudio                         | 26            |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 7.2   | Información hidrométrica                           | 26 |
| 7.3   | Información pluviométrica                          | 27 |
| 7.4   | Análisis de la lluvia media en la cuenca           | 30 |
| 7.4.1 | Método aritmético                                  | 30 |
| 7.4.2 | Polígonos de Thiessen                              | 30 |
| 7.4.3 | Método de Isoyetas                                 | 31 |
| 7.5   | Parámetros utilizados en la modelación con HEC-HMS | 33 |
| 7.5.1 | Número de Curva                                    | 33 |
| 7.5.2 | Tiempo de Retardo (Tr)                             | 36 |
| 7.5.3 | Abstracción Inicial                                | 36 |
| 8     | RESULTADOS Y DISCUSIÓN                             | 37 |
| 8.1   | Datos de entrada                                   | 37 |
| 8.2   | Simulación hidrológica                             | 40 |
| 8.3   | Calibración y validación                           | 46 |
| 9     | CONCLUSIONES                                       | 47 |
| 10    | RECOMENDACIONES                                    | 49 |
| 11    | REFERENCIAS  | 50 |
| 12    | APÉNCIDE   | 54 |

## ÍNDICE DE CUADROS

| No. | Descripción   | Página |
|-----|---|--------|
| 1   | Estaciones climatológicas convencionales dentro y fuera de la cuenca del Río Jamapa.  | 28     |
| 2   | Clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el contenido de arcilla.<br>Fuente: Aparicio (2015).   | 34     |
| 3   | Indicadores para el cálculo del número de curva, Aparicio (2008).   | 35     |
| 4   | Eventos de precipitación ocurridos en la cuenca del Río Jamapa.   | 37     |
| 5   | Datos de entrada para el modelo numérico HEC-HMS.   | 38     |
| 6   | Estimación de los números de curva para las subcuencas de los ríos Jamapa y Cotaxtla para cada serie temporal de tipo de suelo y uso de suelo y vegetación. | 39     |
| 7   | Comparación de los valores de los gastos máximos observados en cada con los estimados por el modelo HEC-HMS en cada evento de tormenta.                     | 45     |

## ÍNDICE DE FIGURAS

| No. | Descripción  | Página |
|-----|--|--------|
| 1   | Esquema del ciclo hidrológico y sus principales componentes que lo involucran. Fuente: <a href="https://blogbitacoraverde.blogspot.com/2019/04/ciclo-hidrologico-del-agua.html">https://blogbitacoraverde.blogspot.com/2019/04/ciclo-hidrologico-del-agua.html</a> .   | 5      |
| 2   | Modelo conceptual de un hidrograma de tormenta. Fuente: Aparicio (2015).   | 6      |
| 3   | Región Hidrológica-Administrativa Núm. 28 "Papaloapan" y cuenca del Río Jamapa, INEGI (SIATL 2022). Imagen propia, elaborada con Esri Inc. 10.3.   | 16     |
| 4   | Registros diarios de gastos en m <sup>3</sup> /s de la estación hidrométrica "El Tejar", periodo noviembre 1951 - abril 2012. Datos obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales de CONAGUA   | 17     |
| 5   | Registros diarios de gastos en m <sup>3</sup> /s de la estación hidrométrica "Paso del Toro", periodo noviembre 1951 - diciembre 2014. Datos obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales de CONAGUA.   | 17     |
| 6   | Mapa de distribución espacial de los tipos de suelo dentro la cuenca del Río Jamapa, realizado a partir de conjuntos de datos vectoriales de la serie I de INEGI y Esri Inc. 10.3. Modificado del INEGI.   | 18     |
| 7   | Modificaciones del uso de suelo y vegetación dentro de la cuenca del Río Jamapa, realizado a partir de conjuntos de datos vectoriales de las series I (a), II (b), III (c), IV (d), VI (e) y VI (f) del INEGI y Esri Inc 10.3. Donde el color verde claro es agricultura, verde oscuro es bosque, amarillo es pastizal cultivado, rosa sin vegetación aparente, y negro urbano construido, elaboración propia. | 20     |
| 8   | Representación esquemática de los planos socioeconómico, tecnológico, político, y económico de la situación problemática del sistema "Cuenca del Río Jamapa"   | 21     |
| 9   | Ubicación de las subcuencas Jamapa y Cotaxtla que conforman a la cuenca del Río Jamapa, además, la localización de las estaciones hidrométricas El Tejar y Paso del Toro. INEGI (SIATL 2022). Imagen propia, elaborada con Esri Inc. 10.3.   | 26     |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 10 | Localización de las estaciones climatológicas dentro y cercanas a la cuenca del Río Jamapa. INEGI (SIATL, 2022). Imagen propia, elaborada con Esri Inc. 10.3. | 27 |
| 11 | Modelo conceptual del trazo de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 2008).  | 31 |
| 12 | Modelo conceptual del trazo de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 2008).  | 32 |
| 13 | Tendencia del número de curva de las series de la 1 a la 7. a) Subcuenca del río Jamapa. b) Subcuenca del río Cotaxtla.                                       | 40 |
| 14 | Evento de precipitación 1, registrado y simulado del 23 al 30 de julio de 1973.   | 42 |
| 15 | Evento de precipitación 2, registrado y simulado del 25 de junio al 02 de julio de 1976.  | 42 |
| 16 | Evento de precipitación 3, registrado y simulado del 22 al 28 de octubre de 1977.   | 42 |
| 17 | Evento de precipitación 4, registrado y simulado del 06 al 12 de septiembre de 1978.  | 43 |
| 18 | Evento de precipitación 5, registrado y simulado del 21 al 26 de septiembre de 1978.  | 43 |
| 19 | Evento de precipitación 6, registrado y simulado del 22 al 29 de septiembre de 1980.  | 43 |
| 20 | Evento de precipitación 7, registrado y simulado del 23 al 28 de junio de 1981.   | 44 |
| 21 | Evento de precipitación 8, registrado y simulado del 11 al 17 de julio de 1981.   | 44 |
| 22 | Evento de precipitación 9, registrado y simulado del 05 al 12 de septiembre de 2008.  | 44 |
| 23 | Evento de precipitación 10, registrado y simulado del 16 al 22 de septiembre de 2010.   | 45 |
| 24 | Gastos máximos observados versus estimados para las estaciones hidrométrica Paso del Toro a) y El Tejar b), con el valor del coeficiente de determinación     | 47 |
| 25 | Polígonos de Thiessen para el evento del 23 al 30 de julio de 1973.   | 54 |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 26 | Polígonos de Tiessen para el evento del 25 de junio al 02 de julio de 1976.          | 54 |
| 27 | Polígonos de Tiessen para el evento del 22 al 28 de octubre de 1977.                 | 55 |
| 28 | Polígonos de Tiessen para el evento del 06 al 12 de septiembre de 1978.              | 55 |
| 29 | Polígonos de Tiessen para el evento del 21 al 26 de septiembre de 1978.              | 56 |
| 30 | Polígonos de Tiessen para el evento del 22 al 29 de septiembre de 1980.              | 56 |
| 31 | Polígonos de Tiessen para el evento del 23 al 28 de junio de 1981.                   | 57 |
| 32 | Polígonos de Tiessen para el evento del 11 al 17 de julio de 1981.                   | 57 |
| 33 | Polígonos de Tiessen para el evento del 05 al 12 de septiembre de 2008.              | 58 |
| 34 | Polígonos de Tiessen para el evento del 16 al 22 de septiembre de 2010.              | 58 |
| 35 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 23 al 30 de julio de 1973.          | 59 |
| 36 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 25 de junio al 02 de julio de 1976. | 59 |
| 37 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 22 al 28 de octubre de 1977.        | 60 |
| 38 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 06 al 12 de septiembre de 1978.     | 60 |
| 39 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 21 al 26 de septiembre de 1978.     | 61 |
| 40 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 22 al 29 de septiembre de 1980.     | 61 |
| 41 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 23 al 28 de junio de 1981           | 62 |
| 42 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 11 al 17 de julio de 1981.          | 62 |
| 43 | Distribución espacial de la lluvia acumulada del 05 al 12 de septiembre de 2008.     | 63 |
| 44 | Distribución espacial de la lluvia acumulada 16 al 22 de septiembre de 2010.         | 63 |

## 1. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos superficiales están en función de un gran número de factores, entre los principales, se tienen: los sistemas climáticos, los fisiográficos, los biológicos, entre otros; dichos factores también están asociados a la incertidumbre o aleatoriedad de una sociedad. Por lo anterior, una de las mayores preocupaciones en México es la disponibilidad del agua para consumo humano, la planeación de la distribución del recurso en el presente y su accesibilidad en el futuro (Martínez y Patiño, 2012). Esta disponibilidad del agua no es homogénea, algunos estados de México cuentan con una vasta disponibilidad del vital líquido, mientras que otros carecen de él (Fernández-Jáuregui, 1999). En cuanto a la disponibilidad superficial, el manejo del agua de los ríos en México ha sido inadecuado por las diferentes actividades antrópicas, las variaciones estacionales del clima y de los cambios del patrón hidrológico de la escorrentía, lo que ha llevado a la pérdida de los ecosistemas (Lanza *et al.*, 2012).

La escorrentía o en general los procesos del agua por los cuales tiene que pasar para llegar desde una fuente primaria como el océano hasta, por mencionar un punto, las partes más alta de una región, están definidos mediante el ciclo hidrológico, término que abarca todas las etapas en las que el agua atraviesa a lo largo de su circulación por el ambiente, desde el mar con una fuente de partida, posteriormente la atmósfera por evaporación, condensándose formando nubes y precipitan en forma de lluvia hasta la superficie de la tierra, en donde tiende a escurrir para llegar nuevamente al océano (Lunagomez, 2010).

Cualquier alteración del ciclo hidrológico (por ejemplo, cambios en la escorrentía), es un factor clave a considerar en la conservación o recuperación de los ríos y consecuentemente de sus humedales (Lanza *et al.*, 2012). Dichas alteraciones se deben principalmente de las modificaciones del uso de suelo y la cobertura vegetal que sufren en una cuenca hidrológica (González *et al.*, 2016). Por lo anterior, es necesario el estudio de modelación numérica hidrológica. De acuerdo con Rodríguez *et al.* (2010) es fundamental contar con un modelo hidrológico que resuelva el proceso lluvia-escorrentía calibrado y que se ajuste a las condiciones fisiográficas de la misma, con el fin de reproducir o simular los escurrimientos superficiales generados por eventos de lluvias, ya que con dicha herramienta es posible diagnosticar eventos de grandes volúmenes de agua que escurren hasta la parte baja de la cuenca y que esas escorrentías hayan incluso generado inundaciones, también es posible pronosticar eventos futuros de avenidas (crecientes del río o grandes volúmenes de escorrentía) que pudieran ocasionar afectaciones como por ejemplo en la agricultura o infraestructuras cercanas a los ríos.

La modelación hidrológica en México, con fines de predicción de avenidas, se practica desde hace varios años, sin embargo, poco ha sido utilizada como herramienta operativa que coadyuve a la toma de decisiones para reducir daños por eventos meteorológicos extremos y para la creación de sistemas de alerta temprana en el ámbito de la protección civil que ayude a salvaguardar la integridad de la población (Pérez, 2015). Por su parte Landa *et al.* (2008) mencionan que los desastres causados por fenómenos hidrometeorológicos en nuestro país son cada vez más frecuentes. También argumentan que las explicaciones oficiales para justificar dichos desastres es con frecuencia el paradigma naturalista, es decir, ponen a la naturaleza como único responsable. Así como también Pereyra *et al.* (2016) mencionan que algunos efectos como son las inundaciones causadas por el desbordamiento de los ríos, no se deben exclusivamente a eventos meteorológicos extremos, sino que, puede deberse a factores antropogénicos.

Por todo lo anterior el objetivo es caracterizar el patrón hidrológico del proceso lluvia-escorrentía con eventos de tormentas relevantes ocurridas en la cuenca del Río Jamapa, Veracruz. Para ello y como primer capítulo hace referencia al apartado del marco teórico y conceptual abordando la investigación bibliográfica, así como las variables, constantes y parámetros, mencionando la relación que guardan con la modelación numérica hidrológica.

En el capítulo de marco teórico y conceptual se exponen los antecedentes, teorías y/o regulaciones referentes a la modelación hidrológica. En el capítulo de materiales y métodos se explican los procedimientos, enfoques y diseños desde las bases de datos hasta la presentación de la modelación hidrológica. En el capítulo de resultados se exponen lo que se planteó en métodos y materiales, así como el tratamiento de la modelación. Finalmente se dan las conclusiones de este proyecto de investigación.

## 2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 Teorías

El ciclo hidrológico es un término muy utilizado en diferentes ramas de la ciencia, describe de manera objetiva los procesos físicos que sufre el agua en su circulación por el medio ambiente (Aranda, 1998). La principal fuente de agua en la superficie de la tierra es la precipitación y medirla es el punto de partida para su correcta administración (Aparicio, 2008), sobre todo utilizarla en la modelación hidrológica como datos de entrada en el proceso lluvia-escorrentía.

Al realizar algún estudio hidrológico o ambiental, se debe tener claro que el área fundamental de estudio es la cuenca hidrológica. “Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida” (Aparicio, 2008). Por su parte, Ortiz-Lozano (2013) menciona que las cuencas hidrológicas pueden abordarse desde el enfoque de los sistemas complejos, ya que los flujos de corrientes que conforman su espacio geográfico están interconectados, transportando nutrientes, materia y energía desde donde se origina la corriente más lejana hasta la salida de la cuenca. De igual manera una cuenca puede estar conformada por una serie de ecosistemas a lo largo de los gradientes altitudinales y que sobre pasan los límites de las entidades de gestión, las cuales pueden ser nacionales, estatales y locales, como en municipio, comunidad o ejido, entre otros (Garrido *et al.*, 2010).

Todo ecosistema expuesto a sistemas meteorológicos extremos, como los ciclones tropicales, los cuales pueden generar lluvias intensas en zona continental incluso antes de tocar tierra, siendo que la mayor parte de las lluvias tienden a escurrir sobre la superficie y los ríos y generar inundaciones en partes bajas de las cuencas y provocar daños significativos (Díaz y Sesma, 2006). Por ejemplo, huracán Karl impactó que al norte del municipio de Veracruz en el año 2010.

De los daños que pudieran presentarse en los ecosistemas, los cambios de uso de suelo, que influyen directamente en el incremento de los escurrimientos superficiales de una cuenca hidrológica y, por lo tanto, favorece un mayor riesgo a que se presenten inundaciones (Jain *et al.*, 2004; Hundedcha y Bardos, 2004; Pérez *et al.*, 2005; Thanapakpawin *et al.*, 2006; Miranda-Aragón *et al.*, 2009).

## **2.2 Conceptos**

### **2.2.1 Hidrología**

La hidrología comprende la circulación de agua y sus componentes a través del ciclo hidrológico. La definición más completa y de carácter ambiental que podrían encontrarse es la literatura de hidrología de Aparicio (2015): *“Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas, y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”*.

Como define Maidment (1993) a la hidrología *“Lidia con la precipitación, evaporación, infiltración, flujo de agua subterránea, escurrimientos, flujo de corrientes superficiales y el transporte de sustancias disueltas o suspendidas en el flujo de agua. Le concierne primordialmente agua costa dentro o cerca de ella; aguas oceánicas son dominio de la oceanografía y ciencias marinas”*. Otra manera de describir brevemente a la hidrología es que lidia con los movimientos del agua y su almacenamiento en el sistema terrestre en sus diferentes estados (Wang y Yang, 2014).

Cabrera (2012-b) plantea que los procesos hidrológicos presentes en una cuenca se caracterizan por: ser no lineales en el tiempo, pues presentan variaciones complejas en el espacio y en el tiempo; no son estacionarios pues en algunos casos responden a efecto de periodicidad y tendencias; responden a las condiciones fisiográficas como el tipo de suelo, usos de suelo y clima a lo largo de la cuenca; presentan variaciones temporales en todas sus escalas, ya sea horaria, diaria, mensual, etc.

### **2.2.2 Ciclo Hidrológico**

Mientras que, el comportamiento hidrológico para un punto dado está en función de múltiples interacciones no lineales de múltiples procesos físicos ocurriendo simultáneamente en la atmósfera, océano y tierra (Figura 1). Donde la atmósfera responderá a los cambios en la radiación solar, movimientos terrestres (inclinación y rotación). El océano responde a los cambios en corrientes atmosféricas, así como de corrientes por diferencia de temperaturas o presiones debido a las posiciones relativas de cuencas y continentes. En la superficie terrestre se ve influenciado por los cambios en la atmósfera y océano antes mencionados, desarrollando su propio patrón térmico por la refracción de la radiación solar a la atmósfera. Todos estos componentes son relevantes en el ciclo hidrológico resultante para un punto dado o de inicio (Wang y Yang 2014).

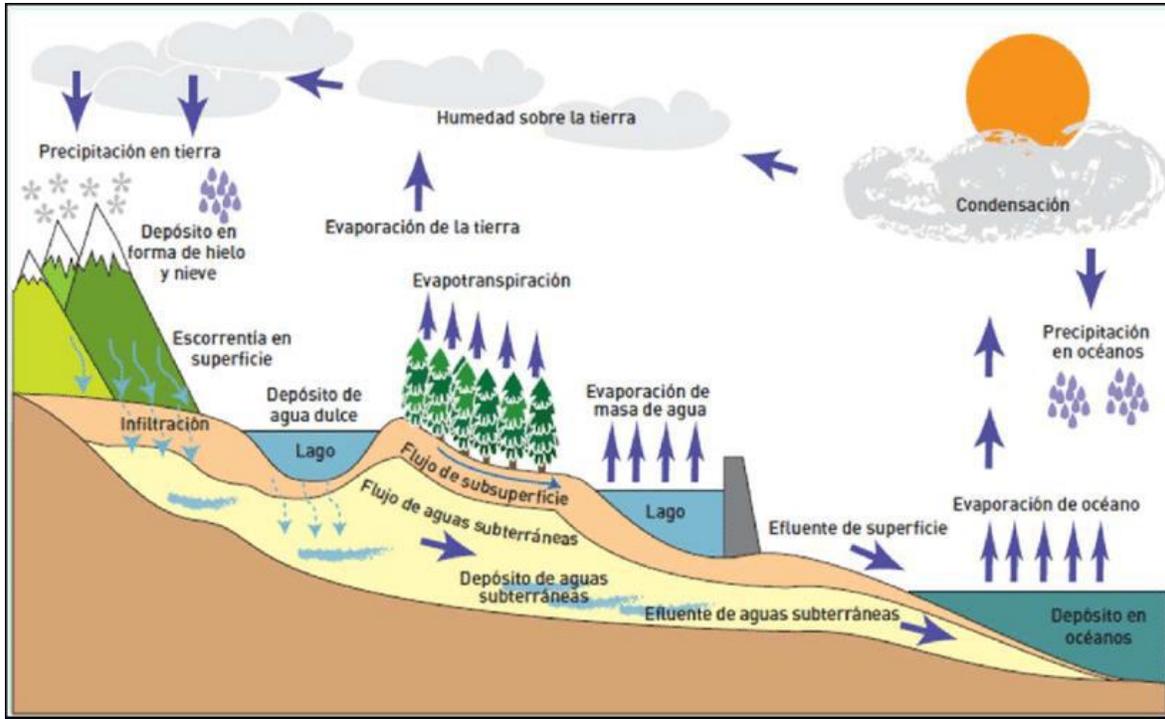


Figura 1. Esquema del ciclo hidrológico y sus principales componentes que lo involucran.  
Fuente: <https://blogbitacoraverde.blogspot.com/2019/04/ciclo-hidrologico-del-agua.html>

### 2.2.3 Escurrimiento

Uno de los componentes que llaman la atención para su estudio hidrológico es el escurrimiento medio diario que se registra en las estaciones de aforo o hidrométricas. El escurrimiento podría entenderse cuando la lluvia no es retenida en la superficie del suelo ni se infiltra al subsuelo, fluye a través de lo largo de la superficie del suelo, convirtiéndose en escurrimiento que se sumará a los cauces de ríos siguiendo su camino hasta encontrar su salida fuera de la cuenca o ser retenida en algún otro cuerpo de agua como lagos o lagunas (Chow *et al.*, 1988).

Existen tres principales tipos de escurrimiento, el flujo sobre el terreno junto con el escurrimiento de cauces y corrientes se les denomina escurrimiento superficial, la parte del agua que se infiltra cerca de la superficie y fluye paralelamente a los escurrimientos superficiales, se le denomina escurrimiento subsuperficial. La parte que se infiltra hasta niveles interiores del freático se le denomina escurrimiento subterráneo (Aparicio 2015). Esta clasificación, aunque simple, es arbitraria ya que muchos de estos escurrimientos no siguen su trayecto por el mismo medio a lo largo de todo su recorrido hasta la salida de la cuenca, ya que pueden comenzar como superficiales y terminar como subsuperficiales o subterráneo y viceversa. Lo importante en realidad es la velocidad con la que la cuenca responde a una tormenta pues permitirá estimar la magnitud de las avenidas.

El escurrimiento se mide como volumen por unidad de tiempo que pasa de manera continua por una determinada sección transversal de un río. En México, el método más simple y mayormente usado para la medición de caudales es mediante la determinación del nivel, haciendo uso de limnógrafos que indicarán la cantidad de agua disponible originada por lluvias y escurrimientos.

El resultado de la medición de escurrimiento se representa mediante hidrogramas (figura 2), son gráficas que relacionan el flujo de agua en función del tiempo. Su forma para tormentas particulares varía en función de las características de la cuenca y de la tormenta misma (Aparicio, 2015).

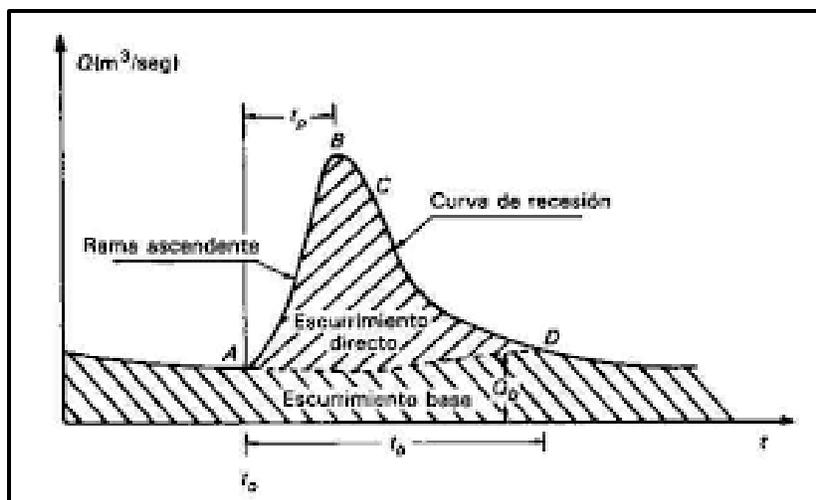


Figura 2. Modelo conceptual de un hidrograma de tormenta. Fuente: Aparicio (2015).

Las partes de un hidrograma dependen de una gran variedad de factores, sin embargo, los más relevantes para la modelación son (Aparicio, 2015):

A: Punto de levantamiento. En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de haber iniciado la tormenta, durante la misma o incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después de que cesó de llover, dependiendo de varios factores, entre los que se pueden mencionar el tamaño de la cuenca, su sistema de drenaje y suelo, la intensidad y duración de la lluvia, etc.

A-B: Rama ascendente o punto de levantamiento. Aquí el agua proveniente de la tormenta llega a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente o tiempo después del inicio de

la tormenta dependiendo de factores de la cuenca como su área, drenaje y tipo o uso de suelo además de intensidad y duración de la precipitación.

**B:** Gasto pico. Es el gasto máximo que produce la tormenta y se considera el punto más importante de un hidrograma.

El tiempo pico ( $t_p$ ) de un hidrograma (Figura 2) es el tiempo que transcurre desde que empieza a incrementarse el gasto en el afluente hasta alcanzar su punto máximo.

$T_b$ : Tiempo base. Es el tiempo que transcurre desde el levantamiento hasta el final del escurrimiento directo, se podría decir que es el tiempo de duración del escurrimiento directo.

**C:** Punto de inflexión. En este punto es cuando aproximadamente termina el flujo sobre el terreno.

**C-D:** Curva de recesión, es cuando aproximadamente termina el flujo sobre el terreno y el escurrimiento remanente es por los canales o subterráneo.

**D:** Final de escurrimiento directo. A partir de aquí el escurrimiento es solo subterráneo y es el de mayor curvatura en la curva de recesión, pero no es fácil de distinguirse.

Sin duda, uno de los componentes que llaman la atención para sus estudios hidrológicos y control de avenidas es el escurrimiento medio diario que se registra en las estaciones de aforo o hidrométricas, como se mencionó anteriormente, es el volumen de agua en  $m^3/s$  que pasa en una sección transversal de un río, como resultado de un evento de lluvia dentro de una cuenca hidrológica (Pérez-Sesma *et al.*, 2012).

#### **2.2.4 Cuenca Hidrológica**

Aparicio (2015) la interpreta como “una cuenca hidrológica es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida”.

Garrido *et al.* (2010) sintetizan tres zonas que caracterizan a una cuenca hidrológica y los criterios para su delimitación:

**Cuenca Alta:** Es el área donde se presentan las lluvias de mayor intensidad y duración, la cual una parte se infiltra y la otra escurre en forma de corrientes. Presenta la altimetría más elevada de la cuenca abarcando sistemas de montaña y lomeríos; inician y confluyen las corrientes de primer y segundo orden, evidenciando procesos fluvio-erosivos, debido a una mayor energía del relieve por el mayor grado de inclinación de las pendientes.

Cuenca media: Área transicional entre la cuenca alta y la cuenca baja. Corresponde a sistemas de lomeríos, colinas, valles y planicies intermontañas y porciones superiores de abanicos aluviales y rampas de piedemonte, con una energía de relieve media. Se observa una mayor integración de la red de drenaje con corrientes de segundo, tercero y cuarto orden.

Cuenca baja: Área de salida del sistema de drenaje por medio del cauce principal, abarcando la porción más baja de la cuenca. Comprende las áreas de planicies inundables, terrazas fluviales y áreas de abanicos coalescentes.

### **2.2.5 Precipitación**

Además de comprender los términos de la cuenca, también resulta relevante entender la precipitación, por lo que Aparicio (2015), determina que la precipitación es el factor que da origen a todas las corrientes superficiales y profundas, y la define como la cantidad de agua que llega al suelo en forma líquida o sólida.

La precipitación obtiene su humedad principalmente de la evaporación de los océanos, pero también influyen otros factores como la latitud, altitud, continentalidad, corrientes marinas, vientos dominantes; en conjunto con las barreras orográficas, se determinará la humedad atmosférica de una región (Chereque, 1989). El Servicio Meteorológico Nacional define la precipitación de la siguiente manera: "Hidrometeoro constituido por un conjunto de partículas acuosas, líquidas o sólidas, cristalizadas o amorfas, que caen de una nube o de un conjunto de nubes y que alcanzan el suelo" (SMN, 2021).

La formación y clasificación de la precipitación pasa por diferentes factores que se describe a continuación:

La elevación de masas de aire húmedo en la atmósfera lleva a su enfriamiento y posterior condensación, resultando en la precipitación del vapor de agua en la atmósfera en la forma de lluvia, nieve o granizo. Como consecuencia del enfriamiento de las masas de aire, ocurre la formación de condensación de partículas de agua en forma de aerosoles con partículas de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro típicamente y se precipitan al alcanzar diámetros mayores de 0.1 mm, mientras caen las gotas colisionan formando gotas más grandes llegando al suelo en un rango de 0.5 a 3.0 mm de diámetro (Wang y Yang 2014). Se describen en tres grupos de precipitación de acuerdo con el factor responsable de la elevación del aire que propicia la precipitación:

- a) Precipitación convectiva. Causada por el ascenso de aire cálido más liviano que el aire frío de los alrededores. Las diferencias de temperatura pueden ser sobre todo el resultado de calentamientos diferenciales en la superficie o en la capa superior de la capa de aire. La precipitación convectiva es puntual y su intensidad puede variar entre aquella correspondiente a lloviznas ligeras y aguaceros (Segeer y Villodas, 2006).
- b) Precipitación orográfica. Resulta del ascenso del aire cálido hacia una cadena de montañas. Las regiones que quedan del otro lado de las montañas pueden sufrir la ausencia de lluvias, puesto que todas las nubes son interceptadas y precipitadas en el lado donde ellas provienen (Segeer y Villodas, 2006).
- c) Precipitaciones por convergencia. Se originan a partir del choque de dos masas de aire con diferentes temperaturas obligando a que el aire ascienda, para luego condensarse por efecto del gradiente vertical de temperatura de la troposfera y finalmente precipitar a la superficie (Soriano *et al.*, 2020).

La organización estructural de los sistemas de precipitación se puede describir en dos mecanismos, que son los convectivos y los estratificados. Estos difieren en el crecimiento de las partículas que precipitarán y la magnitud de sus movimientos verticales, generando marcadas diferencias en el tiempo de formación de partículas que precipitarán, siendo el estratificado el que tome mayor tiempo (horas) y el convectivo debido a la intensidad de sus movimientos verticales locales presenta tiempos de desarrollo de precipitación más cortos, alrededor de 45 minutos. Existe la interacción de ambos mecanismos y es producido por la precipitación orográfica (Maidment, 1993).

Dadas las interacciones de la precipitación y su compleja distribución, es necesario hacer cálculos para determinar una precipitación promedio de una zona específica, para ellos sirve el método de la técnica de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 2015), que consiste en lo siguiente:

1. Unión mediante líneas rectas en planos de la cuenca a las estaciones más próximas entre sí, formando triángulos en cuyos vértices se encuentran las estaciones.
2. Trazado de líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos. Por geografía elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto.
3. Cada estación quedará rodeada por las líneas rectas formando los polígonos de Thiessen y en algunos casos se hacen coincidir con los parteaguas de la cuenca.

4. La lluvia media se calcula como un promedio ponderado de las precipitaciones registradas por área de influencia con respecto al área total de la cuenca.

### **2.3 Métodos de número de escurrimiento**

Para entender del número de escurrimiento es necesario definir la infiltración. La infiltración es todo el movimiento de agua dentro del suelo por acciones de fuerzas capilares y gravitacionales. La diferencia entre el volumen que precipita y el que escurre a la salida de la cuenca se denominan pérdidas y debido a que una gran cantidad de pérdidas se le atribuyen a la infiltración, estas juegan un papel importante en la relación lluvia-escurrimiento, por lo que deben tomarse en cuenta para el diseño y predicción de modelos hidrológicos, así como de obras hidráulicas (Aparicio, 2015).

El proceso de infiltración depende de una gran variedad de factores, entre ellos podemos considerar los siguientes:

- Textura del suelo.
- Contenido de humedad inicial.
- Contenido de humedad de saturación.
- Cobertura vegetal.
- Uso de suelo.
- Aire atrapado.
- Lavado de material fino.
- Compactación
- Temperatura (cambios y diferencias).

El número de curva para el escurrimiento (NC) se estima en función principalmente del tipo del suelo, del uso del suelo y vegetación, además de los factores antes mencionados de la cuenca utilizando las tablas publicadas por el departamento de conservación de suelo de Estados Unidos (SCS, por sus siglas en inglés). El rango de los valores de CN va desde 30 a hasta 100 en función del tipo de suelo, su uso y cobertura, clasificándolo desde el más permeable hasta completamente impermeable. Este método fue generado de manera empírica haciendo uso de valores promedio de tipos de suelo y sus usos para la descripción del comportamiento y las características hidrológicas de una cuenca. Sin embargo, es uno de los métodos más utilizados alrededor del planeta para la simulación y estimación de variables específicas de tormentas (Maidment, 1993).

## **2.4 Relación Lluvia-Escurrimiento**

Es muy común el no contar con los registros adecuados de escurrimiento para la estimación de volúmenes en eventos de tormenta. Sin embargo, los datos de precipitación que generalmente son más abundantes y confiables debido a que los de escurrimiento se ven afectados por cambios en la cuenca. Es por esto, que los modelos lluvia-escorrimento que estimen los volúmenes de escurrimiento en conjunto con los valores de precipitación y características de la cuenca son importantes para llevar a cabo futuros proyectos de manejo de cuencas y de ingeniería (Aparicio, 2015). Los principales parámetros del proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son:

- Área de la cuenca.
- Altura total de precipitación.
- Características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.).
- Distribución de la lluvia en el tiempo.
- Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca.

Para la estimación del proceso lluvia-escorrimento en áreas o cuencas de una gran extensión, donde se requiere su subdivisión y el volumen escurrido sea el mismo pero los gastos pico y otras características sean diferentes para cada subcuenca, este método toma en cuenta este comportamiento considerando todas estas características de la cuenca además como su forma, pendiente y vegetación (Aparicio, 2015).

## **2.5 Modelación numérica hidrológica HEC-HMS**

En la actualidad la modelación hidrológica se utiliza como una herramienta de gran importancia para el estudio de escurrimientos máximos (avenidas) en el todo el mundo. Con el empleo de los modelos hidrológicos que simulan el proceso lluvia-escorrimento es posible realizar el análisis y la prevención de las afectaciones que generan grandes volúmenes de escurrimiento como por ejemplo las inundaciones; también es posible plantear hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrecen cierto grado de confianza para la toma de decisiones, como lo es el ordenamiento territorial en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras que ofrezcan un funcionamiento óptimo en situaciones de emergencia (Díaz-Gutiérrez, 2018).

El Sistema de Modelado Hidrológico, creado por el Cuerpo de Ingeniero de Hidrología de los Estados Unidos (HEC-HMS, por sus siglas en inglés) es un modelo matemático con gran aceptación a nivel internacional y es de distribución libre. Está diseñado para la simulación de procesos lluvia-escorrimento en sistemas de cuencas dendríticas, estimando

escurrimientos máximos y tiempo pico a partir de condiciones extremas de precipitación (Feldman, 2000).

El modelo HEC-HMS, utiliza el método del número de curva del servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos y, estima la precipitación en exceso en función de la precipitación acumulada, cobertura de suelo, del tipo de suelo y vegetación entre otros (Feldman, 2000).

### 3. MARCO DE REFERENCIA

#### 3.1 Antecedentes

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), cuyo ámbito de competencia son las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) en todo México; a su vez, dichas regiones hidrológicas se conforman por cuencas, consideradas como unidades básicas para la gestión de los recursos hídricos (CONAGUA, 2015). Las regiones hidrológicas en el temporal de estiaje o incluso sequía, además de su compleja fisiografía, mantiene un déficit de almacenamiento del recurso hídrico. Por lo que se han realizados diversos estudios hídricos y de climatología utilizando la modelación numérica.

Contar con modelo hidrológico de lluvia-escurrimiento que se ajuste a las condiciones fisiográficas de una cuenca y pueda simular importantes volúmenes de agua que escurren en ríos grandes o de respuesta rápida son de gran ayuda para la planeación de diversas actividades, así como también pueden proporcionar valiosa información que es de gran utilidad en diferentes estudios. Rodríguez *et al.*, (2010) modelaron el proceso lluvia-escurrimiento con la utilización del software HEC-HMS en la cuenca del Río Reno, localizado en la región Emilia Romagna, Italia. El modelo se ajustó a las necesidades de la cuenca y fue capaz de simular eventos de escurrimientos máximos independientes y gastos pico que superen los 350 m<sup>3</sup>/s con un error por abajo del 10%.

En ese mismo sentido, Gaytan *et al.*, (2008) mencionan que el modelo HEC-HMS permite la simulación de las condiciones naturales y modificadas de la zona de estudio, cuantificando los principales procesos del ciclo hidrológico. Por su parte, Myo y Zin (2019), evaluaron el clima futuro en la región de Bago, Birmania y sus impactos en el escurrimiento de la cuenca de Bago. Aplicando el modelo HEC-HMS, tomando como datos de entrada a la pérdida inicial y constante y el número de curva (CN) del SCS, las simulaciones de la escorrentía fueron utilizados para generar escenarios de cambio climático.

Por lo anterior, la simulación numérica del escurrimiento superficial es aplicada en casi todo el mundo, utilizando el modelo numérico semidistribuido HEC-HMS. En Estados Unidos de América con el trabajo de Chu y Stenman (2009) que seleccionaron cuatro eventos de lluvia en una cuenca hidrológica localizada al oeste de Michigan para la calibración / verificación del modelo por eventos de precipitación y datos continuos de precipitación, así como la identificación de los parámetros del modelo, usando el método de Uso de Conservación de Suelos de Número de Curva, ellos encontraron que el modelo funciona y se acopla a la interpretación tanto de tiempos cortos como largos.

En la India con el trabajo de Halwatura y Najjim (2013) que compararon los métodos del hidrograma unitario Snyder, con el método de la unidad Clark hidrograma y el método de Uso de Conservación de Suelos de Número de Curva, en un cuenca hidrográfica tropical (cuenca del Río Attanagalu Oya), ellos en sus resultados encontraron que el método de la unidad hidrograma Snyder simula los flujos más fiables que el método del hidrograma unitario de Clark y que el método Uso de Conservación de Suelos Número de Curva no funciona bien.

Otro estudio en la simulación numérica del escurrimiento superficial, fue el aplicado en el país Turquía por Yener *et al.*, (2012), en el cual, usaron el modelo HEC-HMS y su estudio constó de dos elementos importantes: por hora simulaciones basadas en eventos de precipitación y escenarios de escorrentía utilizando curvas de intensidad-duración-frecuencia, ellos usaron los valores de escorrentía simulados para el control de inundaciones y daños de la inundación estudios de estimación.

Por otro lado, Arekhi (2012) realizó un estudio en la cuenca hidrológica Kan, Irán, uso del modelo HEC-HMS con los diferentes métodos para la evaluación de las pérdidas por escorrentía (Green y Ampt; tasa de pérdida inicial y constante; déficit y tasa de pérdida constante) y encontró que el mejor ajuste fue el de tasa de pérdida inicial y constante. Majidi y Shahedi (2012) que también utilizaron el modelo HEC-HMS en una cuenca hidrológica al sur de Irán para simular el proceso lluvia-escorrentía, para calcular la infiltración, la lluvia en exceso, conversión de la escorrentía y la guía del flujo, los métodos que utilizaron fueron los de Green-Ampt, Unidad SCS hidrógrafo y el enrutamiento de Muskingum. La simulación se realizó con cinco eventos de tormenta. Sus resultados iniciales mostraron que hay una clara diferencia entre los caudales máximos observados y simulados, concluyendo que el modelo se puede utilizar con aproximación razonable en simulación hidrológica.

Oloche y Zhi-jia (2010) realizaron un estudio de cuenca hidrológica en China como una aplicación integral de HEC-HMS. Ellos principalmente examinaron su aplicabilidad, la capacidad y la idoneidad para el pronóstico de inundaciones en las cuencas. Utilizaron los modelos de elevación digital de las áreas de estudio con ayuda de ArcView Gis para la delimitación de la cuenca y el procesamiento de la cuenca. El modelo lo calibraron y verificaron utilizando los datos observados históricos. Los coeficientes de determinación y los coeficientes de acuerdo para todos los eventos de inundación estaban por encima del 90% y los errores relativos en los caudales máximos se encontraron dentro del rango aceptable. Con un error por debajo del 10%. En el mismo sentido Rodríguez (2010), obtuvo un modelo lluvia-escurrimiento semidistribuido a escala de evento de lluvia en la cuenca del río Reno, Italia. Para ello utilizó, entre otros, el software HEC-HMS para la simulación hidrológica del proceso, donde el modelo logra reproducir eventos de gastos máximos independientes que superan los 350 m<sup>3</sup>/s.

En estudios de modelación hidrológica para México, por ejemplo, Juárez *et al.*, (2009), analizaron en un periodo de tiempo determinado, si la cuenca del Río Huehuetán en Chiapas había sufrido cambios de uso de suelo importantes, para ello utilizaron el modelo hidrológico HEC-HMS, ya que este modelo considera los factores fisiográficos y vegetación. Con los resultados obtenidos determinaron que los escurrimientos máximos analizados en diferentes años con un margen relativamente separado entre ambos no presentaron diferencias significativas, lo que indicó que la cuenca del Río Huehuetán se encontraba en un buen estado de conservación. Por su parte Pérez-Sesma *et al.*, (2012) utilizaron dos modelos de lluvia-escurrimiento, el Hidrograma Unitario Instantáneo (HUI) y el Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS), para simular los escurrimientos generados por el huracán Karl en el año 2010 en las cuencas del Río La Antigua y Río Jamapa, concluyendo que ambos modelos simularon bien los escurrimientos máximos observados en las estaciones hidrométricas El Tejar y Paso del Toro.

Además de la modelación numérica, también son relevantes las herramientas informáticas de última generación toman auge para la realización de este tipo de estudios mediante la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y modelos de simulación hidrológica como el HEC-HMS (Rodríguez *et al.* 2010). La utilidad de los SIG para manejar grandes cantidades de información y atributos espaciales simultáneamente se vuelve su principal fortaleza, así lo menciona Arekhi *et al.*, (2021) son de gran ayuda en el desarrollo de escenarios controlados y facilitar la interpretación de la información con una alta resolución, facilitando la toma de decisiones en cuanto al manejo y administración de recursos naturales.

### 3.2 Lugar de Estudio

La cuenca del río Jamapa es parte de la región hidrológica-administrativa Núm. 28 que lleva el nombre de Papaloapan, la cual en mayor medida se encuentra dentro de la entidad veracruzana en su porción centro-sur, así como en pequeñas proporciones del sureste de Puebla y oriente de Oaxaca, como lo muestra la figura 1.



Figura 3. Región Hidrológica-Administrativa Núm. 28 “Papaloapan” y cuenca del Río Jamapa, INEGI (SIATL 2022). Imagen propia, elaborada con Esri Inc. 10.3.

#### 3.2.1 Hidrometría.

Los dos afluentes principales del río Jamapa cuentan con una estación hidrométrica ubicada en la parte baja de cada uno de los afluentes, sobre el río Jamapa se encuentra la estación hidrométrica El Tejar y sobre el río Cotaxtla se encuentra la estación hidrométrica Paso del Toro, de estas dos estaciones hidrométricas se tomarán datos de gastos para determinar los eventos de precipitación.

La estación hidrométrica “El Tejar” se ubica en la parte baja del Río Jamapa, esta estación refleja la influencia de la lluvia por medio del escurrimiento dentro de la subcuenca

que lleva el nombre de Río Jamapa. La estación hidrométrica “Paso del Toro” se ubica en la parte baja del Río Cotaxtla perteneciente a la subcuenca con el mismo nombre.

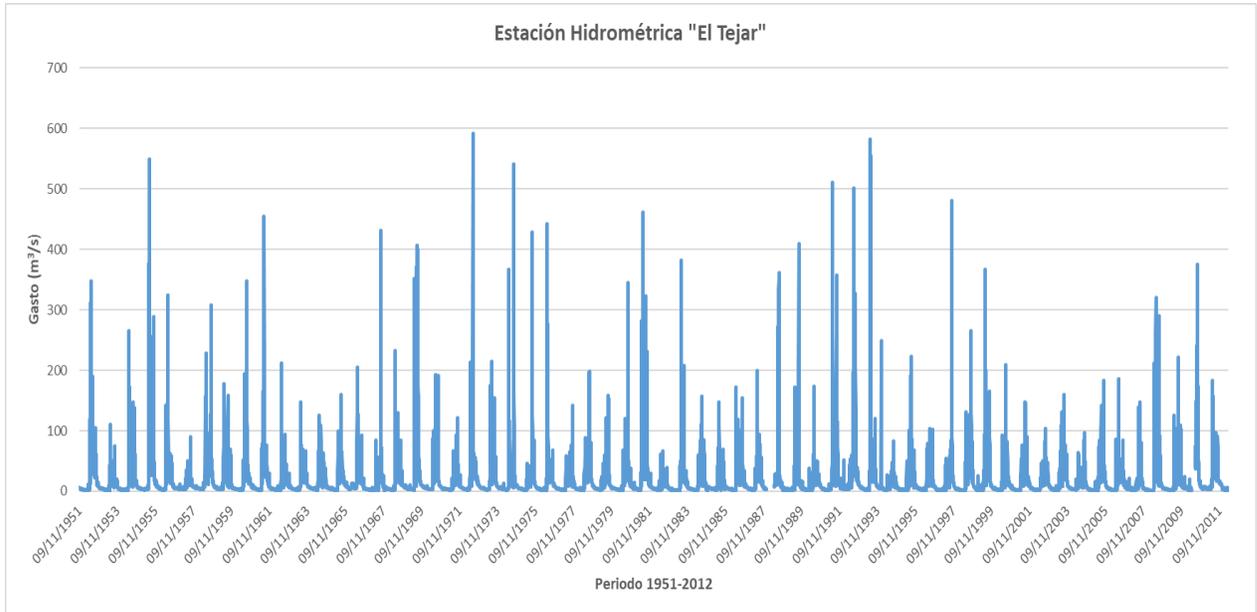


Figura 4. Registros diarios de gastos en  $m^3/s$  de la estación hidrométrica “El Tejar”, periodo noviembre 1951 - abril 2012. Datos obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales de CONAGUA.

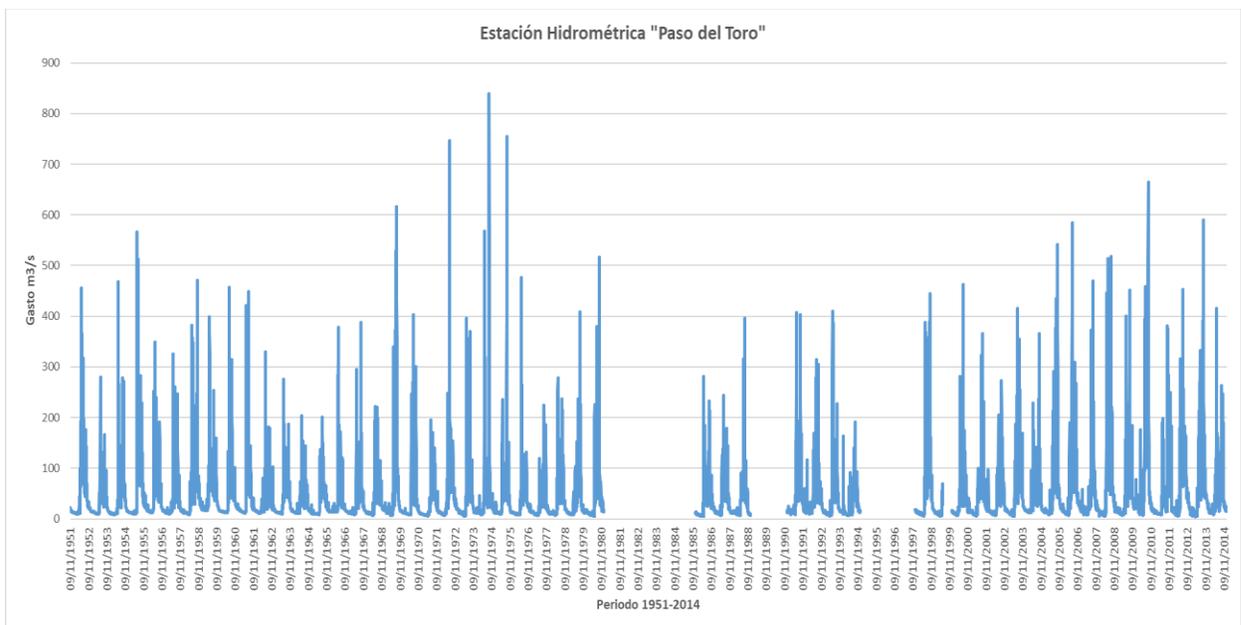


Figura 5. Registros diarios de gastos en  $m^3/s$  de la estación hidrométrica “Paso del Toro”, periodo noviembre 1951 - diciembre 2014. Datos obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales de CONAGUA.

### 3.2.2 Edafología

Para este trabajo es importante calcular el número de curva (CN, por sus siglas en inglés) de la cuenca, debido a que el modelo hidrológico que se utilizó es muy sensible a este parámetro, el cual indica que tan permeable o impermeable es la cuenca.

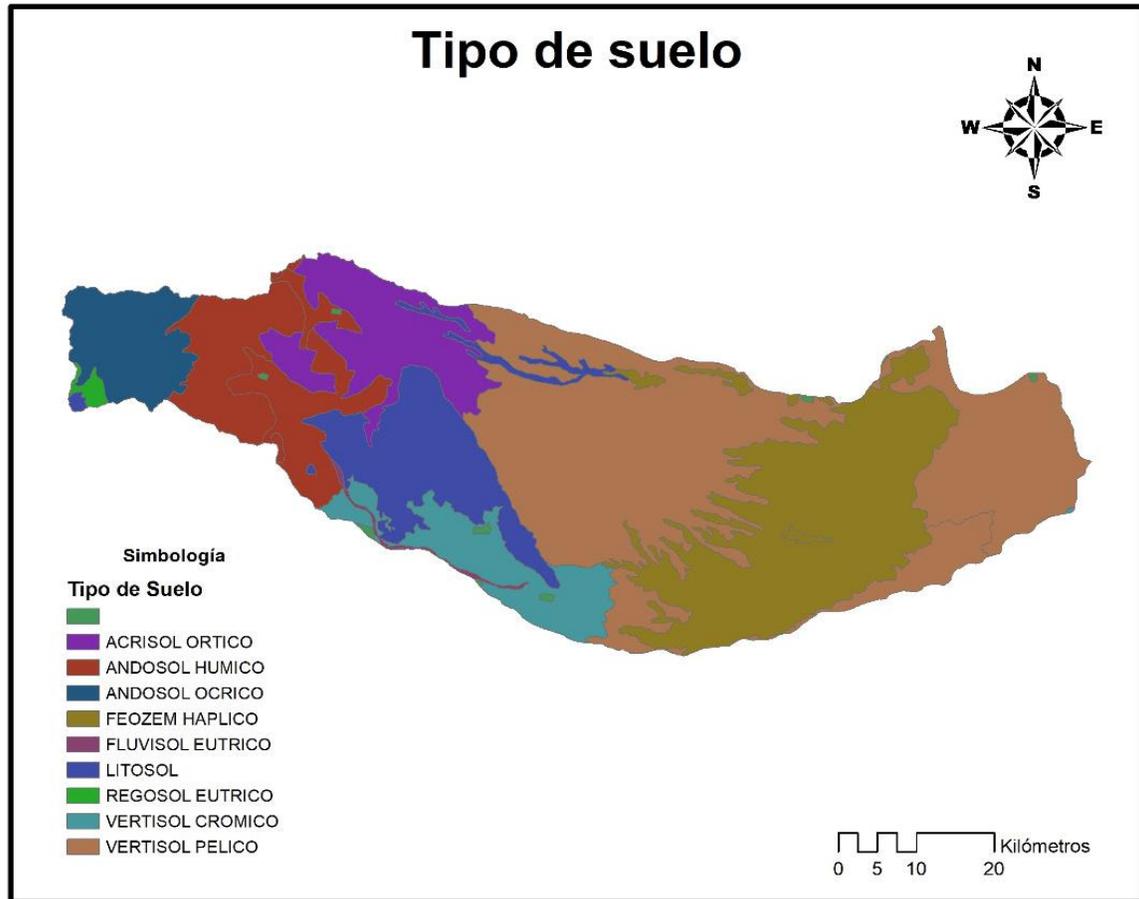


Figura 6. Mapa de distribución espacial de los tipos de suelo dentro la cuenca del Río Jamapa, realizado a partir de conjuntos de datos vectoriales de la serie I de INEGI y Esri Inc. 10.3. Modificado del INEGI.

### 3.2.3 Uso de Suelo y Vegetación

De igual manera el uso de suelo y la vegetación deben ser tomados en cuenta para la estimación del parámetro número de curva (CN), el cual fue creado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (CN-USSCS, por sus siglas en inglés).

Los cambios antropogénicos en el uso de suelo y la cobertura vegetal han sido factores de gran interés en la modelación hidrológica (Koneti *et al.*, 2018). Tal como lo sostiene Castillo

(2019) al indicar que los procesos de cambio de uso de suelo son los factores principales que influyen directamente en la generación de crecientes dentro de una cuenca.

Ortíz (2018) argumentó que la actividad antrópica a lo largo de la cuenca del Río Jamapa a propiciado el incremento de las zonas agropecuarias y urbanas en detrimento de las coberturas vegetales primarias, reduciéndolas. Así mismo, demostró que el cambio en las coberturas vegetales pueden modificar positiva o negativamente los servicios ambientales que estas ofrecen en una cuenca hidrológica.

### **3.3 Vacío del conocimiento**

La cuenca del Río Jamapa es susceptible a los efectos que generan los fenómenos meteorológicos de escala sinóptica, como lo son los ciclones tropicales, pues es el río principal de la cuenca en el Golfo de México sobre la costa central del Estado de Veracruz. Dichos sistemas ciclónicos aportan grandes cantidades de agua en forma de lluvia al interior del estado de Veracruz y que en función a la trayectoria que estos presenten, dichas cantidades de lluvia pueden precipitar sobre la cuenca del Río Jamapa, que es la zona de estudio en esta investigación.

De acuerdo a la literatura consultada para esta investigación, actualmente existen pocos estudios sobre los escurrimientos asociados a lluvias intensas que causan inundaciones en la parte baja de la cuenca del Río Jamapa que hayan sido realizados con el objetivo de crear sistemas de alerta temprana ante dichos eventos y con ello disminuir el riesgo de afectaciones a la población.

La modelación hidrológica es una herramienta que genera conocimiento sobre el sistema hídrico de la cuenca del Río Jamapa, una de las aplicaciones es que puede dar soporte a la toma de decisiones sobre las acciones de gestión integral del recurso hídrico.

### **3.4 Frontera del conocimiento**

Generar nuevos conocimientos sobre los volúmenes de escurrimiento del Río Jamapa a partir de la aplicación del modelo de lluvia-escurrimiento HEC-HMS y la relación con inundaciones en zonas urbanas y agrícolas, dará paso a la planeación de sistemas que alerten con suficiente tiempo de antelación ante eventos hidrometeorológicos extremos, así como también proporcionará información importante para la realización de estudios afines a la disponibilidad de agua y sedimentos transportados por el afluente en sus escurrimientos, así como una gestión óptima del recurso hídrico.

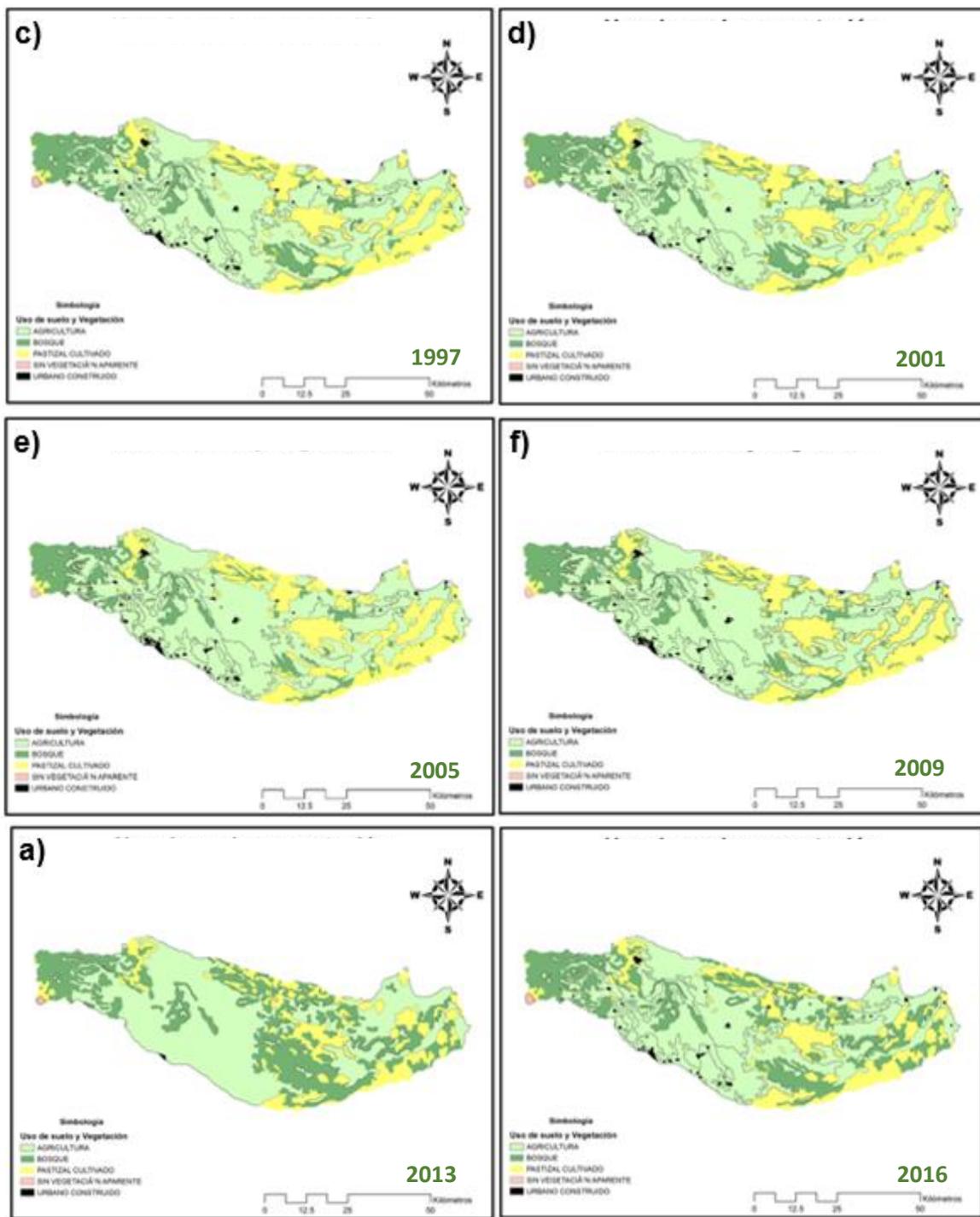


Figura 7. Modificaciones del uso de suelo y vegetación dentro de la cuenca del Río Jamapa, realizado a partir de conjuntos de datos vectoriales de las series I (a), II (b), III (c), IV (d), VI (e) y VI (f) del INEGI y Esri Inc 10.3. Donde el color verde claro es agricultura, verde oscuro es bosque, amarillo es pastizal cultivado, rosa sin vegetación aparente, negro urbano construido, elaboración propia.

## 4. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 4.1 Situación Problemática

La problemática asociada a las avenidas que provocan afectaciones es compleja, puesto que intervienen numerosos factores entre los cuales se encuentran la magnitud de los escurrimientos y localización de las poblaciones, las obras hidráulicas y la actividad antropogénica en las zonas estudiadas y las características fisiográficas de la cuenca (Fig. 2). La posibilidad de contar con modelos que reproduzcan el comportamiento de las cuencas hidrográficas ante la ocurrencia de lluvias intensas que provocan inundaciones es de suma importancia, ya que pueden predecirse las afectaciones en el sector socioeconómico de la zona en estudio, como por ejemplo en el sector de la agricultura (Rodríguez, *et al*, 2010).

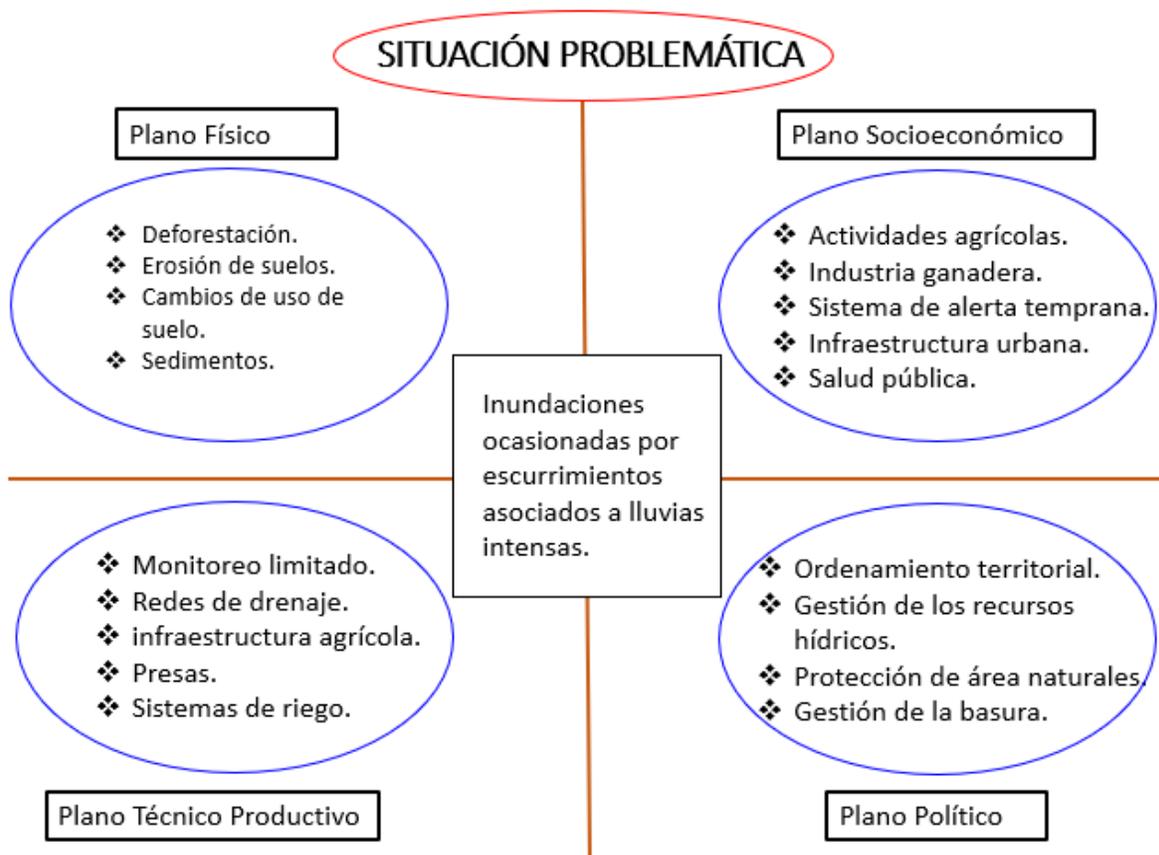


Figura 8. Representación esquemática de los planos socioeconómico, tecnológico, político, y económico de la situación problemática del sistema "Cuenca del Río Jamapa". Elaboración propia.

## 4.2 Delimitación del problema

La modelación hidrológica del proceso lluvia-escorrentía en la cuenca del Río Jamapa se realizó utilizando el modelo HEC-HMS versión 4.7.1, el cual permite reproducir de manera aceptable eventos de escorrentías máximas generados por lluvias intensas ocurridas en 24 horas dentro de la cuenca. Para caracterizar el régimen de caudales máximos en la cuenca a través de la modelación hidrológica, se calcularon los parámetros de entrada al modelo, como son: el tamaño de la cuenca, la pendiente, tipos de suelo, uso de suelo y vegetación, estos últimos con ayuda del software ArcGIS de Esri Inc. 10.3; además, se tomaron en cuenta los gastos máximos ( $m^3/s$ ) registrados en las estaciones hidrológicas de Paso del Toro y El Tejar ubicadas en la parte baja de la cuenca de la serie de tiempo 1952 - 2014, así como la lluvia registrada en la mayor cantidad de estaciones climatológicas posibles durante el evento asociado a los escorrentías máximas.

## 4.3 Planteamiento del problema

Ante un evento de lluvia intensa que se presenta en algún punto de la cuenca del río Jamapa, los escorrentías superficiales son la respuesta principal ante dicho evento (Pérez-Sesma *et al.*, 2012).

Ante escorrentías de grandes volúmenes de agua en el Río Jamapa, trae como consecuencia desbordamiento de afluente e inundaciones en zonas urbanas y agrícolas especialmente en zonas medias y bajas de la cuenca. El caso más relevante en la actualidad, son los escorrentías asociados con las lluvias intensas ocasionadas por el huracán Karl en el año 2010 (Pérez-Sesma *et al.*, 2012).

Si no se cuenta con monitoreo constante del comportamiento del nivel del río, así como de un sistema de alerta temprana que pueda ayudar en la prevención ante una amenaza por algún fenómeno hidrometeorológico, será más difícil poder diseñar planes de respuesta ante eventos de inundaciones.

## 4.4 Justificación

La ocurrencia de eventos de lluvias intensas (tormentas) sobre las partes altas de una cuenca, suponen incrementos repentinos en la escorrentía del cauce, que en algunos casos ocasionan inundaciones sobre las partes bajas (Yuan *et al.*, 2019). Las lluvias intensas generan grandes volúmenes de escorrentía en corto tiempo provocando, desbordamientos de ríos e inundaciones (Castillo y Marín 2011).

Las inundaciones que ocurren en zonas bajas de la cuenca del Río Jamapa se deben en algunos casos a escurrimientos superficiales generados por eventos de lluvias intensas, al tiempo de duración de las mismas y en las zonas en que éstas se presentan (Pérez *et al.*, 2012). El régimen hidrológico es un factor de control que marca las pautas de cambio de los ecosistemas (Lanza *et al.*, 2012).

Por lo que, de acuerdo con Castillo (2017) la modelación hidrológica de avenidas es de gran ayuda para desarrollar sistemas de alerta temprana ante inundaciones, reduciendo los riesgos asociados a dichos eventos. Es decir, con los modelos hidrológicos es posible simular los procesos de lluvia-escurrimiento, realizar el análisis y la prevención de las afectaciones que generarían grandes volúmenes de escurrimiento como las inundaciones. Con estos modelos también es posible plantear hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan cierto grado de confianza para tomarla en cuenta en la toma de decisiones en el ordenamiento territorial en torno a los ríos o para tomar en cuenta en los criterios para el diseño óptimo de obras e infraestructuras enfocadas a la seguridad contra desastres naturales o situaciones de emergencia (Díaz-Gutiérrez, 2018).

Sin embargo, la modelación hidrológica en México, con fines de predicción de avenidas ha sido escasamente utilizada como herramienta operativa que coadyuve a la toma de decisiones para reducir posibles daños por eventos meteorológicos extremos y para la creación de sistemas de alerta temprana en el ámbito de protección civil que ayude a salvaguardar la integridad de la población (Pérez-Luna, 2015).

Por lo que, se considera indispensable el análisis hidrológico para desarrollar estudios hidráulicos como la construcción de flujos de aguas y la evaluación de la amenaza por inundación en zonas urbanas (Valencia y Guevara, 2014). La generación de energía eléctrica y el control de avenidas (Aparicio, 2008). Tal como ocurre con eventos de inundación en zonas bajas de la cuenca del Río Jamapa asociadas a escurrimientos superficiales generados por lluvias intensas (Pérez-Sesma *et al.*, 2012). Por ello, es necesario realizar una caracterización de la distribución espacio-temporal de la lluvia dentro de la cuenca, considerando sus características fisiográficas, entre otros. De modo que, el régimen hidrológico es un factor de control del flujo de agua superficial y marca las pautas de cambio de los ecosistemas (Lanza *et al.*, 2012).

Las problemáticas asociadas a las avenidas de lluvias intensas han provocado afectaciones a las poblaciones por desbordamientos de ríos como: inundaciones en zonas urbanas y agrícolas especialmente en zonas medias y bajas de la cuenca, como fue con el huracán Karl ocurrido en el 2010 (Pérez-Sesma *et al.*, 2012).

Al tener conocimiento del comportamiento se pueden predecir y evitar afectaciones al sector socioeconómico de la zona en estudio, como, el sector de la agricultura (Rodríguez, 2010). Por lo anterior, es necesario caracterizar el régimen hidrológico del proceso lluvia-escorrentía de la cuenca del río Jamapa, el cual ayudará a planear la gestión sustentable del recurso hídrico.

#### **4.5 Pregunta de investigación**

¿Cómo es el patrón hidrológico del proceso lluvia-escorrentía que caracteriza a la cuenca del Río Jamapa ante eventos de lluvias intensas?

## **5. HIPÓTESIS**

A partir del análisis de los escurrimientos asociados a lluvias intensas, se podría caracterizar el patrón hidrológico del proceso lluvia-escurrimiento de la cuenca del Río Jamapa.

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1 General**

Caracterizar el patrón hidrológico del proceso lluvia-escurrimiento con eventos de lluvias intensas ocurridas en la cuenca del Río Jamapa entre los años 1952 y 2014, utilizando un sistema de modelado hidrológico que tome en cuenta las características fisiográficas de la cuenca.

### **6.2 Particulares**

- 1.- Analizar registros de gastos máximos y lluvia acumulada diaria de la cuenca del Río Jamapa en la serie de tiempo del año 1952 al 2014.
- 2.- Estimar los parámetros de entrada que se requieren para la modelación con HEC-HMS.
- 3.- Obtener el ajuste adecuado del modelo HEC-HMS que ayude a simular escurrimientos máximos para la cuenca del Río Jamapa.

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Área de estudio

La cuenca del Río Jamapa se localiza sobre la zona central del estado de Veracruz, entre los 18° 45' y 19° 14' latitud norte y 95° 56' y 97° 17' longitud oeste (CONAGUA, 2005). Tiene un área aproximada de 3,912 km<sup>2</sup>, distribuida totalmente dentro del estado de Veracruz (Fig. 7). El Río Jamapa lo forman dos corrientes secundarias, una lleva el nombre de Río Jamapa y otra Cotaxtla. Ambas confluyen casi a la salida de la cuenca. El río Cotaxtla drena un área de 1,679 km<sup>2</sup>, y nace a una elevación de 5,700 m en una zona limítrofe de los estados de Puebla y Veracruz, con el nombre de río Barranca de Chocomán (Pereyra *et al.*, 2010).

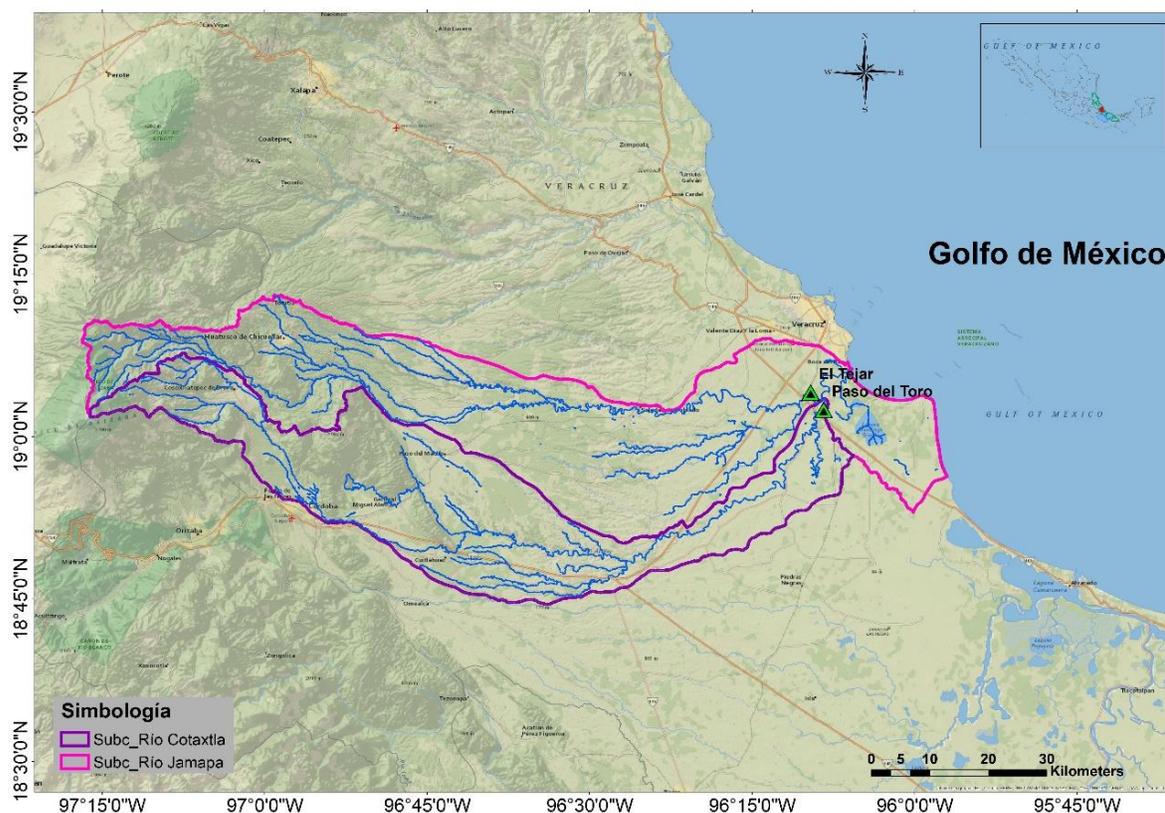


Figura 9. Ubicación de las subcuencas Jamapa y Cotaxtla que conforman a la cuenca del Río Jamapa, además, la localización de las estaciones hidrométricas El Tejar y Paso del Toro. INEGI (SIATL 2022). Imagen propia, elaborada con Esri Inc. 10.3.

### 7.2 Información hidrométrica

Para la realización de este trabajo fue necesario contar con una base de datos de gastos diarios (m<sup>3</sup>/s) para el periodo de 1952 a 2014 de las estaciones hidrométricas El Tejar y Paso del Toro, las cuales se obtuvieron del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de la CONAGUA (2021).

### 7.3 Información pluviométrica

Para el análisis de la lluvia se utilizó información de 45 estaciones climatológicas convencionales distribuidas dentro de la cuenca y cercanas a ella (Figura 8).

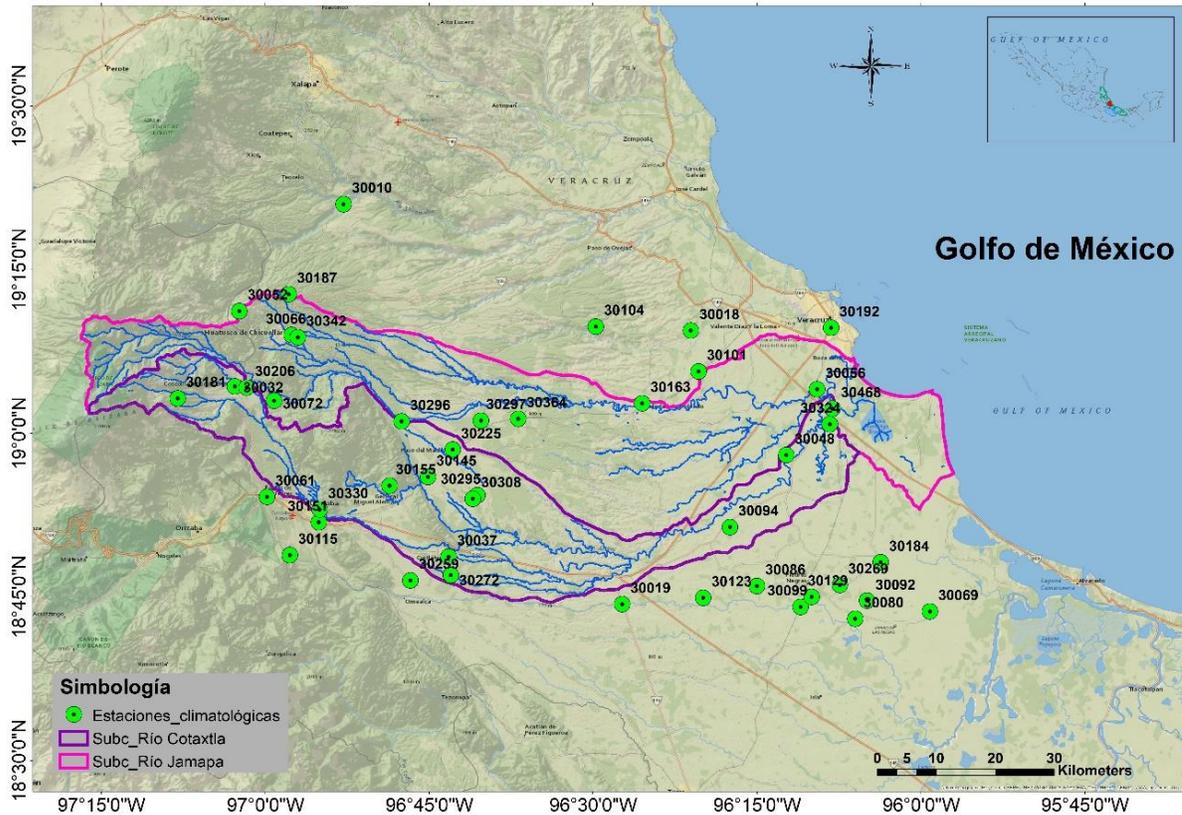


Figura 10. Localización de las estaciones climatológicas dentro y cercanas a la cuenca del Río Jamapa. INEGI (SIATL, 2022). Imagen propia, elaborada con Esri Inc. 10.3.

Dichas estaciones climatológicas cuentan con registros diarios de lluvia acumulada en 24 horas (cuadro 1), mismas que una parte de ellas se obtuvieron de la base de datos climatológicos disponible en el portal web del Servicio Meteorológico Nacional y otras proporcionadas por el departamento de Hidrometeorología del Organismo de Cuenca Golfo Centro de la CONAGUA, la cual en algunos casos cuenta con información de 1920 a 2020, sin embargo, sólo se tomó en cuenta el periodo de los datos de gastos diarios.

Cuadro 1. Estaciones climatológicas convencionales dentro y fuera de la cuenca del Río Jamapa.

| Estación | Nombre                   | Municipio               | Latitud | Longitud |
|----------|--------------------------|-------------------------|---------|----------|
| 30155    | Santa Anita              | Atoyac                  | 18.920  | -96.810  |
| 30364    | Villa de Tejeda          | Camaron de Tejeda       | 19.022  | -96.614  |
| 30151    | San Miguelito            | Cordoba                 | 18.864  | -96.918  |
| 30330    | Heroica Cordoba (SMN)    | Cordoba                 | 18.883  | -96.917  |
| 30032    | Coscomatepec (SMN)       | Coscomatepec            | 19.072  | -97.046  |
| 30206    | Coscomatepec (DGE)       | Coscomatepec            | 19.070  | -97.028  |
| 30181    | Tetelzingo               | Coscomatepec            | 19.053  | -97.133  |
| 30094    | Los Capulines            | Cotaxtla                | 18.857  | -96.291  |
| 30019    | Camelpo                  | Cotaxtla                | 18.739  | -96.456  |
| 30037    | Cuitláhuac               | Cuitláhuac              | 18.811  | -96.720  |
| 30272    | Paso Nacional            | Cuitláhuac              | 18.783  | -96.717  |
| 30259    | San José de Abajo        | Cuitláhuac              | 18.775  | -96.778  |
| 30115    | Naranjal (CFE)           | Fortín                  | 18.814  | -96.962  |
| 30061    | Fortín de las Flores     | Fortín                  | 18.903  | -96.997  |
| 30066    | Huatusco de Chicuellar   | Huatusco                | 19.150  | -96.960  |
| 30052    | Elotepec (CFE)           | Huatusco                | 19.187  | -97.039  |
| 30342    | Centro Regional Huatusco | Huatusco                | 19.147  | -96.950  |
| 30069    | Ignacio de la LLave      | Ignacio de la LLave     | 18.728  | -95.986  |
| 30072    | Ixhuatlán del Café       | Ixhuatlán del Café      | 19.050  | -96.986  |
| 30101    | Manlio Fabio Altamirano  | Manlio Fabio Altamirano | 19.094  | -96.339  |
| 30018    | El Buzón                 | Manlio Fabio Altamirano | 19.157  | -96.351  |
| 30056    | El Tejar                 | Medellín                | 19.067  | -96.158  |
| 30048    | El Copital               | Medellín                | 18.967  | -96.205  |
| 30324    | La Posta                 | Medellín                | 19.014  | -96.139  |
| 30468    | Paso del Toro            | Medellín                | 19.038  | -96.135  |
| 30120    | Orizaba (Obs)            | Orizaba                 | 18.999  | -97.098  |
| 30225    | Paso del Macho           | Paso del Macho          | 18.975  | -96.714  |
| 30104    | Mata Anona               | Paso del Macho          | 19.163  | -96.496  |

|       |                          |                    |        |         |
|-------|--------------------------|--------------------|--------|---------|
| 30145 | San Alejo                | Paso del Macho     | 18.933 | -96.752 |
| 30295 | Campamento Progreso      | Paso del Macho     | 18.905 | -96.676 |
| 30296 | Ejido La Defensa         | Paso del Macho     | 19.018 | -96.792 |
| 30297 | Ejido Mata de Varas      | Paso del Macho     | 19.019 | -96.671 |
| 30308 | Ingenio Central Progreso | Paso del Macho     | 18.900 | -96.683 |
| 30163 | Soledad de Doblado       | Soledad de Doblado | 19.046 | -96.425 |
| 30080 | Río Blanco               | Tlalixcoyan        | 18.717 | -96.100 |
| 30184 | Tlalixcoyan              | Tlalixcoyan        | 18.803 | -96.061 |
| 30099 | Madereros                | Tlalixcoyan        | 18.735 | -96.183 |
| 30092 | Las Vigas                | Tlalixcoyan        | 18.744 | -96.082 |
| 30123 | Palo Gacho               | Tlalixcoyan        | 18.749 | -96.332 |
| 30086 | La Victoria              | Tlalixcoyan        | 18.767 | -96.250 |
| 30269 | El Zapote                | Tlalixcoyan        | 18.768 | -96.123 |
| 30129 | Piedras Negras           | Tlalixcoyan        | 18.750 | -96.167 |
| 30010 | Amatitlán (CFE)          | Tlalixcoyan        | 19.350 | -96.880 |
| 30187 | Totutla                  | Totutla            | 19.213 | -96.964 |
| 30192 | Veracruz (OBS)           | Veracruz           | 19.161 | -96.137 |

De las estaciones hidrométricas se seleccionaron los escurrimientos máximos más relevantes que se presentaron en la serie de tiempo 1952 - 2014 y que además dispusieran de registros de lluvia acumulada en 24 horas en las estaciones meteorológicas. Con el fin de contar con la mayor cantidad de información para este análisis. Posteriormente se identificaron los eventos de lluvias intensas asociadas a los escurrimientos máximos. Se utilizaron las estaciones climatológicas que se encuentran dentro de las subcuencas, inclusive algunas que fuera de ellas, pero cercanas y que serán de gran utilidad para el análisis. Para lo anterior, fue necesario hacer una meticulosa selección de la información de la que disponen las bases de datos, con el fin de que las tormentas seleccionadas cuenten con una información completa y de calidad.

Después del análisis estadístico se realizaron tablas, gráficas de los resultados y mapas de distribución espacial-temporal de la lluvia (mapas de isoyetas). La información oficial de climatológica e hidrométrica se obtuvo de la página oficial de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que se presenta disponible de manera pública, de la cual se capturó, depuró

y analizó la información. Así ya no fue necesario llevar a cabo campañas de medición como trabajo de laboratorio.

## **7.4 Análisis de la lluvia media en la cuenca**

La lluvia media generada por una tormenta o evento de lluvia intensa dentro de una cuenca puede ser estimada por medio de tres métodos de uso generalizado, los cuales son: aritmético, polígonos de Thiessen e Isoyetas, los cuales se describen a continuación.

### **7.4.1 Método aritmético**

Este método consiste en sumar los datos de lluvia registrada de las estaciones disponibles y dividir la sumatoria entre el número de estaciones. En este método, la distribución espacial de las estaciones pluviométricas es irrelevante, pues sólo se toma en cuenta el valor numérico de la lluvia, a diferencia de los otros dos métodos (polígonos de Thiessen e Isoyetas), en donde la distribución espacial de las estaciones es determinante para caracterizar el régimen espacial de la precipitación y la influencia que esta tendrá en la respuesta de los escurrimientos dentro de la cuenca y por consiguiente en el incremento de los afluentes (Aparicio, 2008).

### **7.4.2 Polígonos de Thiessen**

Este método es utilizado para estimar la lluvia media en un lugar que cuente con estaciones pluviométricas, tomando en cuenta la distribución espacial de las mismas. Consiste en generar figuras geométricas o polígonos (Figura 9) que representarán el área de influencia de la lluvia para cada estación pluviométrica (Thiessen, 1911).

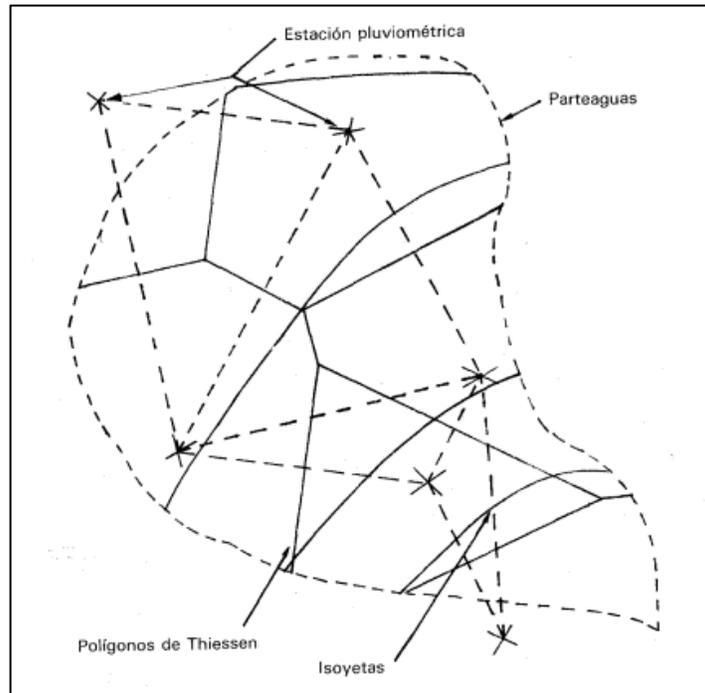


Figura 11. Modelo conceptual del trazado de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 2008).

1. En un plano de la cuenca se unirán mediante líneas rectas discontinuas las estaciones más próximas entre sí, formando triángulos regulares, en cuyos vértices se localizarán las estaciones pluviométricas.
2. Se trazan líneas rectas continuas que dividen los lados de los triángulos, convergiendo éstas en un solo punto.
3. Cada estación pluviométrica queda rodeada por las líneas rectas del paso anterior, estas áreas son los llamados polígonos de Thiessen.
4. La lluvia media se calcula haciendo la sumatoria los registros de precipitación de cada estación multiplicado por su área de influencia o polígono de Thiessen y al final dividir entre el área total de la cuenca, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$h_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi}$$

Donde:  $A_i$  es el área de influencia de la estación  $i$  y  $A_T$  es el área total de la cuenca

### 7.4.3 Método de Isoyetas

Este método es de mayor precisión que los anteriores, porque considera los efectos topográficos en la distribución de la lluvia, sin embargo, también es el más laborioso de los tres, puesto que cada tormenta tiene un plano de isoyetas diferente (Aparicio, 2008).

Consiste en unir mediante líneas los puntos de igual altura de precipitación (Figura 10), similar a como se trazan las curvas de nivel en topografía. Este método es de gran utilidad en superficies irregulares, puesto que ayudan a identificar visualmente los perfiles de precipitación más abundantes (Aparicio, 2008).

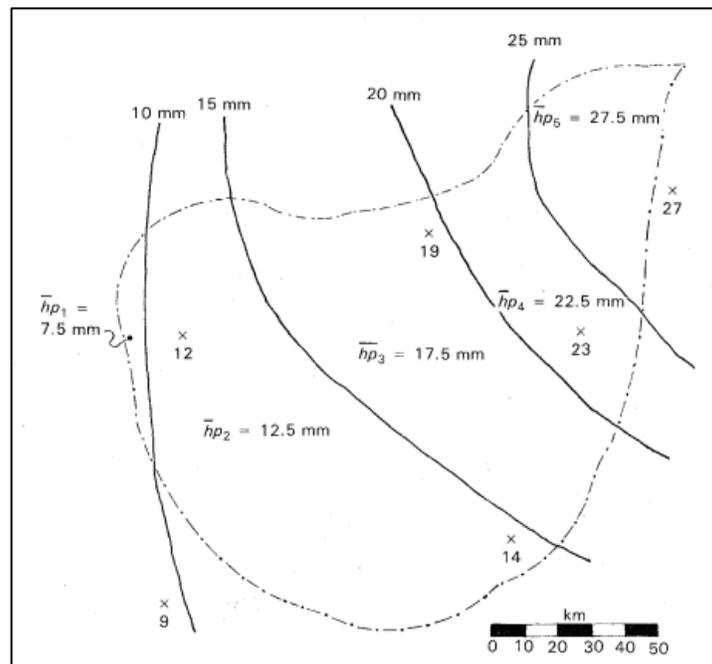


Figura 12. Modelo conceptual del trazo de Isoyetas (Aparicio, 2008).

La precipitación media se calcula de manera similar al del método de Thiessen, pero ahora el peso es el área  $A'_i$  entre cada dos isoyetas y el parteaguas de la cuenca y la cantidad que pesa en es la altura de precipitación promedio entre dos isoyetas,  $\bar{h}_{pi}$ .

$$h_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} (h_{pi} A'_i)$$

Donde:  $n'$  es el número de áreas  $A'$  consideradas.

## **7.5 Parámetros utilizados en la modelación con HEC-HMS**

Feldman (2000), menciona que el HEC-HMS requiere de gran cantidad de información de la zona de estudio, incluyen variables fisiográficas que permiten la caracterización y resultados confiables, que se describen a continuación.

### **7.5.1 Número de Curva**

Este método fue desarrollado por el departamento de agricultura del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (CN-USSCS, por sus siglas en inglés) en 1954 (Villarrolla *et al.*, 2013), en la actualidad dicha institución se conoce con el nombre de Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) (Espinales *et al.*, 2021).

Es un método empírico utilizado para calcular la precipitación efectiva producida por una tormenta en una determinada área, además de ser un parámetro fundamental para la modelación de avenidas máximas, ya que con él se puede estimar el escurrimiento directo generado por una tormenta tomando en cuenta las propiedades fisiográficas de la cuenca.

Para poder estimar el número de curva es necesario conocer las características fisiográficas de la cuenca como lo son tipo de suelo (Cuadro 2), uso de suelo, vegetación y pendiente del terreno (Villarrolla *et al.*, 2013). Dichas características influyen en la pérdida de agua de lluvia al contacto con la superficie del suelo, así como en la velocidad de los escurrimientos sobre la misma. Para ello se tomaron los conjuntos de datos vectoriales de la Carta de Uso de Suelo y Vegetación de la Serie I, adicionalmente, se trabajaron con siete series disponibles por el INEGI a una escala de 1:250,000 (INE-INEGI, 1997; INEGI, 2001; INEGI, 2005; INEGI, 2009; INEGI, 2013). Con estos conjuntos de datos se obtuvo la información de todos los usos de suelo y vegetación que contiene la cuenca del Río Jamapa. Mientras que, para el tipo de suelo se tomó el conjunto de datos vectoriales de la Carta de Tipo de Suelo Serie II, con una escala de 1:250,000 de INEGI (2014).

Cuadro 2. Clasificación del tipo de suelo de acuerdo con el contenido de arcilla. Fuente: Aparicio (2015).

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

Existe una amplia variedad de tablas de asignación del número de curva que consideran el uso de suelo y pendiente del terreno (Villarrolla *et al.*, 2013). En este estudio se utilizará una tabla que además considera el tratamiento del terreno (Cuadro 3).

**Cuadro 3.** Indicadores para el cálculo del número de curva, Aparicio (2008).

| Uso de la tierra y cobertura        |    | Número de Curva (CN)  |                       | Tipo de Suelo |    |    |    |
|-------------------------------------|----|-----------------------|-----------------------|---------------|----|----|----|
|                                     |    | Tratamiento del Suelo | Pendiente del terreno | A             | B  | C  | D  |
| Sin cultivo                         |    | Surcos rectos         | -----                 | 77            | 86 | 91 | 94 |
| Cultivos en surcos                  |    | Surcos rectos         | >1                    | 72            | 81 | 88 | 91 |
|                                     |    | Surcos rectos         | <1                    | 67            | 78 | 85 | 89 |
|                                     |    | Contorneo             | >1                    | 70            | 79 | 84 | 88 |
|                                     |    | Contorneo             | <1                    | 65            | 75 | 82 | 86 |
|                                     |    | Terrazas              | >1                    | 66            | 74 | 80 | 82 |
|                                     |    | Terrazas              | <1                    | 62            | 71 | 78 | 81 |
|                                     |    | Cereales              |                       | Surcos rectos | >1 | 65 | 76 |
| Surcos rectos                       | <1 |                       |                       | 63            | 75 | 83 | 87 |
| Contorneo                           | >1 |                       |                       | 63            | 74 | 82 | 85 |
| Contorneo                           | <1 |                       |                       | 61            | 73 | 81 | 84 |
| Terrazas                            | >1 |                       |                       | 61            | 72 | 79 | 82 |
| Terrazas                            | <1 |                       |                       | 59            | 70 | 78 | 81 |
| Leguminosas o praderas con rotación |    |                       |                       | Surcos rectos | >1 | 66 | 77 |
|                                     |    | Surcos rectos         | <1                    | 58            | 72 | 81 | 85 |
|                                     |    | Contorneo             | >1                    | 64            | 75 | 83 | 85 |
|                                     |    | Contorneo             | <1                    | 55            | 69 | 78 | 83 |
|                                     |    | Terrazas              | >1                    | 63            | 73 | 80 | 83 |
|                                     |    | Terrazas              | <1                    | 51            | 67 | 76 | 80 |
|                                     |    | Pastizales            |                       | -----         | >1 | 68 | 79 |
| -----                               | <1 |                       |                       | 39            | 61 | 74 | 80 |
| Contorneo                           | >1 |                       |                       | 47            | 67 | 81 | 88 |
| Contorneo                           | <1 |                       |                       | 6             | 35 | 70 | 79 |
| Pradera permanente                  |    | -----                 | <1                    | 30            | 58 | 71 | 78 |
| Bosques naturales                   |    | Muy ralo              | -----                 | 56            | 75 | 86 | 91 |
|                                     |    | Ralo                  | -----                 | 46            | 38 | 78 | 84 |
|                                     |    | Normal                | -----                 | 36            | 60 | 70 | 77 |
|                                     |    | Espeso                | -----                 | 26            | 52 | 62 | 69 |
|                                     |    | Muy espeso            | -----                 | 15            | 44 | 54 | 61 |
| Caminos                             |    | De terracería         | -----                 | 72            | 82 | 87 | 89 |
|                                     |    | Con superficie dura   | -----                 | 74            | 84 | 90 | 92 |

Para la modelación hidrológica se utilizó el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center Hidrologic Modeling System) versión 4.7.1 de acceso libre en internet, es un modelo hidrológico semi-distribuido, para simular los procesos de lluvia-escorrentía en los sistemas de cuencas dendríticas. Este modelo tiene la capacidad de reproducir hidrogramas a partir de datos observados (escorrentías máximas y tiempos pico de una o varias cuencas asociadas a lluvias intensas. Este modelo ha permitido obtener resultados positivos en varios estudios hidrológicos en México y el mundo (p. eje. Rodríguez, 2010; Pérez, 2015; Pereyra, 2016 y Lunagomez, 2018).

### 7.5.2 Tiempo de Retardo ( $T_r$ )

El tiempo de retardo ( $T_r$ ) es una variable necesaria para alimentar el modelo de número de curva en HEC-HMS que se considera como un 60% del tiempo de concentración ( $T_c$ ). El tiempo de recesión se obtiene a partir de los valores de la pendiente ( $S$ ) de la zona de estudio obtenida solamente a partir de la diferencia de elevación entre el punto más alto (H), cercano al nacimiento del Río Jamapa y el punto más bajo (donde se encuentran localizadas las estaciones hidrométricas). El otro valor requerido es longitud ( $L$ ) del Río Jamapa desde el punto donde nace en la parte alta de la zona de estudio, hasta su salida identificada en las estaciones hidrométricas. En conjunto con esta información, fue obtenido el tiempo de retardo con las ecuaciones siguientes (2 y 3).

$$T_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2)$$

$$T_r = 0.6 * T_c \quad (3)$$

### 7.5.3 Abstracción Inicial

La abstracción inicial se obtiene a partir del número de curva, el cual depende del tipo de suelo y su clasificación en función de su permeabilidad como se mencionó anteriormente. Por lo que, la ecuación siguiente, se utilizó para el cálculo de la abstracción inicial:

$$P_0 = 0.2 \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right) \quad (4)$$

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Se identificaron 349 hidrogramas de escurrimientos máximos en el periodo de 1952 al 2014 registrados en las estaciones hidrométricas El Tejar y Paso del Toro. Mediante un proceso de depuración se eligieron diez eventos de precipitaciones intensas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Eventos de precipitación ocurridos en la cuenca del Río Jamapa.

| Eventos de tormenta | Fecha                                  |
|---------------------|--|
| 1                   | Del 23 al 30 de julio de 1973          |
| 2                   | Del 25 de junio al 02 de julio de 1976 |
| 3                   | Del 22 al 28 de octubre de 1977        |
| 4                   | Del 06 al 12 de septiembre de 1978     |
| 5                   | Del 21 al 26 de septiembre de 1978     |
| 6                   | Del 22 al 29 de septiembre de 1980     |
| 7                   | Del 23 al 28 de junio de 1981          |
| 8                   | Del 11 al 17 de julio de 1981          |
| 9                   | Del 05 al 12 de septiembre de 2008     |
| 10                  | Del 16 al 22 de septiembre de 2010     |

Para la selección de los eventos de precipitación, se consideró que contarán con el mayor número de estaciones climatológicas y que dispusieran de información de lluvia diaria. Además se tomaron en cuenta dos eventos recientes que, aunque no tuvieron un gran número de estaciones con datos, fueron de gran relevancia por su magnitud, siendo el más relevante el que se relacionó con los efectos generados por el huracán “Karl” en el año 2010, el cual impactó la costa central de Veracruz con categoría 4 en la escala Saffir-Simpson, generando diversas afectaciones en la cuenca del Río Jamapa, entre ellas, inundaciones en la zona conurbada Veracruz-Boca del Río (Tejeda, 2012).

### 8.1 Datos de entrada

El cuadro 5, muestra un resumen de los cálculos y datos para obtener los valores de entrada para ejecutar las simulaciones numéricas hidrológicas.

Cuadro 5. Datos de parámetros de entrada para el modelo numérico HEC-HMS.

|   | Jamapa                       | Cotaxtla                     |
|---|------------------------------|------------------------------|
| Cauce principal*                            | L= 214,509 m                 | L= 194,871 m                 |
| Altitud                                     |                              |                              |
| Altura mínima*                              | P <sub>1</sub> = 0 msnm      | P <sub>1</sub> = 10 msnm     |
| Altura máxima*                              | P <sub>2</sub> = 5,600 msnm  | P <sub>2</sub> = 3,973 msnm  |
| Pendiente                                   |                              |                              |
| Pendiente* $S = \frac{P_2 - P_1}{L}$        | S = 2.0 %                    | S = 2.0 %                    |
| Área de las subcuencas                      |                              |                              |
|   | A = 1,906 km <sup>2</sup>    | A = 1,643 km <sup>2</sup>    |
| Tiempo de concentración $T_r$               |                              |                              |
|   | $T_c = 18.67$ h              | $T_c = 17.34$ h              |
| $T_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$ | $T_r = 60\% * T_c = 672$ min | $T_r = 60\% * T_c = 624$ min |

\*Tomadas de: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#)

Para la obtención del número de curva se usaron los cuadros 2 y 3 expuestos en la metodología, usando el tipo de suelos que presentan los conjuntos de datos de tipo de suelo y los usos de suelo y vegetación (Cuadro 6). Además, el cálculo de cada uno de los números de curva promedio para las subcuencas respecto a las siete series de uso de suelo y vegetación del INEGI permitió comparar los valores cronológicamente, como se ilustran en figura 11, y era de esperarse a lo largo del periodo 1997 - 2021 la cuenca del Río Jamapa tiende a ser cada vez más impermeable, dada la tendencia de incremento de los números de curva. Como lo menciona Feldman (2000), el tipo de suelo y uso de suelo o cobertura vegetal son indispensables para la caracterización del comportamiento hidrológico de la zona de estudio en el modelo de número de curva.

El promedio ponderado del número de curva para cada subcuenca, se obtiene interceptando las áreas de edafología y uso de suelo; así como el uso de tablas con valores de equivalencia de la cobertura y tipo de suelo.

Cuadro 6. Estimación de los números de curva para las subcuencas de los ríos Jamapa y Cotaxtla para cada serie temporal de tipo de suelo y uso de suelo y vegetación.

| Serie | Número de Curva (CN) / Abstracción Inicial<br>( $P_0$ ; mm) |       |                |       |
|-------|---|-------|----------------|-------|
|       | Subc. Jamapa  |       | Subc. Cotaxtla |       |
| 1     | 82.89   | 10.49 | 85.05          | 10.49 |
| 2     | 83.53   | 10.02 | 85.55          | 10.02 |
| 3     | 84.00   | 9.68  | 86.28          | 9.68  |
| 4     | 84.14   | 9.58  | 86.30          | 9.58  |
| 5     | 84.15   | 9.57  | 86.27          | 9.57  |
| 6     | 84.42   | 9.38  | 86.45          | 9.38  |
| 7     | 84.73   | 9.16  | 86.58          | 9.16  |

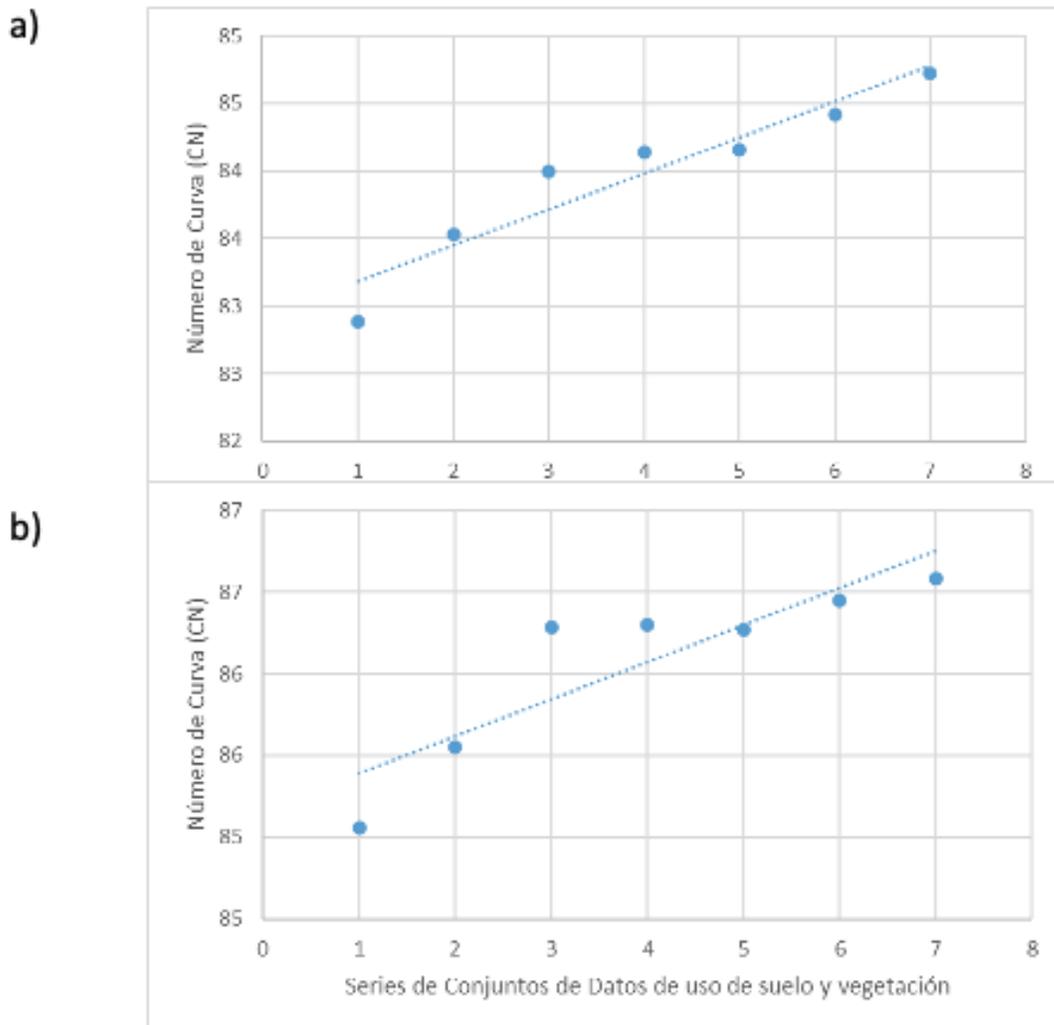


Figura 13. Tendencia del número de curva de las series de la 1 a la 7. a) Subcuenca del río Jamapa. b) Subcuenca del río Cotaxtla.

## 8.2 Simulación hidrológica

Es importante realizar de manera conjunta el análisis de la información de precipitación-escurrimiento para corroborar que se cuenta con la información necesaria y adecuada para introducir al modelo como lo menciona Aparicio (2015).

Además, se deben analizar las características del suelo más importantes que intervienen y discriminar los procesos que intervienen en la formación de la escorrentía, como son: evaporación, evapotranspiración, humedad del suelo, etc. (Cabrera, 2012-b).

Se realizaron las gráficas correspondientes de los datos de precipitación y escurrimiento dentro de la cuenca para determinar los parámetros y variables necesarias a la respuesta hidrológica de la cuenca y posteriormente simulación con el HEC-HMS. El modelo resolvió de manera adecuada las simulaciones de los hidrogramas asociados a eventos de lluvias intensas ocurridas en la cuenca del Río Jamapa como se muestran en las siguientes figuras (14 a la 23), en donde, para cada evento a) Escurrimiento del río Cotaxtla, b) al escurrimiento del río Jamapa; c) el escurrimiento total estimado; d) es el hietograma de la precipitación observada.

Los eventos en que el modelo HEC-HMS presentó mejor concordancia para el caso de la estación hidrométrica Paso del Toro fueron el **2** y el **5** y los de menor ajuste fueron el **3**, **9** y **10**. Mientras que, para El Tejar, los mejores ajustes se presentaron para los eventos **3**, **6** y **7** y los de menor ajuste fueron el **1**, **2**, **8** y **10**.

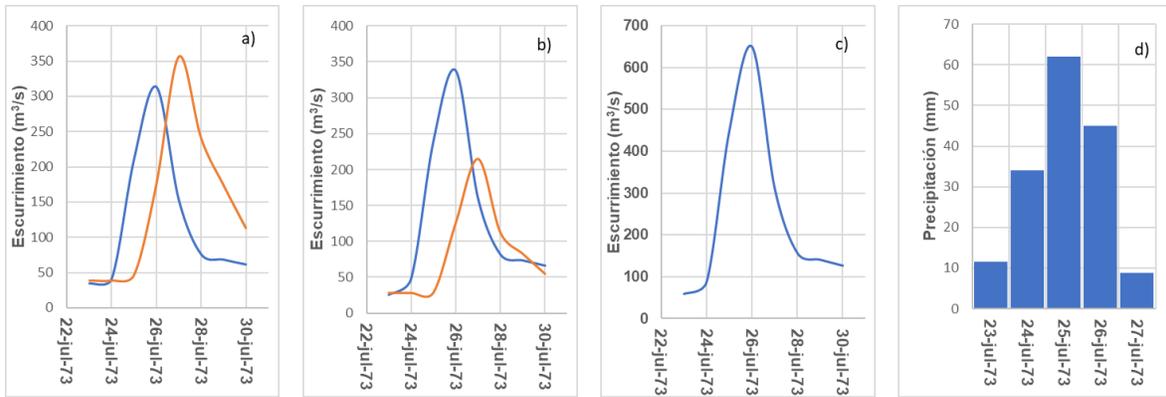


Figura 14. Evento de precipitación 1, registrado y simulado del 23 al 30 de julio de 1973.

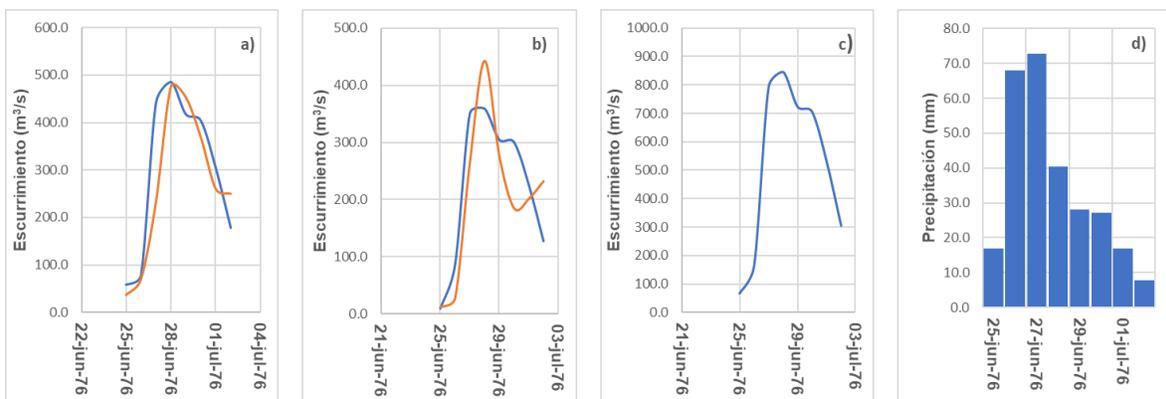


Figura 15. Evento de precipitación 2, registrado y simulado del 25 de junio al 02 de julio de 1976.

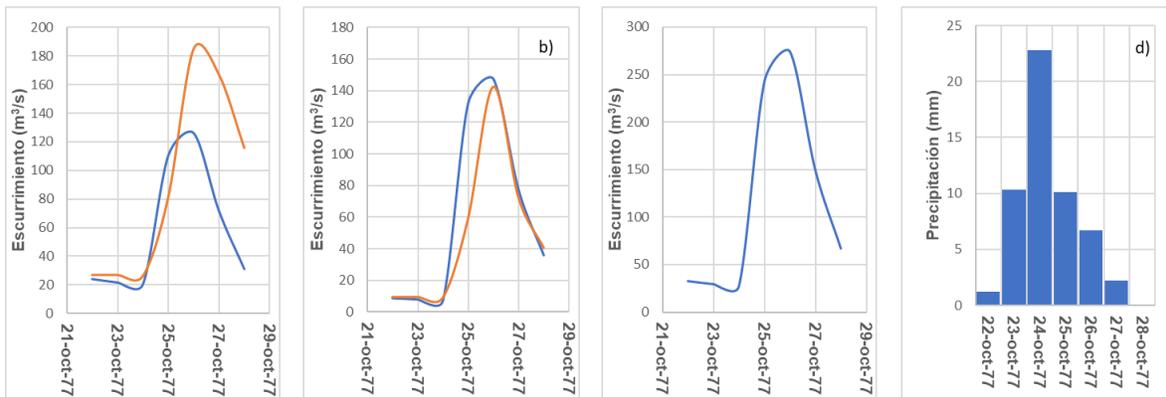


Figura 16. Evento de precipitación 3, registrado y simulado del 22 al 28 de octubre de 1977.

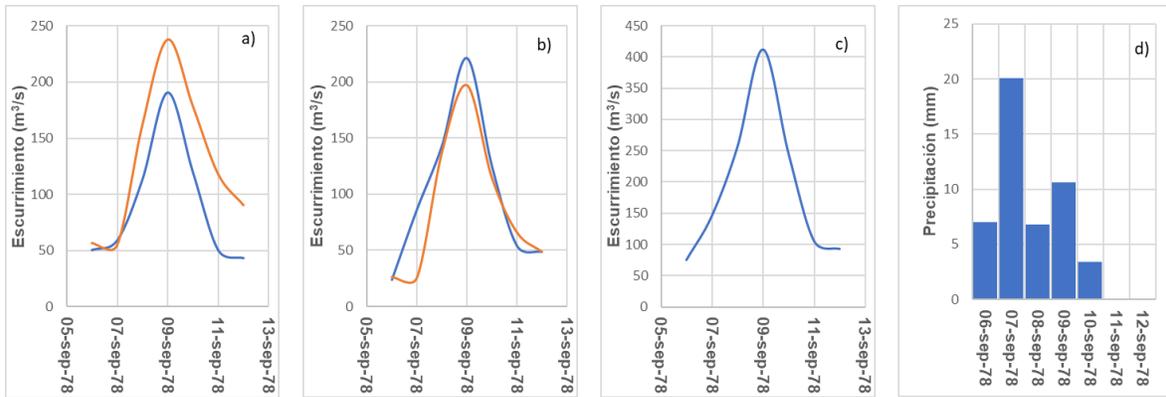


Figura 17. Evento de precipitación 4, registrado y simulado del 06 al 12 de septiembre de 1978.

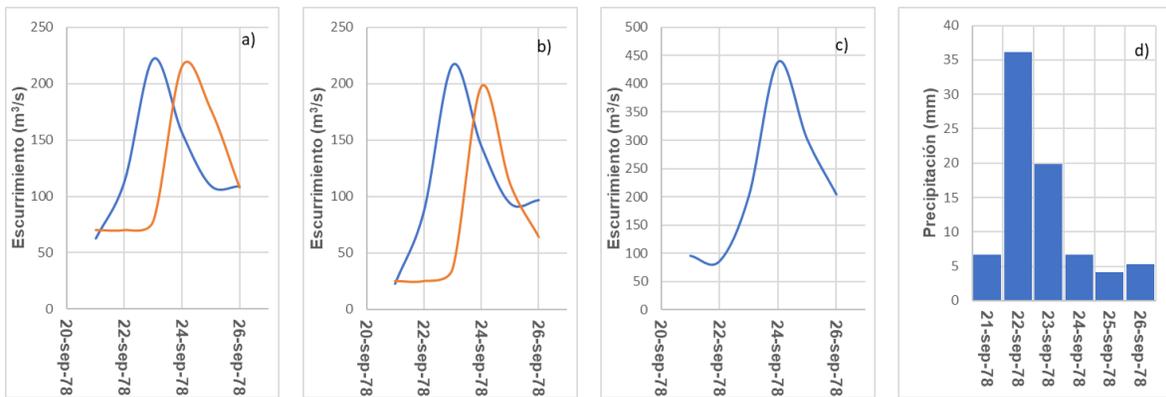


Figura 18. Evento de precipitación 5, registrado y simulado del 21 al 26 de septiembre de 1978.

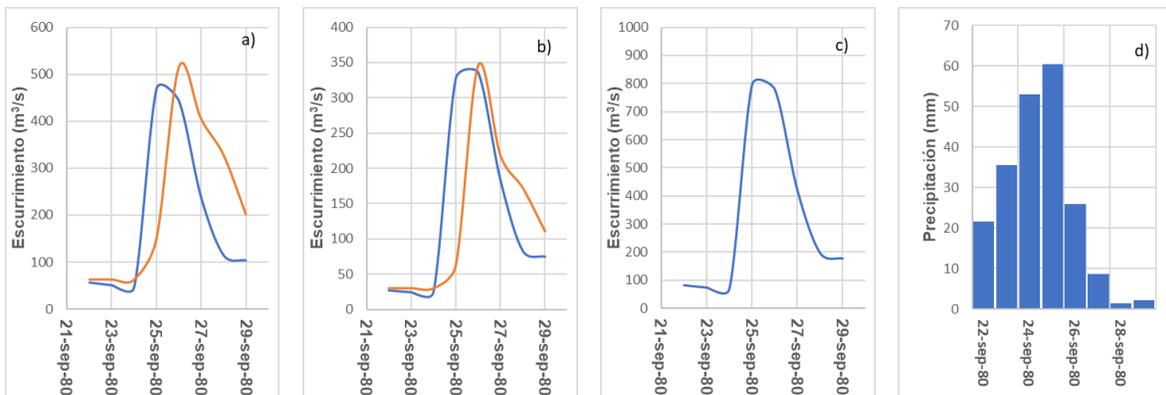


Figura 19. Evento de precipitación 6, registrado y simulado del 22 al 29 de septiembre de 1980.

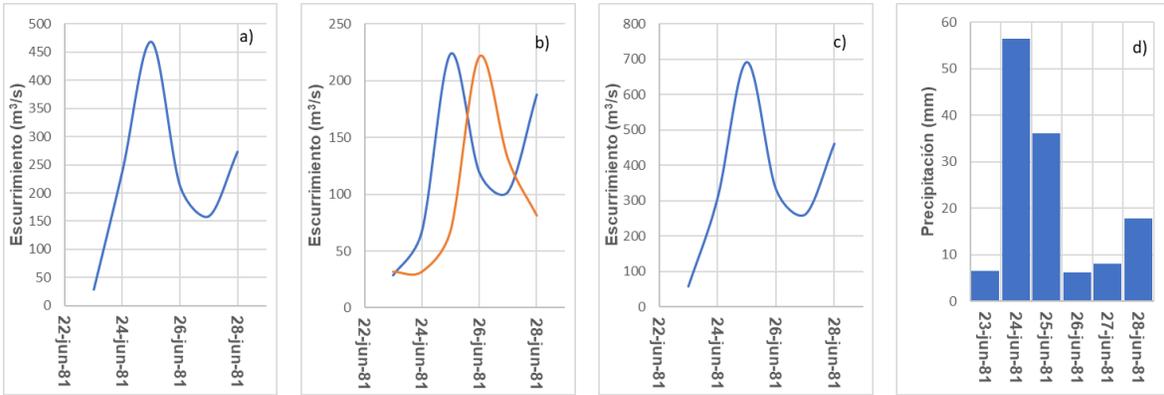


Figura 20. Evento de precipitación 7, registrado y simulado del 23 al 28 de junio de 1981.

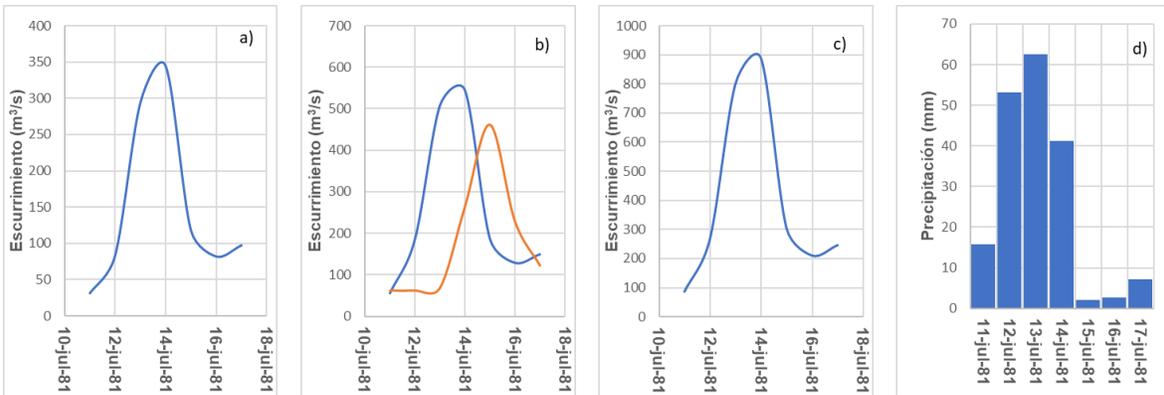


Figura 21. Evento de precipitación 8, registrado y simulado del 11 al 17 de julio de 1981.

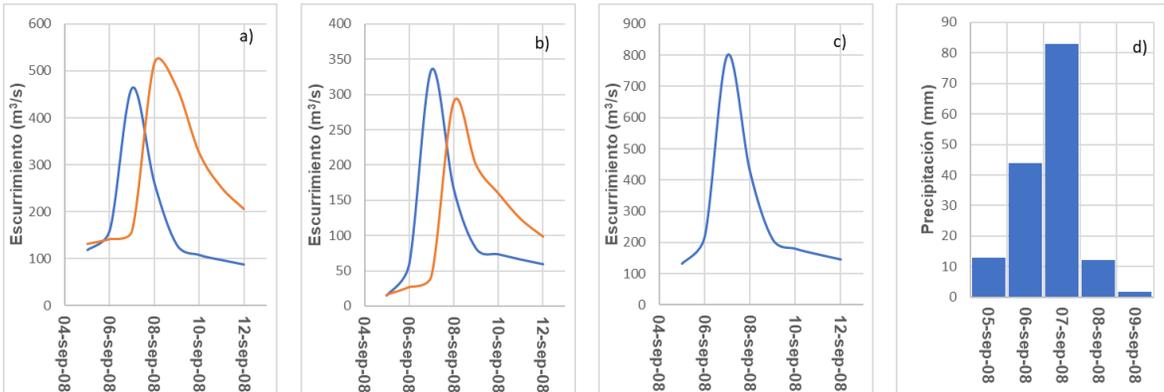


Figura 22. Evento de precipitación 9, registrado y simulado del 05 al 12 de septiembre de 2008.

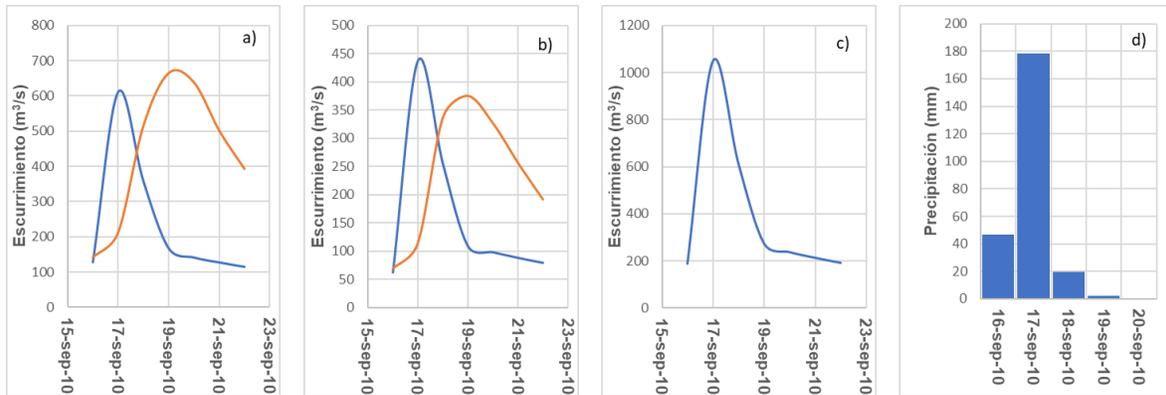


Figura 23. Evento de precipitación 10, registrado y simulado del 16 al 22 de septiembre de 2010.

Cuadro 7. Comparación de los valores de los gastos máximos observados en cada evento de tormenta con los estimados por el modelo HEC-HMS.

| Evento | Gasto m <sup>3</sup> /s |          | Gasto m <sup>3</sup> /s |          |
|--------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
|        | Paso del Toro           |          | El Tejar                |          |
|        | Observado               | Estimado | Observado               | Estimado |
| 1      | 356                     | 313      | 214.3                   | 337.4    |
| 2      | 476                     | 486.1    | 442.7                   | 358.7    |
| 3      | 185.1                   | 126.3    | 142.3                   | 147.5    |
| 4      | 237.6                   | 190.9    | 197.2                   | 221.4    |
| 5      | 215.2                   | 221.7    | 197.4                   | 216.7    |
| 6      | 515.9                   | 469.3    | 345.3                   | 336.1    |
| 7      | S/D                     | S/D      | 221.1                   | 224      |
| 8      | S/D                     | S/D      | 461.9                   | 544.8    |
| 9      | 517.6                   | 464      | 289.3                   | 334.9    |
| 10     | 664.4                   | 610.7    | 375.3                   | 437.6    |

### 8.3 Calibración y validación

De acuerdo a Cabrera (2012-a) el proceso de calibración se centra en disminuir las diferencias entre los datos observado y lo simulado por el modelo, dicho “criterio de exactitud” se basa en el ajuste de los parámetros de entrada. Así mismo, Derdour *et al.*, 2018 reafirma que la calibración del modelo consiste en un proceso sistemático de ajuste de los valores de los parámetros de entrada del modelo hasta que, los datos estimados de las variables coincidan lo mejor posible con los datos observados.

La evaluación de la eficiencia del modelo HEC-HMS se llevó a cabo mediante el coeficiente de determinación entre los gastos máximos observados y los estimados por el modelo HEC-HMS de cada evento (Figura 24). En la estación hidrométrica Paso del Toro (a) se obtuvo un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9747$ , lo que indica que el modelo explica el 97 % de los eventos analizados, como Koneti *et al.* (2018) que al modelar caudales máximos utilizando el modelo HEC-HMS también obtuvieron resultados confiables en valores de correlación del 83 % para la cuenca del río Godavari en la India. Y Rodríguez *et al.* (2010) con modelaron HEC-HMS de gastos máximos superiores a los 350 m<sup>3</sup>/s en la cuenca del Río Reno de la región Emilia Romagna, Italia, obtuvieron una eficacia del 90 %. En tanto que, para la estación hidrométrica El Tejar se obtuvo un  $R^2 = 0.7761$  es decir, que explica el 77 % de los casos. Como lo mencionó Pereyra (2016), las variaciones en las estimaciones y las bajas concordancia, sin embargo, se consideraron aceptables debido a la magnitud de los resultados de volúmenes obtenidos por el modelo.

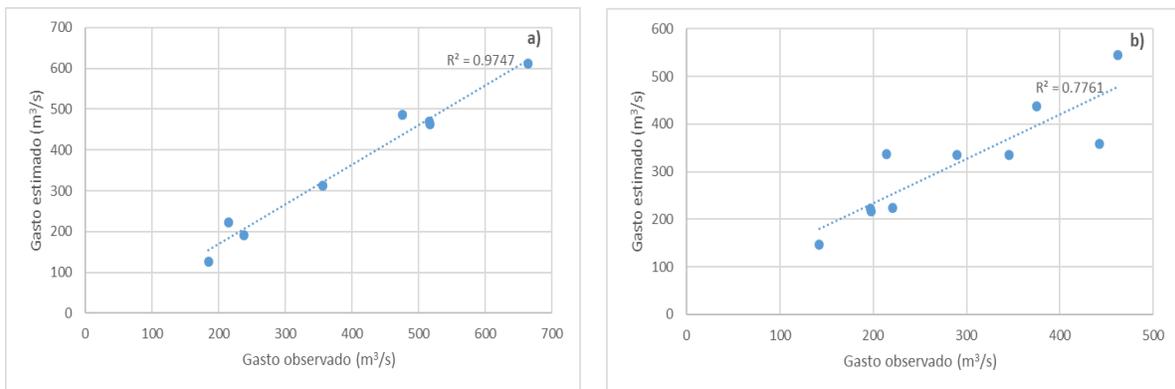


Figura 24. Gastos máximos observados versus estimados para las estaciones hidrométricas Paso del Toro a) y El Tejar b), con el valor del coeficiente de determinación.

## 9. CONCLUSIONES

Del gasto máximo asociado a eventos de lluvias intensas, se concluye que, de acuerdo con el análisis de eficiencia por medio de la correlación entre los gastos máximos observados y estimados, de los diez eventos seleccionados, para la estación hidrométrica Paso del Toro el modelo HEC-HMS se ajustó en un 97 %.

Para la estación El Tejar el modelo presenta el 77 % de asertividad, en esta estación las variaciones en concordancia de los resultados obtenidos con HEC-HMS, pueden atribuirse a la escasa información detallada requerida para la alimentación del modelo, esto a raíz de la escasa o nula información requerida en los reportes históricos de las estaciones climatológicas e hidrométrica obtenidos.

Los parámetros de entrada que se requieren para la modelación con HEC-HMS, resultaron coherentes y precisos dado que se cuenta con bases de datos vectoriales aceptables con lo que cuenta el INEGI.

Del ajuste modelo HEC-HMS, se concluye que, los eventos de precipitación en que este modelo presentó mejor concordancia fue para la estación hidrométrica Paso del Toro, el evento 2 (del 25 de junio al 02 de julio de 1976) y el 5 (del 21 al 26 de septiembre de 1978). Los eventos de precipitación con menor ajuste fueron el 3 (del 22 al 28 de octubre de 1977), 9 (del 05 al 12 de septiembre de 2008) y 10 (del 16 al 22 de septiembre de 2010).

Para el caso de la estación hidrométrica El Tejar, el modelo HEC-HMS presentó sus mejores ajustes en los eventos: 3 (del 22 al 28 de octubre de 1977), 6 (del 22 al 29 de septiembre de 1980) y 7 (del 23 al 28 de junio de 1981) en tanto que, los que más se alejaron de la línea de tendencia fueron los eventos 1, 2, 8 y 10.

Dados los resultados en la modelación del proceso lluvia-escorrentía con HEC-HMS para la cuenca del Río Jamapa, se concluye que el modelo si puede ser utilizado como herramienta para la modelación hidrológica de eventos de precipitación intensa con fines de diagnóstico y/o pronóstico de avenidas máximas en la cuenca.

Finalmente, la información disponible de las características hidrometeorológicas, morfológica, edafológicas, vegetación y uso de suelo, mencionadas en los objetivos, mismas que se usaron en el modelo HEC-HMS como variables de entrada, demostraron

caracterizar de manera correcta la zona de estudio, dado que los datos estimados tienen un coeficiente de determinación aceptable en relación a lo observado.

## 10. RECOMENDACIONES

Para investigaciones futuras deberá tomarse en cuenta el comportamiento hidrológico de la zona de estudio, complementarse con información y modelos que describan de manera más específica los efectos antrópicos y los escenarios de cambio climático para obtener diagnósticos y/o pronósticos confiables que faciliten la toma de decisiones con respecto a los recursos hídricos de manera sustentable.

Al utilizar herramientas de modelado hidrológico de la zona de estudio, se debe considerar que la concordancia de las estimaciones obtenidas para este caso, se determinaron aceptables valores mayores de 70%, debido a la escasa información disponible y periodos de tormentas cortos. No se descarta la posibilidad de nuevas bases de datos científicos como CHIRPS, ERA5, entre otros, específicamente para obtener el análisis de la precipitación.

Evaluar los impactos o servicios ambientales que pueden brindar los cuerpos de captación necesarios para almacenar volúmenes de agua estimados, deberá ser tomado en cuenta para su adecuada planeación y manejo de los recursos hídricos en el interior de la cuenca.

Para estudios posteriores, deben tomarse en cuenta que una de las principales razones de las cuencas de respuesta rápida por los eventos de precipitación, es al cambio de uso de suelo, debido a que no es posible frenar las actividades que crean desarrollo económico, social y cultural, sin embargo, se debe fomentar aquellas que lo hagan de manera sustentable y sostenible.

## 11. REFERENCIAS

- Aparicio F.J. (2008). Fundamentos de Hidrología de Superficie. ISBN 968-18-3014-8
- Aparicio, F.J. (2015). Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa México, 303 p.
- Arekhi, S. (2012), Runoff modeling by HEC-HMS Model (Case Study: Kan watershed, Iran), International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 4(23), pp 1807-1811.
- Feldman Arlen D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual CPD-74B. 441 G St., NW, Washington, DC, HQ U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, USA, 149 p.
- Cabrera, J. (2012-a). Calibración de modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú.
- Cabrera, J. (2012-b). Modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Niño, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, 8.
- Castillo, C., Cepeda, E., Díaz, A., Domínguez, E., García, P., Guerrero, F., & Hassidoff, A. (2009). Evaluación del nivel de aplicación de protocolos de modelación en trabajos sobre simulación del proceso lluvia-escorrentía. Avances en Recursos Hidráulicos, (19).
- Castillo, C.W. H. (2017). Modelación hidrológica de eventos de crecida para el sistema de alerta temprana ante inundaciones en la Cuenca del Río Catamayo (Bachelor's thesis, Quito: UCE).
- Castillo, L. G., & Marín, M. D. (2011). Caracterización hidrológica e hidráulica y evaluación de transporte de sedimento en regiones semiáridas. Jornadas sobre Modelización Hidrológicas en Zonas Semiáridas, Murcia.
- Chereque Morán, W. (1989). Hidrología: para estudiantes de ingeniería civil. CONCYTEC. Lima, Perú. 236 p.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering. 565 p.
- Chu, X. and Steinman, A. (2009). "Event and Continuous Hydrologic Modeling with HEC-HMS." J. Irrig. Drain Eng., 10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(119), pp 119-124.
- Cruz Medina, I. R., & García Páez, F. (2008). MODELACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS DEL RÍO YAQUI. Terra Latinoamericana, 26(2),145-152.[fecha de Consulta 25 de Mayo de 2023]. ISSN: . Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57313046007>
- Derdour, A., Bouanani, A., & Babahamed, K. (2018). Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS in a semi-arid region: Case study in Ain Sefra watershed, Ksour Mountains (SW Algeria). Journal of water and land development.
- Díaz Gutiérrez, D. A. (2018). Determinación de la oferta hídrica superficial mediante aplicación de

software ARCGIS y HEC–HMS, y del índice de calidad de agua (ICA) en épocas de más lluvia, en la parte media y baja de la microcuenca Quebrada la Cristalina en el costado oriental del parque nacional natural el Cocuy, como insumo para valoración de sus servicios eco-sistemicos (doctoral dissertation).

Díaz, D. P., & Sesma, J. A. P. (2006). Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el estado de Veracruz. In *Inundaciones 2005 En El Estado Veracruz*, Universidad Veracruzana, Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología (pp. 81-99).

Espinales Cedeño, F. R., Alulema del Salto, R. A., & Caicedo Toro, M. D. (2021). Determinación del Número de Curva (CN) de la cuenca del Río Portoviejo. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8(SPE2).

Fernández-Jáuregui, C. A. (1999). El agua como fuente de conflictos: repaso de los focos de conflictos en el mundo. *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, 179-194.

Garrido, A., Pérez, J., & Enríquez, C. (2010). Delimitación de las zonas funcionales de las cuencas hidrográficas de México. *Las cuencas hidrográficas de México: diagnóstico y priorización*. Instituto de Ecología de México Press, México, pp 14-17.

Gaytan, R., de Anda, J., Nelson, J. (2008). Computation of changes in the run-off regimen of the Lake Santa Ana watershed (Zacatecas, México). *Lake & Reservoirs: Research and Management*. 12 p.

González, A. G., Alvarez-Figueroa, P., Fuertes, M. G., & Aguirre-Mendoza, Z. (2016). Influencia de la cobertura vegetal en los coeficientes de escorrentía de la cuenca del río Catamayo, Ecuador. *CEDAMAZ*, 6(1).

Halwatura, D. and Najjim, M. M. M. (2013), Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment, *Environmental Modeling and Software*, 46 (2013) pp 155-162.

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>.

INE - INEGI, (1997). Conjunto de Datos Vectoriales Uso de suelo y vegetación, Serie I, Escala 1:250000 (Continuo Nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) México.

INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2017. Gobierno de estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. 1225.

INEGI, (2001). Conjunto de Datos Vectoriales Uso de suelo y vegetación, Serie II, Escala 1:250000 (Continuo Nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) México.

INEGI, (2005). Conjunto de Datos Vectoriales Uso de suelo y vegetación, Serie III, Escala 1:250000 (Continuo Nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) México.

INEGI, (2009). Conjunto de Datos Vectoriales Uso de suelo y vegetación, Serie IV, Escala

1:250000 (Continuo Nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) México.

INEGI, (2014). Conjunto de Datos Vectorial edafológico, Serie II, Escala 1:250000 (Continuo Nacional). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) México.

Juárez-Méndez, J., Ibáñez-Castillo, L. A., Pérez-Nieto, S., & Arellano-Monterrosas, J. L. L. (2009). Uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del río Huehuetán. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 1(2), 69-76.

Koneti, S., Sunkara, S. L., & Roy, P. S. (2018). Hydrological modeling with respect to impact of land-use and land-cover change on the runoff dynamics in Godavari River Basin using the HEC-HMS model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(6), 206 p.

Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático (No. Sirsi) a453952). Semarnat.

Lanza Espino, G. D. L., Carbajal Pérez, J. L., Salinas Rodríguez, S. A., & Barrios Ordóñez, J. E. (2012). Medición del caudal ecológico del río Acaponeta, Nayarit, comparando distintos intervalos de tiempo. *Investigaciones geográficas*, (78), pp 62-74.

Lunagomez, D. P., (2018). Proyecciones de escorrentía generada por tormentas aisladas ante escenarios de cambio climático: caso de estudio cuenca del Río La Antigua. Tesina de licenciatura.

Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology* (Vol. 9780070, p. 397323). New York: McGraw-Hill. 1143 p.

Majidi, A. and Shahedi, K. (2012), Simulation of Rainfall-Runoff Process Using Green-Ampt Method and HEC-HMS Model (Case Study: Abnama Watershed, Iran), *International Journal of Hydraulic Engineering*, 1(1), pp 5-9.

Myo, H. T., and Zin, W. (2020). Assessment of Future Climate for Bago Region and Its Impact on Streamflow. MURC. Yangon, pp 1-6.

Oloche O. J. and Zhi-jia L. (2010), Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misai and Wan'an catchments in China. *Water Science and Engineering*. 3 (1), pp 14–22. doi:10.3882/j.issn.1674-2370.2010.01.002

Ortiz Lozano, J. A. (2013). Modificación en la provisión de los servicios ambientales por efecto del cambio en la heterogeneidad ambiental en la Cuenca del Río Jamapa, Veracruz, México.

Ortiz Lozano, J. A. (2013). Modificación en la provisión de los servicios ambientales por efecto del cambio en la heterogeneidad ambiental en la Cuenca del Río Jamapa, Veracruz, México.

Pereyra Díaz, D., Pérez Sesma, J.A.A. y Salas Ortega, M.D.R. (2010). Hidrología. Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz; Enrique Florescano, Juan Ortíz Escamilla, coordinadores. México: Gobierno del Estado de Veracruz: Comisión del

Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana: Universidad Veracruzana, 2010. v. 1, p. 85-122. ISBN 9786079513160.

- Pereyra, D., Hoyos, C., Pereyra, K., Filobello, U., Pérez, A. y Ramírez, V. (2016) Escurrimiento generado por tormentas intensas en Veracruz, México. Estado actual y ante escenarios de cambio climático. *Revista Iberoamericana de Ciencias*. 29 pp.
- Pérez Luna, G. (2015). Modelación hidrológica continua para fines de pronóstico de avenidas en ríos (Master's thesis).
- Pérez-Sesma, J. A. A., Pereyra-Díaz, D., Cervantes-Pérez, J., Hoyos-Reyes, C., (2012). Escurrimiento generado por el huracán Karl: una primera estimación. En A. Tejeda Martínez y L. Betancourt Trevedhan (Ed.), *Las inundaciones de 2010 en Veracruz Memoria social y medio físico*, 153-174 p.
- Pérez-Sesma, J. A. A., Pereyra-Díaz, D., Cervantes-Pérez, J., Hoyos-Reyes, C.(2012). Escurrimiento generado por el huracán Karl: una primera estimación. En A. Tejeda Martínez y L. Betancourt Trevedhan (Ed.), *Las inundaciones de 2010 en Veracruz Memoria social y medio físico*, 153-174 p.
- Rodríguez, Y., N. Marrero de León, y Laura Gil, (2010). Rainfall-runoff model for Reno's river basin. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 19 (2), pp 31-37.
- SMN (2021) Información estadística climatológica, Comisión Nacional del agua (CONAGUA), Servicio Meteorológico nacional (SMN) México. Consultado 05/02/2021.
- Tejeda, A. (2012). *Las inundaciones de 2010 en Veracruz. Memoria social y medio físico. Tomo 1.* Universidad Veracruzana.
- Valencia Ventura, F., & Guevara Pérez, E. (2014). Validación del modelo HEC HMS en la cuenca del rio Cabriales para el análisis hidrológico. *Revista INGENIERÍA UC*, 21(1), 36-49.
- Villarroya, J., Farias, H., & Amarilla, M. (2013). Estimación del parámetro hidrológico del número de curva nc: Automatización del cálculo mediante sig y nuevas fuentes de información cartográfica. caso del área urbana de pozo hondo. IX Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA.
- Wang, L. K., y Yang, C. T. (2014). *Modern water resources engineering*. Totowa, NJ: Humana Press. 879 p.
- Yener, M. K., Sorman, A. U., Sorman, A. A., Sensoy, A. and Gezgin, T. (2012), Modeling Studies with HEC-HMS And Runoff Scenarios in Yuvacik Basin, Turkiye, *International Congress on River Basin Management*, pp 621-634.
- Yuan, W., Liu, M., & Wan, F. (2019). Calculation of critical rainfall for small-watershed flash floods based on the HEC-HMS hydrological model. *Water Resources Management*, 33(7), pp 2555-2575.

## 12. APÉNDICE

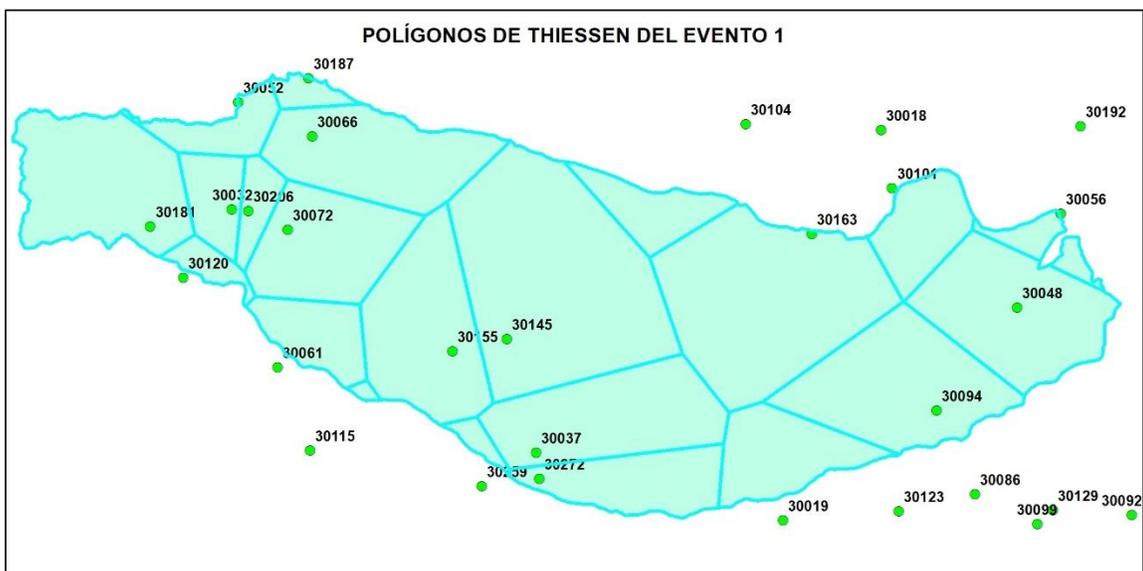


Figura 25. Polígonos de Tiessen para el evento del 23 al 30 de julio de 1973. Los puntos verdes indican la ubicación y número de las estaciones climatológicas dentro y cercanas a la cuenca.

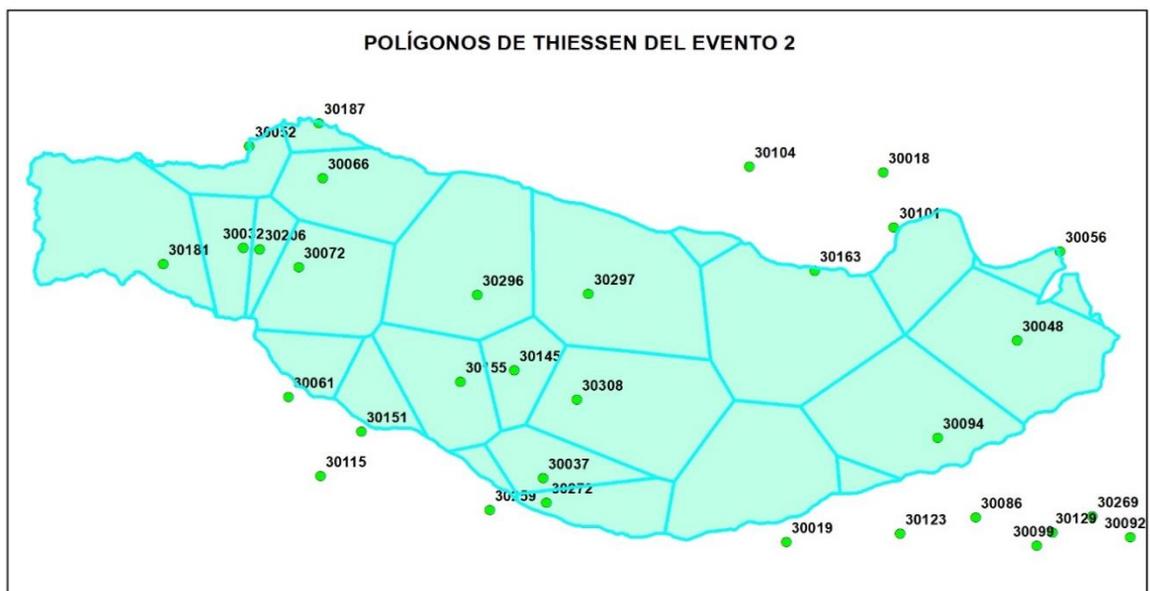


Figura 26. Polígonos de Tiessen para el evento del 25 de junio al 02 de julio de 1976.

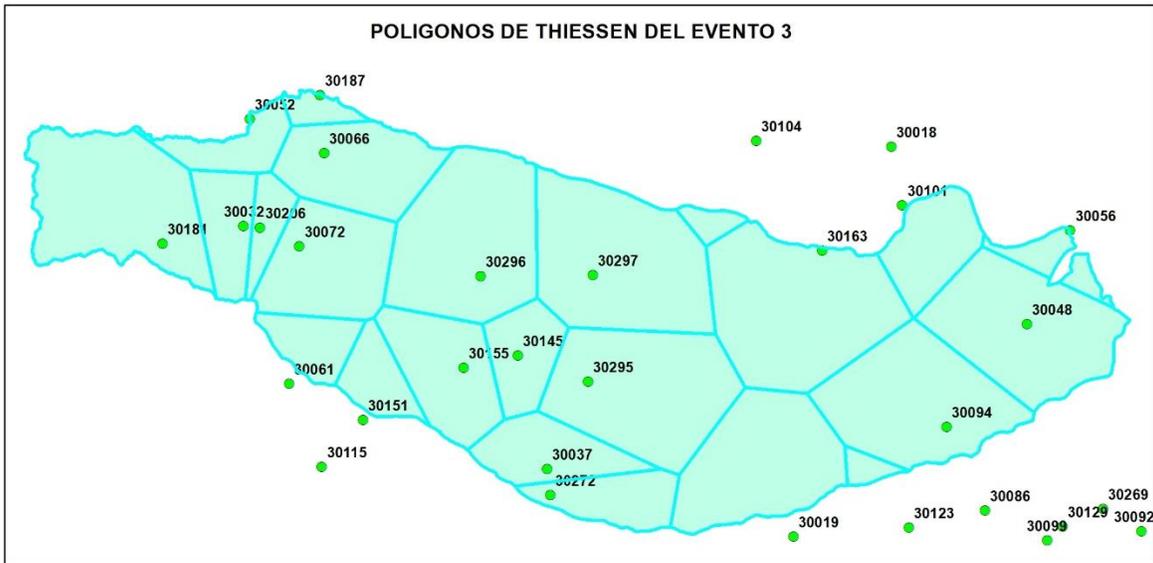


Figura 27. Polígonos de Tiessen para el evento del 22 al 28 de octubre de 1977.

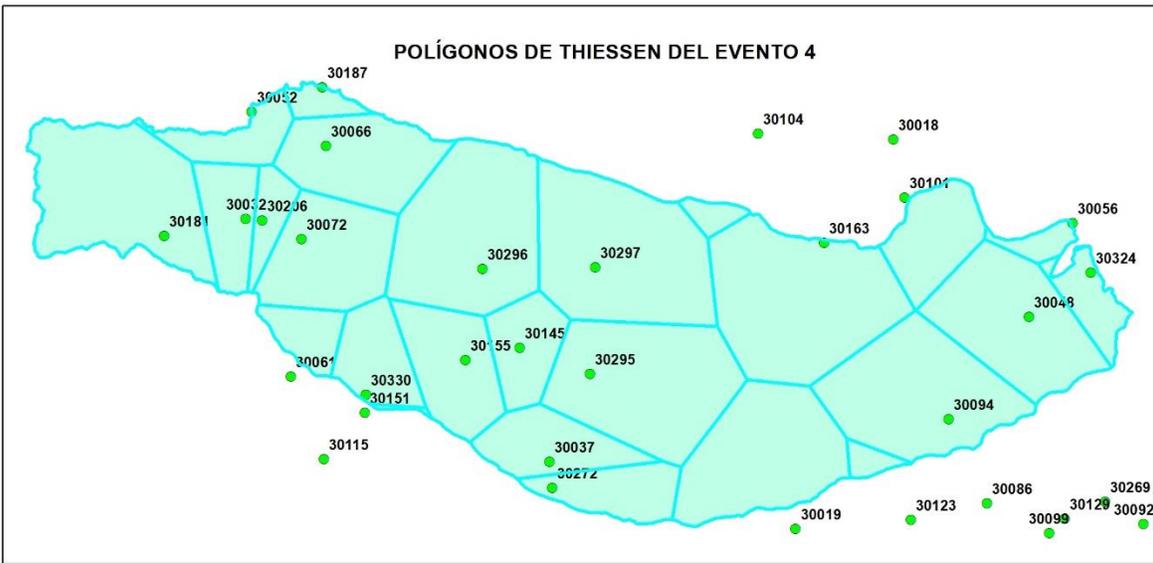


Figura 28. Polígonos de Tiessen para el evento del 06 al 12 de septiembre de 1978.

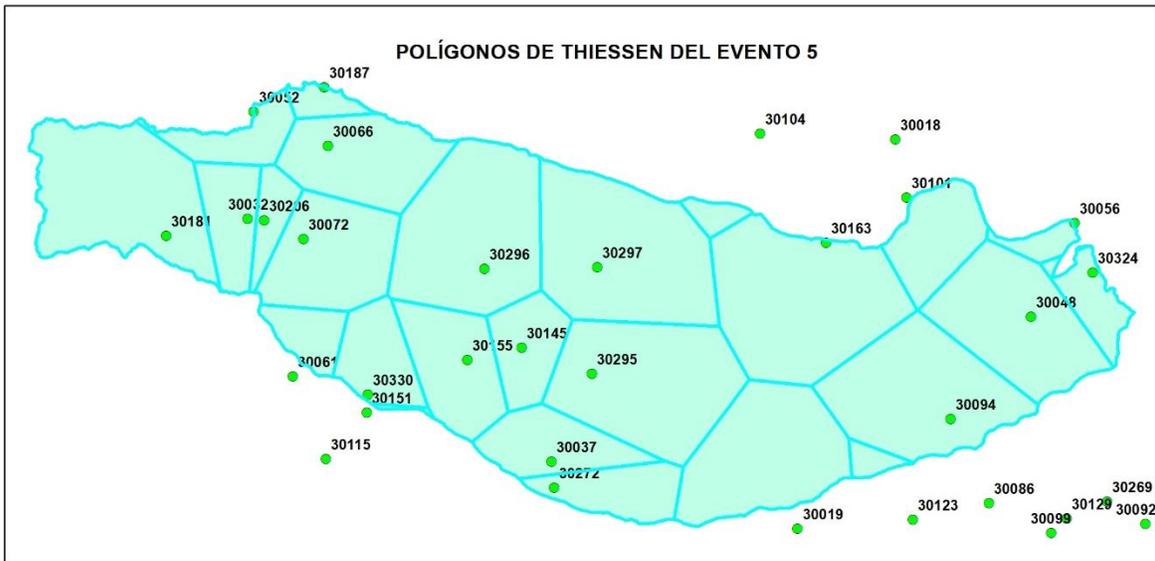


Figura 29. Polígonos de Tiessen para el evento del 21 al 26 de septiembre de 1978.

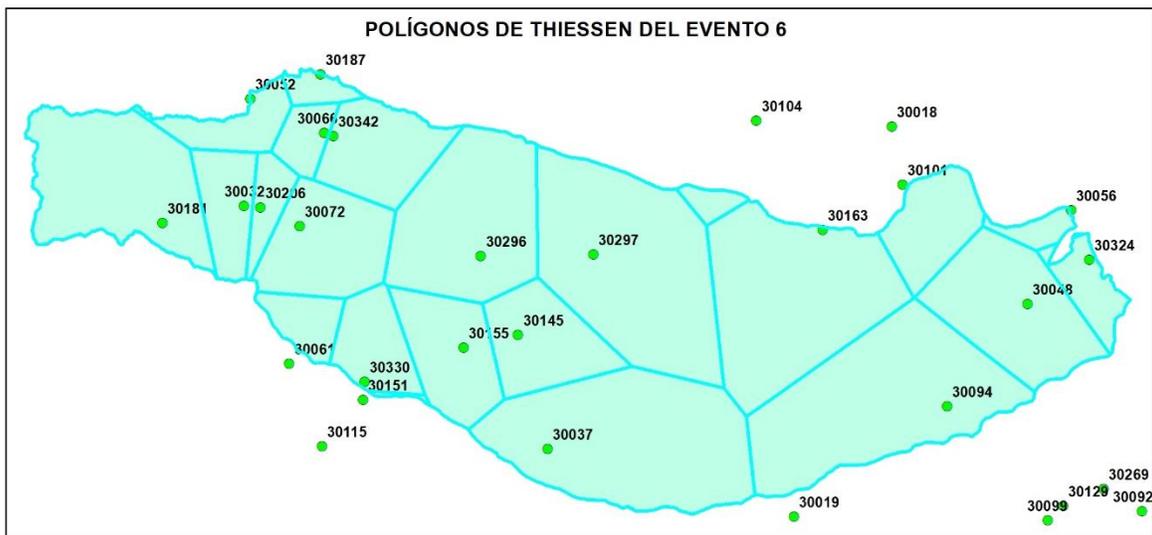


Figura 30. Polígonos de Tiessen para el evento del 22 al 29 de septiembre de 1980.

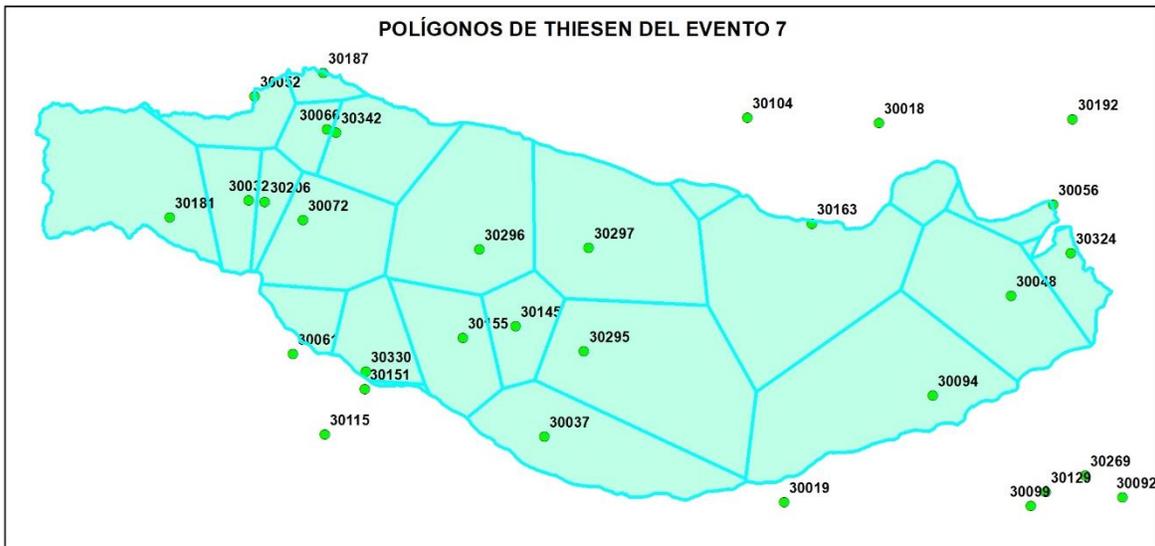


Figura 31. Polígonos de Tiessen para el evento del 23 al 28 de junio de 1981.

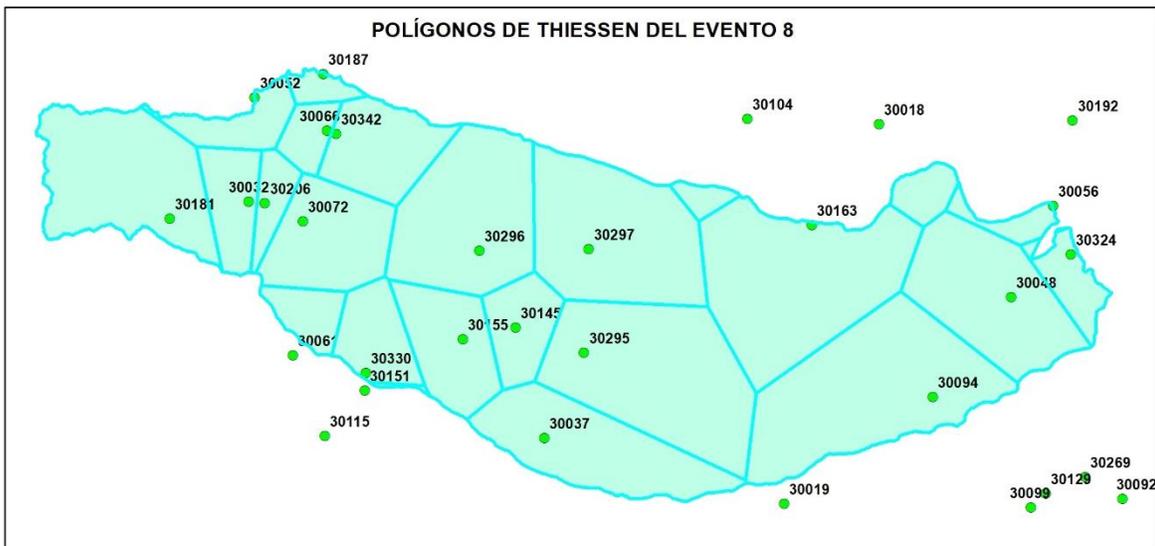


Figura 32. Polígonos de Tiessen para el evento del 11 al 17 de julio de 1981.

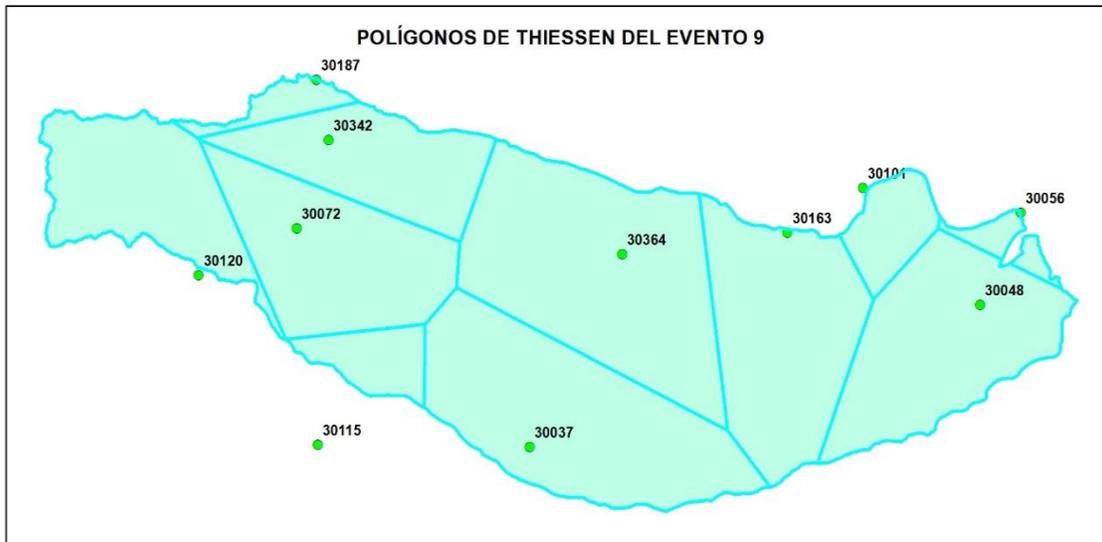


Figura 33. Polígonos de Tiessen para el evento del 05 al 12 de septiembre de 2008.

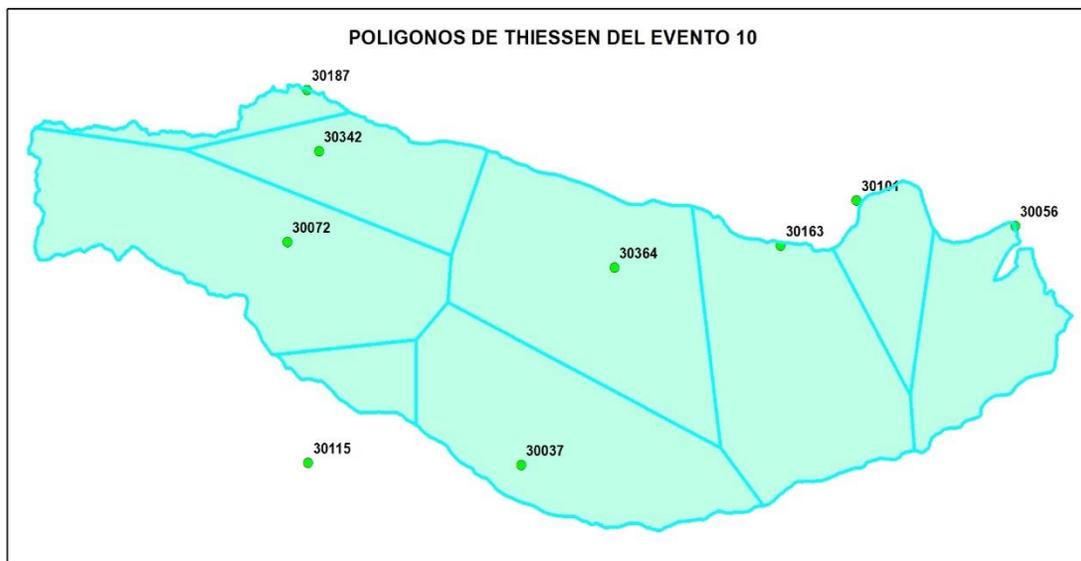


Figura 34. Polígonos de Tiessen para el evento del 16 al 22 de septiembre de 2010.

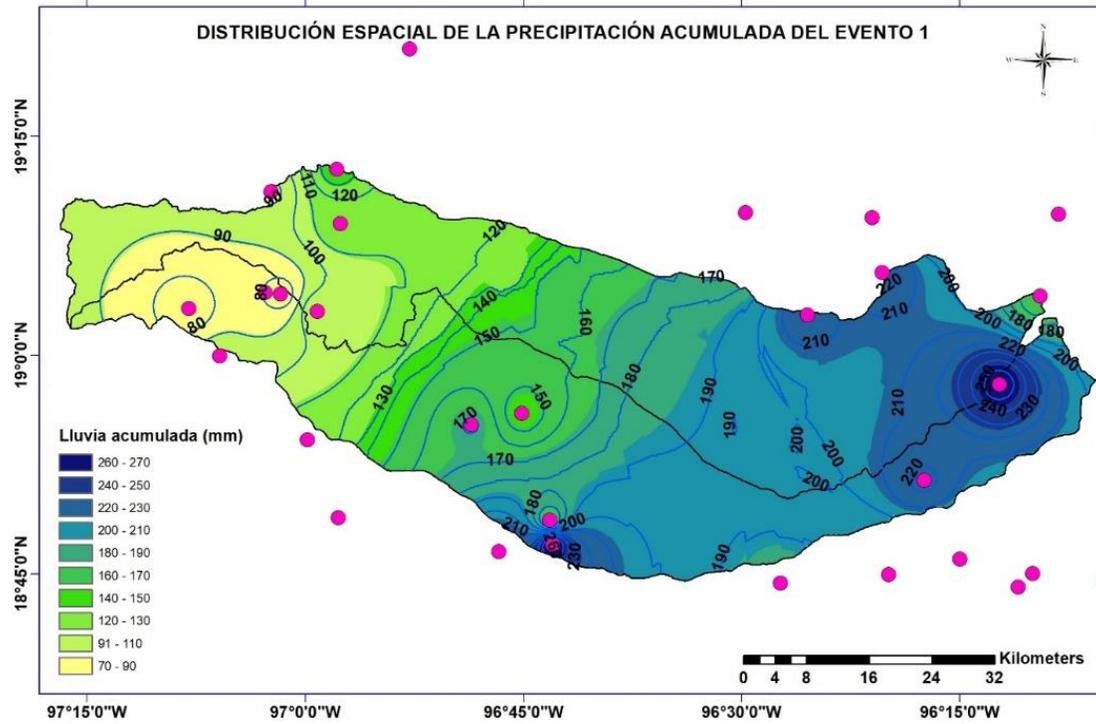


Figura 35. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 23 al 30 de julio de 1973.

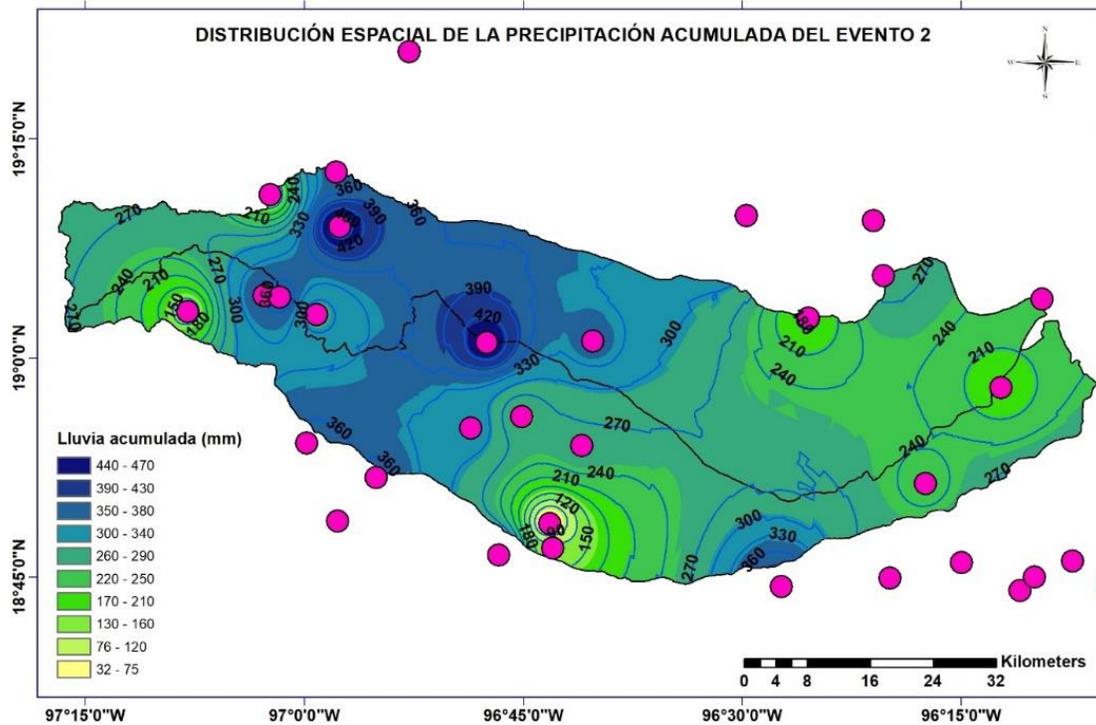


Figura 36. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 25 de junio al 02 de julio de 1976.

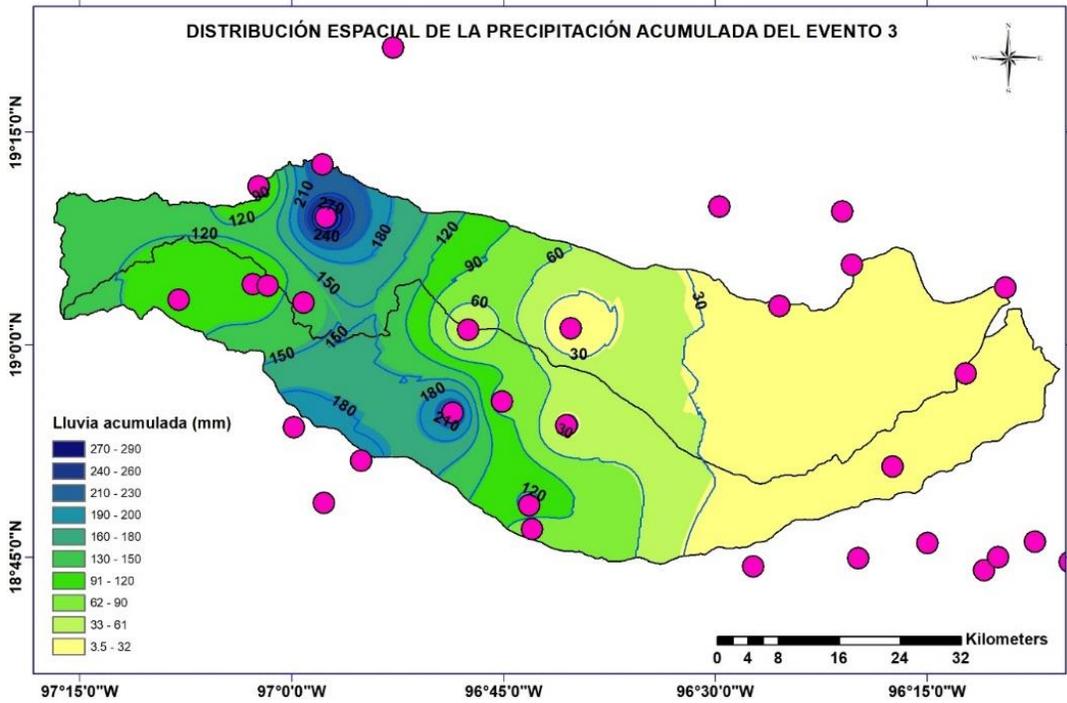


Figura 37. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 22 al 28 de octubre de 1977.

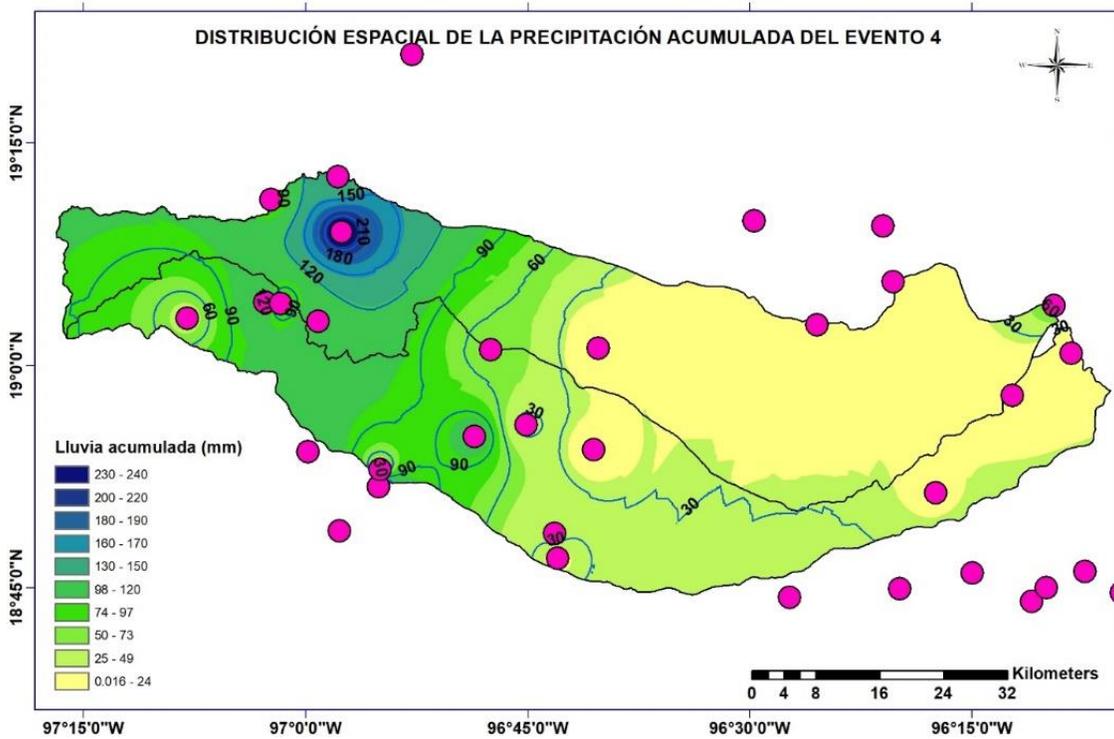


Figura 38. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 06 al 12 de septiembre de 1978.

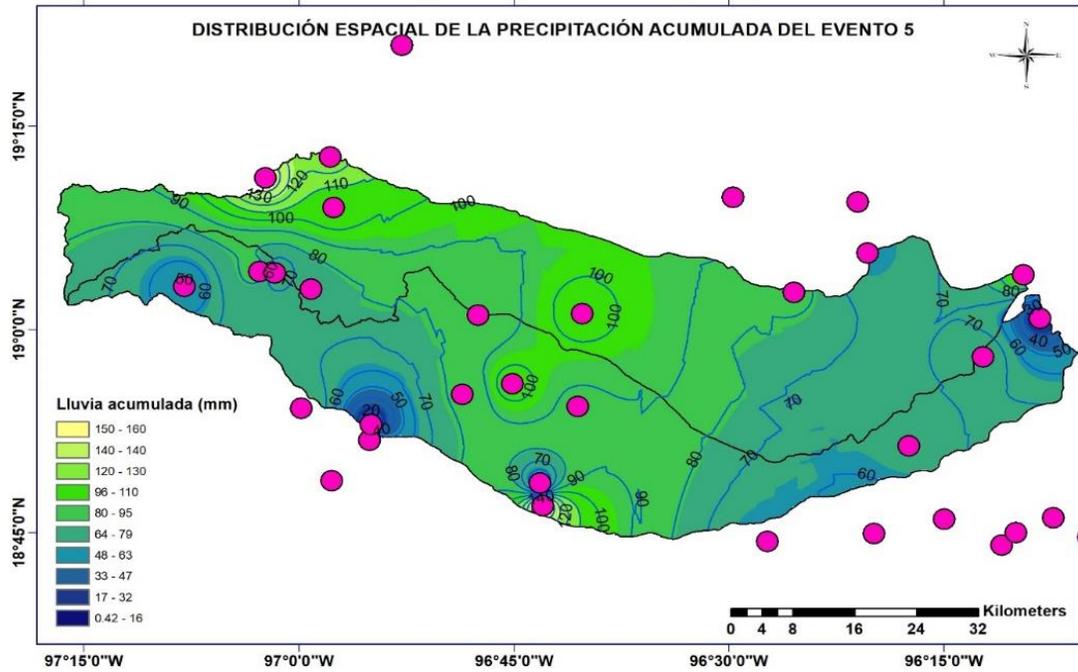


Figura 39. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 21 al 26 de septiembre de 1978.

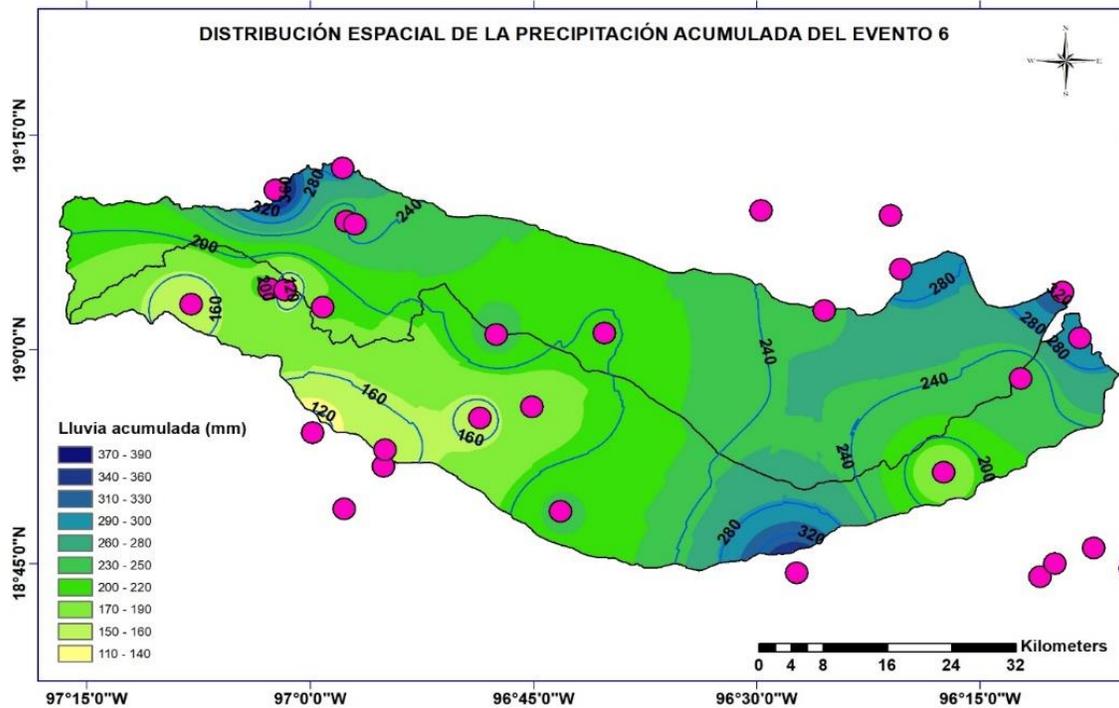


Figura 40. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 22 al 29 de septiembre de 1980.

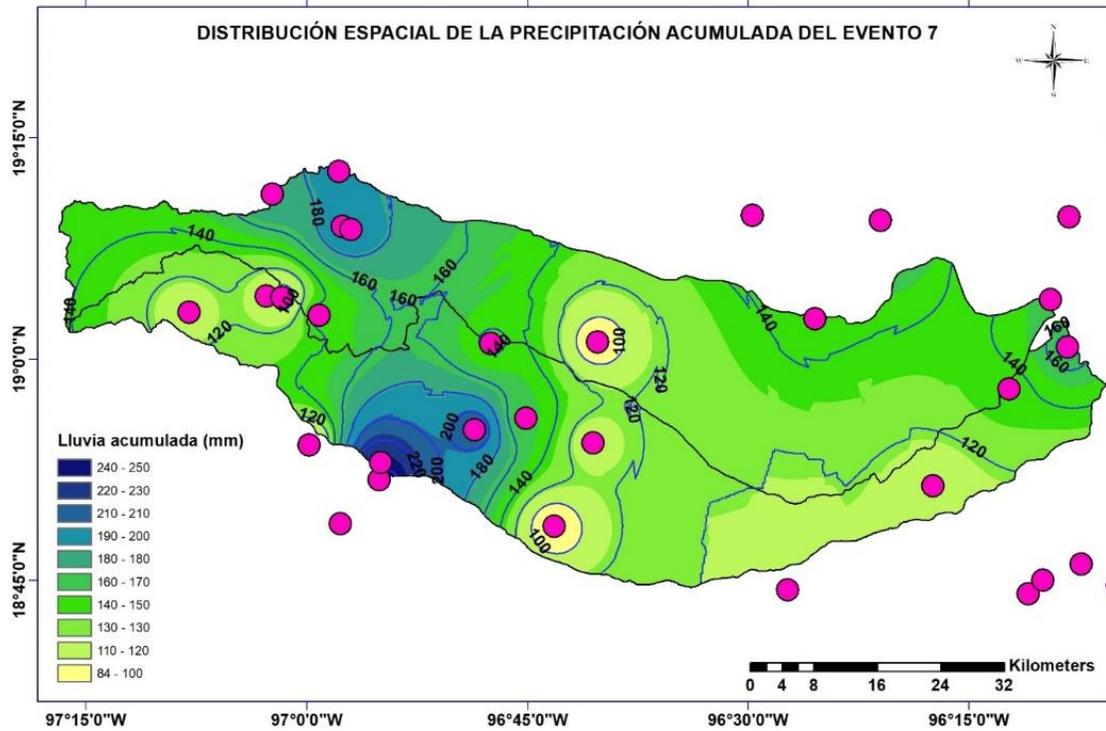


Figura 41. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 23 al 28 de junio de 1981.

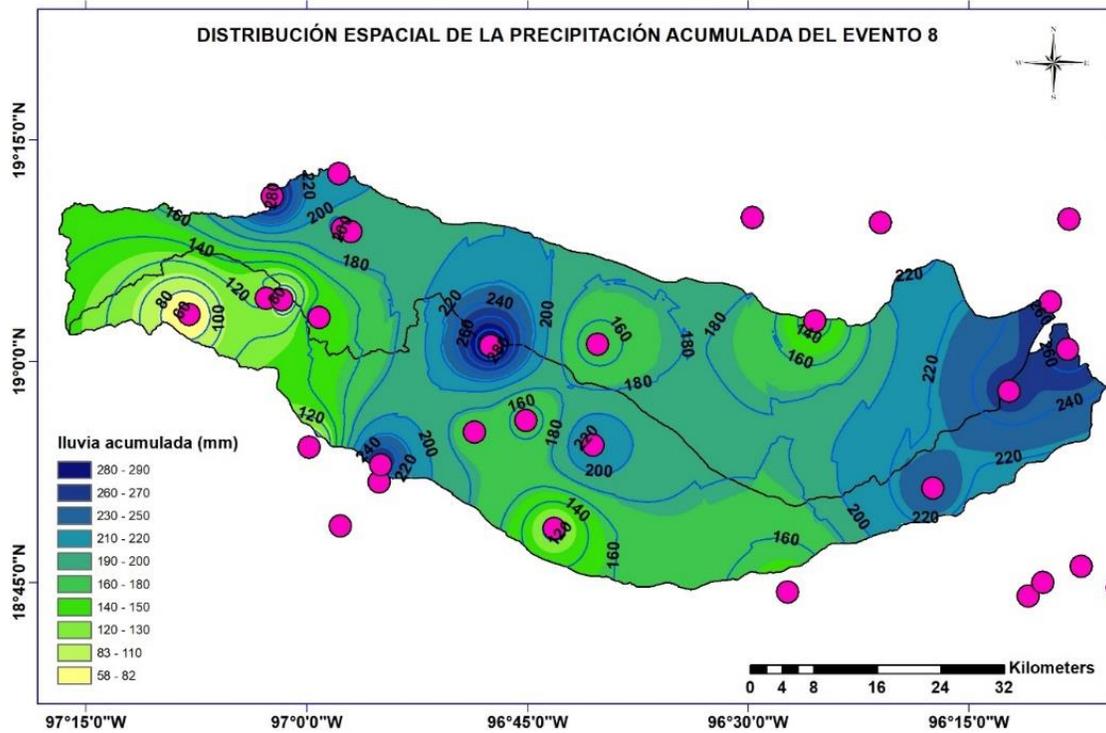


Figura 42. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 11 al 17 de julio de 1981.

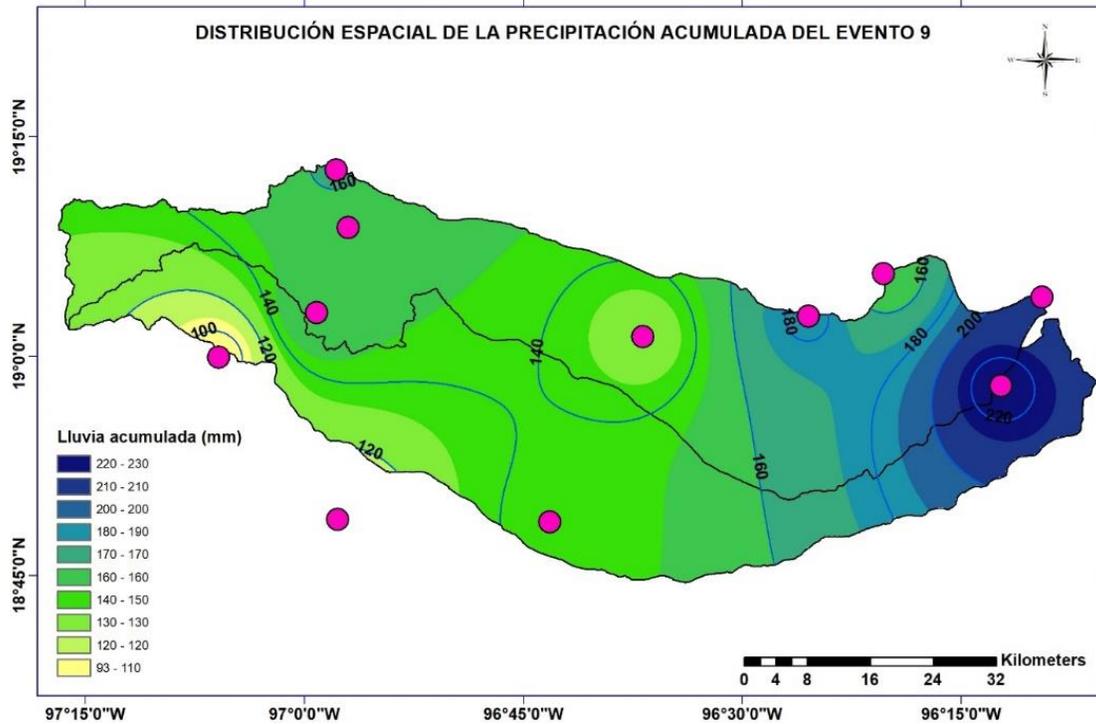


Figura 43. Distribución espacial de la lluvia acumulada del 05 al 12 de septiembre de 2008.

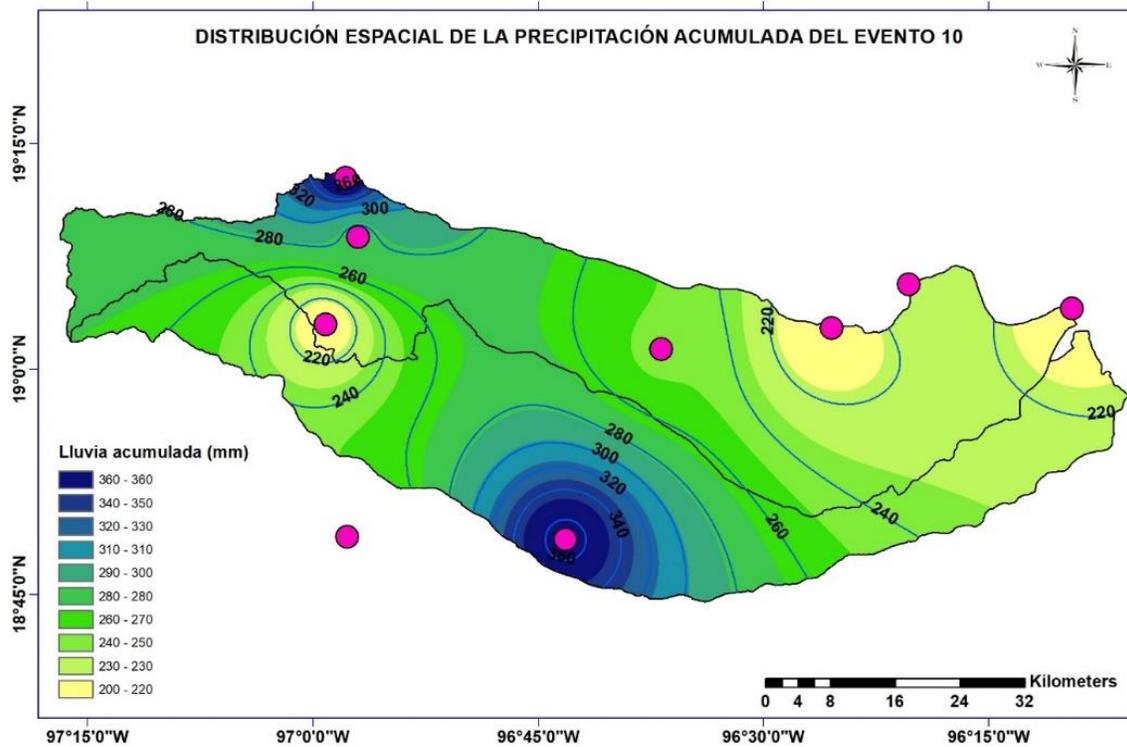


Figura 44. Distribución espacial de la lluvia acumulada 16 al 22 de septiembre de 2010.