



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO  
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

**T E S I S**

**DELIMITACIÓN DE ZONAS AGRÍCOLAS EN EL D.R. 008 METZTITLÁN, CON RIESGO  
DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO METZTITLÁN, HIDALGO, MÉXICO.**

que para obtener el grado de  
**Maestra en Ciencias y Tecnología del Agua**

presenta  
**Michell Deyanira Cruz Santiago**

**Tutor: Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo**  
**Cotutor: Dr. Héctor Alonso Ballinas González**

**Jiutepec, Morelos**

**Año 2022**





Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “DELIMITACIÓN DE ZONAS AGRÍCOLAS EN EL D.R. 008 METZTITLÁN CON RIESGO DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO METZTITLÁN, HIDALGO, MÉXICO”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

### **NOMBRE Y FIRMA DEL ESTUDIANTE**

**Michell Deyanira Cruz Santiago**

---

Jiutepec, Morelos, agosto de 2022





**MAESTRÍA EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA  
(Ingeniería en Sistemas Hidráulicos)**

Ante el Jurado integrado por:

Presidente: Dr. José Antonio Quevedo Tiznado

Secretario: Dr. Roel Simuta Champo

Vocal 1: Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

Vocal 2: Dr. Héctor Alonso Ballinas González

Vocal 3: M.I. Juan Fco. Gómez Martínez

Director de tesis

Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

Co-director de tesis

Dr. Héctor Alonso Ballinas González

Jiutepec, Morelos, agosto de 2022  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua



## **AGRADECIMIENTOS**

**Al CONACyT, al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y al Posgrado en Ciencias y Tecnología del Agua, por brindarme el apoyo para realizar mis estudios de maestría y permitirme ser parte de su gran historia.**

**Al Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo por su tiempo para revisar y realizar las correcciones pertinentes a este trabajo, por siempre tener la amabilidad de resolver mis dudas y sus charlas sobre experiencias.**

**Al Dr. Héctor Alonso Ballinas González por su tiempo, dedicación y el apoyo recibido para la realización de este trabajo.**

**Al M.I. Juan Fco. Gómez Martínez por su tiempo y por tener la amabilidad de compartir sus conocimientos conmigo.**

**Al Dr. José Antonio Quevedo Tiznado por su apoyo y tiempo dedicado a este trabajo.**

**Al Dr. Roel Simuta Champo por su apoyo y tiempo dedicado a este trabajo.**

**A todos mis profesores que durante la maestría me regalaron un poco de su conocimiento.**

**A Paty, por todos los consejos, por su apoyo, por siempre estar para mí y ser una buena amiga, a mis amigos: Lidia, Carolina, Denisse, Ogamisama y Rossana por todo su apoyo y con mención especial a Miguel Ángel, Violeta y Daniel, por su apoyo, por escuchar todas mis quejas, por estar conmigo en distintos momentos y por hacer mi estancia en la maestría más placentera.**

**A todos aquellos que me faltó mencionar y que de alguna forma contribuyeron en mi formación, ya sea directa o indirectamente... ¡Gracias!**

**Michell Deyanira**

## DEDICATORIA

A mis queridos padres: Teresita Santiago Hernández y Antonio Cruz Santiago, por todo el cariño, amor y apoyo incondicional que me han brindado, así como la formación que desde casa he recibido, lo que soy es gracias a ustedes.

A mis hermanos: Ilse, Nadia, Aranza, Aldair, Tomás por todo el cariño incondicional, por todos los momentos que no pase con ustedes, hermanos de los cuales que me siento sumamente orgullosa y cuyos talentos me sorprenden cada día más.

A mis abuelitos: Guadalupe y Tomás, Gabina (†) y Máximo (†), por su cariño, por esa calidad humana que me han regalado.

A la familia Cruz Santiago y Santiago Hernández, por brindarme todo el apoyo y contar siempre con ellos.

A la familia González Cruz, por brindarme su apoyo y por los consejos que me han hecho una mejor persona.

A la familia Montes Miranda por su apoyo incondicional y sus consejos.

De corazón...

**Michell Deyanira**

## RESUMEN.

El sector agrícola en México, según datos del SIAP la superficie sembrada para el año 2021 son 12.6 millones de ha de temporal y 5.4 millones de ha de riego, de las cuales 0.9 millones de ha se reportan como superficie siniestrada por diversos fenómenos hidrometeorológicos incluidas las inundaciones. En el Estado de Hidalgo, dentro de las actividades económicas de mayor importancia está la agricultura, el estado tiene cinco Distritos de Riego (D.R.), el D.R. 008 Metztlán tiene una extensión de 3,553.69 ha y presenta inundaciones recurrentes, a causa del desbordamiento de la laguna y el río Metztlán. Este trabajo de investigación tiene como objetivo estimar las áreas agrícolas con riesgo de inundación en el D.R. 008, basado en delimitar y caracterizar la cuenca del río Metztlán, calibrar el modelo hidrológico con datos meteorológicos e hidrométricos históricos observados, calibrar el modelo hidráulico para definir áreas con posible riesgo de inundación, desarrollar una metodología para la evaluación del riesgo agrícola y finalmente elaborar un mapa de riesgo de la zona agrícola.

La fase de modelación hidrológica se basó en eventos estadísticos, en donde los datos de entrada de la precipitación fueron tormentas de diseño, distribuidas bajo el método de Chen, dando como resultado los hidrogramas por subcuenca, que, comparados con el análisis hidrométrico a diferentes periodos de retorno, se realizó la calibración estadística del modelo hidrológico obteniendo un  $r^2$  de 0.98. Para el modelo hidráulico, se ingresaron los hidrogramas obtenidos en la modelación hidrológica para cada subcuenca de aporte al río Metztlán, generando un modelo hidráulico bidimensional, el cuál fue calibrado mediante la comparación de la mancha de inundación generada por el modelo y la obtenida de una imagen satelital, para el evento del 5 de octubre de 1999, con un error porcentual de 17.5 %, el cual tuvo lugar desde la comunidad de Venados hasta la Laguna de Metztlán, causando daños en 3,363 ha (94.6 % de la superficie total del D.R. 008), una vez calibrado el modelo se obtuvieron los parámetros profundidad, velocidad y duración de la inundación para los periodos de retorno 2, 5, 10, 20 y 50 años, permitiendo obtener el criterio de peligro. El análisis agrícola consistió en realizar un análisis de la fenología y características del cultivo, la estacionalidad de la inundación, la duración de la inundación, lo que permitió la caracterización de las zonas inundables, a partir de esto, se generó un criterio de vulnerabilidad y un valor de la cosecha expuesta, con lo que se construyó el criterio de riesgo para finalmente obtener los mapas de riesgo. De acuerdo con los resultados obtenidos, la metodología propuesta es factible para la obtención del riesgo por inundación en zonas agrícolas.

**Palabras clave:** modelo hidrológico, modelo hidráulico, agricultura de riego, peligro, vulnerabilidad, riesgo.

## CONTENIDO

RESUMEN.....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
3. JUSTIFICACIÓN.....	24
4. HIPÓTESIS.....	28
4.1. Hipótesis general.....	28
4.2. Hipótesis particular.....	28
5. OBJETIVOS.....	29
5.1. General.....	29
5.2. Particulares.....	29
6. REVISIÓN DE LITERATURA.....	30
7. MARCO TEÓRICO.....	33
7.1. El ciclo hidrológico.....	33
7.1.1. Procesos del ciclo hidrológico.....	34
7.2. Cuenca hidrológica.....	35
7.3. Estudio de cuencas hidrológicas.....	37
7.4. Proceso lluvia-escorrentía.....	37
7.4.1. Precipitación en exceso.....	39
7.4.2. Infiltración.....	39
7.5. Clasificación de los modelos.....	41
7.5.1. Clasificación de los modelos hidrológicos.....	42
7.5.2. Clasificación de los modelos hidráulicos.....	45
7.6. Análisis hidrológico.....	47
7.6.1. Estimación de crecientes en cuencas aforadas.....	48
7.6.2. Estimación de crecientes en cuencas no aforadas.....	57
7.6.3. Modelación hidráulica con el software HEC-HMS.....	64
7.7. Análisis hidráulico.....	69
7.7.1. Modelación hidráulica con el software Iber.....	69
7.8. Calibración.....	75
7.8.1. Coeficiente de determinación $r^2$ .....	75

7.8.2.	Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).	75
7.8.3.	Prueba de bondad de ajuste: Shapiro-Wilk.	76
7.8.4.	Coefficiente de correlación de Pearson.	77
7.9.	Definición de riesgo.	77
7.10.	Riesgo por inundación.	78
7.11.	Riesgo por inundación en zonas agrícolas.	79
7.11.1.	Tipos de daños en la agricultura.	79
7.11.2.	Categorías de daños por inundación en la agricultura.	80
7.11.3.	Peligro por inundación en la agricultura.	81
7.11.4.	Vulnerabilidad por inundación en la agricultura.	82
7.12.	Mapas de riesgo por inundación.	83
8.	MATERIALES Y MÉTODOS.	84
8.1.	Materiales.	84
8.2.	Métodos.	85
9.	CASO DE ESTUDIO.	87
9.1.	Elaboración del mapa base de la cuenca hidrológica.	87
9.1.1.	Delimitación y caracterización de la cuenca.	87
9.1.2.	Hidrografía.	90
9.1.3.	Delimitación de las subcuencas.	95
9.1.4.	Tiempo de concentración.	97
9.1.5.	Tiempo de retraso.	98
9.1.6.	Meteorología.	98
9.2.	Análisis hidrometeorológico.	108
9.2.1.	Estaciones meteorológicas.	109
9.2.2.	Estaciones hidrométricas.	112
9.2.3.	Análisis de la precipitación y los escurrimientos históricos.	112
9.3.	Modelación hidrológica con el modelo HEC-HMS versión 4.2.	132
9.3.1.	Periodo de simulación.	132
9.3.2.	Datos de entrada del modelo HEC-HMS.	132
9.3.3.	Modelo hidrológico.	147

9.4.	Acoplamiento del modelo hidrológico y construcción del modelo hidráulico.	152
9.5.	Modelación hidráulica con el modelo Iber versión 2.5.2.....	153
9.5.1.	Datos de entrada del modelo.....	153
9.5.2.	Simulación.....	159
9.6.	Análisis agrícola.....	160
9.6.1.	Índice de peligro.....	162
9.6.2.	Índice de vulnerabilidad.....	162
9.6.3.	Valor de exposición.....	163
10.	RESULTADOS.....	165
10.1.	Caracterización de la cuenca del río Metztlán.....	165
10.2.	Calibración del modelo hidrológico.....	166
10.2.1.	Coeficiente $r^2$ .....	168
10.2.2.	Coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	169
10.2.3.	Prueba de normalidad.....	169
10.2.4.	Coeficiente de correlación de Pearson.....	170
10.3.	Calibración del modelo hidráulico.....	170
10.4.	Riesgo en el D.R. 008 Metztlán.....	176
10.4.1.	Principales cultivos.....	176
10.4.2.	Fenología del cultivo de maíz.....	178
10.4.3.	Índice de peligro.....	181
10.4.4.	Índice de vulnerabilidad.....	184
10.4.5.	Valor de exposición.....	190
10.4.6.	Riesgo.....	193
10.4.7.	Riesgo en pérdidas por hectárea.....	197
11.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	198
12.	CONCLUSIONES.....	200
13.	FUENTES CONSULTADAS.....	202
14.	ANEXOS.....	208

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Superficie sembrada y cosechada por estado, año agrícola 2019. ....	21
Figura 2.2. Valor de la producción agrícola por estado, año agrícola 2019. ....	21
Figura 2.3. Superficie sembrada y valor de la producción en el Estado de Hidalgo, año agrícola 2019. ....	22
Figura 3.1. Ubicación del D.R. 008 Metztlán. ....	24
Figura 3.2. Superficie sembrada y valor de la producción de los D.R. del Estado de Hidalgo. ....	25
Figura 7.1. Ciclo hidrológico de un ambiente natural. Fuente: Adaptado de McCuen (1998). ....	33
Figura 7.2. Relación entre la precipitación y el escurrimiento total. Fuente: Campos Aranda (2007). ....	39
Figura 7.3. Representación gráfica de un modelo. Fuente: Adaptado de Larios (2014). ..	41
Figura 7.4. Clasificación de modelos. Fuente: Roblero (2013). ....	42
Figura 7.5. Diagrama del procesamiento estadístico de lluvias máximas diarias. ....	63
Figura 8.1. Metodología general para la definición del riesgo agrícola por inundación en el D.R. 008 Metztlán. ....	86
Figura 9.1. Ubicación de la cuenca del río Metztlán. ....	88
Figura 9.2. Orden de corriente en la cuenca del río Metztlán. ....	91
Figura 9.3. Cauce principal de la cuenca del río Metztlán. ....	93
Figura 9.4. Elevaciones de la cuenca del río Metztlán. ....	94
Figura 9.5. Subcuencas de la cuenca del río Metztlán. ....	95
Figura 9.6. Polígonos de Thiessen en la cuenca del río Metztlán. ....	100
Figura 9.7. Clima en la cuenca del río Metztlán. ....	105
Figura 9.8. Edafología en la cuenca del río Metztlán. ....	106
Figura 9.9. Distritos de Riego en la cuenca del río Metztlán. ....	107
Figura 9.10. Uso de suelo y vegetación en la cuenca del río Metztlán. ....	108
Figura 9.11. Precipitación diaria estación meteorológica 13042 Zacualtipán. ....	114
Figura 9.12. Gráfica de las FDP en la estación meteorológica 13042 Zacualtipán. ....	121
Figura 9.13. Gráfica de las FDP de la estación hidrométrica 26042 Venados. ....	131
Figura 9.14. Delimitación de la cuenca, subcuencas y corrientes. ....	133
Figura 9.15. Precipitación correspondiente a cada periodo de retorno y estación meteorológica. ....	134
Figura 9.16. Curva-Masa unitaria de tormenta centrada de Chen en la cuenca del río Metztlán. ....	135
Figura 9.17. Hietograma Unitario Centrado de Chen en la cuenca del río Metztlán. ....	135
Figura 9.18. Hietograma Unitario Centrado de Chen en HEC-HMS. ....	136
Figura 9.19. Número de curva para los usos de suelo que se presentan en la cuenca del río Metztlán. ....	142
Figura 9.20. Proyecto creado con capas. ....	147
Figura 9.21. Área de cada subcuenca y definición del método de pérdida de número de curva del SCS y transformación del hidrograma unitario. ....	148
Figura 9.22. Valores ingresados de número de curva a cada subcuenca. ....	148
Figura 9.23. Salidas de las subcuencas y cauce principal. ....	149

Figura 9.24. Área de influencia de estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca.	149
Figura 9.25. Modelo hidrológico completo en HEC-HMS.	150
Figura 9.26. Simulación del modelo hidrológico.	151
Figura 9.27. Acoplamiento del modelo hidrológico y construcción del modelo hidráulico.	152
Figura 9.28. Importación del shapefile para la construcción de superficies NURBS para el modelo hidráulico.	153
Figura 9.29. Colapsar el modelo importado.	153
Figura 9.30. Generación de las superficies NURBS.	154
Figura 9.31. Tamaño de malla asignada a cada superficie NURBS.	154
Figura 9.32. Rugosidad asignada al modelo hidráulico.	155
Figura 9.33. Malla del modelo.	155
Figura 9.34. Asignación de elevación a la malla.	156
Figura 9.35. Entradas en el modelo hidráulico.	157
Figura 9.36. Entrada de los hidrogramas.	158
Figura 9.37. parámetros de tiempo de simulación.	159
Figura 9.38. Inicio de cálculo.	159
Figura 9.39. Modelo hidráulico completo.	160
Figura 9.40. Definición de riesgo. Fuente: adaptado de CENAPRED (2014).	161
Figura 9.41. Construcción del índice de peligro. Fuente: elaboración propia.	162
Figura 9.42. Construcción del índice de vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.	163
Figura 9.43. Construcción del cálculo del valor de exposición. Fuente: elaboración propia.	164
Figura 10.1. Simulación en la salida 36, correspondiente a la estación hidrométrica Venados, TR 2 años.	166
Figura 10.2. Coeficiente $r^2$ de los gastos observados vs gastos simulados.	169
Figura 10.3. Imagen satelital Landsat 5 del 21 de octubre de 1999.	171
Figura 10.4. Imagen de solo visualización de fecha 21 de octubre de 1999.	172
Figura 10.5. Hidrograma de entrada para la estación hidrométrica 26042 Venados.	173
Figura 10.6. Resultado del modelo hidráulico en la imagen Landsat 5.	174
Figura 10.7. Superficie sembrada en el D.R. 008 Metztlán, ciclo otoño-invierno.	177
Figura 10.8. Superficie sembrada en el D.R. 008 Metztlán, ciclo primavera-verano.	177
Figura 10.9. Fenología del cultivo de maíz.	179
Figura 10.10. Criterios de peligrosidad propuesto para esta metodología.	182
Figura 10.11. Mapa de peligro para un Tr de 20 años.	183
Figura 10.12. Fenología del cultivo vs gastos máximos instantáneos y medios mensuales.	185
Figura 10.13. Gráfica de la función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 1.	188
Figura 10.14. Gráfica de la función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 2 y 3.	189
Figura 10.15. Mapa de vulnerabilidad para la etapa fenológica 2 para un Tr de 20 años.	189
Figura 10.16. Mapa de exposición para un Tr de 20 años.	192
Figura 10.17. Mapa de riesgo para un Tr de 20 años.	195
Figura 10.18. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 20 años.	196

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 7.1. Programas de cómputo para modelación hidrológica. ....	43
Cuadro 7.2. Modelos hidrodinámicos.....	45
Cuadro 7.3. Funciones de distribución de probabilidad utilizadas en hidrología.....	52
Cuadro 7.4. Ventajas y desventajas de los métodos de distribución espacial de la lluvia. ....	60
Cuadro 7.5. Descripción de los elementos hidrológicos.....	65
Cuadro 7.6. Métodos de cálculo para subcuencas.....	66
Cuadro 7.7. Descripción de los métodos incluidos en el modelo meteorológico.....	67
Cuadro 7.8. Componentes de los datos de entrada. ....	69
Cuadro 7.9. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.....	76
Cuadro 7.10. Clasificación de daños en la agricultura por inundación, Brémond et al., (2013). ....	80
Cuadro 9.1. Orden de corriente. ....	90
Cuadro 9.2. Subcuencas de la cuenca del río Metztlán.....	96
Cuadro 9.3. Tiempo de concentración de la cuenca. ....	98
Cuadro 9.4. Tiempo de retraso de la cuenca. ....	98
Cuadro 9.5. Años de registro de las estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del río Metztlán. ....	98
Cuadro 9.6. Estación meteorológica asignada a cada subcuenca. ....	101
Cuadro 9.7. Precipitación media mensual y anual para cada estación meteorológica convencional en la cuenca del río Metztlán.....	104
Cuadro 9.8. Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Metztlán.....	110
Cuadro 9.9. Estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Metztlán.....	112
Cuadro 9.10. Precipitación diaria, estación meteorológica 13042 Zacualtipán. ....	113
Cuadro 9.11. Precipitación máxima anual.....	115
Cuadro 9.12. Cálculo del periodo de retorno para precipitación.....	116
Cuadro 9.13. FDP para precipitación máxima anual. ....	118
Cuadro 9.14. Error Cuadrático Mínimo para cada FDP.....	120
Cuadro 9.15. Precipitación máxima probable para diferentes periodos de retorno.....	121
Cuadro 9.16. Precipitación máxima probable y función de distribución de probabilidad con menor error para cada $T_r$ de las estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del río Metztlán. ....	123
Cuadro 9.17. Gasto instantáneo máximo diario anual.....	124
Cuadro 9.18. Cálculo del periodo de retorno para gasto instantáneo máximo diario anual. ....	126
Cuadro 9.19. FDP para gasto instantáneo máximo diario anual. ....	128
Cuadro 9.20. Error cuadrático mínimo para cada FDP de la estación hidrométrica 26042 Venados. ....	131
Cuadro 9.21. Gasto instantáneo máximo diario para diferentes periodos de retorno. ....	132
Cuadro 9.22. Textura por tipos de suelo en la cuenca. ....	136
Cuadro 9.23. Cuadro de grupo de suelo resultante de las combinaciones de grupos de suelo según el USDA.....	137
Cuadro 9.24. Grupo de suelo de acuerdo con el USDA que corresponde a cada textura y tipo de suelo. ....	138

Cuadro 9.25. Tipos de uso de suelo en la cuenca. ....	139
Cuadro 9.26. Condición hidrológica para cada uso de suelo.....	140
Cuadro 9.27. Número de curva ponderada para cada subcuenca. ....	143
Cuadro 9.28. Tiempo de concentración en minutos por subcuenca. ....	144
Cuadro 9.29. Tiempo de retraso en minutos por subcuenca. ....	146
Cuadro 10.1. Características morfométricas, fisiográficas e hidrográficas de la cuenca del río Metztlán. ....	165
Cuadro 10.2. Número de curva ponderada calibrada para cada subcuenca. ....	166
Cuadro 10.3. Gastos observados vs Gastos simulados. ....	168
Cuadro 10.4. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.....	169
Cuadro 10.5. Resumen de las pruebas de bondad y ajuste. ....	170
Cuadro 10.6. Error porcentual entre las áreas del modelo Iber e imagen Landsat. ....	175
Cuadro 10.7. Error porcentual entre las áreas del modelo Iber e imagen de solo visualización. ....	175
Cuadro 10.8. Duración del ciclo productivo del cultivo de maíz de grano y elote en el D.R. 008 Metztlán. ....	178
Cuadro 10.9. Etapas de crecimiento del cultivo de maíz.....	179
Cuadro 10.10. Altura de la planta de maíz conforme a los días de desarrollo. ....	181
Cuadro 10.11. Determinación del índice de peligro.....	182
Cuadro 10.12. Clasificación del índice de peligro.....	183
Cuadro 10.13. Área inundada (ha) por Tr por clasificación del peligro. ....	183
Cuadro 10.14. Profundidad de la inundación propuesta para generar el índice de vulnerabilidad.....	184
Cuadro 10.15. Días de desarrollo por etapa fenológica. ....	185
Cuadro 10.16. Altura de la planta conforme a la etapa fenológica. ....	185
Cuadro 10.17. Clave por etapa fenológica. ....	186
Cuadro 10.18. Clave por profundidad propuesta.....	186
Cuadro 10.19. Combinaciones para determinar la vulnerabilidad. ....	186
Cuadro 10.20. Clasificación y tipificación de la vulnerabilidad.....	187
Cuadro 10.21. Tipificación de la función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 1. ...	187
Cuadro 10.22. Tipificación de la función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 2 y 3. ....	188
Cuadro 10.23. Área inundada (ha) por Tr por clasificación de vulnerabilidad.....	190
Cuadro 10.24. Afectación del rendimiento del cultivo en relación a la duración de la inundación. ....	190
Cuadro 10.25. Valores de referencia de rendimiento y precio del maíz. ....	191
Cuadro 10.26. Pérdidas económicas por clasificación del peligro. ....	191
Cuadro 10.27. Valor de exposición para cada clasificación de peligro por Tr.....	193
Cuadro 10.28. Resultados de multiplicar peligro por vulnerabilidad. ....	193
Cuadro 10.29. Matriz del valor de exposición por los coeficientes de peligro por vulnerabilidad para un Tr de 20 años. ....	193
Cuadro 10.30. Cálculo del riesgo para un Tr de 20 años. ....	194
Cuadro 10.31. Matriz de riesgo para un Tr de 20 años. ....	194
Cuadro 10.32. Clasificación del riesgo para un Tr de 20 años. ....	194

Cuadro 10.33. Índice de riesgo conforme a la matriz de riesgo para un Tr de 20 años..	195
Cuadro 10.34. Índice de riesgo para un Tr de 20 años. ....	195
Cuadro 10.35. Valores del índice de riesgo por clasificación para cada Tr. ....	196
Cuadro 10.36. Área inundada (ha) para cada clasificación de índice de riesgo por Tr...	197
Cuadro 10.37. Utilidad probable por hectárea.....	197

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Cuadros auxiliares para la determinación del número de curva (NC). .	208
Anexo 2. Hidrogramas de entrada del modelo hidráulico.....	216
Hidrogramas de entrada para la calibración del modelo hidráulico.....	216
Hidrogramas de entrada para las simulaciones del periodo de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 20 y 50 años.....	222
Anexo 3. Mapas de peligro por inundación en el D.R. 008 Metztlán. ....	228
Anexo 4. Mapas de vulnerabilidad por inundación en el D.R. 008 Metztlán.....	233
Anexo 5. Mapas de exposición por inundación en el D.R. 008 Metztlán. ....	238
Anexo 6. Mapas de riesgo por inundación en el D.R. 008 Metztlán. ....	243
Anexo 7. Mapas de índice de riesgo por inundación en el D.R. 008 Metztlán...	248
Anexo 8. Utilidad probable por clasificación de riesgo para diferente periodo de retorno.....	253

## ÍNDICE DE FIGURAS DE ANEXOS

Figura 0.1. Hidrograma de entrada 1 para calibración del modelo hidráulico. ....	216
Figura 0.2. Hidrograma de entrada 2 para calibración del modelo hidráulico. ....	216
Figura 0.3. Hidrograma de entrada 3 para calibración del modelo hidráulico. ....	217
Figura 0.4. Hidrograma de entrada 4 para calibración del modelo hidráulico. ....	217
Figura 0.5. Hidrograma de entrada 5 para calibración del modelo hidráulico. ....	218
Figura 0.6. Hidrograma de entrada 6 para calibración del modelo hidráulico. ....	218
Figura 0.7. Hidrograma de entrada 7 para calibración del modelo hidráulico. ....	219
Figura 0.8. Hidrograma de entrada 8 para calibración del modelo hidráulico. ....	219
Figura 0.9. Hidrograma de entrada 9 para calibración del modelo hidráulico. ....	220
Figura 0.10. Hidrograma de entrada 10 para calibración del modelo hidráulico. ....	220
Figura 0.11. Hidrograma de entrada 11 para calibración del modelo hidráulico. ....	221
Figura 0.12. Hidrograma de entrada 12 para calibración del modelo hidráulico. ....	221
Figura 0.13. Hidrogramas de la entrada 1 de cada periodo de retorno. ....	222
Figura 0.14. Hidrogramas de la entrada 2 de cada periodo de retorno. ....	222
Figura 0.15. Hidrogramas de la entrada 3 de cada periodo de retorno. ....	223
Figura 0.16. Hidrogramas de la entrada 4 de cada periodo de retorno. ....	223
Figura 0.17. Hidrogramas de la entrada 5 de cada periodo de retorno. ....	224
Figura 0.18. Hidrogramas de la entrada 6 de cada periodo de retorno. ....	224
Figura 0.19. Hidrogramas de la entrada 7 de cada periodo de retorno. ....	225
Figura 0.20. Hidrogramas de la entrada 8 de cada periodo de retorno. ....	225
Figura 0.21. Hidrogramas de la entrada 9 de cada periodo de retorno. ....	226
Figura 0.22. Hidrogramas de la entrada 10 de cada periodo de retorno. ....	226
Figura 0.23. Hidrogramas de la entrada 11 de cada periodo de retorno. ....	227
Figura 0.24. Hidrogramas de la entrada 12 de cada periodo de retorno. ....	227
Figura 0.1. Mapa de peligro para un Tr de 2 años. ....	228
Figura 0.2. Mapa de peligro para un Tr de 5 años. ....	229
Figura 0.3. Mapa de peligro para un Tr de 10 años. ....	230
Figura 0.4. Mapa de peligro para un Tr de 20 años. ....	231
Figura 0.5. Mapa de peligro para un Tr de 50 años. ....	232
Figura 0.1. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 2 años. ....	233
Figura 0.2. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 5 años. ....	234
Figura 0.3. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 10 años. ....	235
Figura 0.4. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 20 años. ....	236
Figura 0.5. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 50 años. ....	237
Figura 0.1. Mapa de exposición para un Tr de 2 años. ....	238
Figura 0.2. Mapa de exposición para un Tr de 5 años. ....	239
Figura 0.3. Mapa de exposición para un Tr de 10 años. ....	240
Figura 0.4. Mapa de exposición para un Tr de 20 años. ....	241
Figura 0.5. Mapa de exposición para un Tr de 50 años. ....	242
Figura 0.1. Mapa de riesgo para un Tr de 2 años. ....	243
Figura 0.2. Mapa de riesgo para un Tr de 5 años. ....	244
Figura 0.3. Mapa de riesgo para un Tr de 10 años. ....	245
Figura 0.4. Mapa de riesgo para un Tr de 20 años. ....	246

Figura 0.5. Mapa de riesgo para un Tr de 50 años. ....	247
Figura 0.1. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 2 años. ....	248
Figura 0.2. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 5 años. ....	249
Figura 0.3. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 10 años. ....	250
Figura 0.4. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 20 años. ....	251
Figura 0.5. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 50 años. ....	252

## **ÍNDICE DE CUADROS DE ANEXOS**

Cuadro 0.1. Cuadro de decisión para determinar el grupo de suelo y el grupo de suelo resultante de las combinaciones de grupos de suelo según el USDA que corresponde a la edafología de México. ....	208
Cuadro 0.2. Agrupación de los usos de suelo en México dentro de los usos de suelo establecidos en el TR-55. ....	209
Cuadro 0.3. Asignación del número de curva para los usos de suelo que se presentan en la República Mexicana. ....	211
Cuadro 0.1. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 2 años. ....	253
Cuadro 0.2. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 5 años. ....	253
Cuadro 0.3. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 10 años. ....	253
Cuadro 0.4. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 20 años. ....	254
Cuadro 0.5. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 50 años. ....	254

## 1. INTRODUCCIÓN.

Las inundaciones provocan los mayores desastres en el mundo y equivalen a 50% de las catástrofes con significativo impacto en la sociedad (Mendoza Cariño et al., 2018). México por su ubicación y sus características geográficas favorecen la presencia de fenómenos hidrometeorológicos, asociados a estos fenómenos también se presentan lluvias torrenciales que provocan inundaciones, por sus efectos, los desastres pueden tener importantes consecuencias en el ámbito económico y social, en el desarrollo de una región e inclusive llegar a comprometer la seguridad nacional (CENAPRED, 2004).

Existe la necesidad de conocer los peligros y amenazas a los que se está expuesto; estudiar y conocer los fenómenos perturbadores identificando dónde, cuándo y cómo afectan. Identificar y establecer, a distintos niveles de escala y detalle, las características y niveles actuales de riesgo, entendiendo el riesgo como el producto del peligro (agente perturbador), la vulnerabilidad (propensión a ser afectado) y la exposición (el valor del sistema afectable) (CENAPRED, 2004), en el análisis de los escenarios de riesgo es de gran utilidad diseñar acciones y programas para mitigar y reducir el impacto de los desastres.

El sector agrícola es vulnerable a los efectos de inundaciones (Mendoza Cariño et al., 2018), cuando se produce una inundación una gran superficie es afectada (Baró-Suárez et al., 2007a). Las inundaciones tienen un efecto negativo sobre la mayoría de las plantas terrestres debido a que reduce su crecimiento e induce a la senescencia. La deficiencia del oxígeno, efecto principal de la inundación cambia el metabolismo de la planta induciendo la vía anaeróbica o fermentativa como mecanismo alternativo, aunque poco eficiente para la producción de energía. El estrés hídrico por inundación es un factor limitante en la producción de cultivos como maíz (*Zea mays L.*), frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) y trigo (*Triticum aestivum L.*), entre otros (Solís, 2014).

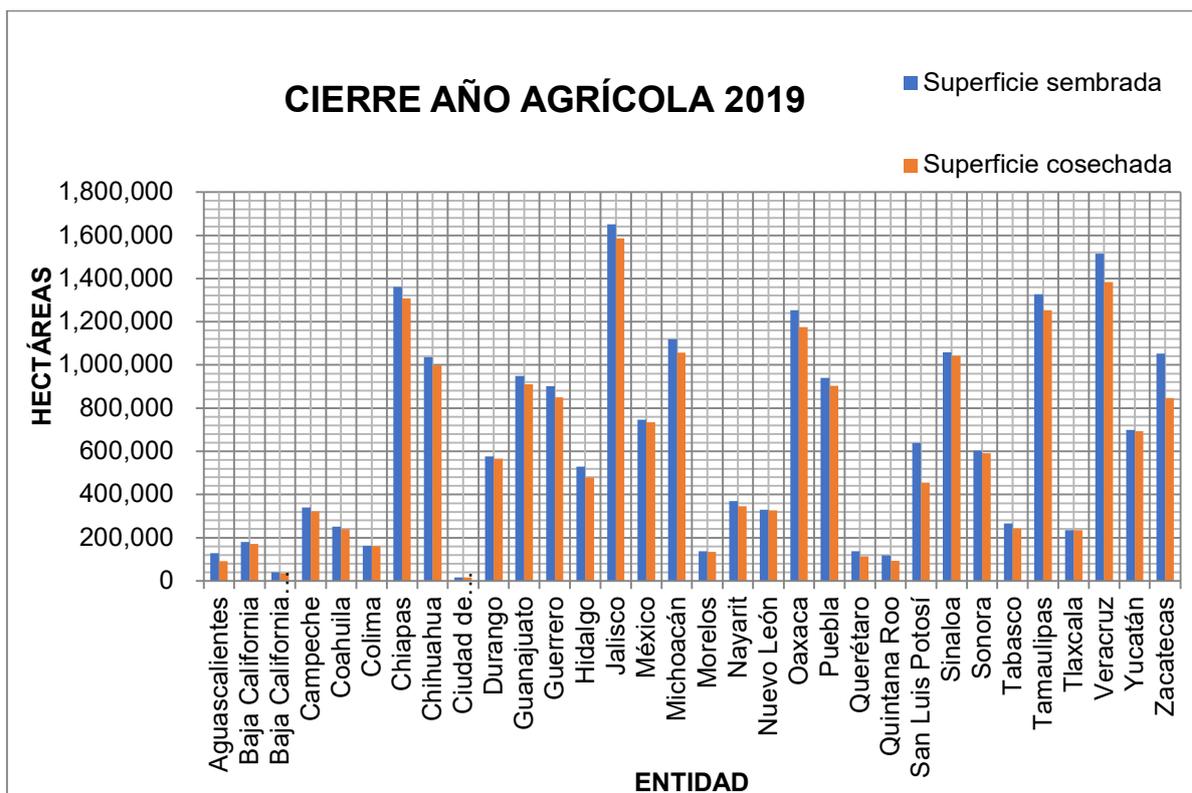
El objetivo de este trabajo es desarrollar y aplicar una metodología para evaluar el riesgo por inundación en zonas agrícolas usando el modelo matemático Iber, considerando cuatro parámetros: estacionalidad de la inundación, profundidad del

agua, duración y velocidad de la corriente, tomando como caso de estudio el D.R. 008 Metztlán, debido a que presenta inundaciones recurrentes, las cuales provocan severas afectaciones al sistema productivo, destruyendo la infraestructura hidroagrícola del D.R., con repercusiones económicas y ambientales, por lo que definir las zonas en riesgo pueda ayudar en la toma de decisiones para mitigar los daños causados por las inundaciones al sector agrícola, por otro lado, se espera que la metodología aquí propuesta pueda replicarse en zonas agrícolas con problemas de inundación.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

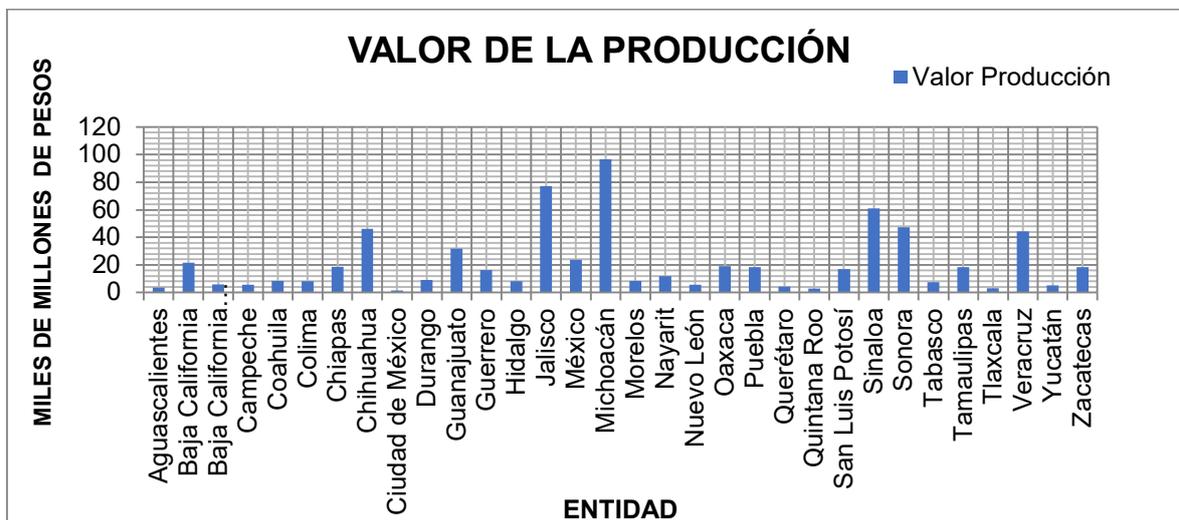
Durante los años del 2000 a 2019, la Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT) registró 7,348 eventos de desastre en el mundo, de los cuales 3,254 fueron desastres por inundación. (UNDRR & CRED, 2019). Las pérdidas en la producción agrícola y ganadera por inundaciones en el año 2018 se estimaron en 19,000 millones de dólares (FAO, 2018). Las inundaciones en México son un tema de fondo, pues en la actualidad son el fenómeno que causa más daños económicos en el país (Hernández-Uribe et al., 2017), en el año 2017 generaron pérdidas por 230 millones de dólares (Forbes, 2017), en el año 2018 las inundaciones afectaron a 8 estados y 45 municipios (CENAPRED, 2019a). El monto de los daños y pérdidas, desde el año 2000 al año 2019, fue de 4,915.7 millones de pesos (CENAPRED, 2020).

El sector agrícola en México está expuesto a las inundaciones, generando daños a la economía regional y nacional por la interrupción del ciclo productivo, reducción de los ingresos, desempleo y desabasto de alimentos, entre otros (Vega-Serratos et al., 2018). En el año 2019, el cierre de la producción agrícola a nivel nacional fue de una superficie sembrada de 20.6 millones de hectáreas, la superficie cosechada fue de 19.3 millones de hectáreas y la pérdida por superficie siniestrada asciende a 844,121.54 hectáreas, el volumen de producción fue de 704 millones toneladas con un valor estimado de 675 mil millones de pesos (SIAP, 2020).



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, año agrícola 2019.

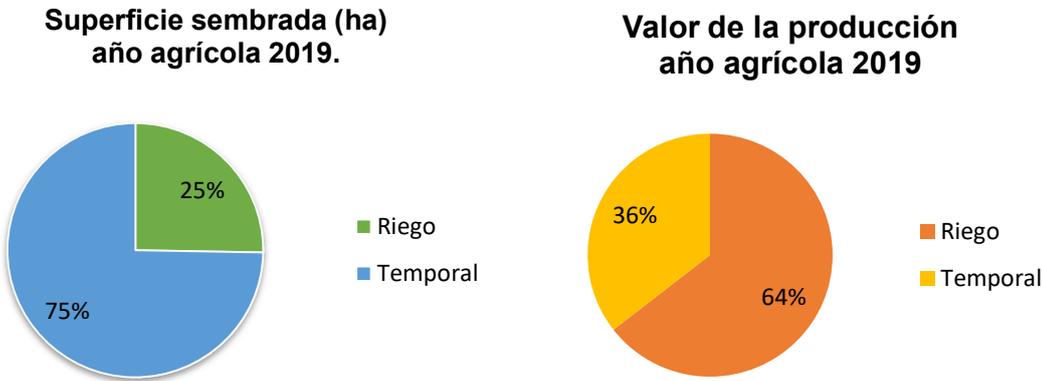
Figura 2.1. Superficie sembrada y cosechada por estado, año agrícola 2019.



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, año agrícola 2019.

Figura 2.2. Valor de la producción agrícola por estado, año agrícola 2019.

En el Estado de Hidalgo, dentro de las actividades económicas de mayor importancia está la agricultura debido a que es una de las principales fuentes de empleo, en el año agrícola 2019, la superficie sembrada fue de 529,426.02 hectáreas, la superficie cosechada fue de 479,435.61 hectáreas, con un valor de producción de 7.97 mil millones de pesos, del total de la superficie sembrada 395,559.76 hectáreas son de temporal (75%) con un valor de producción de 2.83 mil millones de pesos y 133,866.26 hectáreas son de riego (25%) con un valor de producción de 5.14 mil millones de pesos. (SIAP, 2020), el estado tiene cinco Distritos de Riego (D.R.): 003 Tula, 008 Metztlán, 028 Tulancingo, 100 Alfajayucan y 112 Ajacuba (CONAGUA, 2016).



Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP, año agrícola 2019.

Figura 2.3. Superficie sembrada y valor de la producción en el Estado de Hidalgo, año agrícola 2019.

La determinación del riesgo por inundación se ha convertido en una práctica cada vez más recurrente, debido principalmente a la mitigación de desastres. Cuantificar el riesgo por inundación es una tarea compleja por las variables involucradas y su estado evolutivo (Hernández-Urbe et al., 2017). La existencia de un riesgo implica la presencia de un agente perturbador (fenómeno natural o generado por el hombre) que tenga la probabilidad de ocasionar daños a un sistema afectable (asentamientos humanos, infraestructura, planta productiva, etc.) en un grado tal, que constituya un desastre. La definición de riesgo más aceptada es que está en función de tres factores: peligro, vulnerabilidad y el valor

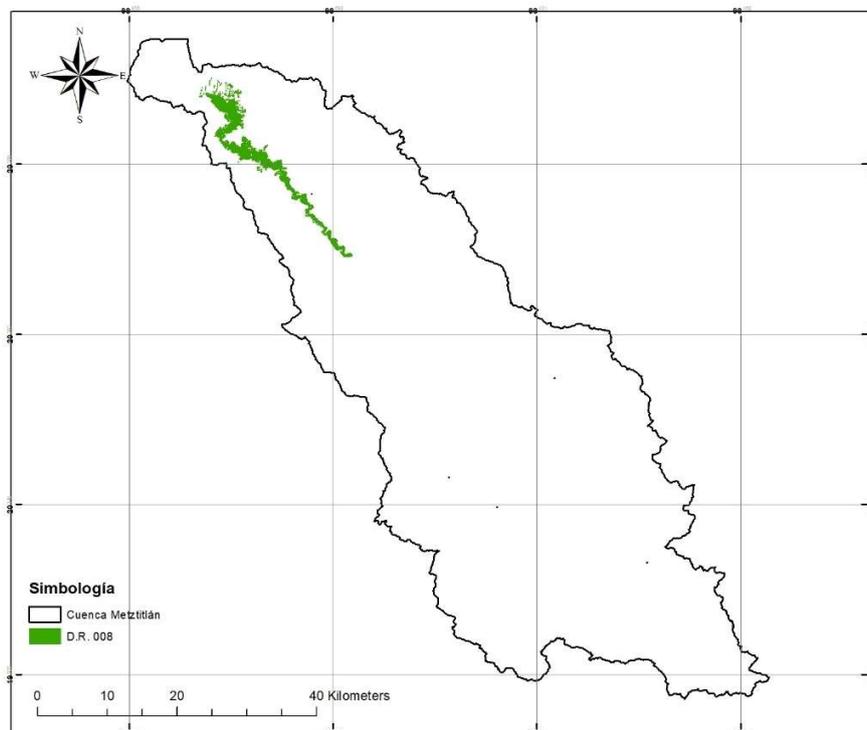
de los bienes expuestos. En los estudios de peligro es importante definir el fenómeno en parámetros cuantitativos, la vulnerabilidad nos define el grado de pérdidas esperadas y en el grado de exposición es común que se exprese el valor de los daños (CENAPRED, 2004), lo que nos lleva a identificar las principales variables que intervienen en la evaluación de daños económicos y una vez identificados se consideren en las curvas de vulnerabilidad a generar (Solís, 2014).

En la literatura, principalmente estudios realizados en Europa, han desarrollado métodos para evaluar el daño agrícola desde un punto de vista económico, sin embargo, existe una clara necesidad de consolidar las funciones de daño a los cultivos (Brémond et al., 2013). En México, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), ha desarrollado metodologías para evaluar el riesgo por inundación, sin embargo, están enfocados en daño a la población dejando de lado otros sectores como el agrícola.

El objetivo de este trabajo es desarrollar y aplicar una metodología para evaluar el riesgo por inundación en zonas agrícolas usando el modelo matemático Iber, considerando cuatro parámetros: estacionalidad de la inundación, profundidad del agua, duración y velocidad de la corriente, tomando como caso de estudio la cuenca del río Metztitlán en el que se encuentra el D.R. 008 Metztitlán, debido a que la cuenca del río Metztitlán presenta inundaciones recurrentes a causa del desbordamiento de la laguna Metztitlán y el río (Mendoza et al., 2011), las cuales provocan severas afectaciones al sistema productivo, (Mendoza Cariño et al., 2018), la infraestructura hidroagrícola del D.R., de las localidades urbanas y caminos, repercutiendo en la sociedad y el ambiente (Mendoza et al., 2011), por lo que definir las zonas en riesgo pueda ayudar en la toma de decisiones para mitigar los daños causados por las inundaciones al sector agrícola, por otro lado, se espera que la metodología aquí propuesta pueda replicarse en zonas agrícolas con problemas de inundación.

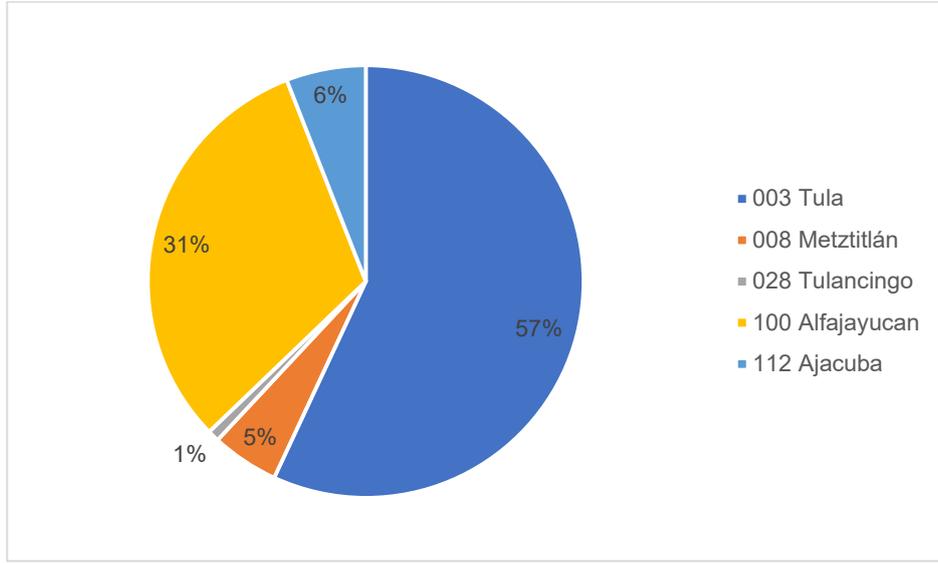
### 3. JUSTIFICACIÓN.

El D.R. 008 tiene una extensión de 3,553.69 hectáreas, se ubica en la cuenca del río Metztitlán la cual tiene un área de 2,937.029 km<sup>2</sup>, también el D.R. 008 se encuentra dentro de la Reserva de la Biosfera de la Barranca de Metztitlán (RBBM), ocupando el 6.1% de ésta (Mendoza et al., 2011), en cuanto a superficie sembrada ocupa el cuarto lugar de los cinco D.R. que tiene el Estado de Hidalgo, sin embargo, produce durante los ciclos de cultivo bajo riego: primavera-verano, otoño-invierno y segundos cultivos, que permiten obtener, en conjunto, una producción elevada de maíz, frijol, ejote, calabacita y sorgo, el D.R. reportó en el año agrícola 2015-2016, una superficie cosechada de 5,075 hectáreas, con una producción de 56,938 toneladas con un valor de 271.6 millones de pesos (CONAGUA, 2016), similar al D.R. que ocupa el tercer lugar a superficie cosechada convirtiendo al D.R. 008 en relevante para el Estado de Hidalgo.

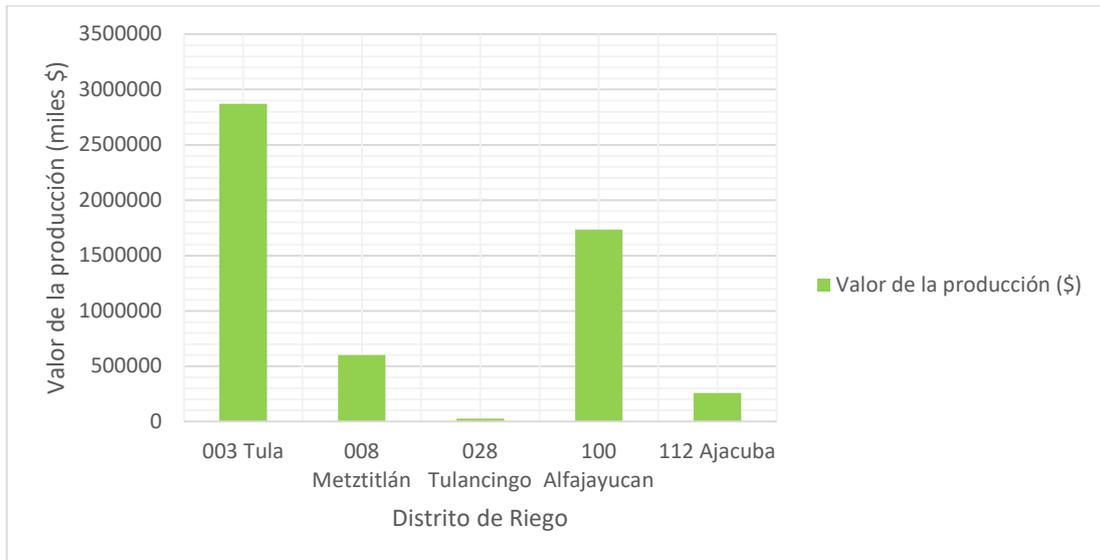


Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI, ESCALA 1:50,000.

Figura 3.1. Ubicación del D.R. 008 Metztitlán.



a) Superficie sembrada (ha). Distritos de Riego del Estado de Hidalgo, año agrícola 2018.



b) Valor de la producción (\$) por D.R., año agrícola 2018.

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, año agrícola 2018.

Figura 3.2. Superficie sembrada y valor de la producción de los D.R. del Estado de Hidalgo.

La cuenca del río Metztlán, presenta inundaciones recurrentes, a causa del desbordamiento de la laguna Metztlán y el río (Mendoza et al., 2011), las cuales provocan severas afectaciones al sistema productivo, al sector social y al medio

ambiente (Mendoza Cariño et al., 2018), la ocurrencia de lluvia intensa en cortos periodos, llenan rápidamente la laguna que tiene poco volumen de almacenamiento y desborda sobre el D.R. 008 y algunas comunidades cercanas desde la parte sureste de la cuenca hasta la noroeste, destruyendo la infraestructura hidroagrícola del D.R., de las localidades urbanas y caminos, repercutiendo en la sociedad y el ambiente (Mendoza et al., 2011). Los eventos más relevantes se presentaron en 1999 y 2005: el primero alcanzó a la comunidad de Venados (López-Herrera, 2015).y cubrió 4,200 hectáreas, 66% de la superficie del D.R. 008 y 34% de la RBBM (Mendoza Cariño et al., 2018); el segundo afectó el poblado de Jilotla con menor intensidad y magnitud (López-Herrera, 2015).

Las inundaciones tienen un efecto negativo sobre la mayoría de las plantas terrestres debido a que reduce su crecimiento e induce a la senescencia. La deficiencia del oxígeno, efecto principal de la inundación, cambia el metabolismo de la planta induciendo la vía anaeróbica o fermentativa como mecanismo alternativo, aunque poco eficiente para la producción de energía. El estrés hídrico por inundación es un factor limitante en la producción de cultivos como maíz (*Zea mays L.*), frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) y trigo (*Triticum aestivum L.*), entre otros (Solís, 2014).

Existe una necesidad de identificar las zonas agrícolas con riesgo de inundación por la importancia económica que tienen y de acuerdo con los antecedentes, los daños económicos en el sector agrícola no han sido estudiados con tanta frecuencia como en las zonas urbanas, aunado a eso, hace falta considerar más parámetros para realizar la construcción de curvas de daños, razones por la cual es un área de interés y son de gran apoyo para la toma de decisiones en el manejo del riesgo.

En relación con lo expuesto, para la evaluación de riesgo por inundación en la zona agrícola, los parámetros a considerar para la elaboración de funciones de daño serán cuatro: la estacionalidad, la profundidad, la duración y la velocidad de la corriente de la inundación. Es importante señalar la influencia que tienen estos parámetros en los daños a los cultivos, la estacionalidad define un papel crucial en

la magnitud de los daños debido a que la época del año o temporada en la que ocurren las inundaciones respecto a la etapa de crecimiento del cultivo, la duración define que a mayor sea la duración de la inundación la anoxia de los cultivos es más severa, aumentando la probabilidad de daño, la profundidad define que mientras a mayor profundidad de la inundación mayor es el daño y la velocidad de flujo define que para altas velocidades pueden causar daños directos a los cultivos y puede conducir a la degradación del suelo por erosión.

## **4. HIPÓTESIS.**

### **4.1. Hipótesis general.**

Para las zonas agrícolas con un índice de riesgo mayor a 0.50 la afectación corresponde a una pérdida mayor del 50%.

### **4.2. Hipótesis particular.**

Para la modelación hidrológica se asume como hipótesis para el proceso de calibración que un parámetro calibrado es aceptable si se obtiene un coeficiente de determinación  $r^2 > 0.80$  entre los caudales simulados contra los observados a diferentes periodos de retorno.

En la modelación hidráulica se considera como calibrado el modelo si la comparación entre la envolvente de inundación simulada y la observada para el evento de 5 de octubre de 1999 tiene una diferencia menor al 20%.

## **5. OBJETIVOS.**

### **5.1. General.**

Estimar áreas agrícolas con riesgo de inundación en el D.R. 008 Metztlán, Hidalgo, México.

### **5.2. Particulares.**

- Delimitar y caracterizar la cuenca del río Metztlán.
- Calibrar el modelo hidrológico con datos meteorológicos e hidrométricos históricos observados.
- Calibrar el modelo hidráulico para definir áreas con posible riesgo de inundación.
- Generar una metodología para la estimación del riesgo en zonas agrícolas.
- Elaborar un mapa de riesgo de las zonas agrícolas.

## 6. REVISIÓN DE LITERATURA.

Para la estimación del riesgo se necesita determinar las consecuencias potenciales de un fenómeno destructivo (CENAPRED, 2004), las evaluaciones de daños de los peligros naturales proporcionan información crucial para el apoyo a la toma de decisiones y el desarrollo de políticas en los campos de la gestión de los peligros naturales y la planificación de la adaptación al cambio climático (Merz et al., 2010). La esencia de los impactos de las inundaciones define la forma de las soluciones para la gestión de inundaciones (Tariq et al., 2021).

En las metodologías para evaluar los riesgos por inundación, las más desarrolladas están asociadas a la evaluación económica de los daños directos tangibles (Vega Serratos, 2017).

La estimación de daños económicos potenciales por inundación en una cuenca es de gran importancia debido a que puede ser útil para la asignación de recursos orientados a la prevención, mitigación, recuperación y reconstrucción de las áreas afectadas (Baró-Suárez et al., 2007b), sin embargo, los daños económicos totales en el sector agrícola son actualmente mucho más bajos que en las zonas urbanas, por lo tanto, la evaluación de daños a menudo se descuida o solo se tiene en cuenta mediante el uso de enfoques simples y estimaciones aproximadas (Merz et al., 2010).

En términos de los intereses del sector agropecuario, las pérdidas económicas cuantiosas se registran en todos los subsectores (agrícola, pecuario, pesca y forestal), el impacto que pueden tener los desastres en el sector de la agricultura y sobre la economía en su conjunto es alto, debido a que, internamente los productos proporcionan alimento para la población urbana e insumos primarios para la industria y externamente son exportados y son una fuente de divisas (Ponvert-Délisles et al., 2007), provocando inseguridad alimentaria (Yildirim & Demir, 2022).

De acuerdo a Merz *et al.*(2010), los daños por inundaciones se pueden clasificar en daños directos e indirectos. Los daños directos son aquellos que se producen

por el contacto físico del agua de la inundación con seres humanos, bienes o cualquier otro objeto. Los daños indirectos son inducidos por los impactos directos y ocurren, en el espacio o en el tiempo, fuera del evento de inundación. Ambos tipos de daños se clasifican además en daños tangibles e intangibles, dependiendo de la valoración o no monetaria.

Brémond *et al.* (2013), propusieron distinguir diferentes categorías de daños tangibles en función de sus escalas espaciales y temporales. En cuanto a la escala temporal: daño instantáneo, que ocurre durante o inmediatamente después del evento de inundación y daño inducido, que ocurre más tarde en el tiempo, en el caso de la agricultura, consideramos que el daño instantáneo es el daño que se puede observar inmediatamente después de la inundación y el daño inducido es el daño que ocurre más tarde, es decir, hasta el final de la temporada agrícola actual y en los años siguientes. En cuanto a la escala espacial, distinguimos: daño directo, que está relacionado con la exposición directa a inundaciones y daño indirecto, que ocurre en un área que no ha sido expuesta a inundaciones.

La clasificación de pérdidas en la agricultura se diferencia entre pérdidas debidas a daños por la anoxia (ausencia de oxígeno en el suelo por encharcamiento prolongado) que sufre el cultivo, la presión de la columna de agua y localmente el caudal del agua, dando lugar a una reducción en el rendimiento y la calidad del cultivo y puede requerir gastos adicionales para el daño que afecta las características del suelo como la disminución de la calidad del suelo debido a la deposición de contaminantes y una pérdida de estructura del suelo debido a la compactación o erosión (Forster *et al.*, 2008).

De los estudios que se centran en el daño directo a la agricultura, se consideran los parámetros de peligro como los más influyentes en el cálculo de daños directos, sin embargo, los parámetros que se usan son los que se pueden obtener a partir de modelos hidráulicos (Brémond *et al.*, 2013). En la mayoría de los estudios de caso, se considera el tiempo de ocurrencia mientras que las variables de la inundación profundidad del agua, duración de la inundación y velocidades de flujo solo se incluyen en unos pocos estudios de caso (Forster *et al.*, 2008).

Derivado de los anterior, Foster *et al.* (2008), define que las principales variables que intervienen en los daños por inundaciones a la agricultura son: la época del año en que ocurre la inundación, la profundidad del agua, la duración de la inundación, la velocidad del flujo y la deposición de contaminantes y Brémond *et al.* (2013) define que los parámetros de inundación que pueden usarse para construir funciones de daño para la agricultura son la estacionalidad de la inundación, la profundidad del agua, la duración, la velocidad de la corriente, los depósitos, la contaminación ambiental y la salinidad del agua.

Citeau (2003) evaluó los efectos de las inundaciones en los suelos y cultivos examinando fuentes bibliográficas y encuestas relacionadas con la profundidad del agua, también se evaluaron los impactos sobre especies forestales y humedales. Baró-Suárez *et al.* (2007), realizó una propuesta metodológica para la construcción de daño en zonas agrícolas afectadas por las inundaciones para el cultivo de maíz usando los parámetros, duración, profundidad y estacionalidad de la inundación. Solís (2014), para calcular las curvas de daños, realizó la aplicación de la curva de vulnerabilidad básica para hortalizas y arbolados de una metodología española como parámetro el tirante de la inundación. Vega Serratos (2017), en su propuesta metodológica propuso para la construcción de curvas de daños usar los parámetros, duración, profundidad y estacionalidad de la inundación. Tariq *et al.* (2021) evaluó el riesgo de inundación recomendando cambios de uso de suelo, calculando el riesgo como una interacción del peligro con vulnerabilidad, usando curvas de daño para maíz y arroz, considerando la exposición, susceptibilidad, intensidad y probabilidad. Yildirim & Demir (2022) realizaron una evaluación integral del riesgo por inundación agrícola utilizando mapas de inundación, analizando la variación estacional del riesgo por inundación centrándose en los cultivos de maíz, soya y alfalfa, calculando las pérdidas anuales.

## 7. MARCO TEÓRICO.

### 7.1. El ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico, se considera el concepto fundamental de la hidrología (Aparicio, 1992). El ciclo hidrológico, es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la tierra, la cual se define como: “sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la atmósfera a la tierra y volver a la atmósfera: evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y reevaporación” (Campos Aranda, 1984).

Aunque no hay un punto real de comienzo o final del ciclo hidrológico, se puede comenzar la discusión con la precipitación, un esquema del ciclo hidrológico para un entorno natural se muestra en la siguiente figura (McCuen, 1998):

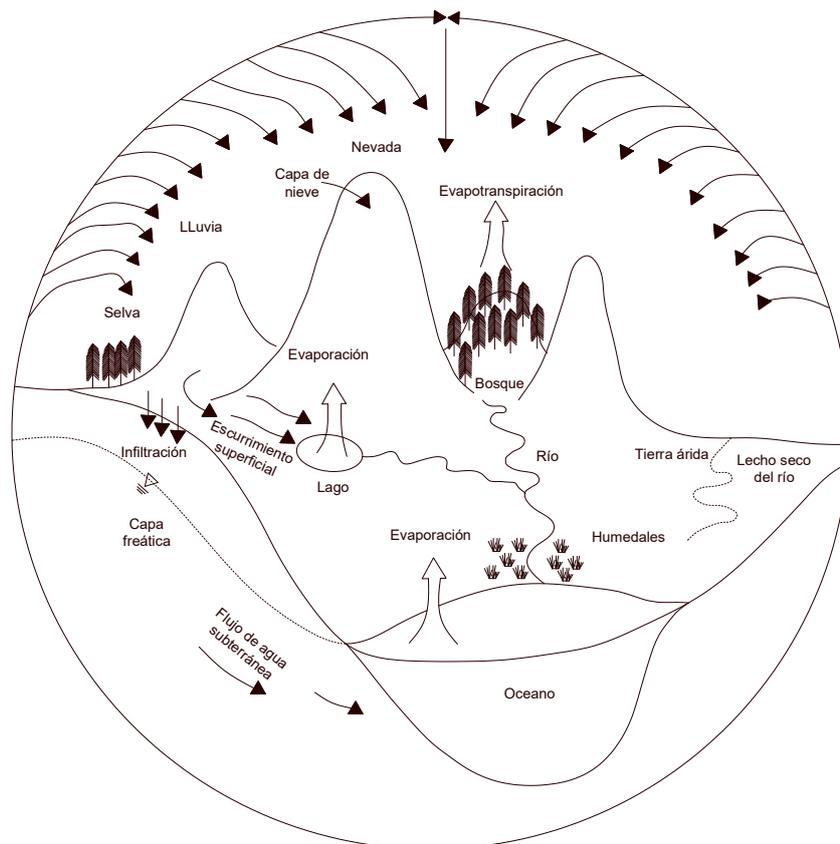


Figura 7.1. Ciclo hidrológico de un ambiente natural. Fuente: Adaptado de McCuen (1998).

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía necesaria para elevar el agua (evaporación); la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento) (Campos Aranda, 1984).

El ciclo hidrológico puede ser tratado como un sistema cuyos componentes son: precipitación, infiltración, evaporación, escurrimiento y las otras fases. Estos componentes pueden ser agrupados en subsistemas, por ejemplo, el sistema del agua atmosférica (precipitación, evaporación, intercepción y transpiración), el sistema del agua superficial (flujo sobre el terreno, escurrimiento superficial, flujo subsuperficial y subterráneo, escurrimiento en cauces y al océano) y sistema del agua subterránea (infiltración, recarga del agua subterránea, flujo subsuperficial y subterráneo (Campos Aranda, 2007).

#### **7.1.1. Procesos del ciclo hidrológico.**

- **Infiltración.** Es un proceso por el cual el agua se transfiere desde la superficie del terreno hacia las profundidades. Depende de la morfología y composición del terreno. La infiltración se puede dar de forma saturada o no saturada. Los dos procesos son muy diferentes. En tanto que uno depende directamente de la ley de Darcy el otro fenómeno está influido por las reacciones fisicoquímicas que ocurren entre el material y el agua. Uno de los más importantes es el fenómeno físico de tensión superficial. Esta es responsable del movimiento de una gran cantidad de sales en el interior del terreno (Bateman, 2007).
- **Evaporación.** Es el proceso por el cual el agua pasa de estado líquido a estado gaseoso, transfiriéndose a la atmósfera.
- **Transpiración.** Es el resultado de la respiración de las plantas o paso del agua a través de las raíces hacia las hojas y la atmósfera. La cantidad de agua contenida en la vegetación es mínima en comparación con la que consume (Bateman, 2007).

- Esguurrimiento. Es el proceso superficial por el cual el agua fluye por la superficie del terreno hacia los cauces y el mar (Bateman, 2007).
- Evapotranspiración. Es la combinación de la evaporación y transpiración (Bateman, 2007).
- Transporte de sedimentos. Este proceso es el que crea la morfología de las cuencas, es el responsable de la desertización de las cuencas, los fenómenos de progradación en embalses, la estabilidad de los cauces (Bateman, 2007).

## **7.2. Cuenca hidrológica.**

La cuenca hidrológica es la unidad básica de estudio de la hidrología (Aparicio, 1992). Una cuenca es una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado (Chow et al., 1988). Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas, en las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago, en las segundas, el punto de salida se encuentra entre los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar (Aparicio, 1992).

El ciclo hidrológico, visto a nivel de una cuenca, se puede esquematizar como un estímulo, constituido por la precipitación, al que la cuenca responde mediante el esguurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otro y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. Dichas características se clasifican en dos tipos, según la manera en que controlan los fenómenos mencionados: las que condicionan el volumen de esguurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo y las que condicionan la velocidad de respuesta, como son el orden de corrientes, pendiente de la cuenca y los cauces, etc. A continuación, se describen las características de la cuenca y los cauces de mayor importancia por sus efectos en la relación precipitación-esguurrimiento (Aparicio, 1992).

**Parteaguas.** Es una línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico y que separa la cuenca de las cuencas vecinas (Aparicio, 1992).

**Área de la cuenca.** Se define como la superficie, en proyección horizontal, delimitada por el parteaguas (Aparicio, 1992).

**Longitud de la cuenca.** La longitud de la cuenca en este caso se mide desde el punto de salida del cauce hasta el límite de la cuenca en la cabecera del cauce más largo, en línea recta (Chávez Morales, 2014).

**Pendiente media de la cuenca.** Mide la pendiente media en los ejes principales (x,y) y a partir de estos valores se determina la pendiente media de la cuenca, definida como la inclinación o declive promedio de su topografía (Breña & Jacobo, 2006).

**Cauce o corriente principal.** Es la corriente que pasa por la salida de la misma y generalmente es la de mayor longitud o la corriente de mayor orden, las demás corrientes se denominan corrientes tributarias. Todo punto de cualquier corriente tiene una cuenca de aportación, toda cuenca tiene una sola corriente principal (Aparicio, 1992).

**Longitud del cauce principal.** Se refiere a la longitud en proyección horizontal del cauce principal (Aparicio, 1992).

**Pendiente del cauce principal.** Es la relación que existe entre los extremos inicial y final y la distancia horizontal del tramo de un río (Breña & Jacobo, 2006). Es uno de los indicadores más importantes del grado de respuesta de una cuenca. Dado que está pendiente varía a lo largo del cauce, es necesario definir una pendiente media (Aparicio, 1992).

**Tiempo de concentración.** El tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del gasto de equilibrio y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1992).

**Tiempo de retraso.** Es el tiempo que transcurre del centro de masa de la precipitación al pico del hidrograma (Aparicio, 1992).

### **7.3. Estudio de cuencas hidrológicas.**

El estudio de las cuencas hidrológicas es muy importante para definir las cantidades de agua que se precipitan dentro de ella y los escurrimientos resultantes. El aprovechamiento de los recursos hidráulicos en una cuenca comprende los usos del agua dentro de ella y su ordenamiento de tal forma que este recurso natural nos sea sobreexplotado, considerando los compromisos de las necesidades hídricas dentro de la cuenca (Chávez Morales, 2014).

La caracterización de cuencas hidrológicas, son el conjunto de actividades para estudiar las cuencas, incluye varias fases como: compilación de información referente existente, reconocimiento preliminar en campo, delimitación de la cuenca con la definición de la hidrografía y del parteaguas, levantamientos topográficos si son necesarios y elaboración del mapa de la cuenca y su caracterización geométrica, fisiográfica, lineal, de área y de relieve (Chávez Morales, 2014).

En general, se puede decir que desde el punto de vista hidrológico el estudio o caracterización de las cuencas comprende dos fases principales, la delimitación y descripción precisa del parteaguas y de su hidrografía y su descripción morfométrica y fisiográfica. El escurrimiento del agua en una cuenca depende de varios factores, de los más importantes, además de la precipitación, son las características morfométricas y físicas de la cuenca. En primer lugar, se debe delimitar la cuenca mediante la definición de su parteaguas y su red de cauces o red hidrográfica. Posteriormente se caracterizará la cuenca de acuerdo con su morfología, fisiografía y parámetros de relieve (Chávez Morales, 2014).

### **7.4. Proceso lluvia-escurrimiento.**

La precipitación que ocurre en una cuenca circula a través de diferentes procesos o etapas antes de convertirse en escurrimiento. Primeramente, se presenta la interceptación y una vez que el agua llega a la superficie del suelo, comienza el proceso de infiltración hasta que las capas superiores del mismo se saturan y posteriormente se empieza a almacenar agua en las depresiones del terreno. Una parte del agua almacenada e interceptada se evapotranspirará (Cavazos, 2020).

Es sumamente común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño y operación de obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca, como construcción de obras de almacenamiento y derivación, talas, urbanización, etc. Por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación (Aparicio, 1992).

Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes (Aparicio, 1992):

- Área de la cuenca.
- Altura total de la 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.

Debido a que, por un lado, la cantidad y calidad de la información disponible varían grandemente de un problema a otro y a que, por otro, no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia-escurrimiento (Aparicio, 1992).

La transformación del proceso lluvia-escurrimiento es uno de los procesos más complicados de representar del ciclo hidrológico, principalmente por la cuantificación de las pérdidas (la cantidad de la precipitación que no escurre de manera directa a la salida de la cuenca), existen varios métodos y la selección del más adecuado depende entre otras cosas de la información disponible y de los objetivos del estudio (Cavazos, 2020).

El ciclo del escurrimiento describe la distribución del agua y la trayectoria que ésta sigue después que se precipita en la tierra hasta que alcanza los cauces o regresa directamente a la atmósfera mediante evapotranspiración (Campos Aranda, 2007).

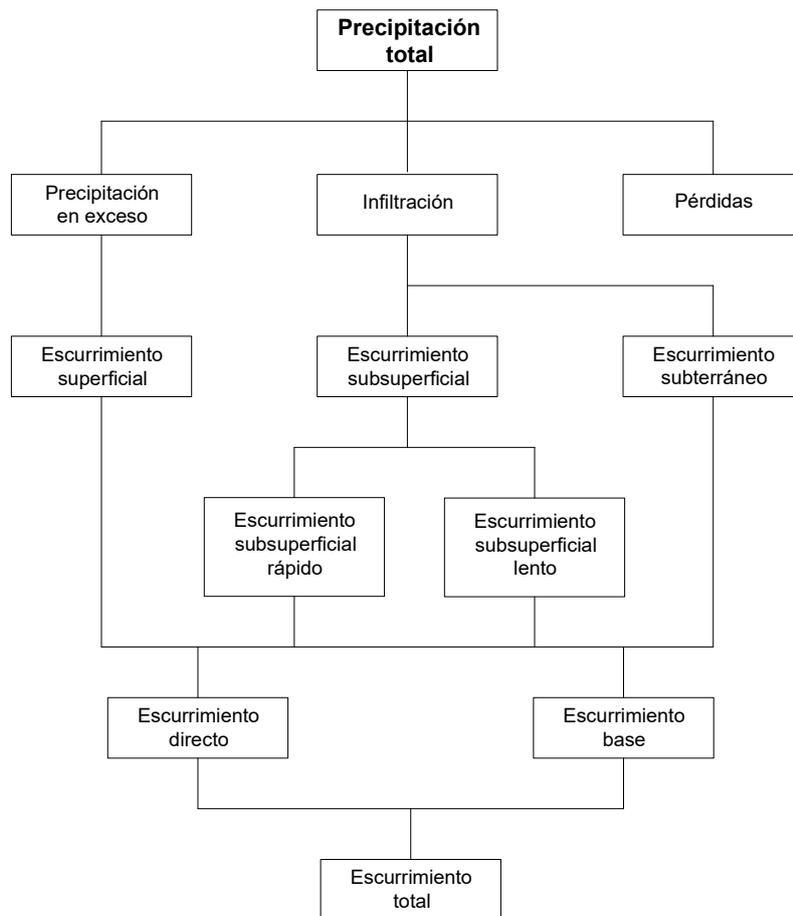


Figura 7.2. Relación entre la precipitación y el escurrimiento total. Fuente: Campos Aranda (2007).

#### 7.4.1. Precipitación en exceso.

La fracción de precipitación media en una cuenca que genera el escurrimiento directo se le conoce como: precipitación efectiva, en exceso o neta. La diferencia entre la precipitación total y la precipitación en exceso se le conoce como pérdidas (Gómez Martínez, 2021).

#### 7.4.2. Infiltración.

Se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. La diferencia entre el volumen de agua que llueve en una cuenca y el que escurre por su salida recibe el nombre genérico de pérdidas. En general, las

pérdidas están constituidas por la intercepción en el follaje de las plantas y en los techos de las construcciones, la retención en depresiones o charcos (que posteriormente se evapora o se infiltra), la evaporación y la infiltración. En la práctica es difícil separar estos cuatro componentes y para el caso del análisis de avenidas, la componente que impacta más en las pérdidas está dada por la infiltración, por lo que es costumbre calcularlas conjuntamente bajo este nombre (Gómez Martínez, 2021).

Para la modelación del proceso lluvia-escurrimiento, principalmente la cuantificación de las pérdidas, existen varios métodos y la selección del más adecuado depende entre otras cosas de (Gómez Martínez, 2021):

- a) La información disponible
- b) Los objetivos del estudio

Cada uno de los métodos tienen sus limitantes e hipótesis, entre más se trate de modelar el proceso lluvia-escurrimiento apegado a la realidad más complejos se vuelven los métodos y por ende se requiere de mayor información (Gómez Martínez, 2021).

$$\text{Pérdidas} = \text{Vol. llovido} - \text{Vol. salida de la cuenca} \quad (7.1)$$

En el proceso de infiltración:

Si  $i < f_p$ ,  $f = i$ ; toda la lluvia se infiltra.

Si  $i > f_p$ ,  $f = f_p$ ; Existe un escurrimiento.

Donde:

$f_p$ : capacidad de infiltración (mm/hr).

$i$ : intensidad de la lluvia (mm/h).

$f$ : infiltración (mm/hr).

### 7.5. Clasificación de los modelos.

Un modelo es una representación simplificada de un sistema complejo. Ayuda en la toma de decisiones, particularmente donde los datos o la información son escasos o hay una gran cantidad de opciones para elegir (Jain, 2013).

En su forma más simple, se puede definir al modelo como una representación de una situación u objeto real que muestra las relaciones (directas o indirectas) de sus elementos en términos de causa y efecto (Larios, 2014).

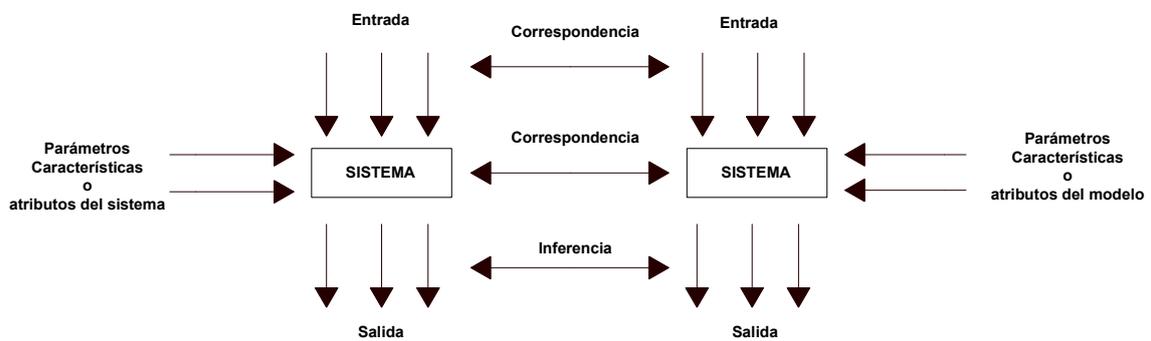


Figura 7.3. Representación gráfica de un modelo. Fuente: Adaptado de Larios (2014).

Para el uso de los modelos, se debe de entender los fenómenos naturales bajo ciertas condiciones que pueden ser hechas por predicciones dentro de una visión determinística o probabilística. El comprender un evento, implica que pueda dar una explicación efectiva de este (Roblero, 2013).

De acuerdo con las características de los modelos, se pueden encontrar diferentes clasificaciones, una de ellas es la siguiente:

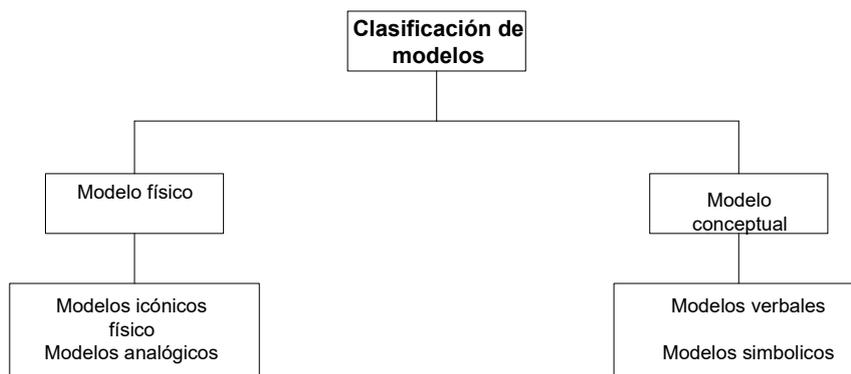


Figura 7.4. Clasificación de modelos. Fuente: Roblero (2013).

### 7.5.1. Clasificación de los modelos hidrológicos.

Los modelos hidrológicos representan las características físicas, químicas y biológicas del área de captación y simula los procesos hidrológicos naturales. Los modelos hidrológicos son esencialmente modelos matemáticos donde los procesos físicos del ciclo hidrológico son descritos por una serie de ecuaciones matemáticas, procesos lógicos, condiciones de contorno y condiciones iniciales que expresan relaciones entre entradas, variables y parámetros. Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados en dos grupos (Jain, 2013):

- a) Modelos hidrológicos determinísticos: Consideran libre de variación aleatoria en todas las entradas, los parámetros y los procesos (Gómez Martínez, 2021).
- b) Modelos hidrológicos estocásticos: Consideran procesos de variación aleatoria (Gómez Martínez, 2021).

Los modelos determinísticos, tienen varias clasificaciones, siendo las principales respecto a su extensión temporal y representación espacial (Cavazos, 2020).

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar desde tres puntos de vista. La primera se fundamenta en el tipo de representación espacial del modelo; la segunda en la forma de representar los procesos hidrológicos que ocurre en la

cuenca y la última en la extensión temporal con la que se puede aplicar el modelo (Juárez Dehesa, 2014).

Se han desarrollado muchos modelos computacionales de cuencas entre los más utilizados se mencionan: HEC-1 y su actualización conocida como HEC-HMS del Hydrological Engineering Center, TR-20 del Servicio de Conservación de Suelos del USDA y SWMM (Modelo de Gestión de Agua de Tormenta) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Roblero, 2013).

Cuadro 7.1. Programas de cómputo para modelación hidrológica.

Modelo	Descripción
HEC-HMS	Se utilizan para generar hidrogramas de crecidas en el análisis y diseño de esquemas de control de flujo.
TR-20	El Sistema de modelado hidrológico (HEC-HMS) está diseñado para simular los procesos hidrológicos completos de los sistemas de cuencas hidrográficas dendríticas. El software incluye muchos procedimientos tradicionales de análisis hidrológico, como infiltración de eventos, hidrogramas unitarios y enrutamiento hidrológico. HEC-HMS también incluye los procedimientos necesarios para la simulación continua, incluida la contabilidad de la evapotranspiración, el deshielo y la humedad del suelo (USACE, 2022).
SWMM	Se adapta a los análisis y a las aplicaciones de diseño que involucran determinaciones simultáneas de cantidad y calidad de agua.

<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>
TOPMODEL	Está ligado al análisis y procesamiento de la información digital del terreno. Está definido como un modelo conceptual de área de contribución variable, el cuál subdivide la cuenca en pequeños elementos y para cada uno de ellos estima el área aguas arriba que drena a través del elemento, la longitud del lado por donde sale el agua hacia otros elementos aguas abajo y la pendiente del elemento.
SHE	Modela de forma integrada procesos de escurrimiento superficial y subterráneo, recarga de acuíferos y evapotranspiración.
SSARR	Estos modelos se utilizan para diseño hidrológico, predicción de volumen de escurrimiento a largo plazo y predicción de flujo en tiempo real.
SWM	
MPE	Modelo para pronóstico de escurrimiento (MPE), tiene la finalidad de obtener el hidrograma de escurrimiento de una cuenca con un modelo de parámetros distribuidos. El método empleado para la producción del escurrimiento está basado en el del número de curva, con una modificación que permite considerar el secado del suelo después de una lluvia que se denominó factor de olvido, el cual hace que las aportaciones de las lluvias antecedentes vayan disminuyendo conforme pasa el tiempo, con este parámetro se consideran las pérdidas por evapotranspiración, la transferencia del escurrimiento se hace con el método de Clark modificado.
SWAT	Basado en la ecuación general de balance hídrico, de simulación continua, el cuál analiza los impactos a largo plazo, generado principalmente para cuantificar la producción de sedimentos en las cuencas, rotación de cultivos, fechas de siembra, riego, fertilización, aplicación de plaguicidas.

<b>Modelo</b>	<b>Descripción</b>
MOPEAU	Determina la relación erosión, escurrimiento, pérdida de nutrientes en el suelo en cuencas agrícolas, generado por la lluvia y por el manejo de los recursos naturales.
SWRRB	Desarrollado para predecir el efecto del manejo del suelo en ciertas características del agua como son la producción de sedimentos, nutrientes y plaguicidas. Los principales componentes del modelo son: clima, hidrología, producción de sedimentos y manejo de suelos.

Fuente: Adaptado de Roblero (2013) y Cavazos (2020).

### **7.5.2. Clasificación de los modelos hidráulicos.**

Los modelos de hidráulica de ríos usados para la modelación de inundaciones se clasifican en hidrodinámicos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales.

Cuadro 7.2. Modelos hidrodinámicos.

<b>Modelos hidrodinámicos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ejemplos</b>
Unidimensionales	Están basados en las ecuaciones de Saint Venant (leyes de conservación de la masa y momento) para calcular la superficie libre del agua en flujo estacionario y no estacionario en canales abiertos. Estas ecuaciones diferenciales parciales se resuelven mediante discretización numérica, usando frecuentemente el método de diferencias finitas y en algunos casos mediante elementos finitos o volúmenes finitos, en un esquema implícito.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HEC-RAS</li> <li>• MIKE 11</li> <li>• SWMM</li> </ul>

<b>Modelos hidrodinámicos</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ejemplos</b>
Bidimensionales	<p>Utilizan las ecuaciones de conservación de la masa y momento expresadas en dos dimensiones y los resultados se calculan en cada punto de la malla en el dominio de solución.</p> <p>Los modelos bidimensionales pueden resolverse usando el método de los elementos finitos. Tienen la desventaja de requerir un mayor tiempo de implementación y una alta demanda de datos y tiempo computacional.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FLO-2D</li> <li>• TUFLOW</li> <li>• IBER</li> <li>• PCSWMM</li> <li>• BRI-STARS</li> <li>• FESWMS-2DH</li> <li>• RMA-2</li> <li>• RIVER-2D</li> </ul>
Tridimensionales	<p>Representan el estado más avanzado de la modelación. Estos modelos son capaces de calcular las tres componentes espaciales de la velocidad y por tanto aplicables a cualquier caso práctico. Requieren resolver las ecuaciones diferenciales y por tanto una discretización más fina mediante el uso de mallas. Los métodos principales son el método de elementos finitos, el método de diferencias finitas y el método de volúmenes finitos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SSIMM</li> <li>• FLOW-3D</li> </ul>

Fuente: Adaptado de Roblero (2013).

## **7.6. Análisis hidrológico.**

El estudio hidrológico es la base para definir la magnitud de los eventos de inundación a analizar. Debe realizarse para periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años (CONAGUA, 2014).

Es necesario realizar una descripción física de la cuenca hidrológica, localización, su red de corrientes y tipo de clima. Se debe incluir un análisis de inundaciones históricas en las que se identifica su origen. Para la realización del estudio hidrológico debe recopilarse toda la información hidrológica disponible. En general se pueden agrupar dos tipos de casos para efectuar el análisis: el primero, la estimación de crecientes en cuencas aforadas y el segundo en cuencas no aforadas (CONAGUA, 2014).

- Cuenas aforadas: Estas cuencas son las que cuentan con una o varias estaciones que cuantifican el escurrimiento a escalas espaciales y temporales apropiadas y a una precisión aceptable que pasa por una corriente, de tal forma que el cálculo de las avenidas de diseño se realiza mediante el análisis estadístico y probabilístico de los escurrimientos. Este análisis es conocido como análisis de frecuencias de gastos máximos (Cavazos, 2020).
- Cuenas no aforadas: Estas cuencas no cuentan con estaciones que registran los escurrimientos, en el mejor de los casos, dentro o cerca de la cuenca, se dispone de estaciones climatológicas convencionales, las cuales cuentan con información de precipitación y temperatura, pero a cada 24 horas. En pocas cuencas se tienen estaciones meteorológicas, pluviómetros digitales o ambos, cuyas características son que se configuran para registrar la precipitación en intervalos de tiempo del orden de minutos. En este tipo de cuencas, el cálculo de las avenidas de diseño se realiza mediante la modelación del proceso lluvia-escurrimiento (Cavazos, 2020).

### **7.6.1. Estimación de crecientes en cuencas aforadas.**

Este caso es aplicable en cuencas en las que se tengan registros de escurrimientos (información hidrométrica) entre los métodos que se pueden aplicar se mencionan los siguientes (CONAGUA, 2014):

1. Análisis de frecuencias de crecientes.
2. Mayoración del hidrograma representativo.
3. Análisis regional:
  - Estaciones año
  - Avenida índice
4. Método del gasto medio diario asociado a duraciones.
5. Análisis bivariado de gasto pico y volumen del hidrograma.
6. Proceso condicional altura de precipitación-volumen-gasto pico.

El método de análisis de frecuencia de crecientes considera los registros máximos instantáneos anuales y la aplicación de diversas funciones de distribución de probabilidad; se selecciona la que tenga el mejor ajuste y con ella se estiman los gastos para diferentes periodos de retorno (CONAGUA, 2014).

Se requieren los registros instantáneos máximos anuales provenientes de una estación hidrométrica. Esta información puede ser consultada a través del sistema denominado Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) (CONAGUA, 2014).

Para la obtención de los gastos asociados a diferentes periodos de retorno se hace uso de las funciones de distribución de probabilidad (FDP). La serie de registros históricos debe ser una serie homogénea y los registros (gastos máximos anuales) deben ser independientes. La independencia está asegurada a seleccionar el gasto máximo de cada año. Sin embargo, la homogeneidad no siempre está garantizada (Cavazos, 2020).

Las características estadísticas de las series hidrológicas, como la media, la desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o varianza, o cuando ocurren saltos

negativos o positivos; tales anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad o inconsistencia. La homogeneidad de una serie de datos se pierde por las actividades humanas como la deforestación, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación (Cavazos, 2020).

### **A. Funciones de distribución de probabilidad.**

En el análisis de frecuencias, una vez que se ha determinado la homogeneidad e independencia de los datos de la muestra, es necesario ajustar los datos a una función de distribución de probabilidad. El ajuste consiste básicamente en la estimación de los parámetros de la función de distribución de probabilidad correspondiente. Cada función de distribución de probabilidad está conformada por la variable aleatoria analizada (gastos, escurrimientos, precipitación, etc) y por los parámetros que la describen (Gómez et al., 2010).

Para la estimación de los parámetros de una función de distribución existen varios métodos, de los cuales aquí se explicarán únicamente tres de ellos, ya que son los más utilizados para el análisis de frecuencias de las variables hidroclimatológicas (Gómez et al., 2010).

#### a) Método de momentos.

Este método estima uno o más parámetros de una función (Gómez et al., 2010).

El k-ésimo momento de la distribución, tomando respecto al origen y a la media es:

$$M'_k = \int_D x^k f(x) dx \quad (7.2)$$

Con respecto al origen y

$$M'_k = \int_D (x - \mu)^k f(x) dx \quad (7.3)$$

Con respecto a la media.

Los primeros cuatro momentos (insesgados) de la muestra son:

$$M_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad (7.4)$$

$$M_2 = S^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7.5)$$

$$M_3 = S^3 C_s \quad (7.6)$$

Donde el  $C_s$  es el coeficiente de sesgo definido como

$$C_s = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{S^3} \quad (7.7)$$

$$M_4 = S^4 K \quad (7.8)$$

Donde  $K$  es la curtosis que se calcula como

$$K = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{S^4} \quad (7.9)$$

La estimación de los parámetros desconocidos por este método se logra al igualar los momentos correspondientes a la población (función de distribución de probabilidad) con los momentos de la muestra, obteniendo así  $n$  ecuaciones con  $n$  incógnitas (los parámetros buscados). Este método contiene a la función de densidad  $f(x)$  que no siempre es simple (Gómez et al., 2010).

b) Método de máxima verosimilitud.

Si se tienen  $n$  observaciones aleatorias  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , su distribución conjunta es:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n) \text{ o } f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) \quad (7.10)$$

Como la muestra es aleatoria, los valores de las observaciones son independientes y entonces su función de distribución conjunta es:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = f(x_1; \theta) \cdot f(x_2; \theta) \dots f(x_n; \theta) \quad (7.11)$$

La expresión anterior es proporcional a la probabilidad de que la muestra, o una muestra aleatoria en particular, pertenezca a la distribución y se conoce con el nombre de "función de verosimilitud (L)".

$$L = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta) \quad (7.12)$$

Donde  $\theta$  es el vector de parámetros (desconocido).

Los valores de los parámetros que maximizan L se conocen como estimadores de máxima verosimilitud.

Para poder estimar los parámetros que maximicen la función de verosimilitud es necesario calcular las derivadas de dicha función con respecto a cada uno de los parámetros a estimar e igualar cada derivada a cero y así obtener un sistema de ecuaciones, el cual será necesario resolver para obtener los parámetros buscados, esto es:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_i} = 0, \forall_i \quad (7.13)$$

Dado que L es un producto de funciones, la derivación de tales productos es complicada, por lo que es más fácil encontrar el valor de los parámetros que maximicen a la función logarítmica de L ( $LL = \ln L$ ), ya que LL es una función monótona creciente de L, la ecuación anterior queda:

$$\frac{\partial LL}{\partial \theta_i} = 0, \text{ con } LL = \ln L, \forall_i \quad (7.14)$$

Cuando el número de parámetros por determinar es mayor a uno, el sistema de ecuaciones que se obtiene con la ecuación es un sistema no lineal, por lo que para resolver dicho sistema es necesario recurrir a los métodos numéricos (Gómez et al., 2010).

#### c) Error cuadrático mínimo.

Este criterio consiste en desarrollar un método que minimice la suma de los errores cuadráticos pesados (E), entre los valores estimados  $F(x)$  y los valores empíricos  $\hat{F}(x_i)$ , esto es (Gómez et al., 2010):

Encontrar los parámetros de la función  $F(x)$  tal que minimicen la función.

$$E = \sum_{i=1}^n [\hat{F}(x_i) - F(x_i)]^2 W_i \quad (7.15)$$

De acuerdo con las ecuaciones se tiene que los valores empíricos están dados por:

$$\hat{F}(x_m) = 1 - \frac{m}{n+1} \quad (7.16)$$

Donde:

$\hat{F}(x_i)$ : Valor estimado de la función de distribución de probabilidad para el gasto máximo anual.

$F(x_m)$ : valor de la función de distribución de probabilidad utilizada.

m: es el número de orden del gasto máximo anual, cuando estos son ordenados en forma decreciente.

n: número de registros.

$W_i$ : es el peso asignado al error cometido, que es la estimación de la función de distribución en el gasto de orden i.

Existe un gran número de métodos para minimizar funciones como la dada por la ecuación, de los cuales algunos ya han sido aplicados a este tipo de datos como lo es el algoritmo de Rosenbrock, el cual se aplica a funciones de múltiples variables no restringidas (Gómez et al., 2010).

Cuadro 7.3. Funciones de distribución de probabilidad utilizadas en hidrología.

Nombre	Descripción	Expresión
Distribución normal.	Esta es la distribución, también llamada Gaussiana, más utilizada y en algunos casos más importante pues se pueden encontrar varias variables aleatorias que aparecen en relación con experimentos u	$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (7.17)$ <p style="text-align: center;">Donde:</p> <p style="text-align: center;"><math>\mu</math>: parámetro de ubicación</p> <p style="text-align: center;"><math>\sigma</math>: parámetro de escala</p>

Nombre	Descripción	Expresión
	<p>observaciones prácticas que están distribuidas normalmente y otras que están distribuidas normalmente en forma aproximada.</p>	
<p>Distribución Lognormal de 2 parámetros.</p>	<p>La distribución lognormal corresponde a una variable aleatoria X, cuyos logaritmos están distribuidos normalmente. Se ha encontrado, por ejemplo, que esta distribución describe la distribución de la conductividad hidráulica en un medio poroso, la distribución del tamaño de las gotas de lluvia en una tormenta y otras variables hidrológicas.</p>	$F(x) = \int_0^x \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2} dx \quad (7.18)$ <p>Donde:</p> <p><math>\mu_y</math>: parámetro de ubicación.</p> <p><math>\sigma_y</math>: parámetro de escala.</p> <p>El coeficiente de sesgo es <math>\gamma &gt; 0</math>.</p>
<p>Distribución Gamma de 2 parámetros.</p>	<p>Toma su nombre de la función gamma (<math>\Gamma(\beta) = \int_0^\infty x^{\beta-1} e^{-x} dx</math>) y describe el tiempo de ocurrencia de un número <math>\beta</math> de eventos en un proceso de Poisson, la cual es la distribución de una</p>	$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} dx = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} \int_0^x x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\alpha}} dx \quad (7.19)$ <p>Donde:</p> <p><math>\alpha</math>: es el parámetro de escala, <math>\alpha &gt; 0</math>.</p>

Nombre	Descripción	Expresión
	<p>suma de <math>\beta</math> variables aleatorias independientes e idénticas, distribuidas exponencialmente. Tiene como límite inferior cero, siendo esto una desventaja para la aplicación a variables que tienen un límite inferior menos a cero. Esta distribución, también llamada digamma, es de gran importancia en la teoría de colas y en los problemas de confiabilidad.</p>	<p><math>\beta</math>: es el parámetro de forma, <math>\beta &gt; 0</math>.</p> <p><math>\Gamma(\beta)</math>: función gamma completa.</p>
<p>Distribución LogPearson tipo III</p>	<p>Su aplicación en hidrología tiene importantes limitaciones.</p> <p>La función de densidad de la Log Pearson tipo III puede tomar forma de J, J invertida, U, U invertida, U invertida con inflexión, forma de campana con límite superior, forma de campana con límite inferior, etc. Para el análisis de frecuencia de inundaciones la única forma de interés es aquella que es unimodal,</p>	<p>La función de densidad de probabilidad está dada por:</p> $f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)x} \left( \frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right)} \quad (7.20)$ <p>Donde:</p> <p><math>y_0</math>: parámetro de ubicación.</p> <p><math>\alpha</math>: parámetro de escala.</p> <p><math>\beta</math>: parámetro de forma.</p>

Nombre	Descripción	Expresión
	continua de 0 a + ∞.	
Distribución Gumbel.	<p>La distribución de Valores Extremos Tipo I o Distribución Gumbel nace con Fisher y Tippett, en los años veinte con la Teoría de Valores Extremos. En los años treinta, Gumbel realiza aplicaciones prácticas usando estadísticos de valores extremos de distribuciones del tiempo de duración de la vida humana y en 1941 publica algunos artículos con respecto a sus aplicaciones en el análisis de frecuencias de gastos máximos y mínimos. Jenkinson (1955) demostró que esta distribución es un caso especial de la Distribución General de Valores Extremos.</p>	$f(x) = \frac{1}{\alpha} - e^{-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)} e^{-\left(\frac{x-\beta}{\alpha}\right)} \quad (7.21)$ <p>Donde:</p> <p><math>\beta</math>: parámetro de ubicación.</p> <p><math>\alpha</math>: parámetro de escala.</p> <p>La variable reducida Gumbel es:</p> $y_i = \frac{x_i - \beta}{\alpha} \quad (7.22)$
Distribución Gumbel doble.	En algunos casos, como por ejemplo en zonas costeras del Golfo de México y el Océano Pacífico se puede observar con claridad la	$F(x) = P \exp \left\{ - \exp \left( - \frac{(x-\beta_1)}{\alpha_1} \right) \right\} + (1 - P) \exp \left\{ - \exp \left( - \frac{(x-\beta_2)}{\alpha_2} \right) \right\} \quad (7.23)$

Nombre	Descripción	Expresión
	<p>existencia de dos grupos de datos con características diferentes, el primero originado por precipitaciones debido a los fenómenos dominantes en la región y segundo, originado por precipitaciones de origen ciclónico, que comúnmente provocan las avenidas más grandes. Por ello, el ajuste de una función de distribución de probabilidad de una población (por ejemplo, Gumbel) no resulta del todo satisfactorio. Por eso es necesario hacer análisis de frecuencias considerando que los gastos máximos anuales se originan por dos procesos diferentes que dan lugar a una función de distribución mezclada o de dos poblaciones.</p> <p>Para realizar el análisis de frecuencias, es posible aplicar la función de distribución doble Gumbel para dos poblaciones considerando que los grupos son</p>	<p>Donde:</p> <p><math>P</math>: es la probabilidad de tener eventos no ciclónicos, adimensional.</p> <p><math>x</math>: es la variable aleatoria para la cual se estima la probabilidad de no excedencia.</p> <p><math>\alpha_1</math>: es el parámetro de escala de la población no ciclónica.</p> <p><math>\beta_1</math>: es el parámetro de ubicación de la población no ciclónica.</p> <p><math>\alpha_2</math>: es el parámetro de escala de la población ciclónica.</p> <p><math>\beta_2</math>: es el parámetro de ubicación de la población ciclónica.</p>

Nombre	Descripción	Expresión
	mutuamente excluyentes, es decir, el valor de la variable se debe a un evento ciclónico o no.	

Fuente: Adaptado de Gómez et al. (2010).

### ***B. Selección de la función de distribución de probabilidad.***

Una selección apresurada de cualquiera de las funciones podría traducirse en una estructura sobrediseñada y costosa o subdiseñada y peligrosa, por ello se debe seleccionar la función con el menor error posible (Aparicio, 1992).

#### a) Análisis gráfico.

Un primer método que se usa para seleccionar la función consiste simplemente en inspeccionar una gráfica donde se haya dibujado cada una de las diferentes funciones junto con los puntos medidos. La función de distribución de probabilidad que se seleccione será la que se apege visualmente mejor a los datos medidos. Es un método de alto grado de subjetividad y usado aisladamente puede ser erróneo (Aparicio, 1992).

#### b) Método del error cuadrático mínimo.

Este método es menos subjetivo que el anterior. Consiste en calcular, para cada función de distribución, el error cuadrático (Aparicio, 1992):

$$C = [(\sum_{i=1}^n (x_{ei} - x_{oi})^2)^{\frac{1}{2}}] \quad (7.24)$$

Donde  $x_{ei}$  es el i-ésimo dato estimado y  $x_{oi}$  es el i-ésimo dato calculado con la función de distribución bajo análisis.

### **7.6.2. Estimación de crecientes en cuencas no aforadas.**

La mayor parte de las cuencas en México no están aforadas, por lo cual, con frecuencia no se cuenta con datos de escurrimiento en la zona de interés, por lo

que es necesario aplicar métodos para cuencas no aforadas y así obtener las avenidas o hidrogramas de diseño (Cavazos, 2020).

Para este caso es necesario inferir a partir de las lluvias registradas el escurrimiento (proceso lluvia-escurrimiento). Por lo anterior es requerido obtener: área de la cuenca, longitud del cauce principal, desnivel del cauce principal, pendiente promedio del cauce, número de curva (CONAGUA, 2014).

Para calcular los escurrimientos en una cuenca es necesario conocer tanto la distribución temporal de la lluvia como su distribución espacial, el registro de la precipitación en las estaciones climatológicas puede tener la forma de hietograma o bien un solo valor por día, con la información del hietograma se puede construir una curva masa de precipitación.

#### **A. Distribución espacial de la precipitación.**

La distribución espacial de la precipitación de puede realizar utilizando los siguientes métodos:

Método aritmético.

Método de Thiessen.

Método de isoyetas.

##### a) Método aritmético.

Consiste simplemente en obtener el promedio aritmético de las alturas de precipitación registradas en cada estación usada en el análisis (Aparicio, 1992):

$$\bar{h}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_{pi} \quad (7.25)$$

Donde  $h_p$  es la altura de precipitación media,  $h_{pi}$  es la altura de precipitación registrada en la estación  $i$  y  $n$  es el número de estaciones bajo análisis.

##### b) Polígonos de Thiessen.

Este método consiste en lo siguiente (Aparicio, 1992):

- i. Unir, mediante líneas rectas dibujadas en un plano de la cuenca, las estaciones más próximas entre sí. Con ello se formarán triángulos en cuyos vértices están las estaciones pluviométricas.
- ii. Trazar líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos. Por geometría elemental, las líneas correspondientes a cada triángulo convergerán en un solo punto.
- iii. Cada estación pluviométrica quedará rodeada por las líneas rectas del paso b), que forman los llamados polígonos de Thiessen y en algunos casos, en parte por el parteaguas de la cuenca. El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas será el área de influencia de la estación correspondiente.
- iv. La lluvia media se calcula entonces como un promedio pesado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i h_{pi} \quad (7.26)$$

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

c) Método de las isoyetas.

Este método consiste en trazar, con la información registrada en las estaciones, líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas, de modo semejante a como se trazan las curvas de nivel en topografía. La precipitación media se calcula en forma similar a la ecuación de los polígonos 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 se pesa es la altura de precipitación promedio entre las dos isoyetas  $\bar{h}_{pi}$  (Aparicio, 1992):

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^{n'} \bar{h}_{pi} A'_i \quad (7.27)$$

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

A continuación, se presenta un cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de usar cada método.

Cuadro 7.4. Ventajas y desventajas de los métodos de distribución espacial de la lluvia.

Método	Ventajas	Desventajas
Aritmético	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso simple.</li> <li>• Terrenos planos si la red pluviométrica es densa y uniforme.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conduce a malos resultados si los pluviómetros son pocos y mal distribuidos.</li> <li>• Pluviómetros localizados fuera de la cuenca son difíciles de tomar en cuenta.</li> <li>• Requiere una red densa para alcanzar la precisión de otros métodos.</li> </ul>
Thiessen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resultados más exactos que el aritmético.</li> <li>• Se pueden usar pluviómetros localizados a corta distancia del parteaguas.</li> <li>• Resultados consistentes por diferentes personas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No toma en cuenta influencias topográficas.</li> </ul>
Isoyetas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Teóricamente es el método más exacto.</li> <li>• Toma en cuenta efectos topográficos.</li> <li>• Se pueden usar pluviómetros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Método más laborioso.</li> <li>• Diferentes personas pueden obtener resultados distintos</li> </ul>

Método	Ventajas	Desventajas
	localizados a corta distancia del parteaguas.	para los mismos datos.

Fuente: Gómez Martínez (2021).

### ***B. Distribución temporal de la precipitación.***

Para la distribución temporal de la lluvia se puede realizar utilizando los siguientes métodos (Gómez Martínez, 2021):

- Análisis de información de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS).
- Isoyetas publicadas por diferentes instituciones (SCT, Instituto de Ingeniería, etc.).
- Formulaciones para cuencas no aforadas (Chen, Bell).
- Curvas masas del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).

Cuando en la zona o cuenca de estudio no exista dentro o cerca de la misma una EMA o ESIME, es necesario recurrir a otros tipos de formulaciones para calcular la distribución temporal de la lluvia a partir de precipitación de 24 horas. Existen varias formulaciones de este tipo, entre las cuales se pueden mencionar: Bell, Kuishling y Chen.

Chen desarrolló un método para estimar curvas IDT a partir de información de pluviómetros válida para duraciones  $D$  entre 5 minutos y 1440 minutos (24 horas) y periodos de retorno desde 5 hasta 100 años (Campos Aranda, 2010).

La fórmula de Chen es la siguiente (Campos Aranda, 2010):

$$i_D^{Tr} = \frac{a \cdot P_1^{10} \cdot \log [10^{2-F} \cdot Tr^{F-1}]}{(D+b)^c} \quad (7.28)$$

Con  $i_D^{Tr}$  la intensidad buscada en mm/h,  $P_1^{10}$  en milímetros,  $D$  es la duración en minutos ( $5 \leq D \leq 1,440$ ) y  $Tr$  es el periodo de retorno en años ( $5 \leq Tr \leq 100$ ).

### ***C. Tormentas de diseño.***

El diseño hidrológico consiste en la estimación de ciertas variables como lluvias, escurrimientos o avenidas, que son necesarias para el dimensionamiento de diversas obras hidráulicas o bien, para la definición de mapas de peligro por inundación. Para realizar este proceso de evaluación del impacto de los eventos hidrológicos en los sistemas naturales y urbanos, es necesario contar con registros climáticos e hidrométricos (Cavazos, 2020).

Existen tres tipos fundamentales de tormentas de diseño: las históricas, las sintéticas o hipotéticas y las asociadas a un periodo de retorno. Las primeras son eventos severos o extraordinarios que han ocurrido en el pasado y que fueron registrados; además pueden estar bien documentados en relación con los problemas y daños que causaron a una zona urbana, a su sistema de drenaje o bien, a las zonas de cultivo. Las segundas se obtienen a partir del estudio y generalización de un gran número de tormentas severas observadas; la idea es estimar un hietograma que represente a las tormentas de la zona asociada a una cierta probabilidad de excedencia (Campos Aranda, 2007). Las terceras son las más utilizadas y son asociadas a una probabilidad de excedencia o a periodo de retorno, pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio (Chow et al., 1988).

- a. Construir curvas I-D-T a partir de la información de las EMAS.

Las primeras EMAS operadas por el SMN de la CONAGUA, datan del año de 1999, es decir las que cuentan con mayor información tienen 21 años. O usar las Curvas de la SCT.

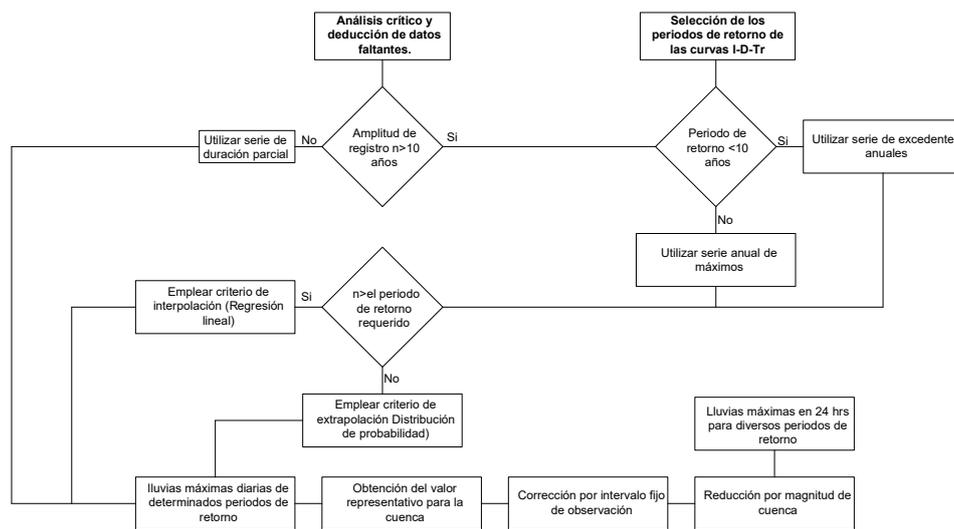
- b. Calcular tormentas con información de estaciones climatológicas convencionales (información a cada 24 horas).

Para esto se requiere recopilar la información máxima anual en 24 horas de cada una de las estaciones. Posteriormente realizar un análisis de frecuencias y así obtener la precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno. Posteriormente se distribuye la lluvia en el tiempo con alguna formulación como la de Chen y el cálculo de la precipitación media en cada cuenca para los periodos

de retorno se puede calcular con el método de los polígonos de Thiessen (Gómez Martínez, 2021).

El procesamiento de los registros disponibles de lluvias máximas diarias cuantifica las lluvias máximas en 24 horas de diversos períodos de retorno. Los periodos de retorno se determinan de manera que cubran las necesidades de diseño de las estructuras hidráulicas, en las cuales se utilizarán las lluvias máximas en 24 horas, a través de las llamadas: Curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno (P-D-Tr) (Campos Aranda, 2007).

Para llevar a cabo el procesamiento estadístico de los registros de lluvias máximas diarias, se sigue la secuencia siguiente:



Fuente: Campos Aranda (2007).

Figura 7.5. Diagrama del procesamiento estadístico de lluvias máximas diarias.

### I. Periodo de retorno.

Periodo de retorno es el número de años en que, en promedio y a la larga un evento puede ser igualado o excedido (Gómez et al., 2010).

En la serie anual de máximos, el período de retorno ( $T_r$ ) será estimado utilizando la fórmula de Weibull, para evaluar la probabilidad, entonces se tiene (Campos Aranda, 2007):

$$Tr = \frac{n+1}{m} \quad (7.29)$$

Siendo  $Tr$  el periodo de retorno en la serie anual de máximos en años,  $n$  el número total de eventos en la serie anual, igual al número de años de registro y  $m$  el número de orden del evento, arreglados en forma decreciente, es decir, uno para el mayor y  $n$  para el menor.

### **7.6.3. Modelación hidráulica con el software HEC-HMS.**

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, HEC-HMS utiliza los siguientes componentes: modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar. Los componentes de los datos de entrada, tales como las series temporales, tablas y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno tanto en el modelo de la cuenca como en el meteorológico (Nania, 2007).

El software de manera general obtiene las avenidas en una cuenca para una tormenta (sea esta, histórica o de diseño) de la siguiente forma: primeramente, cuantifica las pérdidas de la precipitación, es decir, la fracción de la precipitación que no escurre de manera directa a la salida de la cuenca, obteniendo así la precipitación en exceso. Una vez evaluada la precipitación efectiva, calcula el hidrograma para la tormenta simulada (Cavazos, 2020).

#### ***A. Componentes del modelo de la cuenca.***

El modelo de la cuenca representa la cuenca física. El usuario desarrolla el modelo de la cuenca, incluyendo y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que se producen en la cuenca (Nania, 2007).

Cuadro 7.5. Descripción de los elementos hidrológicos.

Elemento hidrológico	Descripción
Subcuenca (subbasin)	Se usa para representar la cuenca física. Dada la precipitación, la salida de agua de la subcuenca se calcula restando las pérdidas a la precipitación y transformando el exceso de precipitación en caudal en el punto de salida de la subcuenca, sumando finalmente el caudal base.
Tramo (Reach)	Se usa para transportar el agua generada en algún punto de la cuenca hacia aguas abajo hasta otro punto de la cuenca, definidos ambos en el modelo de la cuenca. La respuesta de este transporte es un retardo y una atenuación del hidrograma de entrada.
Unión (Junction)	Se usa para sumar flujos de agua que provienen de elementos hidrológicos situados aguas arriba de la unión. La respuesta es simplemente la suma de los hidrogramas de todos los elementos conectados a la unión.
Fuente (Source)	Se usa para introducir agua dentro del modelo de la cuenca. Este elemento no tiene entrada y la salida está definida por el usuario.
Sumidero (Sink)	Se usa para representar el punto de salida de la cuenca. La entrada puede provenir de uno o más elementos situados aguas arriba del sumidero. Este elemento no tiene salida.
Depósito (Reservoir)	Se usa para modelar la retención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o depósito de

<b>Elemento hidrológico</b>	<b>Descripción</b>
	retención. La entrada puede provenir de uno o varios elementos hidrológicos situados aguas arriba del depósito. La salida puede calcularse de 2 maneras: el usuario define una relación almacenamiento-salida, cota-almacenamiento o cota-área y una o más estructuras de salida.
Derivación (Diversion)	Se usa para modelar un flujo de agua que abandona un tramo de cauce. La entrada proviene de uno o varios elementos de aguas arriba. La salida de este elemento consiste un flujo derivado y otro no derivado (que sigue por el cauce). El flujo derivado se define por el usuario. Tanto los flujos derivados como no derivados se pueden conectar aguas abajo con otros elementos.

Fuente: Nania (2007).

Los métodos de cálculo que se usan en las subcuencas son los siguientes:

Cuadro 7.6. Métodos de cálculo para subcuencas.

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Método</b>
Pérdidas	Déficit y tasa constante (DC) Inicial y tasa constante Exponencial Número de curva CN SCS Green y Ampt Consideración de la humedad del suelo (SMA) DC por celdas CN SCS por celdas SMA por celdas
Transformación lluvia-caudal	Hidrograma Unitario (HU) de Clark

Tipo de modelo	Método
	Onda cinemática ModClark HU SCS HU Snyder HU especificado por el usuario Hidrograma en S del usuario
Flujo base	Recesión restringida Constante mensual Depósito lineal Recesión

Fuente: Nania (2007).

Los métodos de cálculo que se usan en los tramos son los relativos a la propagación de caudales y son: Onda cinemática, Retardo, Puls modificado (embalse a nivel), Muskingum y Muskingum-Cunge (Nania, 2007).

### ***B. Componentes del modelo meteorológico.***

El modelo meteorológico calcula la entrada de precipitación que requiere un elemento de subcuenca. El modelo meteorológico puede usar precipitación puntual o por celdas y puede modelar precipitación sólida y líquida junto con la evapotranspiración. Los métodos de evapotranspiración incluyen el método constante mensual y el de Priestley Taylor. Un método de evapotranspiración se requiere únicamente cuando se desee una respuesta de la cuenca continua o a largo plazo (Nania, 2007).

Cuadro 7.7. Descripción de los métodos incluidos en el modelo meteorológico.

Métodos de precipitación	Descripción
Tormenta asociada a frecuencia	Se usa para desarrollar un evento de precipitación donde los volúmenes correspondientes a distintas duraciones tienen una probabilidad de excedencia consistente.

<b>Métodos de precipitación</b>	<b>Descripción</b>
Pluviómetros con pesos	Este método aplica pesos definidos por el usuario a los pluviómetros que el usuario desee.
Precipitación por celdas	Este método permite usar productos con precipitación por celdas, como por ejemplo los datos de Radar.
Inversa de la distancia	Se usa para calcular la precipitación media en una subcuenca aplicando una ponderación basada en la inversa de la distancia al cuadrado.
Tormenta del SCS	Este método aplica una distribución temporal tipo SCS a un volumen total de lluvia en 24 horas.
Hietograma especificado	Este método aplica un hietograma definido por el usuario a un elemento de subcuenca.

Fuente: Nania (2007).

### ***C. Componentes de las especificaciones de control.***

Las especificaciones de control se refieren al tiempo de duración de la simulación, incluyendo fecha y hora de comienzo y fin del proyecto e intervalo de tiempo de cálculo.

### ***D. Componentes de la entrada de datos.***

Datos de series temporales, pares de datos y datos por celdas son requeridos como parámetros o condiciones de contorno en los modelos de la cuenca y meteorológicos. Los datos de entrada pueden introducirse a mano o bien pueden referenciarse a un registro en un fichero HEC-DSS (HEC-Data Storage System). Todos los datos por celdas deben referenciarse a un registro HEC-DSS existente (Nania, 2007).

Cuadro 7.8. Componentes de los datos de entrada.

Series temporales de datos	Pares de datos	Datos por celdas
Pluviómetros Medidores de caudal Limnímetros Termómetros Medidores de radiación solar Medidores de coeficientes de cultivo	Funciones almacenamiento-caudal Funciones cota-almacenamiento Funciones cota-área Funciones cota-caudal Funciones caudal-derivación Secciones transversales Hidrogramas unitarios Curvas de porcentaje Funciones de fusión de nieve Patrones de tasa de fusión de nieve	Precipitación Temperatura Radiación solar Coeficiente de cultivo Capacidad de almacenamiento Tasa de percolación Coeficientes de almacenamiento Déficit de humedad Área impermeable Número de curva CN SCS Cotas Equivalente de agua de nieve Contenido de agua Tasa de fusión de nieve

Fuente: Nania (2007).

### 7.7. Análisis hidráulico.

En el análisis hidráulico, se ingresarán las avenidas y lluvias de diseño. Definiendo una serie de condiciones iniciales, condiciones de contorno, topografía y rugosidad, que impactan en la hidrodinámica sobre la malla de cálculo bidimensional.

#### 7.7.1. Modelación hidráulica con el software Iber.

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente y de procesos medioambientales que representa modelos de hidráulica fluvial. El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de

transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2014).

El modelo Iber consta actualmente de 6 módulos de cálculo principales: módulo hidrodinámico, módulo de turbulencia, módulo de transporte de sedimentos, módulo de calidad del agua, módulo de procesos hidrológicos y módulo de hábitat. Todos los módulos trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros. En el módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D). Estas ecuaciones asumen las hipótesis de distribución de presión hidrostática y velocidad uniforme sobre la profundidad del agua. El supuesto de presión hidrostática se cumple tanto en ríos como en corrientes de marea en estuarios no estratificados. La hipótesis de distribución uniforme de velocidades suele cumplirse en ríos y estuarios, siempre que no existan procesos de estratificación relevantes por diferencias de salinidad, temperatura o viento (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2014).

Para poder realizar un cálculo con Iber, se deben realizar los siguientes pasos:

- Crear o importar una geometría.
- Asignar una serie de parámetros de entrada (rugosidad del fondo, modelo de turbulencia, etc.).
- Asignar condiciones de contorno e iniciales.
- Asignar opciones generales de cálculo (tiempo de cálculo, parámetros del esquema numérico, activación de módulos adicionales).
- Construir una malla de cálculo.
- Lanzar el cálculo.

Las condiciones de contorno e iniciales, así como la mayor parte de parámetros de entrada se pueden asignar tanto sobre la geometría, como sobre la malla. Las condiciones asignadas sobre la geometría se traspasan a la malla al crearla, las condiciones asignadas sobre la malla se pierden al remallar. Para generar una

mallla se debe tener una geometría formada por superficies (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2012).

#### **A. Crear o importar geometría.**

Para importar una geometría es necesario en primer lugar guardar el proyecto con un nombre. El proyecto se guarda en el ordenador como una carpeta con el nombre del proyecto y extensión \*.gid. Iber dispone de una interfaz en la cual se puede crear una geometría desde el inicio, dibujando puntos (directamente o entrando coordenadas), líneas y superficies. Por otro lado, desde el menú “Archivo>Importar” se pueden importar distintos formatos estándar (dxf, shapefile, entre otros). Asimismo, a través del menú “Iber\_Herramientas” se pueden importar modelos digitales del terreno en formato ASCII de Arc/Info. Una vez creada o importada una geometría es posible editarla y modificarla con las opciones bajo el menú Geometría (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2012).

- Menú “Iber\_Herramientas>MDT.
- Menú “Iber\_Herramientas>RTIN.
- Menú “Iber\_Herramientas>CELLS Surf.

#### **B. Condiciones hidrodinámicas.**

a) Condiciones iniciales.

Se deben asignar a todo el dominio. Se puede escoger entre asignar un calado, o una cota de agua.

i. Condiciones de contorno de entrada.

Existe la posibilidad de asignar un caudal total, un caudal específico (caudal por unidad de ancho), o una cota de agua. En cada caso se exigirán los parámetros necesarios en función de si el régimen es subcrítico, crítico, o supercrítico.

ii. Condiciones de contorno de salida.

En este caso sólo se deben especificar parámetros adicionales si el régimen es subcrítico, en cuyo caso es posible utilizar una condición tipo vertedero, una

condición de nivel dado (cota o tirante) o una curva de gasto. En caso de régimen supercrítico o crítico no es necesario asignar parámetros adicionales. Para utilizar una curva de gasto, dentro de la carpeta del proyecto deben existir tantos archivos como curvas de gasto se quieran utilizar, de nombre: rctable1.dat, rctable2.dat, rctable3.dat, etc. Cada archivo ASCII consta de dos columnas con las cuales se define la curva de gasto: en la primera columna la cota, en la segunda el caudal específico. Las cotas deben ser crecientes con las filas de la tabla (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2012).

### **C. Rugosidad.**

En Iber la rugosidad se asigna a través de un coeficiente de rugosidad de Manning.

#### **i. Asignación según usos del suelo.**

Con el menú “Rugosidad > Usos del suelo” se abre la posibilidad de escoger un uso del suelo y asignarlo a las superficies que forman la geometría (o en su caso a los elementos de la malla). Existen valores predeterminados asignados a cada uso del suelo, pero estos pueden cambiarse. También se pueden añadir o eliminar usos del suelo (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2012).

#### **ii. Asignación automática con datos georreferenciados.**

La asignación automática del coeficiente de rugosidad se realiza desde el menú: “Datos >Rugosidad > Asignación automática”. Este menú abre una ventana de selección donde el usuario puede escoger el tipo de archivo desde donde se leerá la información de usos del suelo. Iber tiene implementados dos formatos, el formato estándar ASCII Grid ArclInfo y un formato XY definido específicamente. En ambos casos debe existir en el mismo directorio un archivo \*.csv que contenga la lista de los tipos utilizados, que además deberán coincidir con los existentes en la base de datos del programa. Si las clases no existieran pueden crearse dentro de la base de datos mediante la ventana de asignación manual mencionada en el sub-apartado anterior. Una vez seleccionado el formato deseado se acepta y se abrirá una ventana desde donde escoger el archivo. Al escoger el archivo

adecuado y aceptar, el programa lee la información y automáticamente asigna a los elementos de la malla el coeficiente de Manning que les corresponde (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2012).

#### ***D. Procesos hidrológicos.***

En el menú “Datos > Procesos hidrológicos” se puede asignar un hietograma y distintas funciones de pérdidas por infiltración sobre las superficies de la geometría o los elementos de la malla.

##### **a) Lluvia.**

La lluvia se asigna en forma de hietograma. Cada instante de tiempo del hietograma indica el inicio de un bloque de precipitación de intensidad constante que se mantiene hasta el próximo instante de tiempo.

##### **b) Mallado.**

La malla de cálculo es un elemento fundamental para conseguir buenos resultados. Iber dispone de multitud de maneras de obtener una buena malla de cálculo, y en función de las características del problema un tipo de malla será mejor que otro. Iber puede trabajar tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares, así como estructuradas o no estructuradas (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2012).

#### ***E. Cálculo.***

El módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, resuelve las ecuaciones de conservación de masa y de conservación de cantidad de movimiento en direcciones “X-Y” conocidas como ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones (2D) o ecuaciones de aguas someras, lo anterior debido a que estas expresiones asumen una escala espacial vertical mucho más pequeña que la escala horizontal, lo cual permite asumir una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad. La

hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo en ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios (Cavazos, 2020).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad (7.30)$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} * \frac{h^2}{2} * \frac{\partial \rho}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad (7.31)$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} * \frac{h^2}{2} * \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad (7.32)$$

Donde:

$h$ : calado o tirante.

$U_x, U_y$ : velocidades horizontales promediadas en profundidad.

$g$ : aceleración de la gravedad.

$Z_s$ : elevación de la lámina libre.

$\tau_{s,x}, \tau_{s,y}$ : fricciones en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento.

$\tau_{b,x}, \tau_{b,y}$ : fricciones debido al rozamiento del fondo.

$\rho$ : densidad del agua.

$\Omega$ : velocidad angular de rotación de la tierra.

$\lambda$ : latitud del punto considerado.

$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$ : tensiones tangenciales efectivas horizontales.

$M_s, M_x, M_y$ : términos fuente/sumidero de masa y de momento, respectivamente, mediante los cuales se realiza la modelación de precipitación, infiltración y sumideros.

Las ecuaciones de Saint Venant 2D no se pueden resolver analíticamente en un problema real, por lo que es necesario recurrir a métodos numéricos para resolver dichas ecuaciones sobre mallas de cálculo bidimensionales, pudiendo ser estas estructuradas o no estructuradas. Algunos de los métodos numéricos más utilizados en la modelación hidráulica a superficie libre bidimensional son el Método de Diferencias Finitas (MDF), Método del Elemento Finito (MEF) y Método de Volúmenes Finitos (MVF). Los últimos dos métodos permiten una gran

flexibilidad geométrica para definir el problema a analizar, lo que los hace especialmente adecuados para resolver problemas de hidráulica fluvial, donde se presentan geometrías irregulares (Cavazos, 2020).

#### **F. Post-proceso.**

Una vez finalizado el cálculo, o durante el mismo, se puede acceder al post-proceso para visualizar y analizar los resultados (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2012).

#### **7.8. Calibración.**

Durante la calibración se busca la máxima correlación entre los valores de las variables generadas por el modelo y las medidas en el sistema real. Si después de muchas pruebas no se obtuviera la calibración, se tendría que revisar el planteamiento del modelo (Larios, 2014).

##### **7.8.1. Coeficiente de determinación $r^2$ .**

El coeficiente de determinación  $r^2$  es definido como el cuadrado del valor del coeficiente de correlación de acuerdo con Bravais-Pearson. Es calculado como (Krause et al., 2005):

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (7.33)$$

Con O observados y P valores predichos.

El coeficiente  $r^2$  puede ser expresado como la razón al cuadrado entre la covarianza y las desviaciones estándar multiplicadas de los valores observados y predichos (Krause et al., 2005).

##### **7.8.2. Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).**

La eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la varianza de los datos medidos ("información"). NSE indica qué tan bien la

trama de observación frente a los datos simulados se ajusta a la línea 1:1. NSE se calcula como se expresa en la ecuación (Roblero, 2013).

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y^{media})^2} \right] \quad (7.34)$$

Valores referenciales del criterio Nash-Sutcliffe.

Cuadro 7.9. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.

<b>E</b>	<b>Ajuste</b>
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

### 7.8.3. Prueba de bondad de ajuste: Shapiro-Wilk.

La prueba de Shapiro-Wilk se restringió originalmente para tamaños de muestra pequeños ( $n < 50$ ). Esta prueba fue la primera que fue capaz de detectar desviaciones de la normalidad, ya sea debido a la asimetría o curtosis o ambos. Las hipótesis a contrastar están establecidas de la siguiente manera (Carmona & Rosales, 2015):

$H_0$ : la muestra sigue una distribución normal.

$H_1$ : la muestra no sigue una distribución normal.

El estadístico de prueba definido por Shapiro-Wilk es el siguiente.

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]} \quad (7.35)$$

Dónde:

$x_{(i)}$ : es la i-ésima estadística de orden.

$\bar{x}$ : media de la muestra.

#### 7.8.4. Coeficiente de correlación de Pearson.

Tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta. El coeficiente se define por la siguiente fórmula (Restrepo & Julián González L, 2007):

$$\rho = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x\sigma_y} \quad (7.36)$$

Cuando  $\rho = +$  la relación es directa entre las variables, si  $\rho = -$  la relación es inversa y si  $\rho = 0$  son independientes.

#### 7.9. Definición de riesgo.

El término riesgo tiene una variedad de significados y múltiples dimensiones relacionados con la seguridad y aspectos económicos, medioambientales y sociales (Vega Serratos, 2017). Merz et al., (2010) definen el riesgo como la probabilidad de que los efectos adversos de un proceso natural, como una inundación, superen cierta magnitud (intensidad) a partir de la cual se produzcan ciertos daños y pérdidas (vulnerabilidad) La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastre (UNDRR) define riesgo como la probabilidad de exceder un valor específico de daños, en un lugar dado y durante un tiempo de exposición determinado (UNDRR, CEPAL, 2019).

Otra definición es del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) define riesgo como la probabilidad de que se produzcan alteraciones graves en el funcionamiento normal de una comunidad o sociedad debido a los fenómenos físicos peligrosos que interactúan con condiciones sociales vulnerables, dando lugar a efectos humanos, materiales, económicos o ambientales (IPCC, 2012).

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), (2014) define riesgo como el resultado de 3 factores: **peligro (P)** que se define como como la probabilidad que se presente un evento de cierta intensidad. Sus características

específicas son magnitud, tiempo, ubicación y probabilidad de ocurrencia, **grado de exposición** (E), que se define como la cantidad de personas, bienes y sistemas que se encuentran en el sitio considerado y que es factible sean dañados por el evento y **vulnerabilidad** (V) que se define como la propensión de estos sistemas a ser afectados por el evento, la vulnerabilidad se expresa como una probabilidad de daño (CENAPRED, 2014a), quedando expresado de la siguiente manera:

$$R = P \times E \times V \quad (7.37)$$

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad}$$

El riesgo se expresa como un resultado posible de un evento; ya que P y V son dos probabilidades; si E se puede expresar en términos monetarios, R resulta igual a la fracción del costo total de los sistemas expuestos que se espera sea afectada por el evento en cuestión (CENAPRED, 2014a).

#### **7.10. Riesgo por inundación.**

El riesgo de inundación puede describirse a diferentes escalas, que van desde el nivel mundial hasta la escala local (Merz et al., 2007). Se considera como una inundación el flujo o la invasión de agua por exceso de escurrimientos superficiales o por la acumulación de éstos en terrenos planos, ocasionada por la falta o insuficiencia de drenaje pluvial tanto natural como artificial (Baró-Suárez et al., 2007b) y cuanto más tiempo permanece el agua y más grande es el espesor del volumen de agua, causa mayores daños (CENAPRED, 2014a).

El riesgo de inundación es una combinación de daño potencial y capacidad de inundación (Forster et al., 2008). Las zonas con mayor riesgo de inundación a nivel nacional son las partes bajas y zonas costeras, las que se ven mayormente afectadas. Las inundaciones son uno de los fenómenos naturales más comunes en nuestro país, prácticamente todos los años se producen por el desbordamiento de los ríos, debido al exceso de lluvia, que pueden causar daños severos (CENAPRED, 2019b).

### **7.11. Riesgo por inundación en zonas agrícolas.**

La evaluación del riesgo por inundaciones en zonas agrícolas es significativa e importante para los encargados de atender los desastres por inundaciones e implementar planes de compensación y reducción de desastres (Sun et al., 2016). La evaluación del daño agrícola potencial es indispensable para evaluar las implicaciones para las áreas más expuestas (Brémond et al., 2013). Los daños por inundaciones en el sector agrícola incluyen pérdidas de productos agrícolas, viviendas rurales y urbanas e infraestructura agrícola. La reducción del rendimiento y la calidad de los productos agrícolas pueden requerir gastos adicionales para la siembra, la labranza y la aplicación de fertilizantes y agentes protectores de cultivos. Además, el daño al suelo podría ser importante. Se refiere a una potencial disminución en la calidad del suelo debido a la deposición de contaminantes y una pérdida de estructura del suelo debido a la compactación o erosión (Merz et al., 2010). En general, se deben desarrollar estimaciones de pérdidas para cada tipo de cultivo y período de inundación, teniendo en cuenta las pérdidas de rendimiento debido a retrasos en la siembra, costos de replantación, ahorros debido a costos no incurridos y costos de limpieza (Forster et al., 2008).

#### **7.11.1. Tipos de daños en la agricultura.**

El efecto dañino de las inundaciones sobre la agricultura se puede evaluar a partir de los impactos siguientes: Destrucción o afectación de los cultivos que quedan cubiertos total o parcialmente por el agua durante varios días, a consecuencia del estrés hídrico excesivo, presencia de enfermedades y plagas como consecuencia de la humedad persistente en el terreno, saturación de los suelos o aumento significativo de la humedad de los mismos, socavación de estructuras como carreteras, puentes, alcantarillas y cruces de ferrocarriles que dan servicio a la agricultura, pérdida de rendimiento agrícola de los cultivos y de la producción en general como consecuencia de los efectos anteriores (Ponvert-Délisles et al., 2007).

La clasificación de daños distingue primero entre daños tangibles e intangibles. El daño tangible se define como un impacto negativo que puede cuantificarse

fácilmente. Por el contrario, la cuantificación de daños intangibles, es decir, daños ambientales como la pérdida de biodiversidad o impactos estéticos no son fáciles o incluso imposibles de medir, por lo tanto, los daños intangibles a menudo no se tienen en cuenta en la evaluación monetaria del daño, segundo la misma clasificación distingue entre daño directo e indirecto, el daño directo corresponde al daño limitado al área inundada y el daño indirecto corresponde a lo que ocurre fuera del área inundada, distinguiendo el daño entre instantáneo e inducido (Brémond et al., 2013).

### 7.11.2. Categorías de daños por inundación en la agricultura.

Para los daños en la agricultura Brémond et al., (2013) proponen una clasificación:

Cuadro 7.10. Clasificación de daños en la agricultura por inundación, Brémond et al., (2013).

<b>Tipo de daño</b>	<b>Instantáneo (justo después de la inundación)</b>	<b>Inducido (tiempo después de la inundación)</b>
Directo (exposición a las inundaciones)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de cosechas y reducción de rendimiento.</li> <li>• Daño a material vegetal perenne.</li> <li>• Daño al suelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de valor añadido por pérdida de rendimiento en los primeros años tras la replantación de material vegetal perenne o resiembra de hierba.</li> <li>• Pérdida de valor agregado debido a la falta de disponibilidad de factores de producción (maquinaria, insumos, etc.)</li> </ul>

Tipo de daño	Instantáneo (justo después de la inundación)	Inducido (tiempo después de la inundación)
Indirecto (no directamente expuesto a las inundaciones)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumento del tiempo de viaje debido a daños en la infraestructura.</li> <li>• Retraso o cancelación de suministro de la zona inundada (insumos, maquinaria, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de valor agregado fuera del área inundada por interrupción del negocio de activos en el área inundada.</li> <li>• Pérdida de valor añadido fuera de la zona inundada debido a daños en la infraestructura.</li> </ul>

### 7.11.3. Peligro por inundación en la agricultura.

De los estudios que se centran en el daño directo a la agricultura, se consideran los parámetros de peligro como los más influyentes en el cálculo de daños directos, sin embargo los parámetros que se usan son los que se pueden obtener a partir de modelos hidráulicos, los parámetros de inundación que pueden usarse para construir funciones de daño para la agricultura son la estacionalidad de la inundación, la profundidad del agua, la duración, la velocidad de la corriente, los depósitos, la contaminación ambiental y la salinidad del agua (Brémond et al., 2013).

#### A. Estacionalidad de la inundación.

Es un parámetro que vincula diferentes coeficientes de daño con la estación del año, utiliza el año como escala de tiempo y los intervalos pueden ser mensuales o la etapa vegetativa de crecimiento para un cultivo en específico, es utilizado para evaluar el daño en el material vegetal y en la disponibilidad (Brémond et al., 2013).

## **B. Profundidad del agua.**

Es el parámetro más utilizado en la construcción de funciones de daño directo, se considera para evaluar los daños en el material vegetal y en algunos casos el suelo (Brémond et al., 2013).

## **C. Duración.**

El parámetro considera el número de días que dura la sumersión del cultivo para evaluar el daño en los cultivos y material vegetal (Brémond et al., 2013).

## **D. Velocidad de la corriente.**

Es un parámetro que no es común utilizar en las funciones de daños, estableciendo intervalos de velocidad media, baja y alto para determinar el daño potencial de la planta por extracción (Brémond et al., 2013).

## **E. Contaminación y salinidad del agua.**

La sal puede generar impactos específicos en los cultivos y el suelo, en el caso de la inmersión marina, la reducción del rendimiento es mayor debido a la toxicidad de la sal para el suelo. La contaminación en el suelo es importante para la restauración de llanuras aluviales (Brémond et al., 2013).

## **F. Transporte de sedimentos.**

El transporte de sedimentos genera erosión dentro y en las márgenes del río, generando problemas de socavación en los terrenos agrícolas y los sedimentos pueden depositarse en los cultivos y afectar el rendimiento (Brémond et al., 2013).

### **7.11.4. Vulnerabilidad por inundación en la agricultura.**

La vulnerabilidad se considera generalmente como una amenaza específica (Brémond & Grelot, 2012), la vulnerabilidad se considera como la extensión del daño que se puede esperar en determinadas condiciones de exposición, susceptibilidad y resiliencia. La vulnerabilidad de cualquier sistema (a cualquier escala) es un reflejo de (o una función de) la exposición y susceptibilidad de ese sistema a condiciones peligrosas y la habilidad, capacidad o resiliencia del sistema para

hacer frente, adaptarse y recuperarse de los efectos de esas condiciones, dado que la cuantificación de la vulnerabilidad puede ayudar en los procesos de toma de decisiones, los parámetros y los indicadores (índices) deben diseñarse para producir información para áreas objetivo específicas y deben proporcionar información para contrarrestar los diferentes peligros que enfrentan las sociedades, como inundaciones (Balica, 2007).

La evaluación de la vulnerabilidad en la agricultura nos permite conocer que tan expuesto queda un cultivo frente a las inundaciones, es difícil de evaluar debido a que se deben considerar varios factores como el periodo de ocurrencia y la profundidad de la inundación, las etapas fenológicas en las que se encuentren los cultivos, las características del suelo (Brémond et al., 2013), un cultivo siempre es más vulnerable que otro dependiendo de la combinación de factores.

#### **7.12. Mapas de riesgo por inundación.**

Un mapa de riesgo por inundación es una representación gráfica del análisis de riesgo, con los componentes: magnitud, distribución espacial e interacción con un sistema. Los mapas del riesgo de inundaciones es un elemento esencial para la gestión y comunicación de riesgos de inundaciones (Merz et al., 2010), debido a que permite identificar las zonas críticas, cuantificar el daño potencial, desde el punto de vista de inundaciones. Al proyectar cualquiera de las medidas de protección, ya sean estructurales o institucionales, se puede realizar el análisis costo beneficio (comparando los beneficios obtenidos del rendimiento potencial vs los daños obtenidos por la inundación) (CENAPRED, 2014b).

## **8. MATERIALES Y MÉTODOS.**

Se presenta el proceso que se siguió para el desarrollo del trabajo de simulación de inundaciones que afectan al Distrito de Riego 008 Metztlán. En la figura 8.1 se muestra el diagrama de flujo de los métodos seguidos para el estudio de la cuenca del río Metztlán.

### **8.1. Materiales.**

La información utilizada se tomó de fuentes oficiales, de acuerdo con los siguiente:

*Documentación antecedente:* libros, artículos y base de datos.

*Información meteorológica:* la información de estaciones meteorológicas se elaboró con base en la información de la CONAGUA, se obtuvo información de 19 estaciones meteorológicas con influencia en la cuenca del río Metztlán de la variable precipitación (mm).

*Información hidrométrica:* para el análisis de información hidrométrica se localizaron las estaciones hidrométricas, que miden los escurrimientos en los cauces principales, en el caso de la cuenca del río Metztlán se utilizó la información de 2 estaciones convencionales: 26042 Venados y 26047 Jihuico, extrayéndola de la base de datos del Banco Nacional de Aguas de Superficiales (BANDAS), utilizando información de gasto en m<sup>3</sup>/s diarios e instantáneos.

*Cartografía digital:* con la finalidad de elaborar el mapa base para el estudio, se revisó la información cartográfica digital del área de estudio referente a estados, municipios, uso de suelo y vegetación, hidrografía, topografía en formato vectorial y ráster de INEGI y CONABIO.

*Software:* para el mapa base se usó el programa ArcGis 10.4.1, HEC-HMS 4.2 para la modelación hidrológica, Iber 2.5.2 para la modelación hidráulica y paquetería de office (Word y Excel) para la elaboración del documento y las presentaciones.

*Equipo de cómputo:* computadora portátil de 16.0 GB de memoria RAM, procesador Intel (R) Core (TM) i7 11th generación y sistema operativo de 64 bits.

## **8.2. Métodos.**

El desarrollo de esta investigación consta de las siguientes fases: recopilación de información, modelación hidrológica con el software HEC HMS versión 4.2, modelación hidráulica con el software Iber versión 2.5.2 y el análisis agrícola.

La fase de recopilación de información tuvo como resultado la delimitación de la cuenca y subcuencas, la asignación del número de curva (NC) ponderado de cada subcuenca y las tormentas de diseño, datos de entrada de la siguiente fase, la modelación hidráulica con el software HEC HMS versión 4.2., el resultado del modelo fueron los hidrogramas de las subcuencas, con estos hidrogramas se realizó la calibración del modelo hidrológico comparando con los registrados en la estación hidrométrica 26042 Venados, una vez calibrado el modelo, los hidrogramas fueron ingresados al modelo Iber versión 2.5 para obtener las manchas de inundación, el modelo hidráulico fue calibrado por comparación de áreas de la mancha de inundación con respecto al área trazada en imágenes satelitales, una vez calibrado, se obtuvo las manchas de inundación para cada periodo de retorno analizado, estas manchas fueron procesadas para obtener el primer componente del riesgo, el peligro, en base a la fase fenológica de la planta se les aplicó el criterio de vulnerabilidad y se obtuvo el segundo componente, la vulnerabilidad, con la clasificación del peligro, se estimó el área afectada para el cálculo de las pérdidas económicas y así se obtuvo el tercer componente, el valor de exposición, con los tres componentes calculados, se calculó el riesgo y el índice de riesgo.

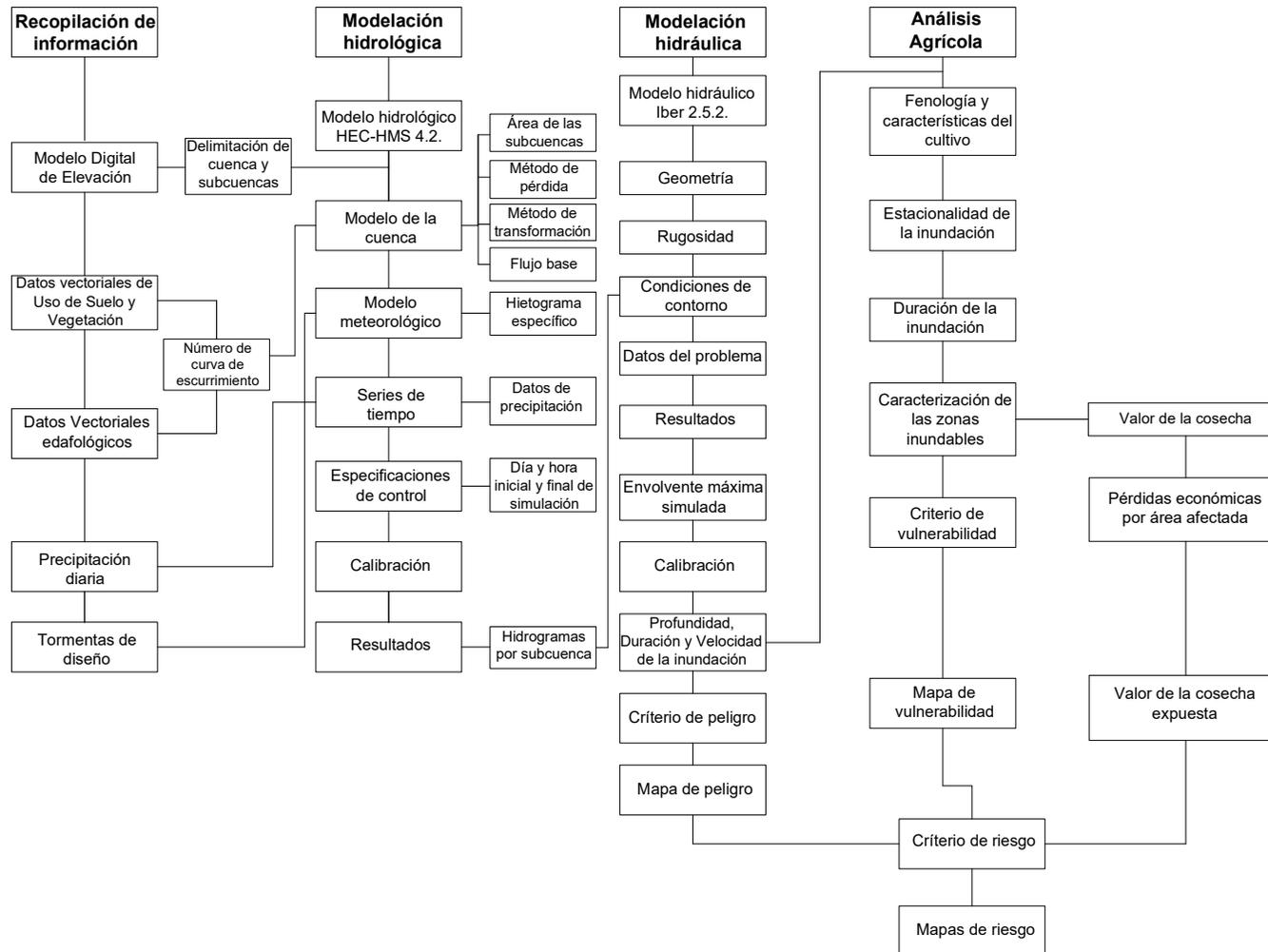


Figura 8.1. Metodología general para la definición del riesgo agrícola por inundación en el D.R. 008 Metztlán.

## **9. CASO DE ESTUDIO.**

La metodología general mostrada en el apartado anterior será desarrollada para el caso de estudio, el D.R. 008 Metztlán, para ello, se recopiló la información, que nos permitirá la realización del mapa base de la cuenca y caracterizar la misma.

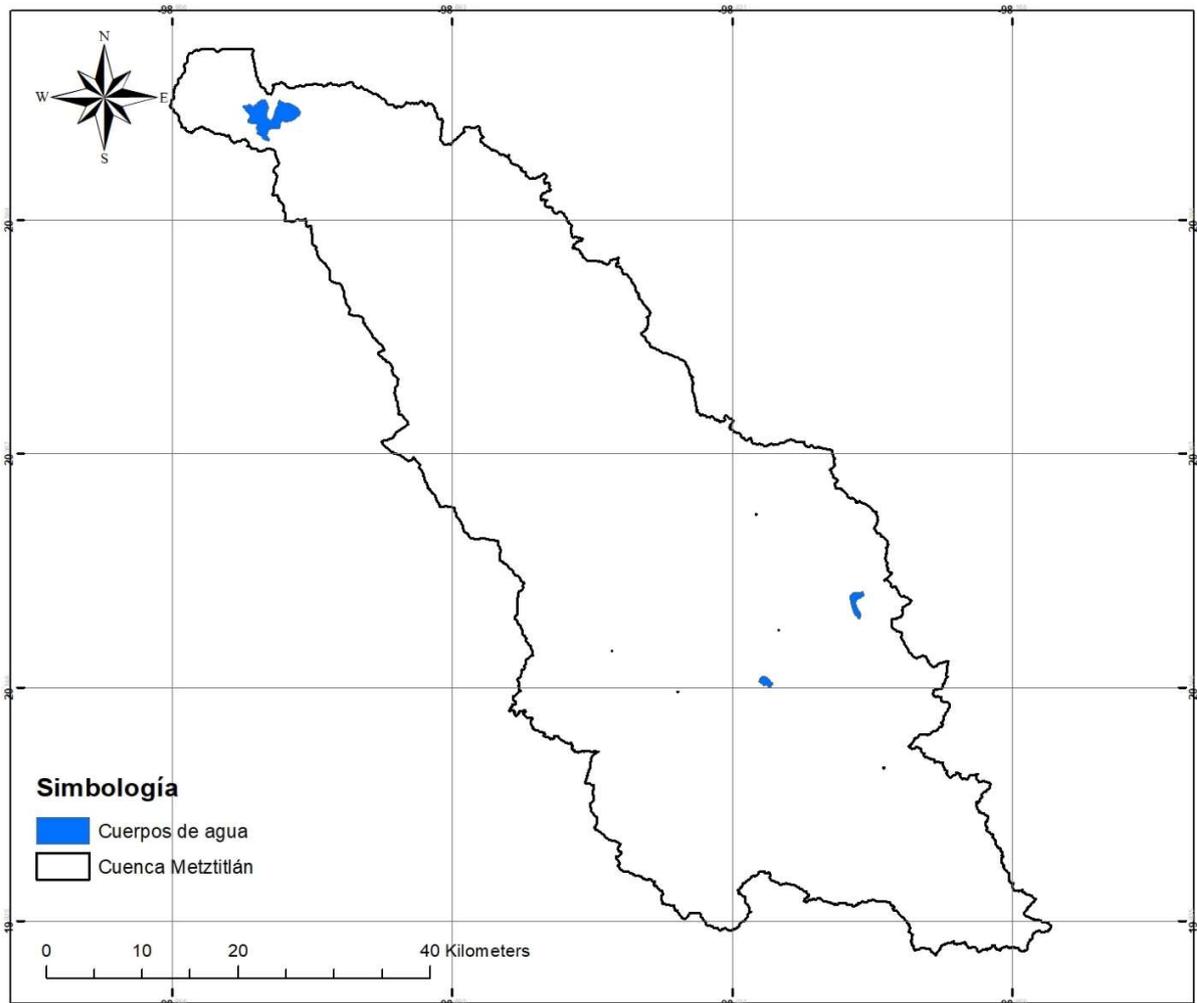
### **9.1. Elaboración del mapa base de la cuenca hidrológica.**

Para la elaboración del mapa base de la cuenca, se usaron las cartas de INEGI escala 1:50,000 para descargar el Modelo Digital de Elevación (MDE) del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), en los cuales indican puntos sobre la superficie del terreno y tiene una resolución de las celdas de elevación de 15 metros.

Las claves de cartas escala 1:50,000 usadas para la delimitación de la cuenca son: F14D61, F14D71, F14D62, F14D72, F14D82, F14B12, F14D73, F14D83 y F14B13.

#### **9.1.1. Delimitación y caracterización de la cuenca.**

La delimitación de la cuenca se realizó con el programa ArcMap 10.4.1, el primer paso fue unir los MDE para genera un mosaico y reprojectar para ponerlos en coordenadas UTM zona 14 N, continuando con el proceso para determinar la dirección y acumulación del flujo y finalmente realizar la delimitación automática de la cuenca con el módulo Hydrology de ArcMap.



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI. Escala 1:50,000.

Figura 9.1. Ubicación de la cuenca del río Metztitlán.

Con el sistema de información geográfica del mapa base realizado, se caracterizó la cuenca en forma morfométrica, hidrológica, climática, edafológica y uso de suelo y vegetación.

#### **A. Parámetros morfométricos de la cuenca.**

##### a) Área de la cuenca.

El área de la cuenca  $A_c$ , es el área de la proyección horizontal del parteaguas. El área de la cuenca es:

$$A = 2,937.029 \text{ km}^2$$

b) Perímetro de la cuenca.

El perímetro de la cuenca es:

$$P = 402.030 \text{ km}$$

c) Longitud de la cuenca:

La longitud de la cuenca es:

$$L = 172.247 \text{ km}$$

d) Forma de la cuenca.

*Forma de la cuenca cualitativa.*

La cuenca tiene forma de hoja.

*Forma de la cuenca cuantitativa.*

Para el caso de la forma cuantitativa la definimos con el Factor de forma ( $Rf$ ) definido por Horton en 1932.

$$Rf = \frac{Ac}{Lb^2} \quad (9.1)$$

Dónde:

$Rf$ : factor de forma, adimensional.

$Ac$ : área de la cuenca,  $\text{km}^2$

$Lb$ : longitud de la cuenca,  $\text{km}$ .

$$Rf = \frac{2,937.014 \text{ km}^2}{(111.497 \text{ km})^2} = 0.24$$

El factor de forma de la cueca es de 0.24, el valor indica que la cuenca es alargada, el valor máximo que se puede obtener del factor de forma es 0.78 para una cuenca completamente circular y a medida que la cuenca se hace más alargada el valor tiende a 0.

### 9.1.2. Hidrografía.

Para generar los cauces, una vez obtenidos la dirección y acumulación del flujo, con álgebra de mapas se determinaron las corrientes, continuando con el enlace y orden de corriente.

#### ***B. Parámetros hidrográficos de la cuenca.***

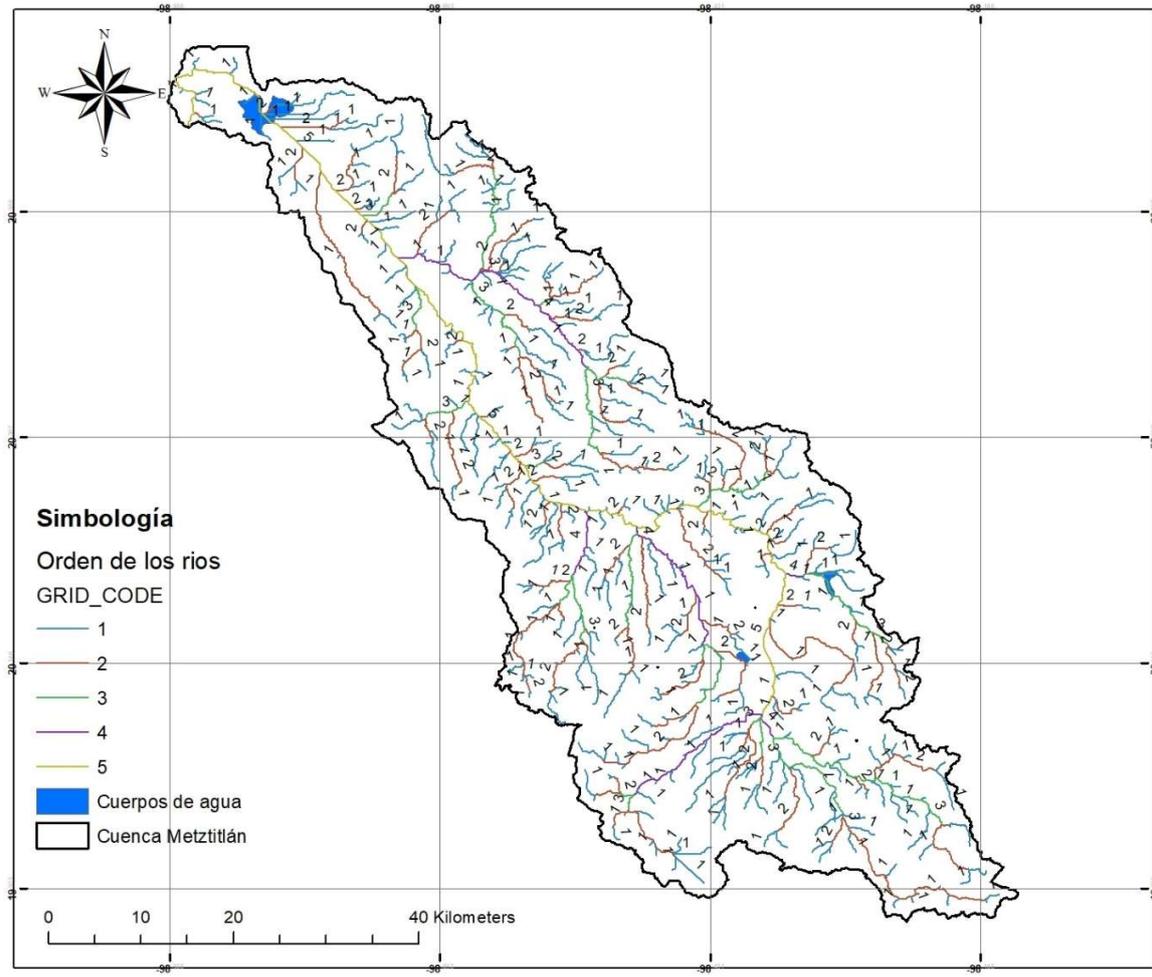
##### a) Orden de corriente.

El número de orden es directamente proporcional al tamaño de la cuenca de drenaje, a las dimensiones de los cauces y al caudal en ese lugar del sistema. El orden de corriente de la cuenca es 5.

Cuadro 9.1. Orden de corriente.

<b>Orden de corriente</b>	<b>Número de corrientes</b>
1	949
2	402
3	222
4	124
5	163
Total	1860

Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI, ESCALA 1:50,000.



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI. Escala 1:50,000.

Figura 9.2. Orden de corriente en la cuenca del río Metztlán.

b) Densidad de corriente.

Es un indicador de la eficiencia de drenaje de una cuenca, la densidad de corriente se representa como la relación existente entre el número de corrientes y el área de la cuenca:

$$Dc = \frac{Nc}{Ac} \quad (9.2)$$

Dónde:

$Dc$ : densidad de corrientes, cauces/ km<sup>2</sup> o ha,

$Nc$ : número de corrientes o cauces, adimensional y

$A_c$ : área de la cuenca, en  $km^2$ .

En la cuenca se tiene un número de cauces de 1,860, sustituyendo en la ecuación:

$$D_c = \frac{N_c}{A_c} = \frac{1,860 \text{ cauces}}{2,937.014 \text{ km}^2} = 0.633 \text{ cauces/km}^2$$

La densidad de corriente de la cuenca es de:  $0.6332 \text{ cauces/km}^2$ .

c) Densidad de drenaje.

La densidad de drenaje se representa como la relación existente la longitud de la red hídrica y el área de la cuenca:

$$D_d = \frac{L_{red}}{A_c} \quad (9.3)$$

Dónde:

$D_d$ : densidad de drenaje

$L_{red}$ : longitud de la red hídrica, km

$A_c$ : área de la cuenca, en  $km^2$

La longitud de la red hídrica es de 1,727.9178 km.

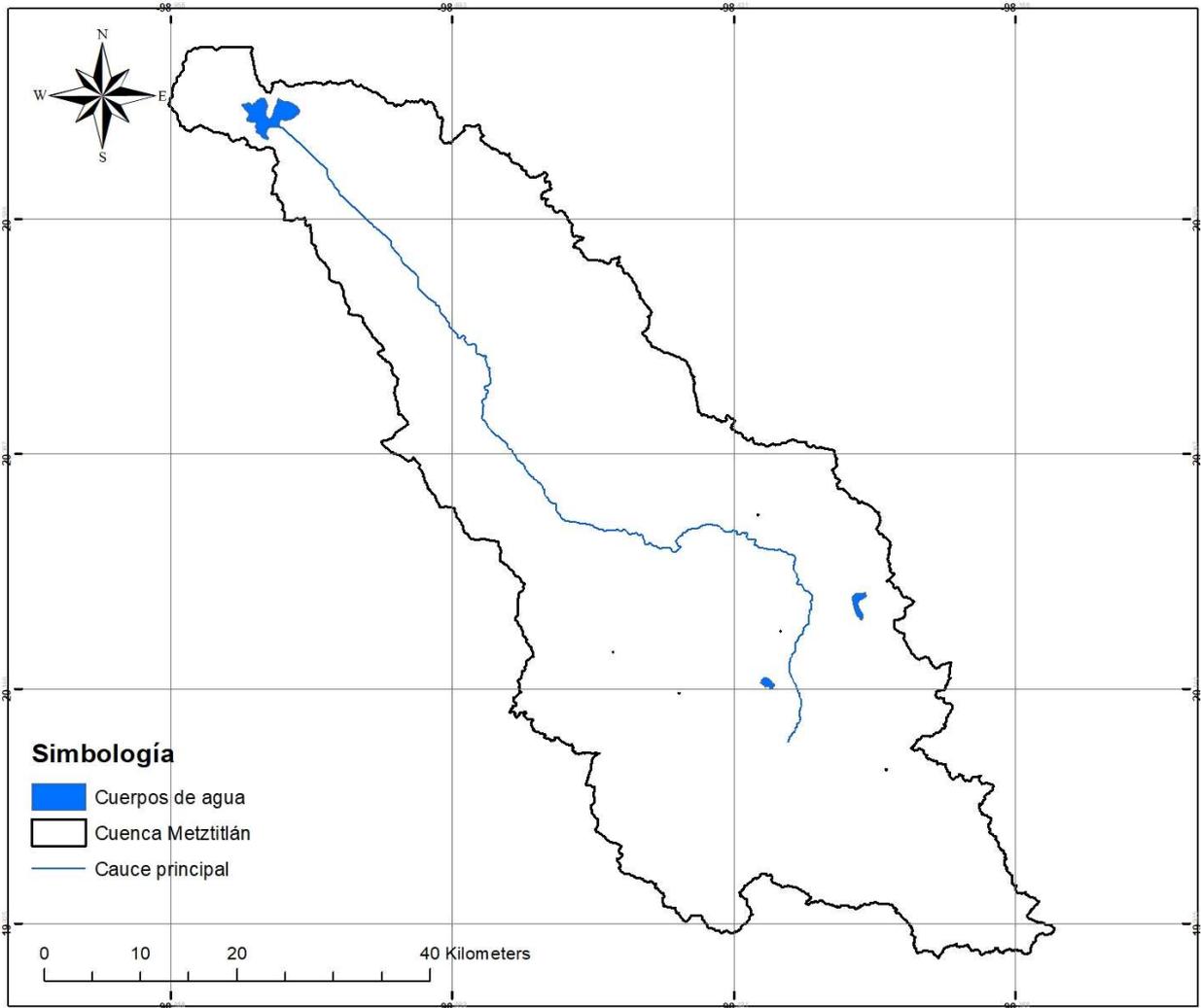
$$D_d = \frac{L_{red}}{A_c} = \frac{1,727.9178 \text{ km}}{2,937.014 \text{ km}^2} = 0.588/km$$

La densidad de drenaje es de:  $0.5883/km$ .

d) Longitud del cauce principal.

La longitud del cauce principal es de:

$$L_c = 109.544 \text{ km}$$



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI. Escala 1:50,000.

Figura 9.3. Cauce principal de la cuenca del río Metztitlán.

e) Pendiente del cauce principal.

La pendiente del cauce influye sobre la velocidad del flujo y juega un papel muy importante en la forma de los hidrogramas. En general, la pendiente de un tramo de cauce es el desnivel entre los extremos del tramo, dividido entre la longitud horizontal de dicho tramo.

$$S = \frac{H}{L} \quad (9.4)$$

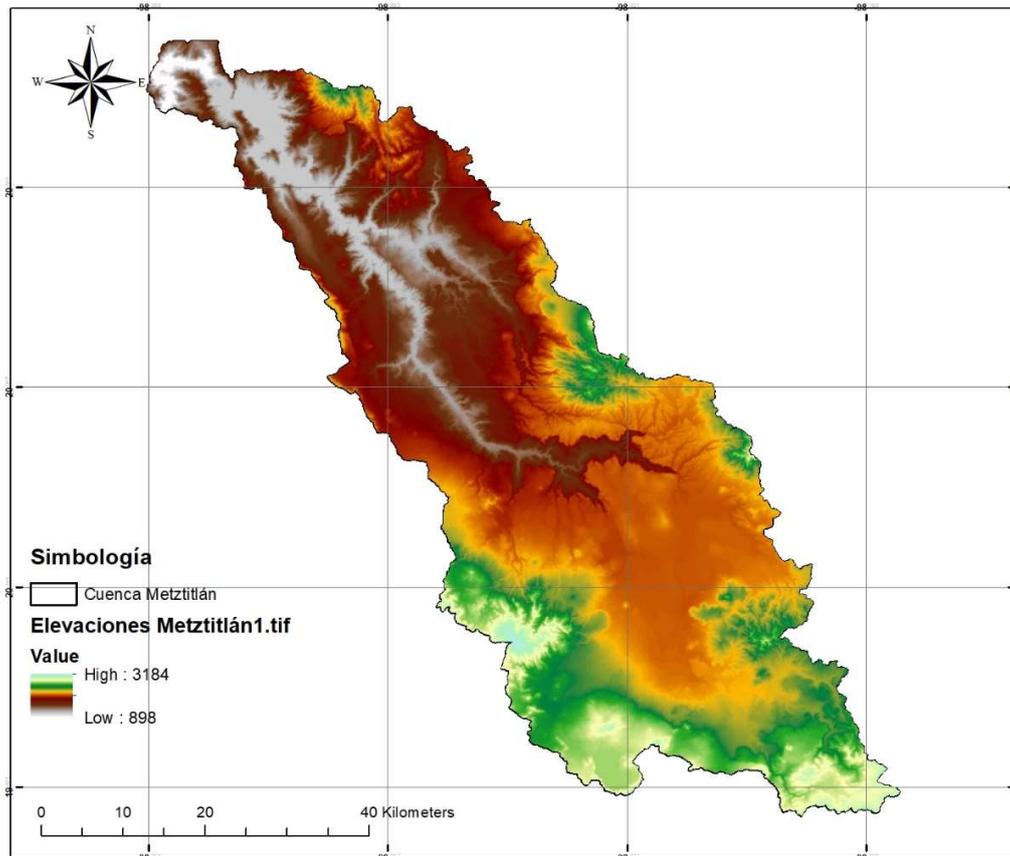
Donde:

$S$ : Pendiente del cauce.

$H$ : Desnivel del cauce

$L$ : Longitud del cauce.

Las elevaciones en la cuenca son las siguientes:



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI. Escala 1:50,000.

Figura 9.4. Elevaciones de la cuenca del río Metztlán.

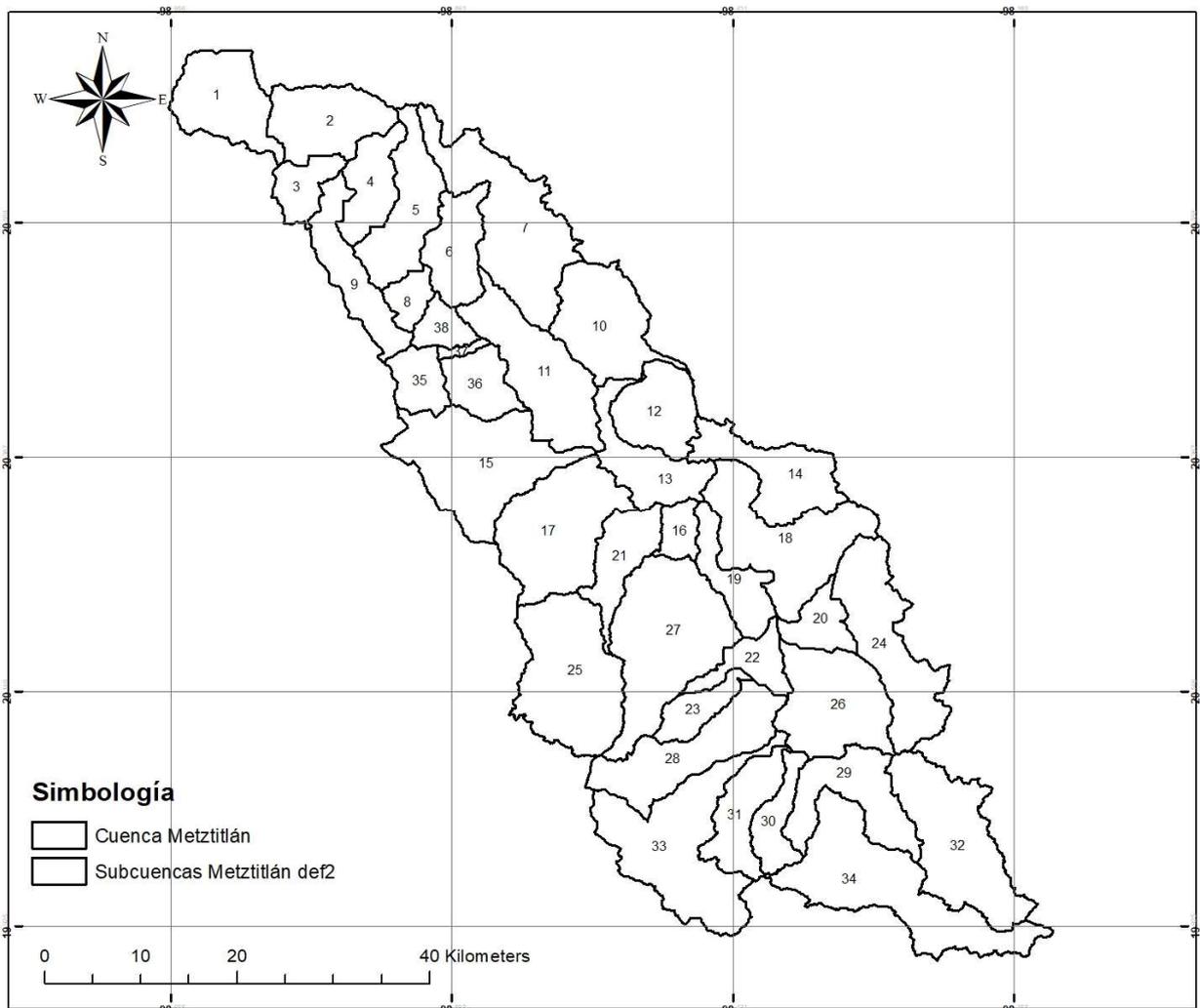
La elevación donde comienza el cauce principal es de 2,241 m.s.n.m. y a donde desemboca es de 898 m.s.n.m., sustituyendo los valores en la ecuación obtenemos que la pendiente media del cauce es:

$$\text{Desnivel} = 2140 \text{ m} - 1300 \text{ m} = 840 \text{ m} = 0.840 \text{ km}$$

$$S = \frac{0.840 \text{ km}}{109.544 \text{ km}} = 0.0076$$

### 9.1.3. Delimitación de las subcuencas.

La delimitación de las subcuencas se realizó con base a la acumulación y dirección del flujo, tomando en cuenta la disponibilidad de información meteorológica e hidrométrica, coincidiendo con la ubicación de las estaciones hidrométricas, como resultado se tienen 38 subcuencas, las cuales se presentan en la figura 9.5.



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI. Escala 1:50,000.

Figura 9.5. Subcuencas de la cuenca del río Metztlán.

A continuación, se presenta el cuadro de las subcuencas con el área de cada una y la superficie que representa con respecto a la cuenca.

Cuadro 9.2. Subcuencas de la cuenca del río Metztitlán.

<b>Subcuenca</b>	<b>Nombre</b>	<b>Área en km<sup>2</sup></b>	<b>Superficie (%)</b>
1	San Pedro	78.458	2.67%
2	Hualula	75.498	2.57%
3	San Cristóbal	31.414	1.07%
4	Metztitlán	49.016	1.67%
5	Jilotla	78.225	2.66%
6	Jialipa	55.909	1.90%
7	Zacualtipán	142.994	4.87%
8	La Paila	20.845	0.71%
9	Atzolcintla	62.960	2.14%
10	Atecoxco	93.035	3.17%
11	Milpillas	111.038	3.78%
12	Palo Bendito	62.669	2.13%
13	Las Blancas	63.157	2.15%
14	Agua Blanca	78.793	2.68%
15	Los Sabinos	141.515	4.82%
16	San Pablo	20.891	0.71%
17	Santo Tomás	127.361	4.34%
18	Estación de Apulco	127.395	4.34%
19	El Veladero	46.275	1.58%
20	El Acocul	32.272	1.10%
21	Aguacatitla	51.794	1.76%
22	Colonia 28 de Mayo	33.941	1.16%
23	Metepec	30.637	1.04%
24	Santa María	114.163	3.89%
25	San Antonio	138.648	4.72%
26	Napateco	105.293	3.59%
27	Río Seco	155.995	5.31%
28	Jaltepec	99.743	3.40%
29	Cuautepec	78.976	2.69%
30	Tulancingo	35.025	1.19%
31	Javier Rojo Gómez	56.274	1.92%
32	Santa Elena	129.210	4.40%
33	Ahuehuetitla	149.052	5.07%
34	Almoleya	157.576	5.37%
35	Santa Mónica	32.394	1.10%
36	El Veladero	41.353	1.41%
37	Venados	4.972	0.17%
38	El Carrizal	22.260	0.76%
	<b>Total</b>	<b>2937.029</b>	<b>100.00%</b>

La subcuenca con mayor área es la número 34 Almoloya, debido a que representa el 5.37% del total de la superficie y la subcuenca con menor área es número 37 Venados representando solo el 0.17% del total de la superficie. El área total de la cuenca es de 2,937.029 km<sup>2</sup>.

#### 9.1.4. Tiempo de concentración.

Para el cálculo del tiempo de retraso primero se calculó el tiempo de concentración, el cuál fue obtenido como el promedio de las ecuaciones de Passini y Temez (Vélez-Upegui & Botero-Gutiérrez, 2011).

a) Ecuación de Passini.

$$T_c = \frac{[0.108(A L_c)^{1/3}]}{S^{0.5}} \quad (9.5)$$

En donde:  $T_c$  = tiempo de concentración (hr),  $L_c$  = longitud del cauce (km),  $S$  = pendiente media del cauce (%),  $A$  = área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

La pendiente media del cauce se calculó con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{\Delta z}{L_c} \quad (9.6)$$

b) Ecuación de Temez.

$$T_c = 0.3 \left[ \frac{L_c}{S_c^{0.25}} \right]^{0.76} \quad (9.7)$$

En donde:  $T_c$  = tiempo de concentración (hr),  $L_c$  = longitud del cauce (km),  $S_c$  = pendiente promedio del cauce (%).

La pendiente promedio del cauce se calculó con la siguiente fórmula:

$$S_c = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2 \quad (9.8)$$

En la cual  $n$  es el número de tramos iguales en los cuales se divide el cauce principal y  $S_i$  son las pendientes de cada tramo con  $i=1, 2, 3, \dots, n$  y estimadas como  $h_i/l_i$ .

Cuadro 9.3. Tiempo de concentración de la cuenca.

Área (km <sup>2</sup> )	Longitud del cauce (km)	S	Sc	TcPassini (Min)	TcTemez (Min)	Tc (min) promedio
2937.029	109.544	0.0077	0.0039	1515.79	1827.39	1671.58

#### 9.1.5. Tiempo de retraso.

Para el cálculo del tiempo de retraso ( $T_r$ ), se aplicó la expresión siguiente de acuerdo con Aparicio (1992):

$$T_r = 0.6 T_c \quad (9.9)$$

Cuadro 9.4. Tiempo de retraso de la cuenca.

Área (km <sup>2</sup> )	Longitud del cauce (km)	TrPassini (Min)	TrTemez (Min)	Tc (min) promedio
2937.029	109.544	909.47	1096.43	1002.95

#### 9.1.6. Meteorología.

Para el caso de estudio, se consideraron 19 estaciones meteorológicas convencionales, la variable obtenida para el análisis es la precipitación, a continuación, se presentan la clave de la estación, nombre y periodo de registro.

Cuadro 9.5. Años de registro de las estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del río Metztlán.

No.	Clave de estación	Nombre de la estación meteorológica	Registro
1	13015	San Agustín Metzquititlán	1943-1949/1951-1965/1967-1969/1970/1972-1976/2007-2019
2	13029	San Lorenzo Sayula	1968-1974/1976-1988/1990-1991/1997-2000/1997-

No.	Clave de estación	Nombre de la estación meteorológica	Registro
			2000/2005/2007-2009/2011-2014/2016-2017
3	13031	Santiago Tulantepec	1967-1988/1990-1993/1997-2000/2005-2014
4	13033	Singuilucan	1961-1963/1965-1966/1968-1990/1996-2000/2005-2008/2011/2013-2016
5	13041	Tulancingo (obs)	1946-1947/1951-1952/1955-1956/1958-1960/1965/1981-1988/1990-2006/2008-2018
6	13042	Zacualtipán (smn)	1942-1953/1955-1986/1988/1990-1993/1995-2013/2015-2018
7	13061	Alcholoaya	1963/1967-1971/1973-1982/1984-1990/1992-1995/1997-2014
8	13077	Metztitlán	1952-1953/1957-1965/1967-1981/1984/1986-1993/1995-2001/2003-2004/2006-2007/2016-2018
9	13082	Presa La Esperanza	1957-2018
10	13087	San Cristóbal	1954/1956-1981/1984-1985/1988-1990/1993-1998/2002-2008/2010-2018
11	13093	Venados	1952/1954-1959/1961-1962/1964-2007/2010/2013-2014/2017-2018
12	13095	Agua Blanca	1974-1975/1977-1980/1982-1985/1988/1991/1994-1995/1997-1999/2001-2002/2004-2018
13	13096	Atotonilco	1975-2015/2017-2018
14	13098	Huasca	1975-1983/1985-2017
15	13099	Metepéc	1975-2013/2015-2016
16	13116	El Zembo	1981-2007/2009-2015
17	13121	Santa María Amajac	1981-2010/2014-2017
18	13130	Santa María Asunción	1980-1988/1991-1997/2006-2008/2012/2014/2016-2017
19	30359	Palo Bendito	1983-2004/2008-2015

### A. Definición del área de influencia por estación meteorológica.

La definición del área de influencia de cada estación se realizó a través de polígonos de Thiessen.

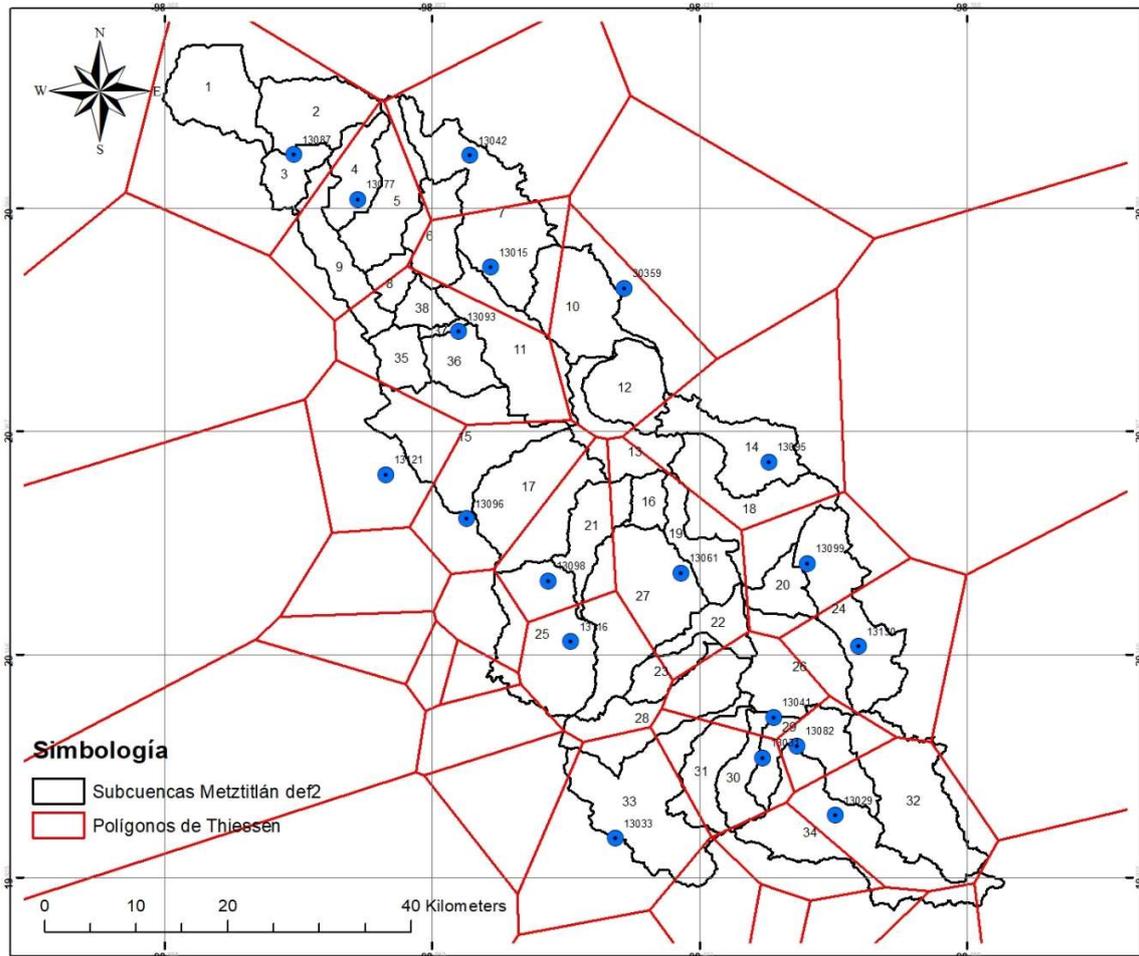


Figura 9.6. Polígonos de Thiessen en la cuenca del río Metztitlán.

A continuación, el área de influencia que tiene cada estación meteorológica dentro de las subcuencas.

Cuadro 9.6. Estación meteorológica asignada a cada subcuenca.

Subcuenca	Nombre subcuenca	Número de estación meteorológica	Área de influencia (fracción respecto a la superficie total)
1	San Pedro	13087	1.000
2	Hualula	13087	0.979
		13077	0.021
3	San Cristóbal	13087	0.999
4	Metztitlán	13087	0.110
		13077	0.890
5	Jilotla	13087	0.000
		13042	0.155
		13077	0.845
6	Jialipa	13042	0.301
		13093	0.042
		13077	0.163
		13015	0.494
7	Zacualtipán	13042	0.482
		13015	0.518
8	La Paila	13093	0.522
		13077	0.467
		13015	0.011
9	Atzolcintla	13087	0.108
		13093	0.203
		13077	0.689
10	Atecoxco	13093	0.001
		30359	0.768
		13015	0.231
11	Milpillás	13096	0.012
		13093	0.751
		30359	0.066
		13015	0.171
12	Palo Bendito	13095	0.083
		30359	0.917
13	Las Blancas	13096	0.059
		13095	0.236
		13098	0.087
		13061	0.271
		30359	0.346
14	Agua Blanca	13095	0.994

Subcuenca	Nombre subcuenca	Número de estación meteorológica	Área de influencia (fracción respecto a la superficie total)
		30359	0.006
15	Los Sabinos	13096	0.403
		13121	0.365
		13093	0.232
		13095	0.000
16	San Pablo	13061	1.000
		13096	0.615
17	Santo Tomás	13098	0.385
		13061	0.000
		13099	0.281
18	Estación de Apulco	13095	0.537
		13061	0.182
		13095	0.007
19	El Veladero	13061	0.993
		13130	0.004
20	El Acocul	13099	0.967
		13061	0.029
		13116	0.018
21	Aguacatitla	13098	0.776
		13061	0.207
		13041	0.146
22	Colonia 28 de Mayo	13116	0.006
		13061	0.848
		13041	0.030
23	Metepec	13116	0.553
		13061	0.417
		13130	0.529
24	Santa María	13082	0.001
		13099	0.470
		13116	0.598
25	San Antonio	13098	0.402
		13130	0.351
26	Napateco	13082	0.029
		13041	0.495
		13099	0.118
		13061	0.007
		13116	0.359
27	Río Seco	13098	0.095

<b>Subcuenca</b>	<b>Nombre subcuenca</b>	<b>Número de estación meteorológica</b>	<b>Área de influencia (fracción respecto a la superficie total)</b>
		13061	0.546
28	Jaltepec	13033	0.220
		13041	0.412
		13031	0.070
		13116	0.278
		13061	0.021
		13029	0.254
29	Cuautepec	13082	0.444
		13041	0.081
		13031	0.221
		13041	0.138
30	Tulancingo	13031	0.862
		13033	0.135
31	Javier Rojo Gómez	13041	0.103
		13031	0.762
		13029	0.854
32	Santa Elena	13130	0.041
		13082	0.105
		13033	0.856
33	Ahuehuetitla	13041	0.034
		13031	0.110
		13029	0.873
34	Almoloya	13082	0.083
		13031	0.044
		13121	0.005
35	Santa Mónica	13093	0.995
36	El Veladero	13093	1.000
37	Venados	13093	1.000
38	El Carrizal	13093	1.000

## **B. Precipitación.**

La precipitación media mensual y anual para cada estación, fue calculada utilizando todo el periodo de registro y se presenta a continuación.

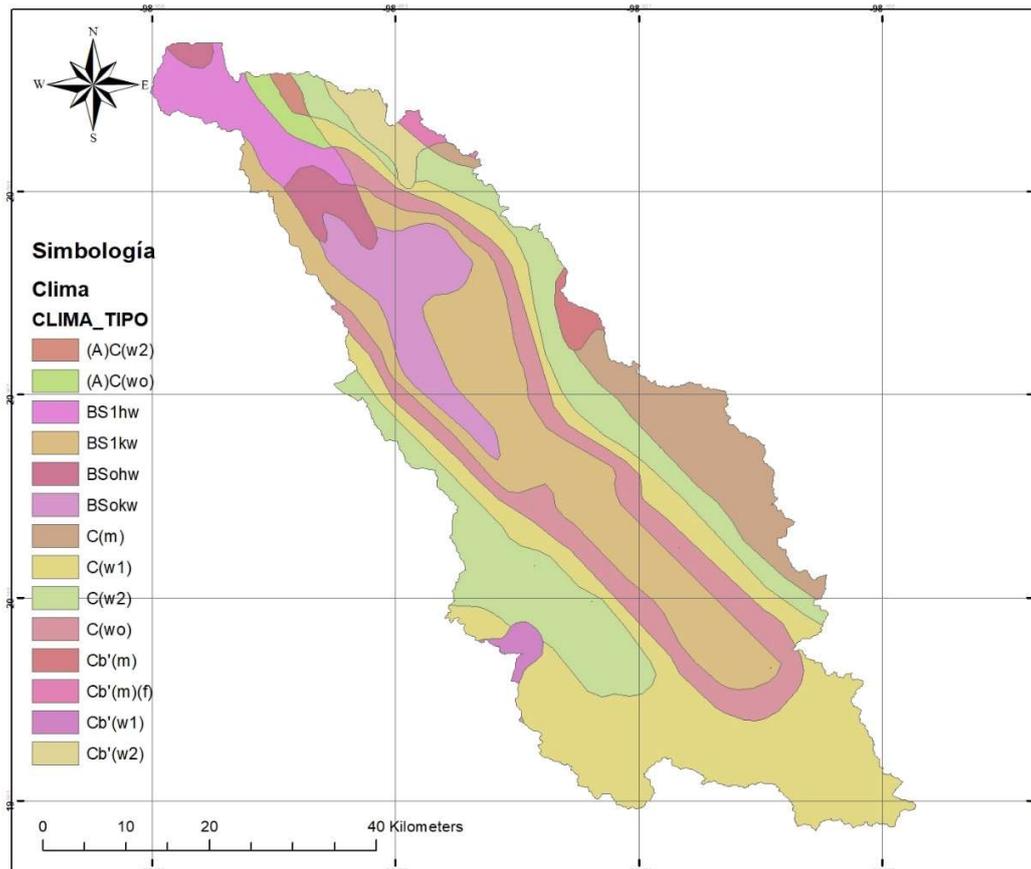
Cuadro 9.7. Precipitación media mensual y anual para cada estación meteorológica convencional en la cuenca del río Metztitlán.

<b>No.</b>	<b>Clave de estación</b>	<b>Nombre de la estación</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>	<b>Anual</b>
1	13015	San Agustín Metziquititlán	10.4	5.9	9.8	19.9	33.0	64.3	59.2	49.4	113.6	49.6	14.8	6.2	436.1
2	13029	San Lorenzo Sayula	13.3	14.6	17.2	37.2	48.6	107.0	91.9	84.6	116.4	69.5	17.7	8.9	626.9
3	13031	Santiago Tulantepec	13.6	13.2	15.3	37.8	56.8	86.3	93.6	81.2	107.3	62.8	12.8	7.3	588.0
4	13033	Singuilucan	11.4	15.2	19.6	41.8	54.9	92.3	94.9	80.4	96.3	56.9	16.6	7.4	587.7
5	13041	Tulancingo (obs)	2.6	4.5	4.5	7.9	11.1	12.5	21.4	18.3	29.3	14.8	3.7	1.9	132.5
6	13042	Zacualtipán (smn)	39.0	31.5	33.9	49.1	64.6	199.5	210.9	200.8	374.5	206.1	87.6	36.8	1534.3
7	13061	Alcholoaya	11.5	10.9	14.2	33.1	44.0	83.8	74.4	78.7	97.2	55.6	13.8	4.6	521.8
8	13077	Metztitlán	8.2	4.1	7.7	20.7	31.5	70.7	53.5	58.1	103.9	43.5	13.4	3.8	419.1
9	13082	Presa La Esperanza	11.7	10.8	15.6	36.9	50.5	83.3	82.1	75.5	99.8	62.1	15.4	7.2	550.9
10	13087	San Cristóbal	9.0	4.7	6.8	17.4	28.1	66.5	58.0	59.6	96.6	44.1	10.7	4.6	406.1
11	13093	Venados	9.7	6.9	7.2	22.0	35.9	65.7	62.2	55.8	108.7	47.2	11.8	25.3	458.4
12	13095	Agua Blanca	16.5	11.9	13.0	22.0	30.2	75.1	100.3	112.1	146.3	49.5	19.2	13.3	609.4
13	13096	Atotonilco	10.3	14.2	14.8	36.6	56.5	118.0	125.6	135.5	171.1	80.8	17.4	6.5	787.3
14	13098	Huasca	12.7	13.1	12.3	40.0	70.6	130.0	126.9	119.4	163.1	85.7	18.6	7.2	799.6
15	13099	Meteppec	13.0	12.9	15.5	27.0	41.5	85.2	99.2	104.6	137.8	67.3	20.3	8.2	632.5
16	13116	El Zembo	15.6	17.7	14.4	36.3	75.2	123.6	130.8	139.2	179.1	95.6	20.8	7.9	856.2
17	13121	Santa María Amajac	10.5	13.6	12.8	31.2	43.7	93.6	108.1	96.9	127.1	55.5	9.8	3.9	606.7
18	13130	Santa María Asunción	13.1	14.5	15.4	28.2	42.8	72.7	100.2	78.4	122.1	95.0	26.5	12.3	621.2
19	30359	Palo Bendito	7.0	7.9	3.9	12.0	25.4	74.0	78.2	97.4	179.8	101.6	31.8	13.3	632.3

La precipitación media anual en la cuenca es de 621.42 mm.

### C. Clima.

La cuenca tiene un clima templado subhúmedo ( $C_b(w_2)(w)$ ) en la parte sur y un clima semiseco templado ( $BS_1kw(w)$ ) en el centro y norte.



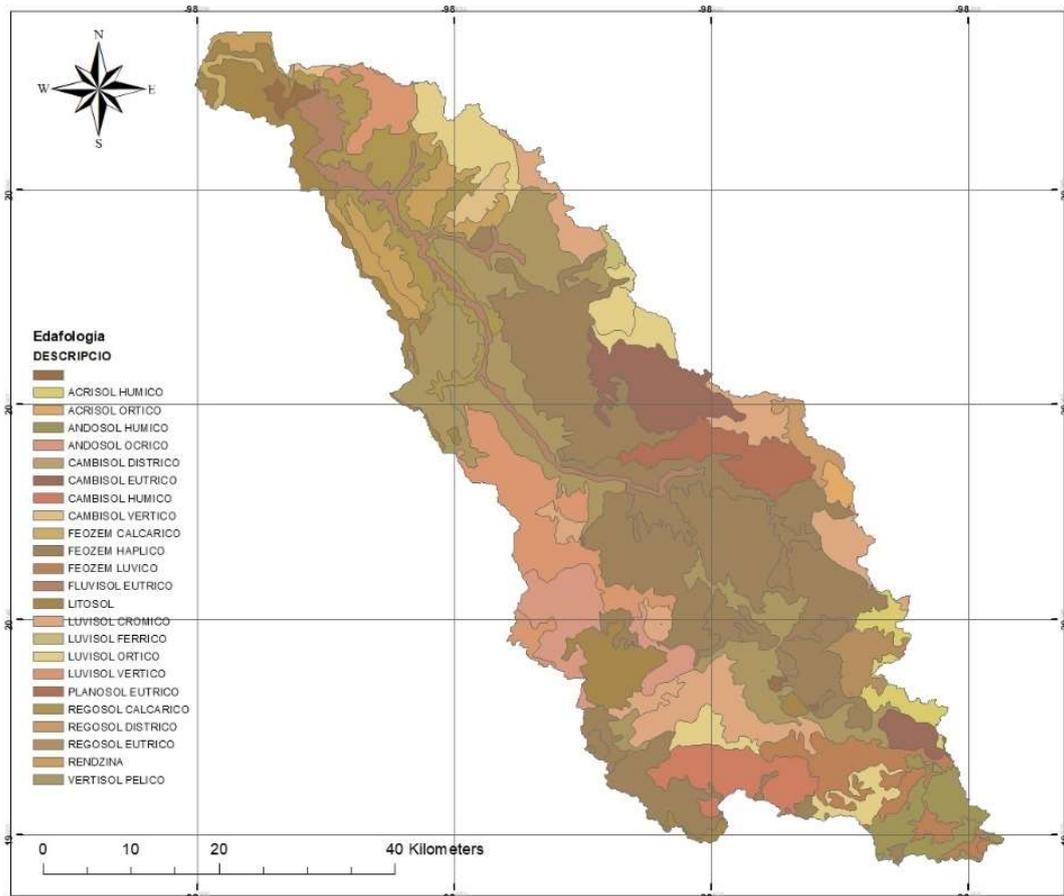
Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de CONABIO. Escala 1:250,000.

Figura 9.7. Clima en la cuenca del río Metztitlán.

El tipo de clima con mayor superficie es el C (w1), es decir, templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C con 787.13 km<sup>2</sup>.

### **D. Edafología.**

Los principales tipos de suelo en la cuenca son litosoles, rendzinas, regosoles, fluvisoles, feozems y vertisoles, en las márgenes del río Metztitlán destaca el fluvisol calcárico (Mendoza Cariño et al., 2018).



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de CONABIO. Escala 1:250,000.

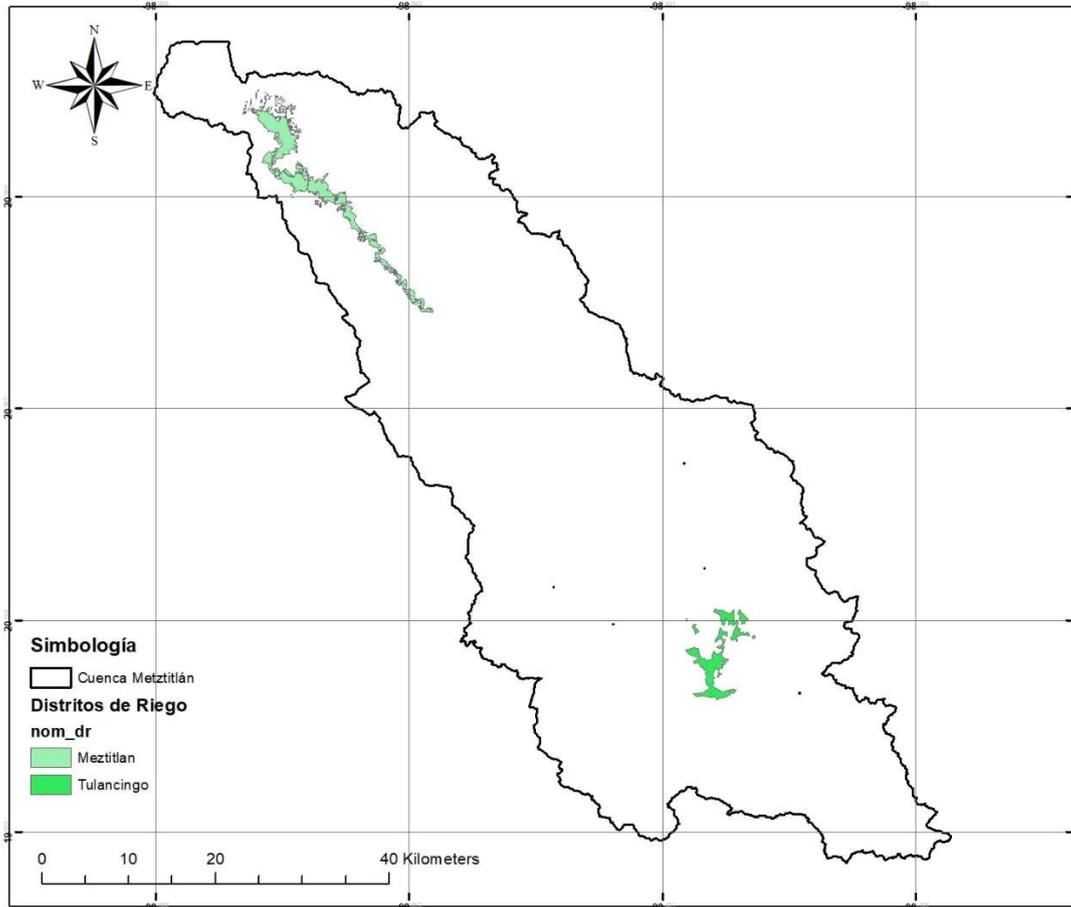
Figura 9.8. Edafología en la cuenca del río Metztitlán.

El tipo de suelo predominante es el feozem háplico con 773.20 km<sup>2</sup> que corresponde al 26% de la superficie total de la cuenca.

### **E. Uso de suelo y vegetación.**

La cuenca se considera el corazón agrícola del estado de Hidalgo, con dos Distritos de Riego, el D.R. 008 Metztitlán y el D.R. 028 Tulancingo (Reynoso Santos et al., 2015), el principal uso del suelo en la cuenca del río Metztitlán es la

agricultura de temporal anual con 983.09 km<sup>2</sup> que corresponde al 34% de la superficie total de la cuenca.



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de CONABIO. Escala 1:250,000.

Figura 9.9. Distritos de Riego en la cuenca del río Metztitlán.

La vegetación se determina por el efecto barlovento-sotavento. En los bordes de la cuenca (barlovento), las montañas captan la mayor parte de la lluvia (al noreste, Zacualtipán y Agua Blanca; al sureste, Acaxochitlán; al sur, Singuilucan, y al suroeste la sierra de Pachuca), lo que permite el desarrollo de bosques de clima templado (mesófilo de montaña, de Pinus y Pinus-Quercus). En la parte interna de la cuenca (sotavento), el viento presenta poca humedad por el efecto llamado “sombra geográfica”, lo que aunado a la escasez de precipitaciones favorece el crecimiento de matorral xerófilo crassicaule, espinoso y rosetófilo (Mendoza



### **9.2.1. Estaciones meteorológicas.**

Se elaboró el siguiente cuadro con las estaciones meteorológicas convencionales en el cual se muestran la identificación (clave y nombre), entidad, cuenca, organismo operador, ubicación geográfica (latitud, longitud y altitud) y situación operativa.

Cuadro 9.8. Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Metztitlán.

No.	Clave de estación	Nombre de la estación	Estado	Cuenca	Organismo	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m.s.n.m)	Situación
1	13015	San Agustín Metzquititlán	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.533	-98.635	1,421	Operando
2	13029	San Lorenzo Sayula	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	19.872	-98.297	2768	Operando
3	13031	Santiago Tulantepec	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.044	-98.3683	2179	Operando
4	13033	Singuilucan	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	19.964	-98.513	2650	Operando
5	13041	Tulancingo (obs)	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.084	-98.357	2213.5	Operando
6	13042	Zacualtipán (smn)	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.646	-98.655	1988	Operando
7	13061	Alcholoaya	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.227	-98.448	2112	Operando
8	13077	Metztitlán	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.591	-98.757	1374	Operando
9	13082	Presa La Esperanza	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.064	-98.345	2210	Operando
10	13087	San Cristóbal	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.641	-98.828	1300	Operando
11	13093	Venados	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.471	-98.668	1383	Operando
12	13095	Agua Blanca	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.346	-98.358	2200	Operando
13	13096	Atotonilco	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.281	-98.66	2112	Operando
14	13098	Huasca	Hidalgo	Río	CONAGUA-	20.21	-98.577	2100	Operando

No.	Clave de estación	Nombre de la estación	Estado	Cuenca	Organismo	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m.s.n.m)	Situación
				Moctezuma	SMN				
15	13099	Metepec	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.237	-98.32	2156	Operando
16	13116	El Zembo	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.159	-98.557	2310	Operando
17	13121	Santa María Amajac	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.324	-98.738	1692	Operando
18	13130	Santa María Asunción	Hidalgo	Río Moctezuma	CONAGUA-SMN	20.154	-98.273	2190	Operando
19	30359	Palo Bendito	Veracruz	Río Tuxpan	CONAGUA-SMN	20.509	-98.503	2266	Operando

### 9.2.2. Estaciones hidrométricas.

Se identificaron las estaciones hidrométricas con la que se realizó el estudio, el siguiente cuadro muestra la información de cada estación: identificación (clave y nombre), entidad, cuenca, organismo operador, y ubicación geográfica (altitud, longitud y altitud).

Cuadro 9.9. Estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Metztitlán.

No.	Clave	Nombre	Estado	Cuenca	Organismo	Latitud (°)	Longitud (°)	Altitud (m.s.n.m)	Área de medición (km <sup>2</sup> )
1	26042	Venados	Hidalgo	Río Metztitlán	CONAGUA-SMN	20°28'00"	98°40'45"	1353	1952.18
2	26047	Jihuico	Hidalgo	Río Metztitlán	CONAGUA-SMN	20°32'45"	98°42'45"	1294	528.80

En la cuenca, se tienen dos estaciones hidrométricas que miden el escurrimiento de dos grandes áreas, sin embargo, en la estación hidrométrica Jihuico, se tienen muy pocos años de registro, derivado de esto, no se tiene un registro confiable en las mediciones del escurrimiento, es por ello que solo se considerará la estación hidrométrica 26042 Venados para la calibración del modelo hidrológico.

### 9.2.3. Análisis de la precipitación y los escurrimientos históricos.

Se recopiló y revisó la información histórica de la precipitación diaria registrada en las estaciones meteorológicas y los gastos diarios medios e instantáneos registrados en las estaciones hidrométricas definidas para realizar el estudio temporal de la precipitación y los escurrimientos históricos correspondientes.

#### **A. Análisis de la precipitación.**

Para realizar análisis de la precipitación en las subcuencas se utilizaron los acervos meteorológicos de las estaciones meteorológicas definidas en el apartado anterior.

Para cada una de las 19 estaciones relacionadas, se procesó la información diaria de los periodos de registro, debido a la gran cantidad de información procesada, 365 datos por año por el número total de años de registro de las 19 estaciones, la

información se presenta en forma gráfica como pluviogramas, para la precipitación diaria de cada una de las 19 estaciones.

Este proceso se ejemplifica con la información de la estación meteorológica 13042 Zacualtipán, debido a que es la estación con la mayor cantidad de años de registro, 72 años.

a) Precipitación máxima diaria de todo el periodo de registro, estación 13042 Zacualtipán.

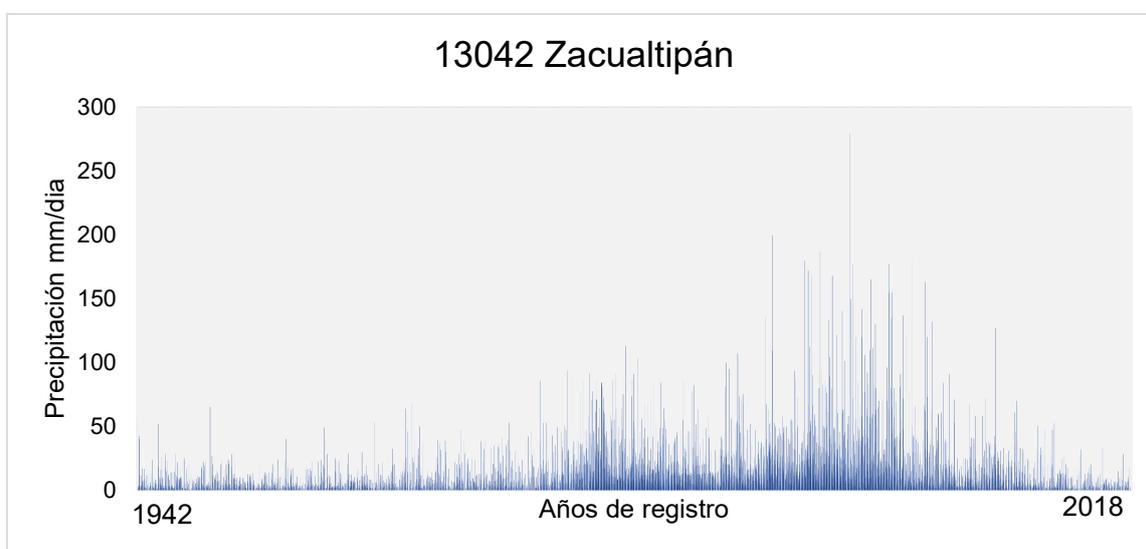
Los datos de precipitación diarios por año de registro se ordenaron en el siguiente cuadro, de manera consecutiva, lo que permitió ver el comportamiento de la precipitación.

Cuadro 9.10. Precipitación diaria, estación meteorológica 13042 Zacualtipán.

No.	Año	Mes	Día	Precipitación (mm/día)
1	1942	Enero	1	0
2	1942	Enero	2	0
3	1942	Enero	3	0
4	1942	Enero	4	0
5	1942	Enero	5	1.5
6	1942	Enero	6	0
7	1942	Enero	7	2
8	1942	Enero	8	0
9	1942	Enero	9	5
10	1942	Enero	10	0
...	...	....	....	....
26166	2018	Diciembre	21	0
26167	2018	Diciembre	22	0
26168	2018	Diciembre	23	0
26169	2018	Diciembre	24	0
26170	2018	Diciembre	25	0
26171	2018	Diciembre	26	0
26172	2018	Diciembre	27	0
26173	2018	Diciembre	28	0
26174	2018	Diciembre	29	0
26175	2018	Diciembre	30	0
26176	2018	Diciembre	31	0
Estadísticos				

Número total de datos	26176
Media	4.10
Mediana	0.00
Desviación estándar	11.85
Máximo	280.00
Mínimo	0.00

Con la precipitación diaria se elaboró un pluviograma de todos los años de registro.



Fuente: Elaboración propia con información del SMN-CONAGUA.

Figura 9.11. Precipitación diaria estación meteorológica 13042 Zacualtipán.

Como se observa en la gráfica, que aun cuando la precipitación media diaria es de 4.10 mm/día, se presentó un máximo de 280 mm/día el 20 de septiembre de 1974, el dato indica la intensidad de precipitación máxima registrada en 24 horas, pero no indica cómo se distribuyó en esas 24 horas.

b) Precipitación máxima diaria anual de todo el periodo de registro, estación 13042 Zacualtipán.

Para la misma estación se calculó la precipitación máxima diaria anual.

Cuadro 9.11. Precipitación máxima anual.

<b>Año</b>	<b>Precipitación máxima anual (mm/día)</b>	<b>Año</b>	<b>Precipitación máxima anual (mm/día)</b>
1942	96.0	1973	80.9
1943	62.0	1974	280.0
1944	84.0	1975	187.0
1945	32.0	1976	63.8
1946	62.0	1977	54.6
1947	62.0	1978	93.5
1948	78.0	1979	81.3
1949	137.0	1980	63.8
1950	82.0	1981	140.2
1951	96.0	1982	84.3
1952	160.0	1983	54.6
1953	84.5	1984	133.7
1955	220.0	1985	101.2
1956	114.0	1986	42.5
1957	56.0	1988	180.0
1958	180.0	1990	50.5
1959	94.0	1991	80.0
1960	47.0	1992	84.0
1961	87.0	1993	149.7
1962	86.0	1995	132.1
1963	78.0	1996	52.8
1964	47.0	1997	56.0
1965	65.0	1998	66.0
1966	91.0	1999	177.0
1967	84.0	2000	73.5
1968	47.0	2001	120.0
1969	168.0	2002	104.0
1970	71.3	2003	111.5
1971	72.0	2004	49.0
1972	77.3	2005	155.0

<b>Año</b>	<b>Precipitación máxima anual (mm/día)</b>
2006	142.0
2007	200.0
2008	120.0
2009	163.0
2010	172.0
2011	113.0
2012	75.0

<b>Año</b>	<b>Precipitación máxima anual (mm/día)</b>
2013	168.0
2015	73.0
2016	165.0
2017	107.0
2018	65.0

A cada precipitación máxima anual en 24 horas observada se le calculó el periodo de retorno (Tr).

Cuadro 9.12. Cálculo del periodo de retorno para precipitación.

<b>Año</b>	<b>Precipitación máxima (mm)</b>	<b>m</b>	<b>Tr</b>
1974	280.0	1	73.000
1955	220.0	2	36.500
2007	200.0	3	24.333
1975	187.0	4	18.250
1958	180.0	5	14.600
1988	180.0	6	12.167
1999	177.0	7	10.429
2010	172.0	8	9.125
1969	168.0	9	8.111
2013	168.0	10	7.300
2016	165.0	11	6.636
2009	163.0	12	6.083
1952	160.0	13	5.615
2005	155.0	14	5.214
1993	149.7	15	4.867
2006	142.0	16	4.563
1981	140.2	17	4.294
1949	137.0	18	4.056
1984	133.7	19	3.842
1995	132.1	20	3.650
2001	120.0	21	3.476

<b>Año</b>	<b>Precipitación máxima (mm)</b>	<b>m</b>	<b>Tr</b>
2008	120.0	22	3.318
1956	114.0	23	3.174
2011	113.0	24	3.042
2003	111.5	25	2.920
2017	107.0	26	2.808
2002	104.0	27	2.704
1985	101.2	28	2.607
1942	96.0	29	2.517
1951	96.0	30	2.433
1959	94.0	31	2.355
1978	93.5	32	2.281
1966	91.0	33	2.212
1961	87.0	34	2.147
1962	86.0	35	2.086
1953	84.5	36	2.028
1982	84.3	37	1.973
1944	84.0	38	1.921
1967	84.0	39	1.872
1992	84.0	40	1.825
1950	82.0	41	1.780
1979	81.3	42	1.738
1973	80.9	43	1.698
1991	80.0	44	1.659
1948	78.0	45	1.622
1963	78.0	46	1.587
1972	77.3	47	1.553
2012	75.0	48	1.521
2000	73.5	49	1.490
2015	73.0	50	1.460
1971	72.0	51	1.431
1970	71.3	52	1.404
1998	66.0	53	1.377
1965	65.0	54	1.352
2018	65.0	55	1.327
1976	63.8	56	1.304
1980	63.8	57	1.281
1943	62.0	58	1.259
1946	62.0	59	1.237

<b>Año</b>	<b>Precipitación máxima (mm)</b>	<b>m</b>	<b>Tr</b>
1947	62.0	60	1.217
1957	56.0	61	1.197
1997	56.0	62	1.177
1977	54.6	63	1.159
1983	54.6	64	1.141
1996	52.8	65	1.123
1990	50.5	66	1.106
2004	49.0	67	1.090
1960	47.0	68	1.074
1964	47.0	69	1.058
1968	47.0	70	1.043
1986	42.5	71	1.028
1945	32.0	72	1.014

Con la precipitación máxima se realizó el cálculo de la precipitación a diferentes periodos de retorno, usando las siguientes Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP).

Cuadro 9.13. FDP para precipitación máxima anual.

<b>Tr</b>	<b>Precipitación máxima</b>	<b>FDP para precipitación máxima anual</b>					
		<b>Normal</b>	<b>LogNormal</b>	<b>LogPerson III</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Gumbel Doble</b>
73.000	280.0	211.5	251.7	284.1	230.0	231.3	234.7
36.500	220.0	197.5	221.1	240.5	208.1	206.7	216.3
24.333	200.0	188.4	203.5	216.8	194.9	192.2	205.1
18.250	187.0	181.6	191.1	200.8	185.3	181.9	196.9
14.600	180.0	176.0	181.6	188.7	177.6	173.8	190.2
12.167	180.0	171.3	173.8	179.0	171.3	167.1	184.5
10.429	177.0	167.1	167.2	171.0	165.8	161.5	179.4
9.125	172.0	163.3	161.4	164.2	161.0	156.5	174.7
8.111	168.0	159.8	156.4	158.2	156.6	152.1	170.3
7.300	168.0	156.6	151.8	152.9	152.7	148.1	166.0
6.636	165.0	153.6	147.7	148.2	149.1	144.5	161.9
6.083	163.0	150.8	143.9	143.9	145.7	141.2	157.7
5.615	160.0	148.1	140.5	140.0	142.6	138.1	153.4
5.214	155.0	145.6	137.2	136.4	139.7	135.2	148.9
4.867	149.7	143.2	134.2	133.0	136.9	132.5	144.0

Tr	Precipitación máxima	FDP para precipitación máxima anual					
		Normal	LogNormal	LogPerson III	Gamma	Gumbel	Gumbel Doble
4.563	142.0	140.8	131.3	129.9	134.3	129.9	138.7
4.294	140.2	138.6	128.6	127.0	131.7	127.5	133.1
4.056	137.0	136.4	126.1	124.2	129.4	125.2	127.5
3.842	133.7	134.3	123.7	121.6	127.1	123.0	122.6
3.650	132.1	132.2	121.3	119.1	124.8	120.9	118.3
3.476	120.0	130.2	119.1	116.8	122.7	118.8	114.6
3.318	120.0	128.3	117.0	114.6	120.7	116.9	111.4
3.174	114.0	126.3	114.9	112.4	118.7	115.0	108.5
3.042	113.0	124.5	113.0	110.4	116.7	113.2	106.0
2.920	111.5	122.6	111.0	108.4	114.8	111.4	103.7
2.808	107.0	120.8	109.2	106.5	113.0	109.7	101.5
2.704	104.0	119.0	107.4	104.7	111.2	108.0	99.6
2.607	101.2	117.2	105.6	102.9	109.5	106.4	97.7
2.517	96.0	115.4	103.9	101.2	107.8	104.8	96.0
2.433	96.0	113.7	102.3	99.5	106.1	103.2	94.4
2.355	94.0	111.9	100.7	97.9	104.4	101.7	92.9
2.281	93.5	110.2	99.1	96.3	102.8	100.2	91.4
2.212	91.0	108.5	97.5	94.8	101.2	98.7	90.0
2.147	87.0	106.8	96.0	93.3	99.6	97.3	88.6
2.086	86.0	105.1	94.5	91.8	98.1	95.8	87.3
2.028	84.5	103.4	93.1	90.4	96.6	94.4	86.1
1.973	84.3	101.7	91.6	89.0	95.1	93.0	84.9
1.921	84.0	100.0	90.2	87.6	93.6	91.7	83.7
1.872	84.0	98.3	88.8	86.3	92.1	90.3	82.5
1.825	84.0	96.6	87.5	85.0	90.6	89.0	81.4
1.780	82.0	94.9	86.1	83.7	89.1	87.6	80.3
1.738	81.3	93.2	84.7	82.4	87.7	86.3	79.3
1.698	80.9	91.5	83.4	81.1	86.2	85.0	78.2
1.659	80.0	89.7	82.1	79.8	84.8	83.7	77.2
1.622	78.0	88.0	80.7	78.6	83.3	82.4	76.2
1.587	78.0	86.2	79.4	77.4	81.9	81.0	75.2
1.553	77.3	84.4	78.1	76.2	80.4	79.7	74.2
1.521	75.0	82.6	76.8	74.9	79.0	78.4	73.2
1.490	73.5	80.7	75.5	73.7	77.5	77.1	72.2
1.460	73.0	78.8	74.2	72.5	76.1	75.8	71.2
1.431	72.0	76.9	72.9	71.4	74.6	74.5	70.3
1.404	71.3	74.9	71.6	70.2	73.1	73.1	69.3
1.377	66.0	72.9	70.3	69.0	71.7	71.8	68.3

Tr	Precipitación máxima	FDP para precipitación máxima anual					
		Normal	LogNormal	LogPerson III	Gamma	Gumbel	Gumbel Doble
1.352	65.0	70.9	69.0	67.8	70.2	70.4	67.3
1.327	65.0	68.7	67.7	66.6	68.6	69.0	66.4
1.304	63.8	66.6	66.3	65.4	67.1	67.6	65.4
1.281	63.8	64.3	65.0	64.1	65.5	66.2	64.4
1.259	62.0	62.0	63.6	62.9	63.9	64.7	63.4
1.237	62.0	59.5	62.2	61.7	62.3	63.2	62.3
1.217	62.0	57.0	60.7	60.4	60.6	61.7	61.3
1.197	56.0	54.3	59.3	59.1	58.8	60.1	60.2
1.177	56.0	51.5	57.7	57.8	57.0	58.5	59.1
1.159	54.6	48.5	56.2	56.4	55.2	56.7	57.9
1.141	54.6	45.3	54.5	55.0	53.2	54.9	56.7
1.123	52.8	41.9	52.8	53.5	51.1	53.0	55.5
1.106	50.5	38.1	51.0	52.0	48.9	50.9	54.1
1.090	49.0	33.9	49.1	50.3	46.6	48.7	52.6
1.074	47.0	29.1	47.0	48.5	44.0	46.2	51.0
1.058	47.0	23.5	44.6	46.6	41.1	43.4	49.2
1.043	47.0	16.7	41.9	44.3	37.7	40.1	47.1
1.028	42.5	7.7	38.6	41.5	33.6	35.9	44.4
1.014	32.0	-6.4	33.9	37.7	27.7	29.7	40.5

Para seleccionar una FDP, se utilizaron dos criterios, uno es el análisis gráfico que consiste en ver la función que más se apegue a los datos medidos y el otro criterio es el error cuadrático mínimo, en el cual se selecciona la función que presente el menor error cuadrático.

Cuadro 9.14. Error Cuadrático Mínimo para cada FDP.

Error Cuadrático Mínimo					
Normal	LogNormal	LogPerson III	Gamma	Gumbel	Gumbel Doble
132.024	66.809	65.291	83.742	89.365	59.477

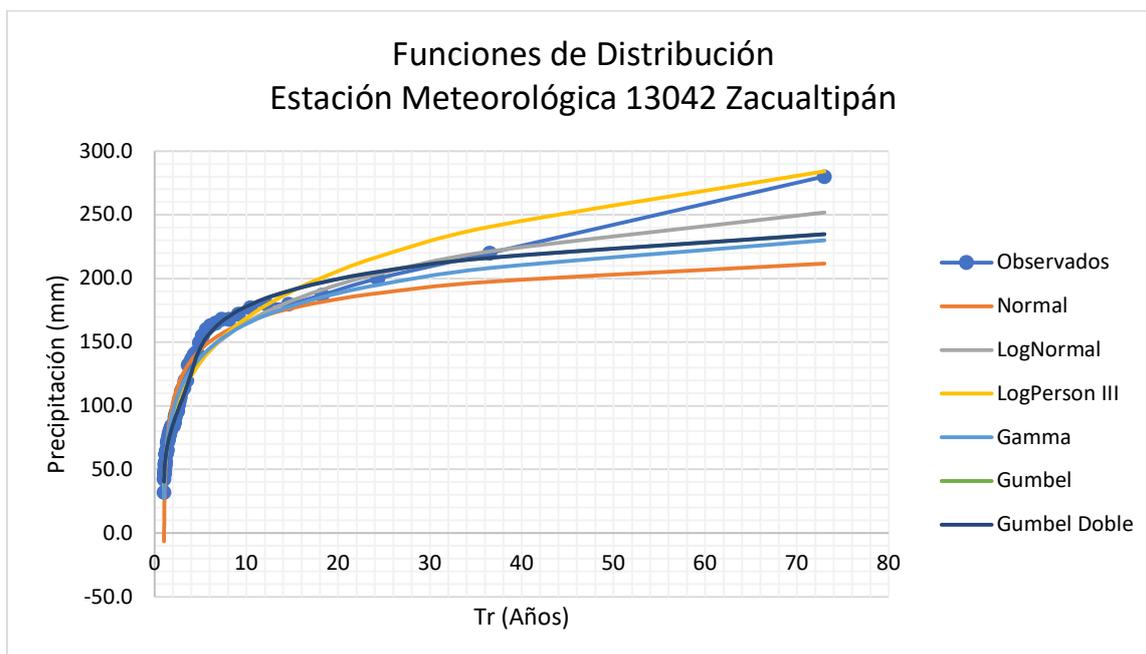


Figura 9.12. Gráfica de las FDP en la estación meteorológica 13042 Zacualtipán.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la FDP que más se ajusta a los datos observados es la función Gumbel Doble, en la gráfica se observa como la función se ajusta para los periodos de retorno pequeños.

En el siguiente cuadro se presenta la precipitación máxima obtenida extrapolada para diferentes periodos de retorno, resultado de la FDP Gumbel Doble.

Cuadro 9.15. Precipitación máxima probable para diferentes periodos de retorno.

Tr	Precipitación (mm/día)
2	85.5
5	146.0
10	177.9
20	199.5
50	224.7
75	235.4
100	242.9
200	260.7
500	284.1
1000	301.7

Se realizó el mismo procedimiento para las 19 estaciones meteorológicas consideradas para la zona de estudio, a continuación, se presenta para cada estación meteorológica la precipitación en mm/día para diferentes periodos de retorno, de acuerdo a la FDP que mejor se ajustó a los datos.

Cuadro 9.16. Precipitación máxima probable y función de distribución de probabilidad con menor error para cada Tr de las estaciones meteorológicas convencionales en la cuenca del río Metztlán.

Tr	Estación meteorológica/ Precipitación máxima diaria (mm)									
	13015	13029	13031	13033	13041	13042	13061	13077	13082	13087
2	36.3	46.1	40.0	37.5	12.8	85.5	32.3	40.9	36.0	43.0
5	70.0	69.1	65.0	63.0	34.9	146.0	57.1	59.6	54.2	68.3
10	84.4	87.3	78.0	82.3	53.2	177.9	74.8	72.7	88.1	88.9
20	94.2	107.0	86.9	95.8	66.0	199.5	86.3	85.5	118.9	111.6
50	105.7	136.2	97.2	111.4	80.9	224.7	99.7	102.8	154.3	146.0
75	110.6	150.6	101.6	118.0	87.2	235.4	105.3	110.5	169.2	163.1
100	114.0	161.3	104.7	122.6	91.6	242.9	109.3	116.1	179.6	175.9
200	122.2	189.3	112.0	133.7	102.1	260.7	118.7	129.9	204.4	209.7
500	132.8	231.4	121.6	148.1	115.8	284.1	131.1	148.7	237.0	261.1
1000	140.9	267.7	128.8	159.0	126.2	301.7	140.4	163.6	261.5	306.0

Tr	Estación meteorológica/ Precipitación máxima diaria (mm)								
	13093	13095	13096	13098	13099	13116	13121	13130	30359
2	43.4	27.7	50.0	53.7	39.6	62.0	45.5	33.3	63.6
5	74.3	66.9	80.1	82.6	76.0	80.1	69.3	59.7	108.2
10	89.5	73.2	96.1	91.9	98.8	94.4	84.8	99.8	142.9
20	100.3	77.0	106.4	97.9	112.7	109.8	95.1	123.7	179.8
50	113.1	81.6	118.4	105.0	128.8	132.8	107.1	150.9	232.8
75	118.5	83.6	123.4	108.0	135.6	144.1	112.1	162.3	258.0
100	122.2	85.1	127.0	110.1	140.3	152.5	115.7	170.4	276.6
200	131.3	88.8	135.5	115.2	151.7	174.5	124.1	189.5	323.8
500	143.1	94.6	146.6	121.9	166.5	207.9	135.2	214.5	391.9
1000	152.0	99.8	154.9	127.1	177.7	236.8	143.5	233.4	448.1

### **B. Análisis Hidrométrico.**

Para el análisis hidrométrico se utilizó la información del registro histórico de gastos instantáneos. La estación hidrométrica Venados, mide el escurrimiento de la parte aguas arriba de la cuenca, la cual se compone de 22 subcuencas.

Para la estación hidrométrica se procesó información de los gastos instantáneos máximos diarios, siguiendo el mismo procedimiento descrito en las estaciones meteorológicas.

a) Gasto instantáneo máximo diario anual para todo el periodo de registro, estación 26042 Venados.

La información de gasto instantáneo máximo diario anual fue extraída del BANDAS, los cuales se presentan a continuación.

Cuadro 9.17. Gasto instantáneo máximo diario anual.

<b>Año</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>
1931	354.500
1932	129.100
1936	622.000
1937	113.000
1938	51.980
1939	198.200
1940	9.520
1941	218.200
1942	250.000
1943	231.600
1944	1000.200
1945	149.000
1946	254.000
1947	85.900
1948	92.500
1949	126.000

<b>Año</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>
1950	75.360
1951	73.100
1952	84.520
1953	56.650
1954	1701.200
1955	3548.000
1956	300.000
1957	18.100
1958	373.000
1959	107.000
1960	28.200
1961	63.000
1962	30.500
1963	90.400
1964	12.400
1965	168.000
1966	106.500
1967	201.544
1968	115.667

<b>Año</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>
1969	270.833
1970	462.000
1971	241.500
1972	68.300
1973	159.080
1974	922.209
1975	257.070
1976	152.000
1977	96.000
1978	71.818
1980	125.560
1982	30.380
1983	38.331
1984	160.540
1985	229.250
1986	39.900
1987	21.039
1988	241.406
1989	176.103
1990	411.426
1991	96.577
1992	54.623

<b>Año</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>
1993	174.425
1994	23.092
1995	82.105
1996	65.200
1997	23.714
1998	242.614
1999	1278.536
2000	43.879
2001	89.883
2002	85.926
2003	114.280
2004	39.514
2005	285.860
2006	49.208
2007	384.230
2008	61.025
2009	139.576
2010	256.337
2011	774.684
2012	655.782
2013	428.916
2014	48.657

A cada gasto instantáneo máximo diario anual, se calculó el periodo de retorno.

Cuadro 9.18. Cálculo del periodo de retorno para gasto instantáneo máximo diario anual.

<b>Año</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>m</b>	<b>Tr</b>
1955	3548.00	1	80.000
1954	1701.20	2	40.000
1999	1278.54	3	26.667
1944	1000.20	4	20.000
1974	922.21	5	16.000
2011	774.68	6	13.333
2012	655.78	7	11.429
1936	622.00	8	10.000
1970	462.00	9	8.889
2013	428.92	10	8.000
1990	411.43	11	7.273
2007	384.23	12	6.667
1958	373.00	13	6.154
1931	354.50	14	5.714
1956	300.00	15	5.333
2005	285.86	16	5.000
1969	270.83	17	4.706
1975	257.07	18	4.444
2010	256.34	19	4.211
1946	254.00	20	4.000
1942	250.00	21	3.810
1998	242.61	22	3.636
1971	241.50	23	3.478
1988	241.41	24	3.333
1943	231.60	25	3.200
1985	229.25	26	3.077
1941	218.20	27	2.963
1967	201.54	28	2.857
1939	198.20	29	2.759
1989	176.10	30	2.667
1993	174.43	31	2.581
1965	168.00	32	2.500
1984	160.54	33	2.424
1973	159.08	34	2.353

<b>Año</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>m</b>	<b>Tr</b>
1976	152.00	35	2.286
1945	149.00	36	2.222
2009	139.58	37	2.162
1932	129.10	38	2.105
1949	126.00	39	2.051
1980	125.56	40	2.000
1968	115.67	41	1.951
2003	114.28	42	1.905
1937	113.00	43	1.860
1959	107.00	44	1.818
1966	106.50	45	1.778
1991	96.58	46	1.739
1977	96.00	47	1.702
1948	92.50	48	1.667
1963	90.40	49	1.633
2001	89.88	50	1.600
2002	85.93	51	1.569
1947	85.90	52	1.538
1952	84.52	53	1.509
1995	82.11	54	1.481
1950	75.36	55	1.455
1951	73.10	56	1.429
1978	71.82	57	1.404
1972	68.30	58	1.379
1996	65.20	59	1.356
1961	63.00	60	1.333
2008	61.03	61	1.311
1953	56.65	62	1.290
1992	54.62	63	1.270
1938	51.98	64	1.250
2006	49.21	65	1.231
2014	48.66	66	1.212
2000	43.88	67	1.194
1986	39.90	68	1.176
2004	39.51	69	1.159
1983	38.33	70	1.143
1962	30.50	71	1.127
1982	30.38	72	1.111

<b>Año</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>m</b>	<b>Tr</b>
1960	28.20	73	1.096
1997	23.71	74	1.081
1994	23.09	75	1.067
1987	21.04	76	1.053
1957	18.10	77	1.039
1964	12.40	78	1.026
1940	9.52	79	1.013

El siguiente paso fue calcular el periodo de retorno para el gasto instantáneo máximo diario anual, usando las siguientes Funciones de Distribución de Probabilidad (FDP).

Cuadro 9.19. FDP para gasto instantáneo máximo diario anual.

<b>Tr</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Función de Distribución de Probabilidad</b>					
		<b>Normal</b>	<b>LogNormal</b>	<b>LogPerson III</b>	<b>Gamma</b>	<b>Gumbel</b>	<b>Gumbel Doble</b>
80.000	3548.00	1610.097	2079.733	870.814	1317.748	1255.17	2230.766
40.000	1701.20	1174.507	1406.931	752.807	1185.228	1041.1	1764.657
26.667	1278.54	960.433	1102.543	683.322	1100.695	918.151	1481.634
20.000	1000.20	824.971	919.65	633.695	1036.824	831.963	1272.606
16.000	922.21	728.648	794.457	594.943	984.665	765.72	1103.192
13.333	774.68	655.322	701.987	563.067	940.107	711.995	957.91
11.429	655.78	596.932	630.175	535.93	900.902	666.855	828.265
10.000	622.00	548.924	572.382	512.258	865.679	627.964	709.032
8.889	462.00	508.497	524.615	491.23	833.54	593.824	597.102
8.000	428.92	473.811	484.308	472.284	803.86	563.417	493.073
7.273	411.43	443.606	449.726	455.02	776.187	536.017	406.321
6.667	384.23	416.978	419.651	439.141	750.182	511.092	346.576
6.154	373.00	393.265	393.198	424.424	725.584	488.238	307.935
5.714	354.50	371.963	369.705	410.692	702.189	467.144	281.287
5.333	300.00	352.685	348.668	397.808	679.832	447.562	261.456
5.000	285.86	335.127	329.697	385.659	658.378	429.293	245.816

Tr	Gasto instantáneo máximo diario (m <sup>3</sup> /s)	Función de Distribución de Probabilidad					
		Normal	LogNormal	LogPerson III	Gamma	Gumbel	Gumbel Doble
4.706	270.83	319.043	312.479	374.155	637.717	412.176	232.953
4.444	257.07	304.238	296.767	363.218	617.754	396.075	222.04
4.211	256.34	290.547	282.357	352.785	598.411	380.88	212.565
4.000	254.00	277.838	269.082	342.802	579.621	366.495	204.187
3.810	250.00	265.996	256.806	333.223	561.323	352.84	196.671
3.636	242.61	254.927	245.41	324.009	543.467	339.846	189.85
3.478	241.50	244.55	234.797	315.123	526.008	327.454	183.595
3.333	241.41	234.794	224.883	306.537	508.905	315.61	177.817
3.200	231.60	225.6	215.597	298.222	492.124	304.269	172.438
3.077	229.25	216.915	206.875	290.157	475.631	293.392	167.402
2.963	218.20	208.693	198.665	282.319	459.398	282.942	162.662
2.857	201.54	200.894	190.919	274.689	443.399	272.888	158.178
2.759	198.20	193.483	183.596	267.251	427.608	263.202	153.921
2.667	176.10	186.428	176.66	259.989	412.004	253.858	149.863
2.581	174.43	179.702	170.077	252.889	396.565	244.833	145.98
2.500	168.00	173.278	163.82	245.938	381.273	236.107	142.254
2.424	160.54	167.135	157.863	239.125	366.109	227.662	138.67
2.353	159.08	161.252	152.182	232.438	351.056	219.48	135.212
2.286	152.00	155.611	146.758	225.867	336.096	211.546	131.868
2.222	149.00	150.196	141.571	219.403	321.216	203.845	128.626
2.162	139.58	144.99	136.605	213.037	306.398	196.365	125.478
2.105	129.10	139.982	131.844	206.761	291.629	189.094	122.413
2.051	126.00	135.157	127.275	200.567	276.895	182.021	119.425
2.000	125.56	130.505	122.884	194.448	262.18	175.136	116.505
1.951	115.67	126.013	118.659	188.396	247.466	168.426	113.648
1.905	114.28	121.67	114.587	182.404	232.731	161.882	110.848
1.860	113.00	117.467	110.659	176.466	217.962	155.495	108.098
1.818	107.00	113.396	106.865	170.576	203.145	149.257	105.395
1.778	106.50	109.45	103.199	164.727	188.264	143.163	102.731
1.739	96.58	105.621	99.652	158.913	173.305	137.207	100.105
1.702	96.00	101.903	96.218	153.127	158.251	131.382	97.51
1.667	92.50	98.29	92.889	147.365	143.087	125.684	94.943
1.633	90.40	94.777	89.661	141.618	127.795	120.106	92.4
1.600	89.88	91.357	86.526	135.882	112.356	114.645	89.876
1.569	85.93	88.026	83.479	130.149	96.752	109.297	87.368

Tr	Gasto instantáneo máximo diario (m <sup>3</sup> /s)	Función de Distribución de Probabilidad					
		Normal	LogNormal	LogPerson III	Gamma	Gumbel	Gumbel Doble
1.538	85.90	84.779	80.516	124.414	80.962	104.056	84.872
1.509	84.52	81.611	77.631	118.669	64.962	98.92	82.383
1.481	82.11	78.517	74.821	112.907	48.729	93.884	79.898
1.455	75.36	75.495	72.08	107.12	32.237	88.946	77.413
1.429	73.10	72.538	69.404	101.301	15.455	84.103	74.923
1.404	71.82	69.645	66.789	95.44	-1.647	79.351	72.423
1.379	68.30	66.81	64.232	89.529	-19.107	74.688	69.909
1.356	65.20	64.029	61.728	83.557	-36.963	70.111	67.376
1.333	63.00	61.301	59.274	77.512	-55.26	65.62	64.817
1.311	61.03	58.619	56.865	71.383	-74.051	61.211	62.226
1.290	56.65	55.981	54.498	65.155	-93.394	56.884	59.595
1.270	54.62	53.383	52.169	58.811	-113.357	52.638	56.917
1.250	51.98	50.821	49.875	52.333	-134.018	48.47	54.181
1.231	49.21	48.291	47.61	45.701	-155.472	44.383	51.376
1.212	48.66	45.788	45.371	38.887	-177.829	40.374	48.488
1.194	43.88	43.308	43.152	31.862	-201.224	36.446	45.501
1.176	39.90	40.845	40.949	24.59	-225.821	32.6	42.393
1.159	39.51	38.394	38.755	17.025	-251.827	28.838	39.138
1.143	38.33	35.946	36.563	9.11	-279.5	25.166	35.701
1.127	30.50	33.494	34.365	0.771	-309.18	21.589	32.035
1.111	30.38	31.027	32.149	-8.087	-341.319	18.117	28.072
1.096	28.20	28.532	29.902	-17.597	-376.541	14.763	23.715
1.081	23.71	25.99	27.606	-27.948	-415.747	11.548	18.805
1.067	23.09	23.374	25.234	-39.423	-460.305	8.504	13.068
1.053	21.04	20.645	22.742	-52.482	-512.464	5.683	5.942
1.039	18.10	17.733	20.061	-67.951	-576.335	3.179	-4.063
1.026	12.40	14.501	17.044	-87.594	-660.867	1.173	-25.021
1.013	9.52	10.578	13.294	-116.643	-793.388	0.065	

Los valores negativos indican que la FDP está extrapolando los valores de gasto a números negativos para periodos de retorno pequeños, indicando que los valores son inexistentes al no hacer un ajuste adecuado de los valores de gasto observados.

Para seleccionar una FDP, se utilizaron dos criterios, uno es el análisis gráfico que consiste en ver la función que más se apegue a los datos medidos y el otro criterio es el error cuadrático mínimo, en el cual se selecciona la función que tenga menor error cuadrático.

Cuadro 9.20. Error cuadrático mínimo para cada FDP de la estación hidrométrica 26042 Venados.

Error Cuadrático Mínimo					
Normal	LogNormal	LogPerson III	Gamma	Gumbel	Gumbel Doble
3349.991	2060.463	1525.086	2490.002	3001.892	1426.878

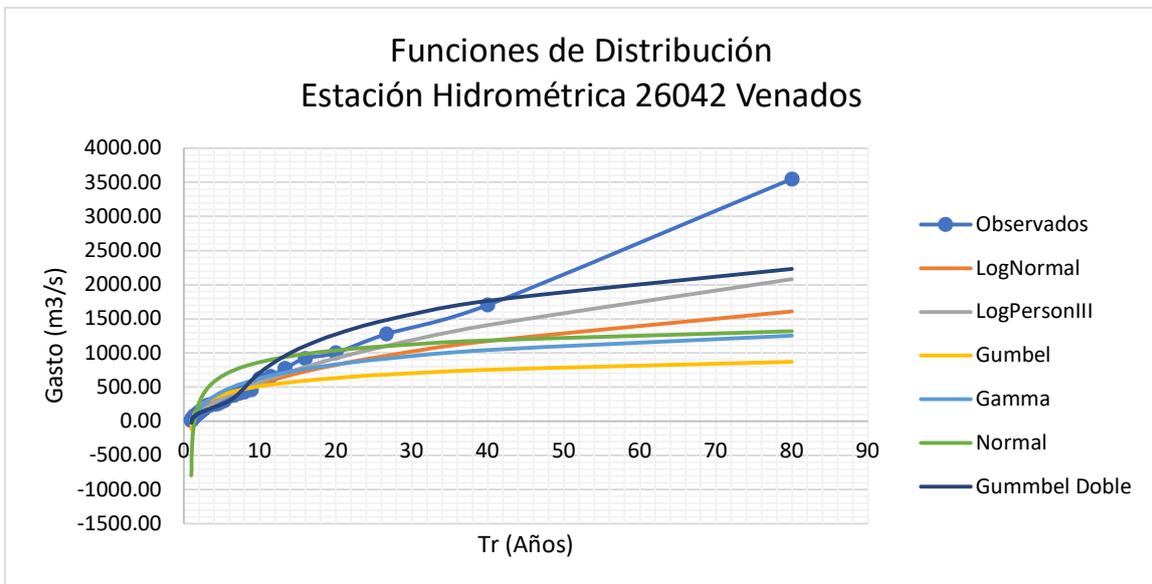


Figura 9.13. Gráfica de las FDP de la estación hidrométrica 26042 Venados.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la FDP que más se ajusta a los datos observados es la función Gumbel Doble.

En el siguiente cuadro se presenta el gasto instantáneo máximo diario obtenido para diferentes periodos de retorno, resultado de la FDP Gumbel Doble.

Cuadro 9.21. Gasto instantáneo máximo diario para diferentes periodos de retorno.

<b>Tr</b>	<b>Gasto instantáneo máximo diario (m<sup>3</sup>/s)</b>
2	116.505
5	245.816
10	709.032
20	1272.606
50	1916.55
75	2187.987
100	2378.029
200	2830.672
500	3422.971
1000	3868.949

### **9.3. Modelación hidrológica con el modelo HEC-HMS versión 4.2.**

El modelo HEC-HMS es un programa que calcula el hidrograma producido por una cuenca a partir de los datos de entrada (Sánchez San Román, 2015).

#### **9.3.1. Periodo de simulación.**

La simulación se realizó para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años de periodo de retorno.

#### **9.3.2. Datos de entrada del modelo HEC-HMS.**

Los datos de entrada que requiere el modelo son: delimitación de la cuenca, subcuencas y corrientes, precipitación, número de curva, y tiempo de retraso.

##### ***A. Datos de la cuenca.***

Los datos de delimitación la cuenca en formato \*.shp, se extraen del mapa base generado en el programa ArcGis 10.4.1.



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de INEGI. Escala 1:50,000.

Figura 9.14. Delimitación de la cuenca, subcuencas y corrientes.

### ***B. Preparación de los datos de precipitación.***

Para el modelo meteorológico se utilizó el método de pesos de precipitación, a partir de polígonos de Thiessen por tal motivo, para cada estación meteorológica y para cada periodo de retorno se ingresa la precipitación obtenida de acuerdo con el cuadro 9.16.

Components		Compute	Results
Total Storm Gages			
<b>Met Name: Tr 2</b>			
Gage Name	Total Depth (MM)		
13015	36.325		
13029	46.114		
13031	40.009		
13033	37.46		
13041	12.811		
13042	85.472		
13061	32.331		
13077	40.896		
13082	36.003		
13087	42.989		
13093	43.43		

Figura 9.15. Precipitación correspondiente a cada periodo de retorno y estación meteorológica.

### **C. Preparación de la información del componente datos de series de tiempo.**

Para la distribución de la lluvia se utilizó la formulación de Chen, para obtener el Hietograma Unitario Centrado de Chen y la Curva-Masa unitaria de tormenta centrada, para ello, se usó información de las precipitaciones para diferentes periodos de retorno por estación mostradas en el cuadro 9.16, las isoyetas publicadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) con duración de 1 hora y 24 horas para periodos de retorno de 10, 25 y 50 años y la siguiente fórmula:

$$P_d^T = \frac{a_1 P_1^{10} \log(10^{2-x} T^{x-1})}{(d+b)^c} \left(\frac{d}{60}\right) \quad (9.10)$$

Y los coeficientes:

$$a = 21.03453 - 186.4683 R + 825.4915 R^2 - 1084.846 R^3 + 524.06 R^4$$

$$b = 3.487775 - 68.13976 R + 389.4625 R^2 - 612.4041 R^3 + 315.8721 R^4$$

$$c = 0.277553 + 0.9481759 R + 2.109415 R^2 - 4.827012 R^3 + 2.459584 R^4$$

Obteniendo la Curva-Masa unitaria de tormenta centrada y el hidrograma unitario centrado de Chen, el cuál fue ingresado al componente de series de tiempo en HEC-HMS.

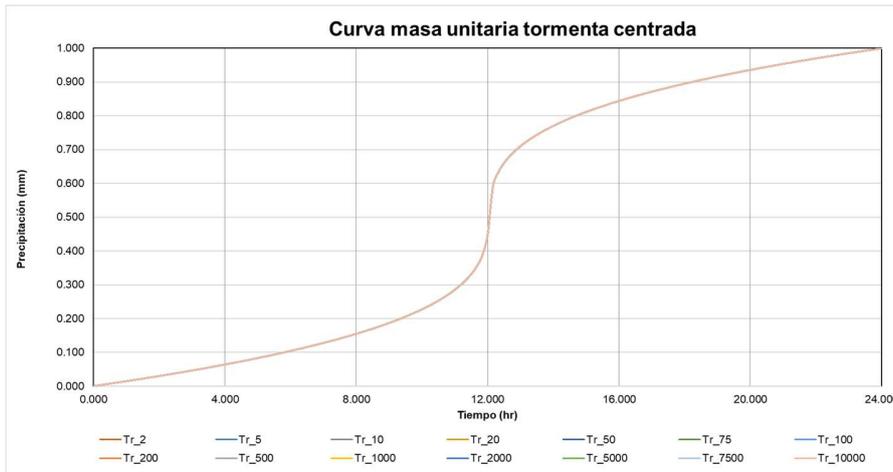


Figura 9.16. Curva-Masa unitaria de tormenta centrada de Chen en la cuenca del río Metztlán.

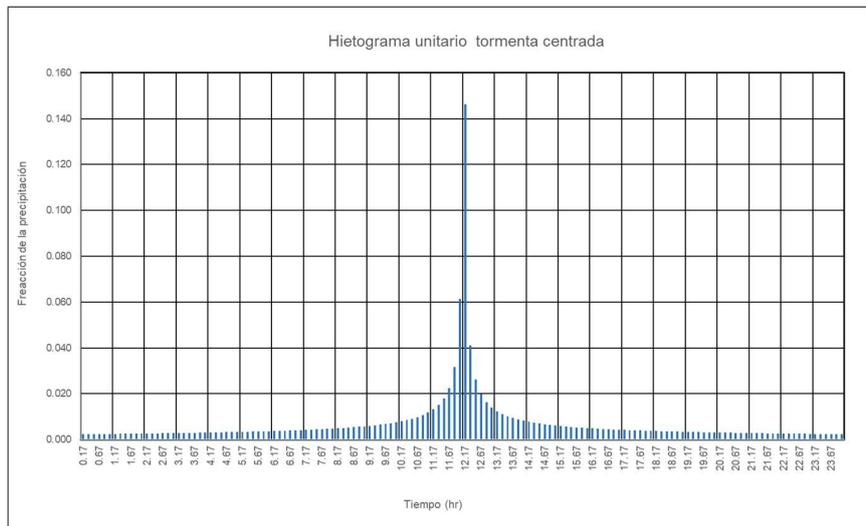


Figura 9.17. Hietograma Unitario Centrado de Chen en la cuenca del río Metztlán.

El cual fue ingresado al componente de series de tiempo en HEC-HMS.

Components Compute Results	
Time-Series Gage Time Window Table Graph	
Time (ddMMYYYY, H...	Precipitation (MM)
31dic1999, 23:50	
01ene2000, 00:00	0.002
01ene2000, 00:10	0.002
01ene2000, 00:20	0.002
01ene2000, 00:30	0.002
01ene2000, 00:40	0.002
01ene2000, 00:50	0.002
01ene2000, 01:00	0.002
01ene2000, 01:10	0.003
01ene2000, 01:20	0.003
01ene2000, 01:30	0.003
01ene2000, 01:40	0.003

Figura 9.18. Hietograma Unitario Centrado de Chen en HEC-HMS.

#### ***D. Preparación de la información del número de curva.***

Para la obtención del número de curva dentro de la cuenca, se utilizó el método TR-55 “Hidrología urbana para cuencas pequeñas” emitida por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en 1986 y adaptada para México por Hernández (2014).

De acuerdo con la figura 9.8, en la cuenca de estudio tenemos los siguientes tipos de suelo:

Cuadro 9.22. Textura por tipos de suelo en la cuenca.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Textura</b>
Acrisol húmico	Media
Acrisol ortico	Fina
Andosol húmico	Media
Andosol ocrico	Media
Cambisol districo	Media
Cambisol eutrico	Media
Cambisol húmico	Media
Cambisol vertico	Fina
Feozem calcarico	Fina
Feozem haplico	Media/Fina
Feozem luvico	Fina/Media

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Textura</b>
Fluvisol eutrico	Fina
Litosol	Fina/Media
Luvisol cromico	Fina/Media
Luvisol ferrico	Media
Luvisol ortico	Media/Fina
Luvisol vertico	Fina
Planosol eutrico	Fina
Regosol calcarico	Media
Regosol districo	Fina
Regosol eutrico	Media
Rendzina	Fina
Vertisol pelico	Fina

Se usó el cuadro de decisión para determinar el grupo de suelo según el USDA que corresponde a la edafología de México (ver anexo 1) y el siguiente cuadro:

Cuadro 9.23. Cuadro de grupo de suelo resultante de las combinaciones de grupos de suelo según el USDA.

<b>Combinaciones</b>	<b>Grupo de suelo resultante</b>
A	A
AA	
AB	
AAA	
AAB	
ABA	
BAA	
B	B
BA	
BB	
BC	
BBA	
BBB	
BBCC	
BAB	
BCB	
ABB	
CBB	
C	
CB	
CC	

<b>Combinaciones</b>	<b>Grupo de suelo resultante</b>
CD	
CCB	
CCC	
CBC	
CDC	
BCC	
DCC	
D	
DC	
DD	
DDC	
DDD	
DCD	
CDD	

Fuente: Hernández (2014).

Realizando las combinaciones mostradas en el cuadro anterior obtenemos los grupos de suelo de la cuenca.

Cuadro 9.24. Grupo de suelo de acuerdo con el USDA que corresponde a cada textura y tipo de suelo.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Textura</b>	<b>Grupo de Suelo</b>
Acrisol humico	Media	B
Acrisol ortico	Fina	C
Andosol humico	Media	B
Andosol ocrico	Media	B
Cambisol districo	Media	B
Cambisol eutrico	Media	C
Cambisol humico	Media	B
Cambisol vertico	Fina	D
Feozem calcarico	Fina	D
Feozem haplico	Media/Fina	B/C=B
Feozem luvico	Fina/Media	D/C=D
Fluvisol eutrico	Fina	D
Litosol	Fina/Media	C/B=C
Luvisol cromico	Fina/Media	C/B=C
Luvisol ferrico	Media	B
Luvisol ortico	Media/Fina	B/C=B
Luvisol vertico	Fina	D
Planosol eutrico	Fina	D

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Textura</b>	<b>Grupo de Suelo</b>
Regosol calcarico	Media	C
Regosol districo	Fina	C
Regosol eutrico	Media	C
Rendzina	Fina	C
Vertisol pelico	Fina	C

Como se ha presentado en la figura 10, en la cuenca se tiene los usos de suelo que se resumen en el cuadro 9.25.

Cuadro 9.25. Tipos de uso de suelo en la cuenca.

<b>Descripción</b>
Agricultura de temporal anual
Bosque de pino
Bosque de pino-encino
Pastizal inducido
Matorral submontano
Agricultura de temporal anual y permanente
Agricultura de riego anual y semipermanente
Matorral crasicaule
Agricultura de riego anual
Bosque de encino
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino
Bosque mesófilo de montaña
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate
Urbano construido
Vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano
Agricultura de temporal permanente
Bosque de encino-pino
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino
Agricultura de temporal semipermanente y permanente
Bosque de tuscate
Agricultura de riego anual y permanente
Agua
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia
Selva baja caducifolia
Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino

<b>Descripción</b>
Bosque de oyamel
Vegetación secundaria herbácea de bosque de encino-pino
Agricultura de temporal anual y semipermanente
Sin vegetación aparente
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino
Agricultura de humedad anual
Bosque cultivado
Matorral desértico
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino
Bosque de mezquite
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino
Vegetación secundaria arbórea de bosque de tuscate

Con ayuda de la agrupación de los usos de suelo en México dentro de los usos de suelo establecidos en el TR-55 realizamos la clasificación de los usos de suelo en la cuenca que se presentan en el cuadro de agrupación de los usos de suelo en México dentro de los usos de suelo establecidos en el TR-55 (ver anexo 1).

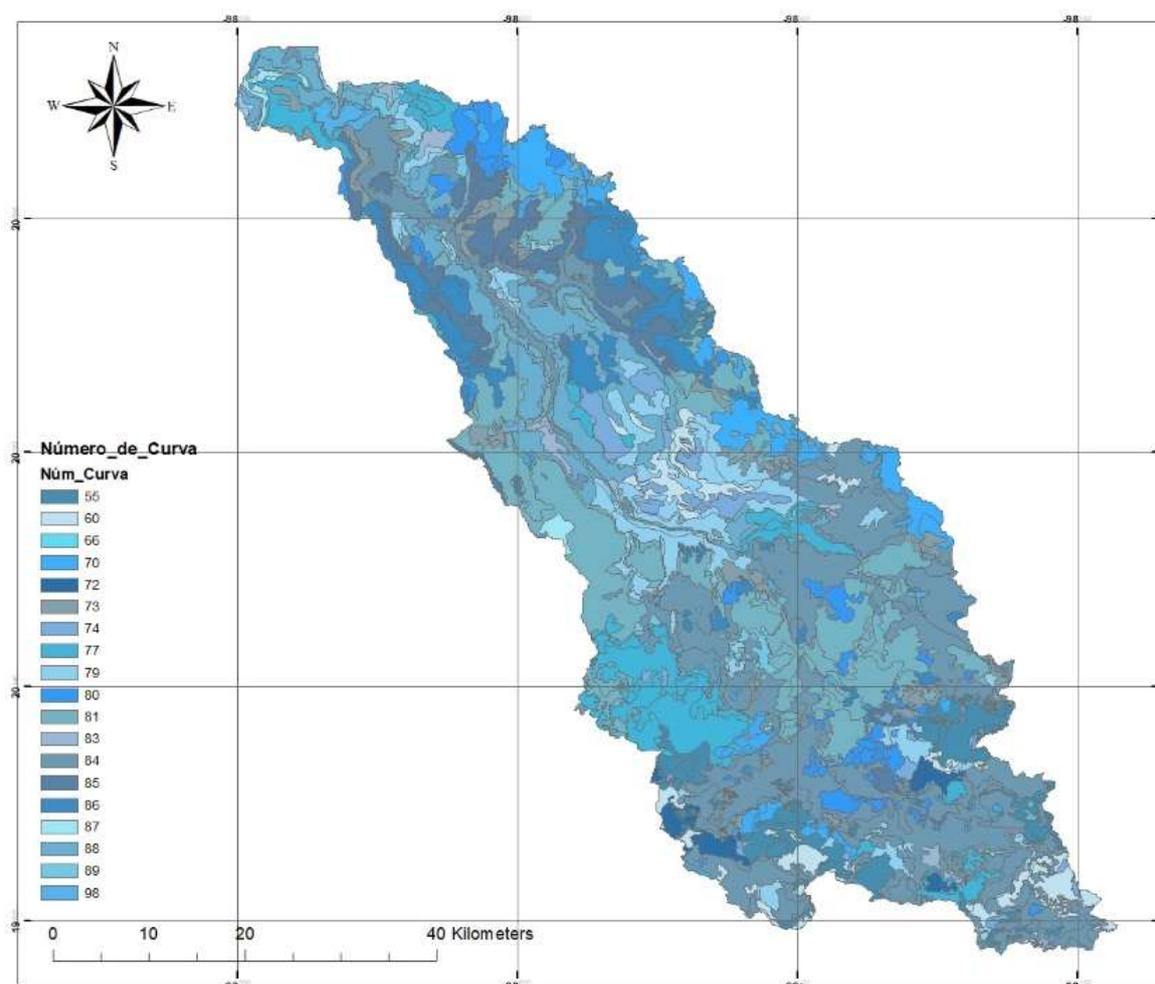
Y las combinaciones para determinar la condición hidrológica, se obtuvo las siguientes condiciones hidrológicas en la cuenca.

Cuadro 9.26. Condición hidrológica para cada uso de suelo.

<b>Descripción</b>	<b>Condición hidrológica</b>
Agricultura de temporal anual	Buena
Bosque de pino	Buena
Bosque de pino-encino	Buena
Pastizal inducido	N/A
Matorral submontano	Pobre
Agricultura de temporal anual y permanente	Buena
Agricultura de riego anual y semipermanente	Buena
Matorral crasicaule	Pobre
Agricultura de riego anual	Pobre
Bosque de encino	Buena
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	Pobre
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	Media
Bosque mesófilo de montaña	Buena

<b>Descripción</b>	<b>Condición hidrológica</b>
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	Media
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	Media
Urbano construido	N/A
Vegetación secundaria arbustiva de matorral submontano	Pobre
Agricultura de temporal permanente	N/A
Bosque de encino-pino	Buena
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	Media
Agricultura de temporal semipermanente y permanente	Buena
Bosque de tuscate	Media
Agricultura de riego anual y permanente	Buena
Agua	N/A NC=98
Vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia	Media
Selva baja caducifolia	Media
Vegetación secundaria arbustiva de bosque mesófilo de montaña	Media
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	Media
Bosque de oyamel	Buena
Vegetación secundaria herbacea de bosque de encino-pino	Pobre
Agricultura de temporal anual y semipermanente	Buena
Sin vegetación aparente	Pobre
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	Media
Agricultura de humedad anual	N/A NC=98
Bosque cultivado	Pobre
Matorral desértico	Pobre
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino	Media
Bosque de mezquite	Pobre
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino-encino	Media
Vegetación secundaria arbórea de bosque de tuscate	Media

Con todo lo anterior y con ayuda del cuadro para la asignación del número de curva para los usos de suelo que se presentan en la República Mexicana (ver anexo 1), se asigna el número de curva, con el número de curva asignado, se elaboró el siguiente mapa de número de curva en la cuenca del río Metztitlán.



Fuente: Elaboración propia con datos vectoriales de CONABIO. Escala 1:250,000.

Figura 9.19. Número de curva para los usos de suelo que se presentan en la cuenca del río Metztitlán.

Finalmente, se calculó el número de curva ponderada para cada subcuenca, los cuales se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 9.27. Número de curva ponderada para cada subcuenca.

<b>Subcuenca</b>	<b>Nombre de la subcuenca</b>	<b>Área en km<sup>2</sup></b>	<b>NC ponderada inicial</b>
1	San Pedro	78.46	83.3
2	Hualula	75.5	83.15
3	San Cristóbal	31.41	82.77
4	Metztitlán	49.02	83.85
5	Jilotla	78.22	81.97
6	Jialipa	55.91	82.01
7	Zacualtipán	142.99	80.1
8	La Paila	20.84	85.57
9	Atzolcintla	62.96	84.6
10	Atecoxco	93.03	80.04
11	Milpillas	111.04	83.05
12	Palo Bendito	62.67	76.08
13	Las Blancas	63.16	74.85
14	Agua Blanca	78.79	77.6
15	Los Sabinos	141.52	82.59
16	San Pablo	20.89	81.9
17	Santo Tomás	127.36	78.87
18	Estación de Apulco	127.39	80.57
19	El Veladero	46.28	82.2
20	El Acocul	32.27	81.89
21	Aguacatitla	51.79	79.87
22	Colonia 28 de Mayo	33.94	81.73
23	Metepc	30.64	80.24
24	Santa María	114.16	77.97
25	San Antonio	138.65	78.46
26	Napateco	105.29	77.11
27	Río Seco	156	81.56
28	Jaltepec	99.74	76.84
29	Cuautepec	78.98	78.66
30	Tulancingo	35.03	75.49
31	Javier Rojo Gómez	56.27	70.9
32	Santa Elena	129.21	75
33	Ahuehuetitla	149.05	75.81
34	Almoleya	157.58	77.74
35	Santa Mónica	32.39	83.33
36	El Veladero	41.35	85.26
37	Venados	4.97	86.04
38	El Carrizal	22.26	85.09

### E. Preparación de la información del tiempo de retraso.

Para el cálculo del tiempo de retraso primero se calculó el tiempo de concentración, el cuál fue obtenido como el promedio de las ecuaciones de Passini (9.5) y Témez (9.7) (Vélez-Upegui & Botero-Gutiérrez, 2011).

a) Ecuación de Passini:

$$T_c = \frac{[0.108(A L_c)^{1/3}]}{S^{0.5}}$$

En donde Tc: tiempo de concentración (hr), Lc: longitud del cauce (km), S: pendiente media del cauce (%), A: área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

La pendiente media del cauce se calculó con la siguiente fórmula (9.6):

$$S = \frac{\Delta z}{L_c}$$

b) Ecuación de Témez:

$$T_c = 0.3 \left[ \frac{L_c}{S_c^{0.25}} \right]^{0.76}$$

En donde Tc: tiempo de concentración (hr), Lc: longitud del cauce (km), Sc: pendiente promedio del cauce (%).

La pendiente promedio del cauce se calculó con la siguiente fórmula (9.8):

$$S_c = \left[ \frac{n}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

Cuadro 9.28. Tiempo de concentración en minutos por subcuenca.

Subcuenca	Nombre	Longitud del cauce	S	Sc	TcPassini (min)	TcTemez (min)	Tc promedio (min)
1	San Pedro	19.792	0.009	0.033	786.856	331.800	559.328
2	Hualula	11.843	0.083	0.099	217.010	182.728	199.869
3	San Cristóbal	5.923	0.037	0.043	191.964	126.731	159.348

Subcuenca	Nombre	Longitud del cauce	S	Sc	TcPassini (min)	TcTemez (min)	Tc promedio (min)
4	Metztlán	10.699	0.074	0.088	191.699	173.158	182.429
5	Jilotla	14.860	0.062	0.074	273.833	229.493	251.663
6	Jialipa	10.077	0.065	0.102	209.141	160.810	184.975
7	Zacualtipán	27.881	0.029	0.036	599.154	425.468	512.311
8	La Paila	6.934	0.058	0.076	141.590	127.939	134.765
9	Atzolcintla	22.396	0.023	0.029	476.874	375.193	426.034
10	Atecoxco	15.559	0.053	0.095	318.924	226.620	272.772
11	Milpillas	23.085	0.029	0.035	524.094	369.227	446.660
12	Palo Bendito	11.261	0.049	0.049	261.056	201.076	231.066
13	Las Blancas	24.599	0.022	0.033	504.221	393.501	448.861
14	Agua Blanca	14.017	0.034	0.041	361.967	245.464	303.715
15	Los Sabinos	14.125	0.047	0.055	374.794	233.551	304.173
16	San Pablo	7.6027	0.061	0.073	142.667	138.236	140.452
17	Santo Tomás	16.247	0.048	0.058	375.665	257.148	316.406
18	Estación de Apulco	19.190	0.033	0.036	478.011	320.156	399.083
19	El Veladero	12.615	0.036	0.023	285.171	253.315	269.243
20	El Acocul	8.3299	0.005	0.006	603.513	240.197	421.855
21	Aguacatitla	11.189	0.055	0.059	230.445	193.399	211.922
22	Colonia 28 de Mayo	8.066	0.004	0.004	648.098	254.499	451.299
23	Metepec	10.849	0.024	0.031	287.201	213.594	250.397
24	Santa María	20.794	0.016	0.018	681.064	388.050	534.557
25	San Antonio	21.557	0.039	0.054	475.712	323.378	399.545
26	Napateco	26.130	0.012	0.009	844.617	528.966	686.791
27	Río Seco	24.031	0.049	0.058	454.267	345.981	400.124
28	Jaltepec	23.377	0.026	0.035	528.492	373.787	451.139
29	Cuatepec	17.287	0.016	0.023	573.087	322.016	447.551
30	Tulancingo	11.896	0.027	0.032	295.090	227.065	261.077
31	Javier Rojo Gómez	15.556	0.041	0.048	304.431	257.616	281.024
32	Santa Elena	21.110	0.027	0.036	550.981	344.497	447.739
33	Ahuehuetitla	33.898	0.018	0.022	839.286	541.338	690.312
34	Almoloya	35.727	0.020	0.025	822.366	549.902	686.134
35	Santa Mónica	7.306	0.050	0.051	180.076	143.792	161.934
36	El Veladero	9.269	0.008	0.004	541.665	280.158	410.912
37	Venados	1.421	0.007	0.045	148.216	42.368	95.292
38	El Carrizal	7.077	0.002	0.003	760.224	247.835	504.029

Para el cálculo del tiempo de retraso ( $T_r$ ), se aplicó la expresión siguiente (9.9):

$$T_r = 0.6 T_c$$

Cuadro 9.29. Tiempo de retraso en minutos por subcuena.

Subcuena	Nombre	TrPassini (min)	TrTémez (min)	Tr promedio (min)
1	San Pedro	472.113	199.080	335.597
2	Hualula	130.206	109.637	119.921
3	San Cristóbal	115.178	76.039	95.609
4	Metztlán	115.019	103.895	109.457
5	Jilotla	164.300	137.696	150.998
6	Jialipa	125.485	96.486	110.985
7	Zacualtipán	359.493	255.281	307.387
8	La Paila	84.954	76.763	80.859
9	Atzolcintla	286.125	225.116	255.620
10	Atecoxco	191.354	135.972	163.663
11	Milpillas	314.456	221.536	267.996
12	Palo Bendito	156.634	120.646	138.640
13	Las Blancas	302.532	236.101	269.317
14	Agua Blanca	217.180	147.278	182.229
15	Los Sabinos	224.877	140.131	182.504
16	San Pablo	85.600	82.941	84.271
17	Santo Tomás	225.399	154.289	189.844
18	Estación de Apulco	286.806	192.093	239.450
19	El Veladero	171.102	151.989	161.546
20	El Acocul	362.108	144.118	253.113
21	Aguacatitla	138.267	116.039	127.153
22	Colonia 28 de Mayo	388.859	152.700	270.779
23	Metepec	172.320	128.156	150.238
24	Santa María	408.639	232.830	320.734
25	San Antonio	285.427	194.027	239.727
26	Napateco	506.770	317.379	412.075
27	Río Seco	272.560	207.588	240.074
28	Jaltepec	317.095	224.272	270.684
29	Cuauteppec	343.852	193.209	268.531
30	Tulancingo	177.054	136.239	156.646
31	Javier Rojo Gómez	182.659	154.570	168.614
32	Santa Elena	330.589	206.698	268.643
33	Ahuehuetitla	503.572	324.803	414.187
34	Almoloya	493.420	329.941	411.680
35	Santa Mónica	108.045	86.275	97.160
36	El Veladero	324.999	168.095	246.547
37	Venados	88.930	25.421	57.175
38	El Carrizal	456.135	148.701	302.418

### 9.3.3. Modelo hidrológico.

El primer paso fue crear el proyecto y se añadieron las capas.

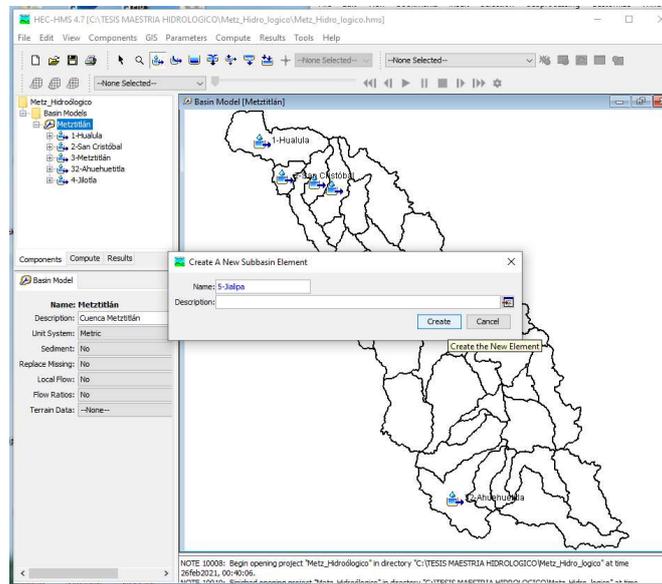


Figura 9.20. Proyecto creado con capas.

Se ingresaron los datos de área de cada subcuenca y se asignó el método de pérdida por el número de curva del SCS y el método de transformación por el hidrograma unitario del SCS.

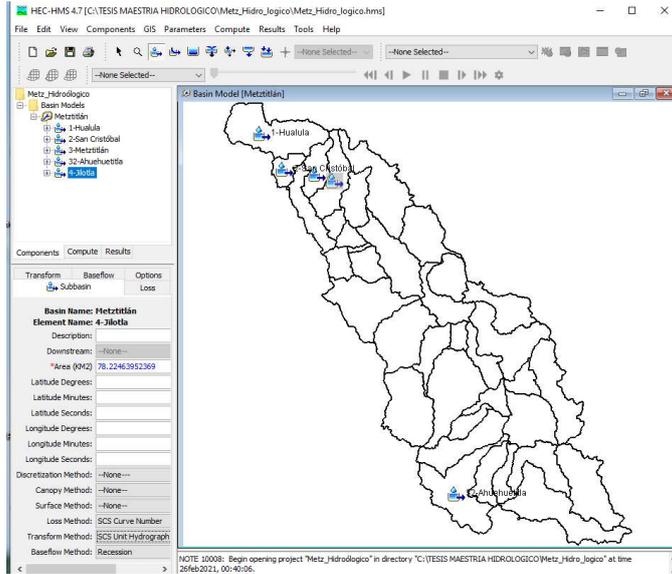


Figura 9.21. Área de cada subcuenca y definición del método de pérdida de número de curva del SCS y transformación del hidrograma unitario.

Se ingresó el número de curva para cada subcuenca.

La primera parte del modelo queda de la siguiente manera.

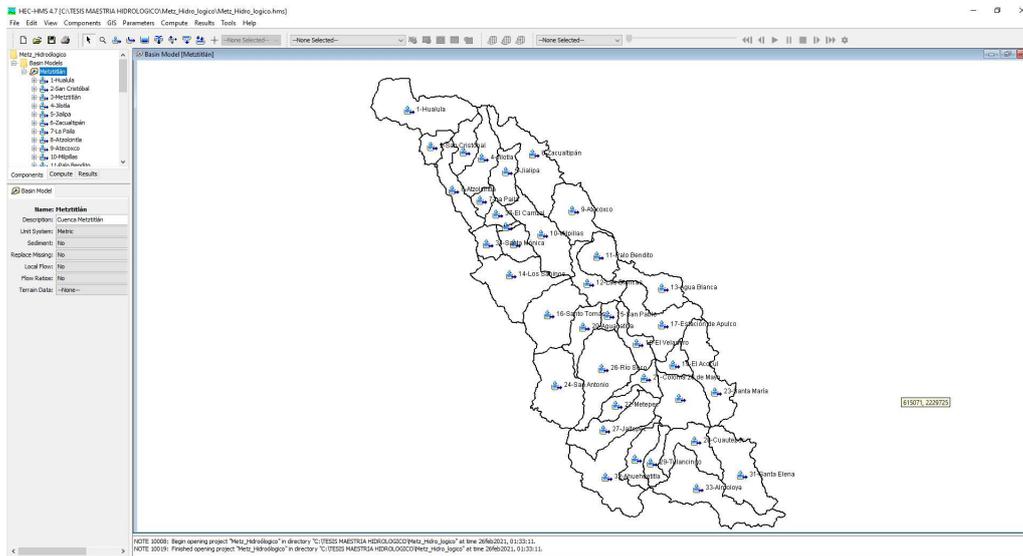


Figura 9.22. Valores ingresados de número de curva a cada subcuenca.

Se realizó la conexión de salidas de las subcuencas y el cauce principal por tramos.

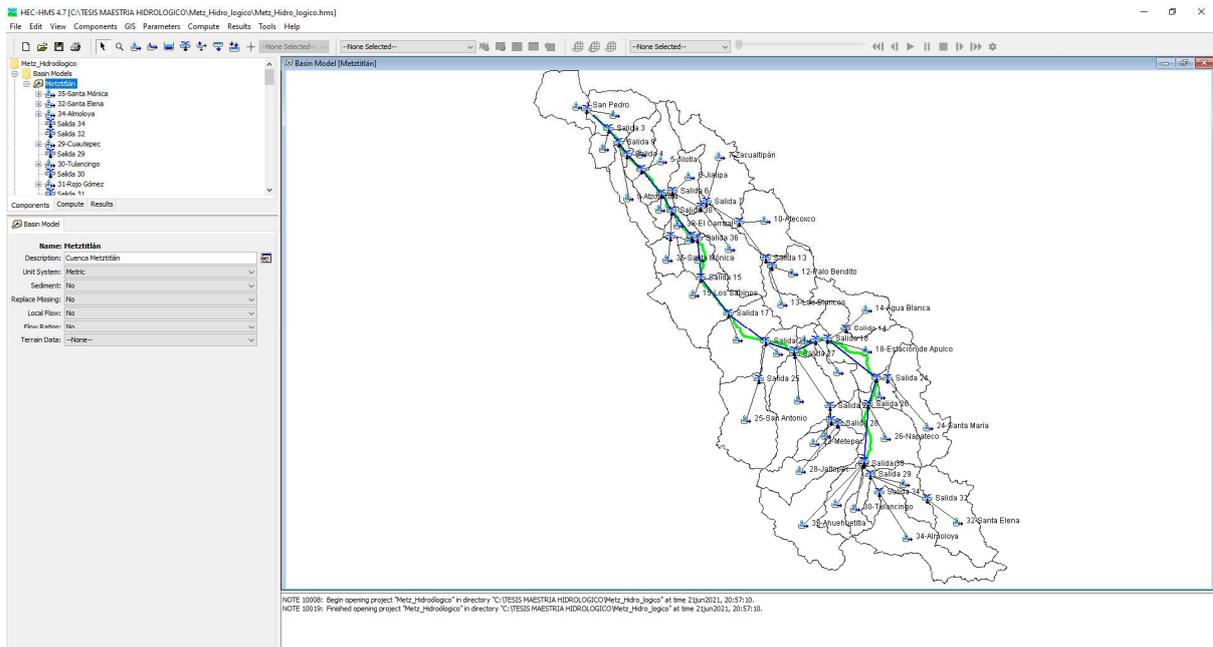


Figura 9.23. Salidas de las subcuencas y cauce principal.

Por último, se vincularon los datos de precipitación a cada subcuenca de acuerdo con los datos presentados en el apartado anterior del área de influencia de cada estación meteorológica dentro de la subcuenca por polígonos de Thiessen.

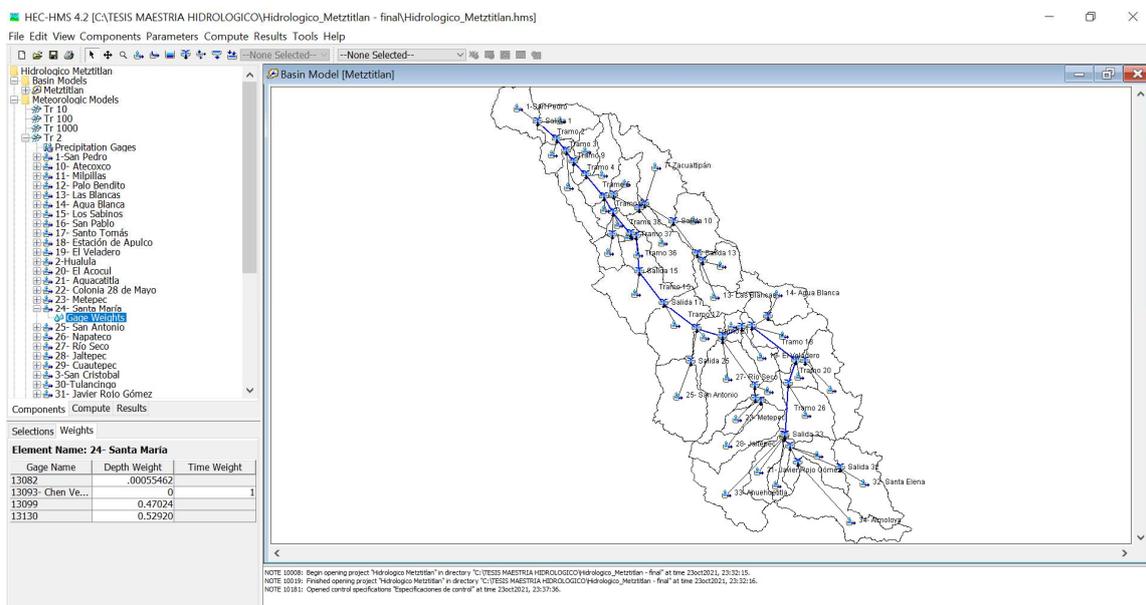


Figura 9.24. Área de influencia de estaciones meteorológicas dentro de la subcuenca.

El modelo hidrológico en HEC-HMS quedó de la siguiente manera:



Figura 9.25. Modelo hidrológico completo en HEC-HMS.

Se corre el modelo para la simulación para cada periodo de retorno.

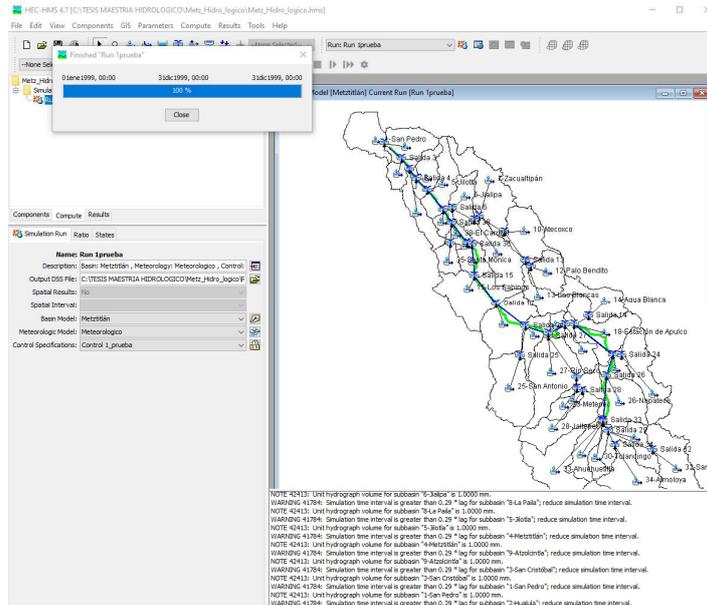


Figura 9.26. Simulación del modelo hidrológico.

#### 9.4. Acoplamiento del modelo hidrológico y construcción del modelo hidráulico.

Delimitadas la cuenca y las subcuencas, se ubicó la estación hidrometría 26042 Venados, que es la entrada del cauce principal en el modelo hidráulico, el cauce principal tiene una longitud de 38.752 km<sup>2</sup>, dentro del modelo hidráulico se tienen 11 afluentes más, todos desembocan en la laguna de Metztitlán, razón por la cual el modelo no tiene salida al ser una cuenca endorreica. Los hidrogramas de entrada del modelo hidráulico se obtuvieron de los hidrogramas de salida de las subcuencas 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 35, 36, 37 y 38.

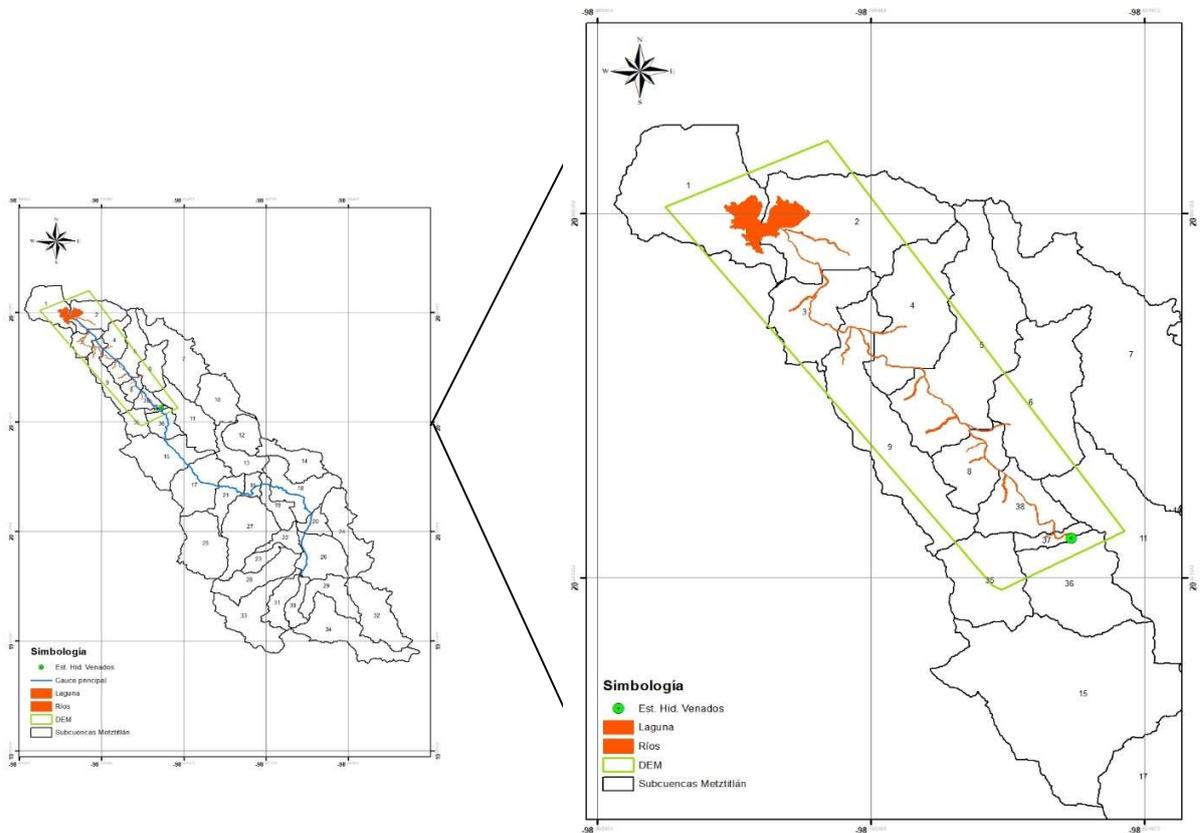


Figura 9.27. Acoplamiento del modelo hidrológico y construcción del modelo hidráulico.

## 9.5. Modelación hidráulica con el modelo Iber versión 2.5.2.

### 9.5.1. Datos de entrada del modelo.

El primer paso fue importar el shapefile, que previamente fue trabajado en ArcGis donde se encuentran las superficies con los usos de suelo, la laguna, el río y los tributarios.

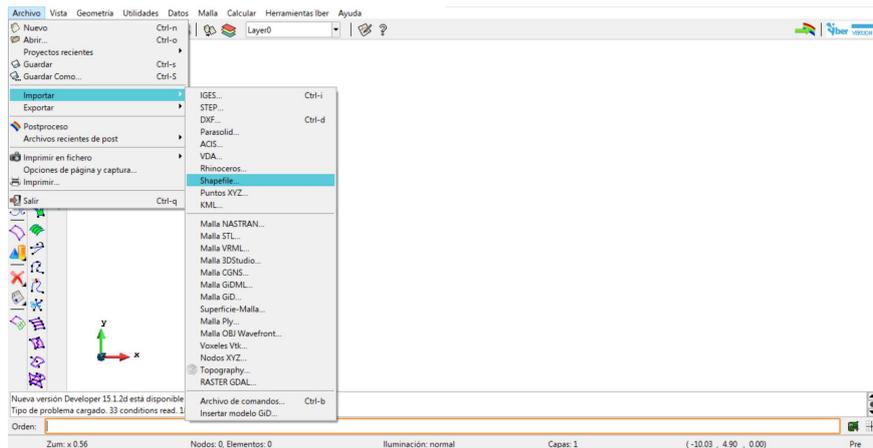


Figura 9.28. Importación del shapefile para la construcción de superficies NURBS para el modelo hidráulico.

Una vez importado el shapefile se colapsa el modelo, para eliminar errores de duplicidad en puntos o líneas.

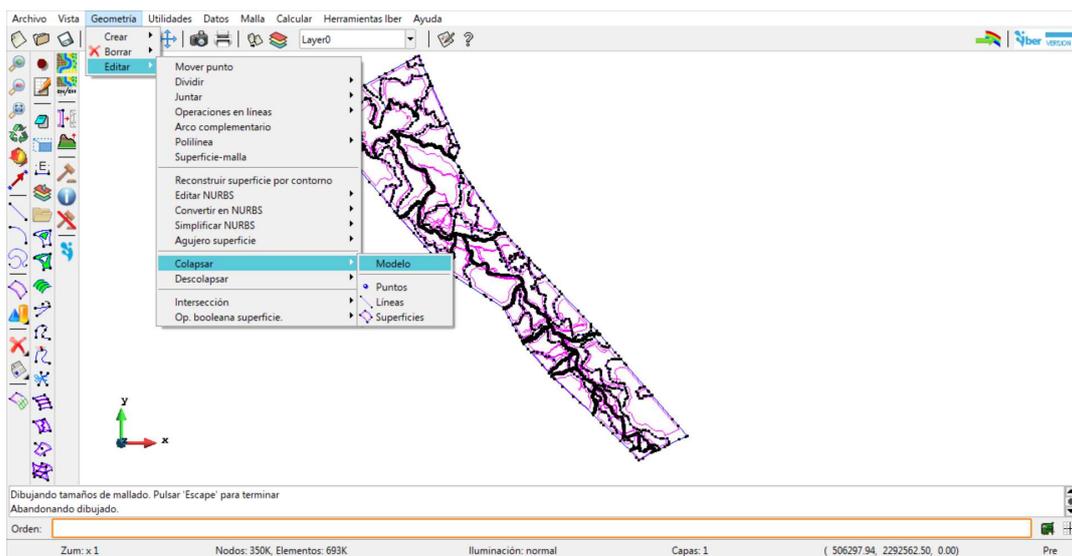


Figura 9.29. Colapsar el modelo importado.

Se generó las superficies NURBS.

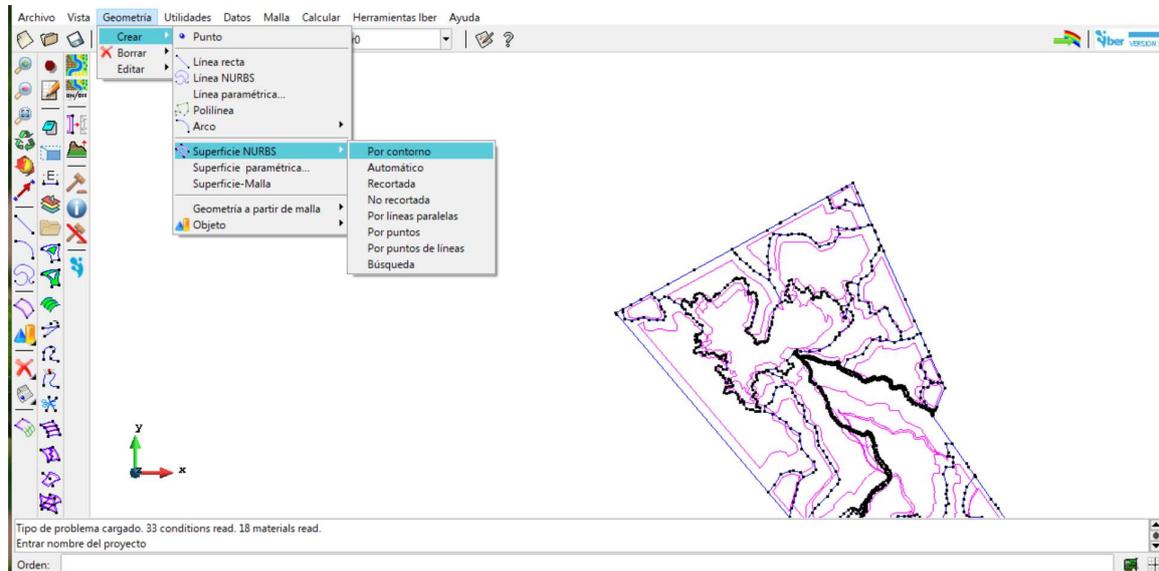


Figura 9.30. Generación de las superficies NURBS.

### A. Tamaño de malla.

El siguiente paso es asignar el tamaño de malla que se utilizará en el modelo, para el río principal y los tributarios, se utilizó el tamaño de malla de 10 m, para la laguna de 15 m y para el resto de las superficies de 30 m.

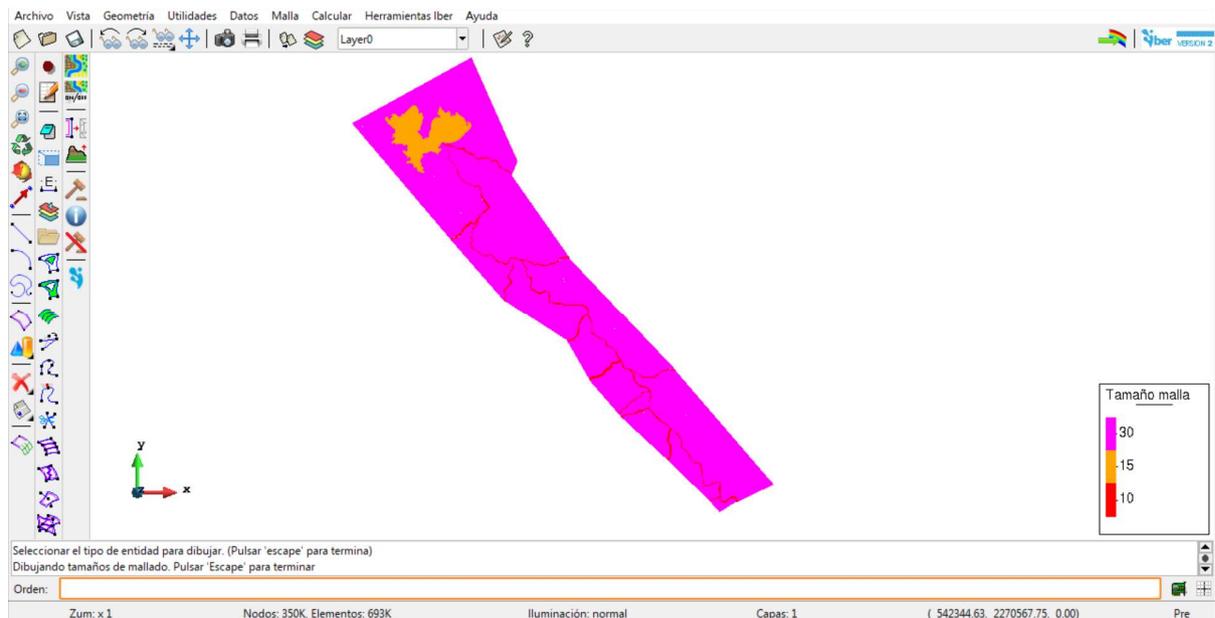


Figura 9.31. Tamaño de malla asignada a cada superficie NURBS.

### **B. Asignación de rugosidad.**

Se asignó la rugosidad dependiendo del uso de suelo y para cada superficie NURBS generada, esto para garantizar que cada elemento en la malla tenga asignada una rugosidad.

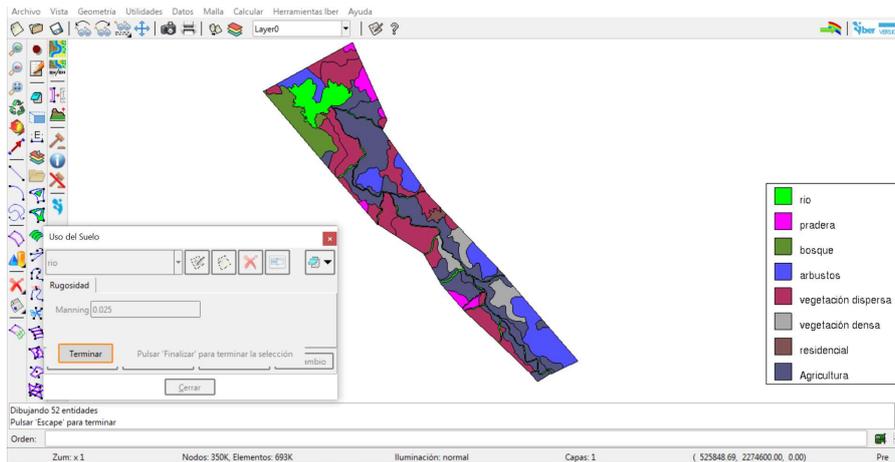


Figura 9.32. Rugosidad asignada al modelo hidráulico.

Para río el número de manning asignado es 0.025, pradera de 0.05, bosque de 0.12, arbustos de 0.05, vegetación dispersa de 0.08, vegetación densa de 0.18, residencial de 0.15, agricultura de 0.015.

### **C. Malla y asignación de elevación.**

Se genera la malla del modelo.

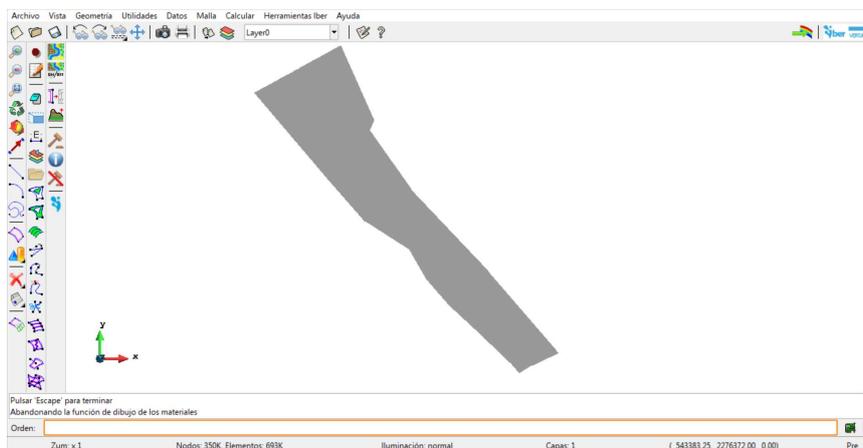


Figura 9.33. Malla del modelo.

Una vez generada la malla se asigna la elevación en cada nodo con el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) de 10 m.

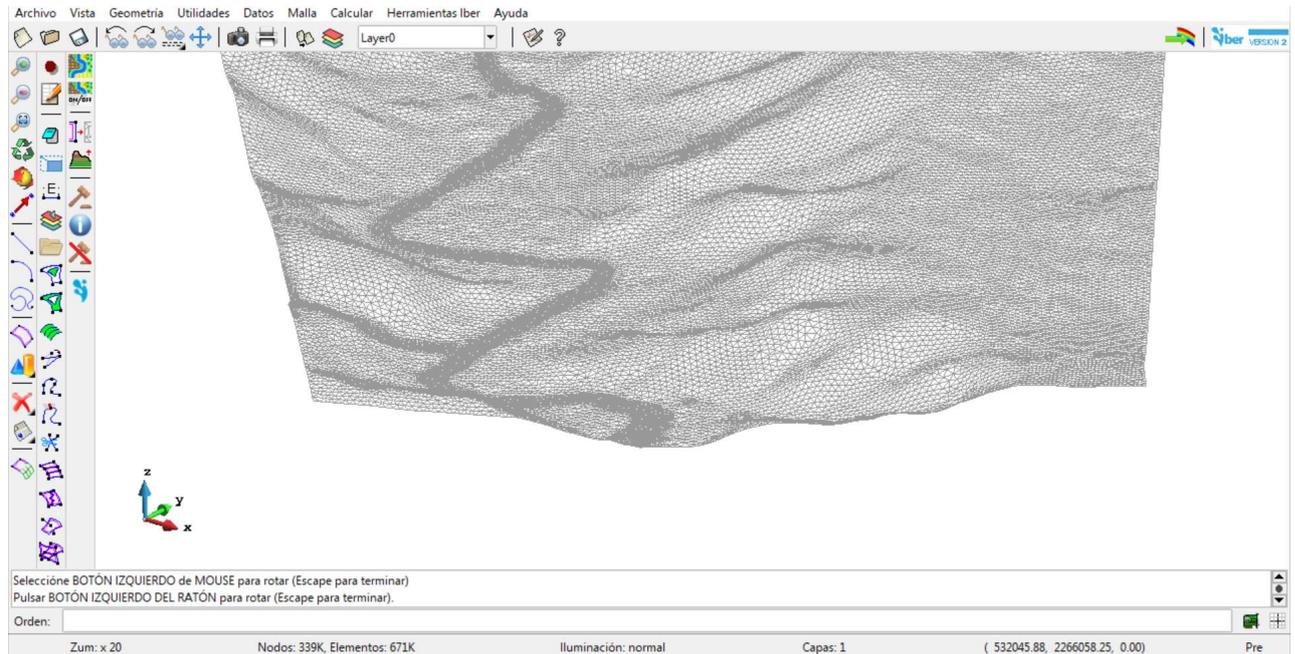


Figura 9.34. Asignación de elevación a la malla.

#### ***D. Ingreso de hidrogramas en cada entrada del modelo.***

Se asignan las condiciones de contorno, donde se ingresan los hidrogramas obtenidos del modelo hidrológico en cada entrada según figura 9.36, para la calibración del modelo hidráulico, se usarán los hidrogramas resultantes del modelo hidrológico con la precipitación diaria en mm del periodo del 1 de octubre al 21 de octubre de 1999, este periodo es debido a que las imágenes de satélite con la que se calibrará el evento es de fecha 21 de octubre de 1999 y el evento que generó el mayor daño registrado ocurrió el 5 de octubre de 1999, para las simulaciones se usarán los hidrogramas resultantes del modelo hidrológico de los periodos de retorno ( $T_r$ ) de 2, 5, 10, 20, 50 de acuerdo con el manual para el control de inundación de la CONAGUA, que establece el periodo de retorno con el cual debe calcularse la avenida de diseño en función del tipo de zona a proteger (CONAGUA, 2011). Los hidrogramas de cada entrada para la calibración y para cada periodo de retorno se muestran en el anexo 2.

A continuación, se presentan las entradas del modelo hidráulico.



Figura 9.35. Entradas en el modelo hidráulico.

El modelo no tiene salida debido a que los afluentes descargan en la laguna de Metztlán.

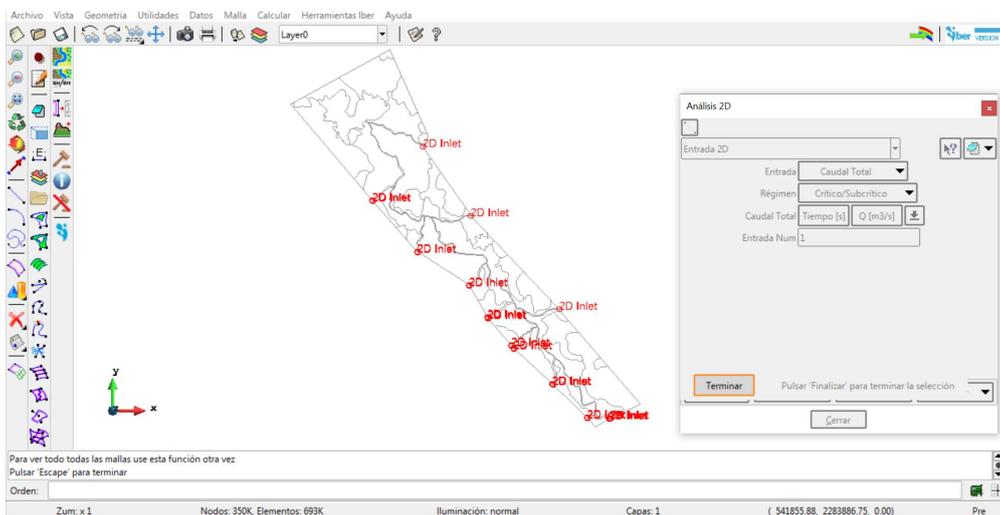
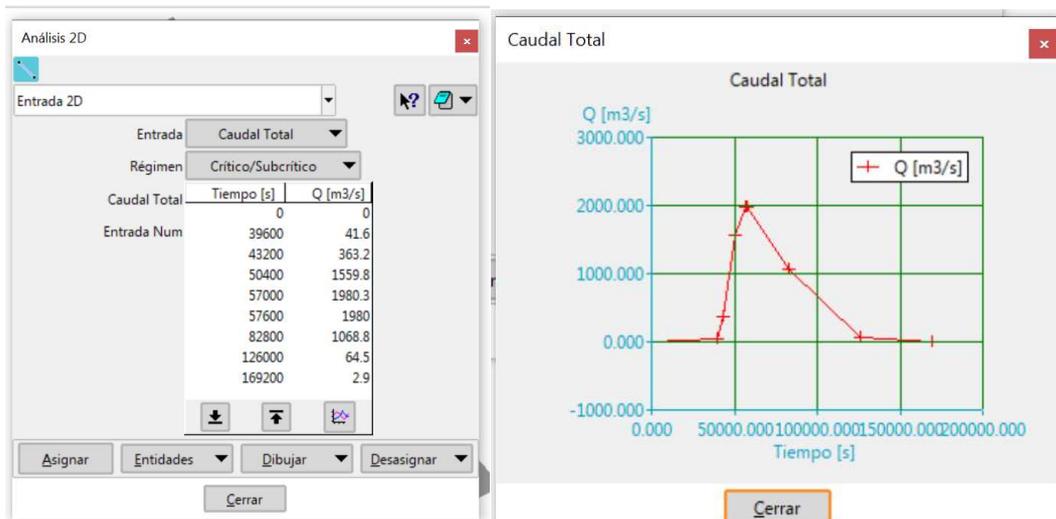


Figura 9.36. Entrada de los hidrogramas.

### E. Parámetros de tiempo.

Se modifican los parámetros de tiempo de simulación y el intervalo de tiempo, en este caso, el tiempo de simulación fue de 200,000 segundos que equivalen a 55.56 horas e intervalos de mil segundos.

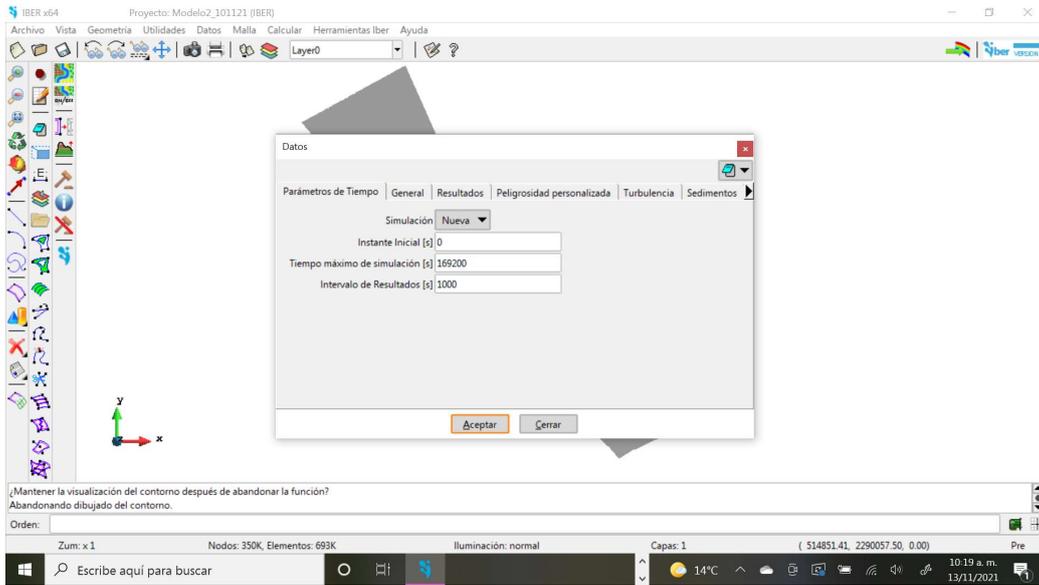


Figura 9.37. parámetros de tiempo de simulación.

### 9.5.2. Simulación.

El paso final es correr el modelo para iniciar los cálculos y obtener resultados de profundidad y velocidad para el evento de calibración y para cada periodo de retorno.

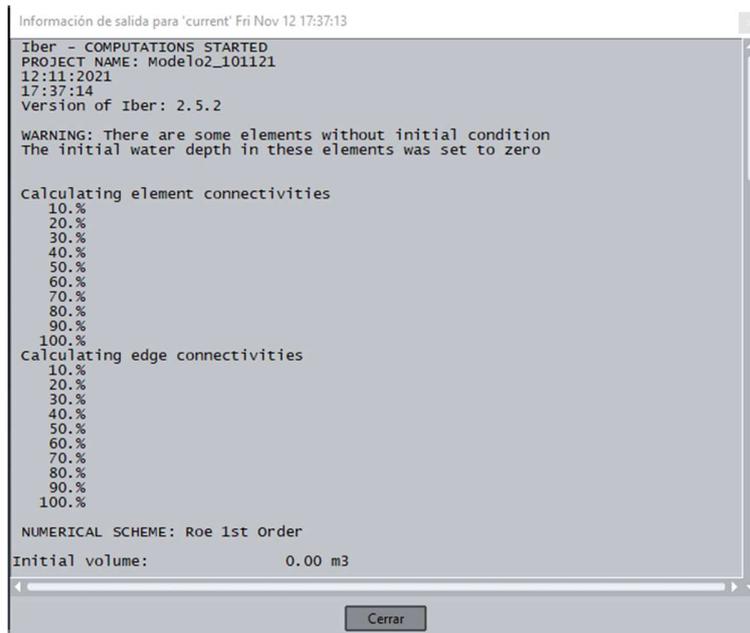


Figura 9.38. Inicio de cálculo.

El modelo finalmente quedó de la siguiente manera:

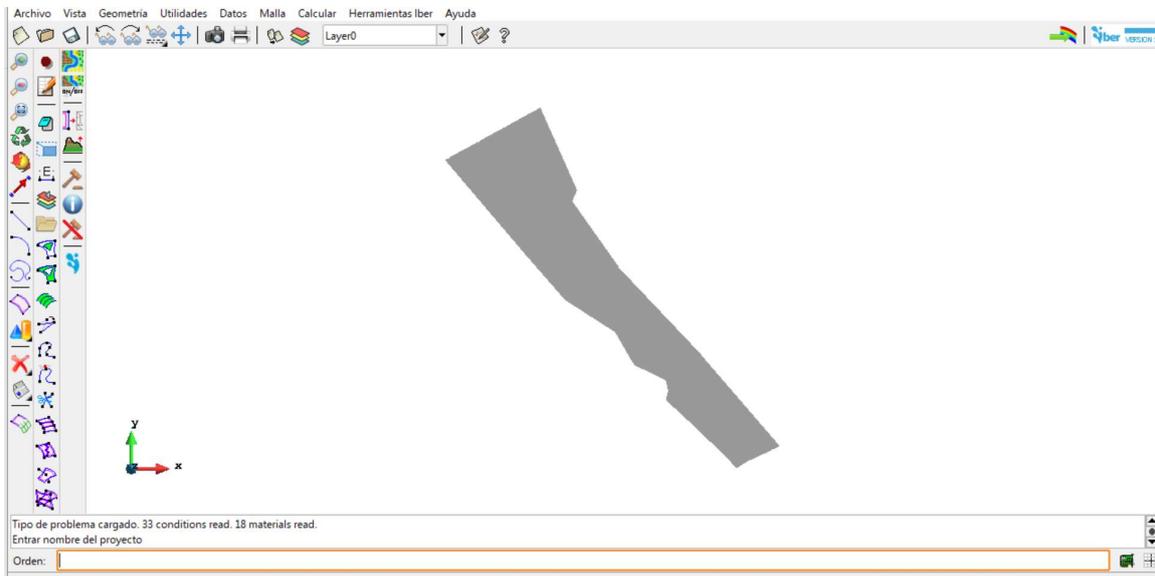


Figura 9.39. Modelo hidráulico completo.

El tiempo que llevó correr el modelo fue de 10 días, de acuerdo con las características del equipo de cómputo descrito en los materiales.

## 9.6. Análisis agrícola.

Para el cálculo del riesgo, se usará la expresión de acuerdo con CENAPRED (2014), donde el riesgo es la combinación de tres factores: valor de los bienes expuestos (C), vulnerabilidad (V) y peligro (P), de manera que:

Es decir:

$$Riesgo (R) = CPV \quad (9.11)$$

Para el caso de las zonas agrícolas, los factores serán definidos de la siguiente manera:



Figura 9.40. Definición de riesgo. Fuente: adaptado de CENAPRED (2014).

A partir de los conceptos anteriores y para el caso de zonas agrícolas, se utilizarán los factores que afectan los cultivos, en este caso, profundidad, velocidad, estacionalidad y duración de la inundación, de manera que cada factor nos dé un componente del riesgo, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Peligro} = \text{profundidad} \times \text{velocidad} \quad (9.12)$$

$$\text{Vulnerabilidad} = f(\text{gasto}, \text{estacionalidad}) \quad (9.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Valor de los bienes expuestos} &= \text{función de exposición} = \\ &f(\text{duración}, \text{rendimiento del cultivo}) \end{aligned} \quad (9.14)$$

La ecuación para el cálculo de riesgo en zonas agrícolas es la siguiente:

$$\text{Riesgo (R)} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Valor de exposición}$$

Y el índice de riesgo se calculó con la siguiente ecuación:

$$I_R = \frac{R}{C_{m\acute{a}x}} \quad (9.15)$$

Donde:

$R$ : valor de los bienes expuestos.

$C_{m\acute{a}x}$ : máximo valor del bien expuesto, es decir, el valor de la cosecha con el 100% del rendimiento.

### 9.6.1. Índice de peligro.

Para la formulación del índice de peligro, el punto de partida es la identificación del cultivo a analizar, una vez definido, se recopiló información sobre las fechas de siembra, la fenología del cultivo y la velocidad máxima tolerable, como se muestra en la siguiente figura:

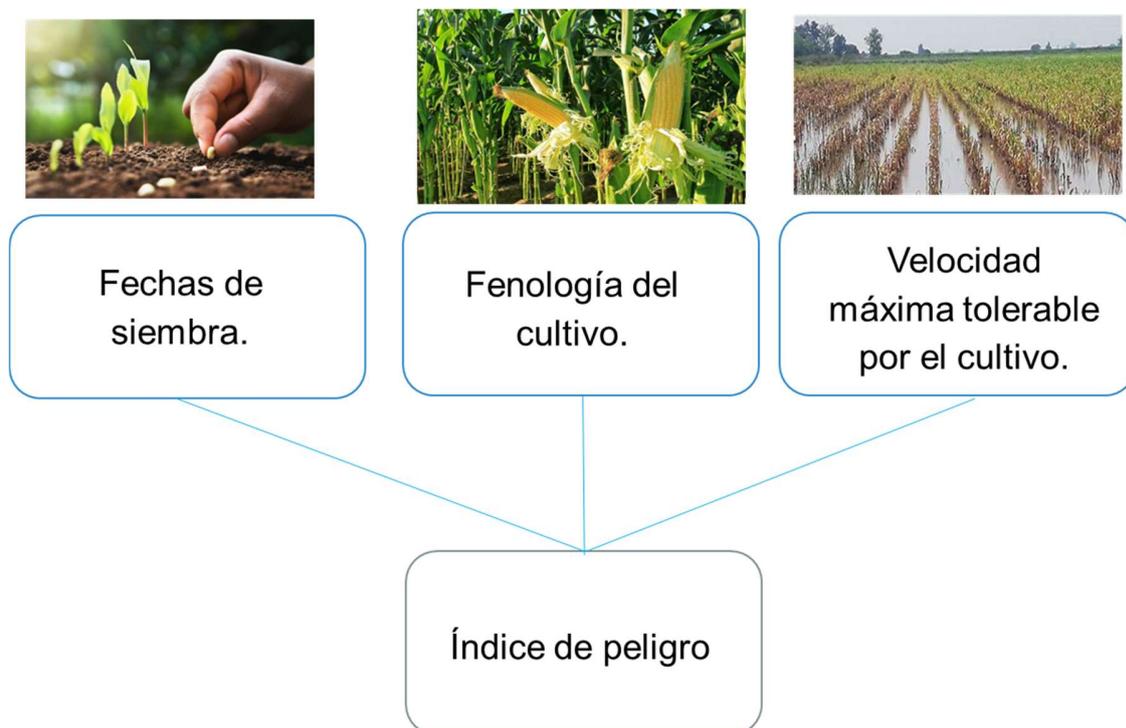


Figura 9.41. Construcción del índice de peligro. Fuente: elaboración propia.

### 9.6.2. Índice de vulnerabilidad.

Para la generación del índice de vulnerabilidad, se consideró la profundidad de la inundación y la fenología de la planta, en base a estos dos factores se realizan las combinaciones de vulnerabilidad para la obtención de las funciones de vulnerabilidad, como se muestra en la siguiente figura:

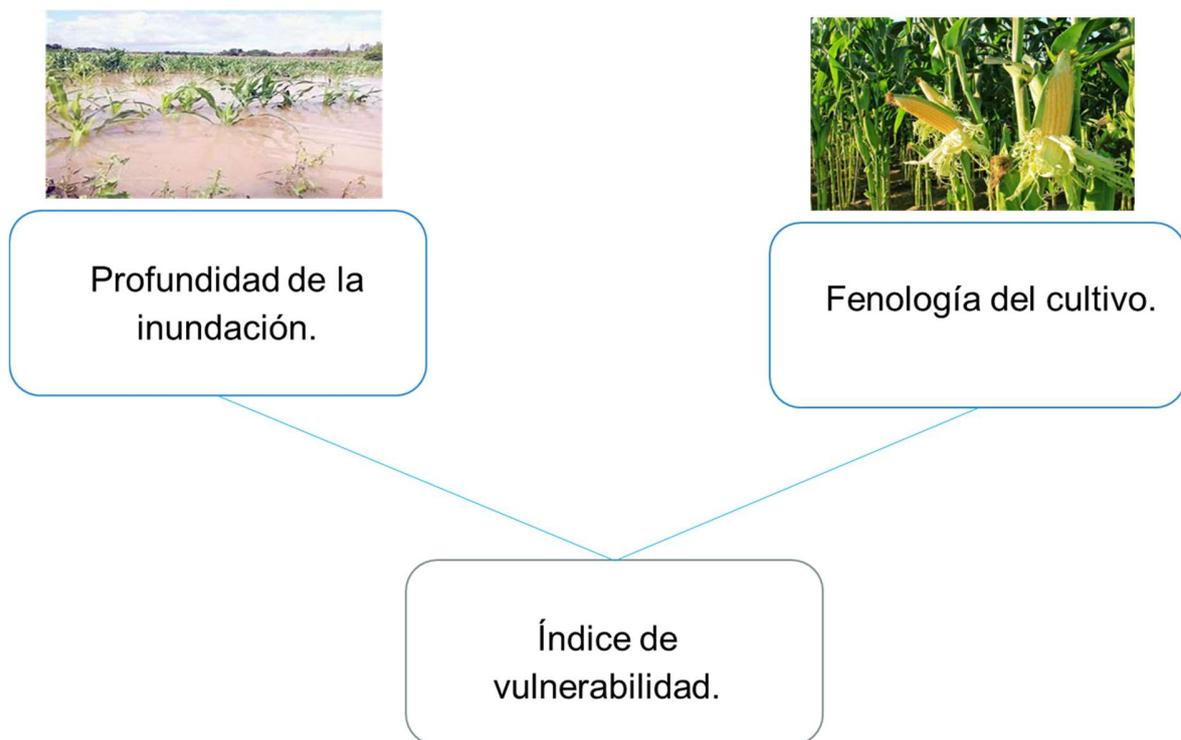


Figura 9.42. Construcción del índice de vulnerabilidad. Fuente: elaboración propia.

### 9.6.3. Valor de exposición.

Para el cálculo del valor de exposición se consideró la duración de la inundación y en consecuencia, cómo afecta el rendimiento del cultivo, es importante tener definidas las áreas de afectación de la mancha de inundación conforme a la clasificación del peligro para obtener el valor de las pérdidas económicas, como se muestra en la siguiente figura:

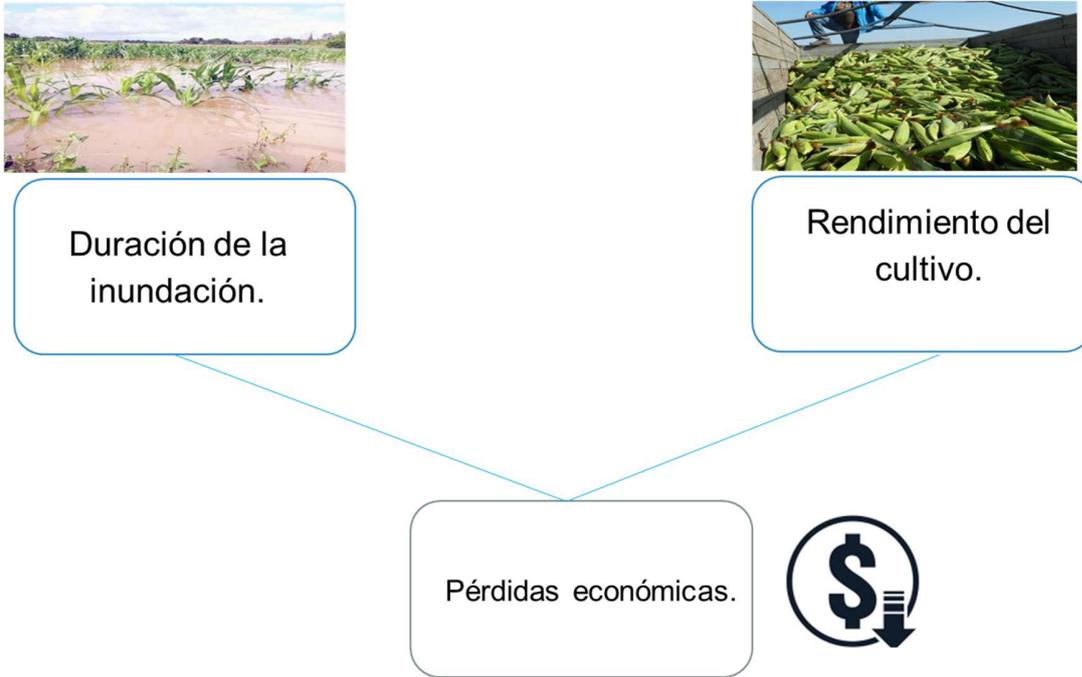


Figura 9.43. Construcción del cálculo del valor de exposición. Fuente: elaboración propia.

## 10. RESULTADOS.

Los resultados que se presentan consisten en la caracterización de la cuenca del río Metztitlán, la calibración del modelo hidrológico, las manchas de inundación de diferente periodo de retorno y los resultados del modelo hidráulico calibrado y la formulación del índice de riesgo.

### 10.1. Caracterización de la cuenca del río Metztitlán.

Como resultado de la caracterización de la cuenca, a continuación, se presenta un cuadro resumen con los parámetros de caracterización asociados a la hidrografía, a la cuenca y al relieve.

Cuadro 10.1. Características morfométricas, fisiográficas e hidrográficas de la cuenca del río Metztitlán.

Características	Parámetros	Valor
Parámetros asociados a la hidrografía	Longitud del cauce principal:	110.963 km
	Densidad de corriente:	0.6332 cauces/km <sup>2</sup>
	Densidad de drenaje:	0.5883/km
	Orden de corriente:	5 (adim)
Parámetros asociados a la cuenca	Área:	2,937.0286 km <sup>2</sup>
	Perímetro:	402.0304 km
	Longitud de la cuenca:	172.247 km
	Factor de forma.	0.1 adim)
Parámetros asociados al relieve	Pendiente del cauce principal:	0.0121
	Tiempo de concentración:	2731.023 (min)
	Tiempo de retraso:	1638.614 (min)

## 10.2. Calibración del modelo hidrológico.

La primera simulación de del modelo hidrológico, dio como resultado el siguiente hidrograma para un periodo de retorno de 2 años, los resultados de la simulación en la salida 36, correspondiente a la estación hidrométrica 26042 Venados.

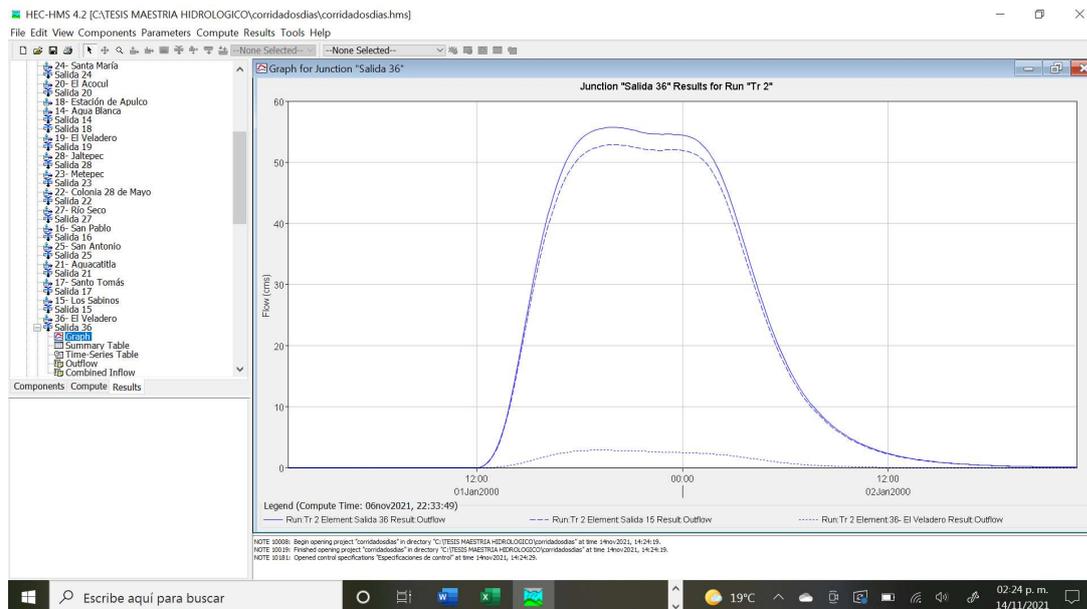


Figura 10.1. Simulación en la salida 36, correspondiente a la estación hidrométrica Venados, TR 2 años.

El pico del hidrograma que se obtuvo de la simulación no se parece al pico observado, para que se parecieran, se realizó el proceso de calibración de manera manual, modificando el parámetro de número de curva, a continuación, se muestra el número de curva calibrado.

Cuadro 10.2. Número de curva ponderada calibrada para cada subcuenca.

Subcuenca	Nombre de la subcuenca	Área en km <sup>2</sup>	NC ponderada inicial	NC ponderada calibrada
1	San Pedro	78.46	83.3	67.47
2	Hualula	75.5	83.15	67.35
3	San Cristóbal	31.41	82.77	67.04
4	Metztitlán	49.02	83.85	67.92
5	Jilotla	78.22	81.97	66.39
6	Jialipa	55.91	82.01	66.43
7	Zacuapitán	142.99	80.1	64.89

<b>Subcuenca</b>	<b>Nombre de la subcuenca</b>	<b>Área en km<sup>2</sup></b>	<b>NC ponderada inicial</b>	<b>NC ponderada calibrada</b>
8	La Paila	20.84	85.57	69.31
9	Atzolcintla	62.96	84.6	68.53
10	Atecoxco	93.03	80.04	64.83
11	Milpillas	111.04	83.05	67.27
12	Palo Bendito	62.67	76.08	61.63
13	Las Blancas	63.16	74.85	60.63
14	Agua Blanca	78.79	77.6	62.86
15	Los Sabinos	141.52	82.59	66.90
16	San Pablo	20.89	81.9	66.34
17	Santo Tomás	127.36	78.87	63.89
18	Estación de Apulco	127.39	80.57	65.26
19	El Veladero	46.28	82.2	66.58
20	El Acocul	32.27	81.89	66.33
21	Aguacatitla	51.79	79.87	64.69
22	Colonia 28 de Mayo	33.94	81.73	66.20
23	Metepéc	30.64	80.24	64.99
24	Santa María	114.16	77.97	63.16
25	San Antonio	138.65	78.46	63.55
26	Napateco	105.29	77.11	62.46
27	Río Seco	156	81.56	66.07
28	Jaltepec	99.74	76.84	62.24
29	Cuauhtepéc	78.98	78.66	63.71
30	Tulancingo	35.03	75.49	61.15
31	Javier Rojo Gómez	56.27	70.9	57.42
32	Santa Elena	129.21	75	60.75
33	Ahuehuetitla	149.05	75.81	61.41
34	Almoloya	157.58	77.74	62.97
35	Santa Mónica	32.39	83.33	67.49
36	El Veladero	41.35	85.26	69.06
37	Venados	4.97	86.04	69.69
38	El Carrizal	22.26	85.09	68.92

La calibración del modelo hidrológico se realizó con los gastos máximos instantáneos extrapolados con la FDP para diferentes periodos de retorno de la estación hidrométrica 26042 Venados y los gastos máximos resultado de la simulación para diferentes periodos de retorno en la salida 36 que corresponde a la ubicación de la estación hidrométrica, debido a que al trabajar con periodos de retorno no están asociados a un evento específico, a continuación, se presentan

los gastos máximos obtenidos de la simulación en el modelo hidrológico para diferentes periodos de retorno.

Con la obtención de los gastos máximos simulados, se procede a concentrar en un cuadro los gastos observados en la estación hidrométrica 26042 Venados y los simulados para diferentes periodos de retorno, que se presenta a continuación:

Cuadro 10.3. Gastos observados vs Gastos simulados.

Tr	Gastos (m <sup>3</sup> /s)	
	Observados	Simulados
2	116.51	55.70
5	245.82	372.80
10	709.03	726.40
20	1272.61	1063.60
50	1916.55	1557.10
100	2378.03	1980.30
500	3422.97	3161.20
1000	3868.95	3765.60

Para calibrar el modelo se realizaron pruebas de bondad de ajuste entre los gastos observados y simulados, utilizando las pruebas: coeficiente de determinación  $r^2$ , coeficiente de Nash-Sutcliffe, a los datos se les aplico la prueba de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk y el coeficiente de correlación de Pearson.

#### 10.2.1. Coeficiente $r^2$ .

Realizando la comparación de los datos de gastos observados vs gastos simulados obtenemos un  $r^2 = 0.986$ , el cuál nos dice que tenemos un buen ajuste. La comparación fue realizada con el programa Excel, el eje X representa los gastos observados y el eje Y representa los gastos simulados.

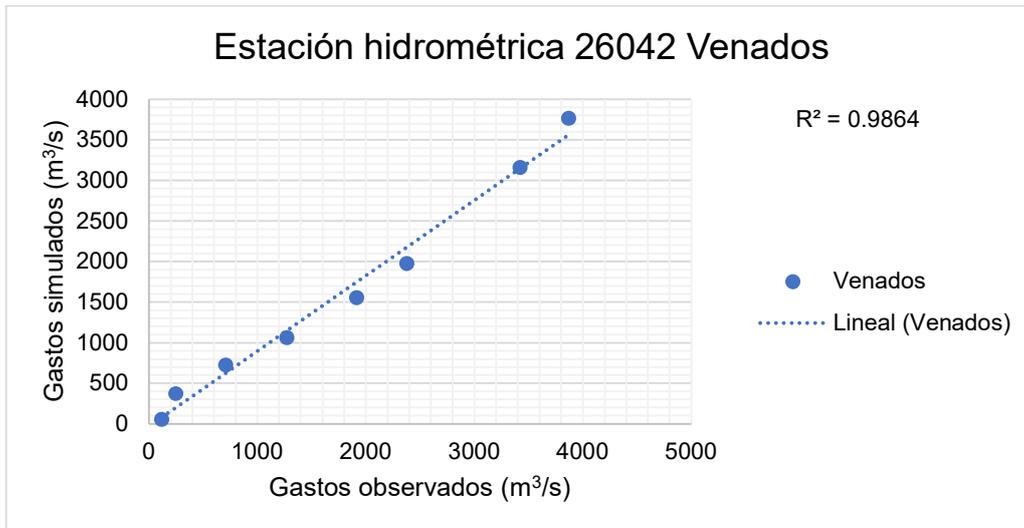


Figura 10.2. Coeficiente  $r^2$  de los gastos observados vs gastos simulados.

### 10.2.2. Coeficiente de Nash-Sutcliffe.

El coeficiente de Nash-Sutcliffe obtenido es de 0.969, de acuerdo a los valores de la tabla siguiente, el modelo es clasificado como excelente.

Cuadro 10.4. Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe.

<b>E</b>	<b>Ajuste</b>
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

### 10.2.3. Prueba de normalidad.

Como el número de datos es menor a 50, usamos la prueba de Shapiro-Wilk, el cuál para gastos observados; el valor es de 0.931 y para gastos simulados el valor es de 0.932, lo que indica que los resultados son normales, lo que significa que las variables están relacionadas, por lo tanto, podemos usar el coeficiente de correlación de Pearson.

#### 10.2.4. Coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación de Pearson obtenido es de 0.933 lo que indica que la relación entre los gastos observados y simulados es cercana a 1, por lo que se considera que el modelo tiene cierta tendencia lineal.

En resumen:

Cuadro 10.5. Resumen de las pruebas de bondad y ajuste.

<b>Prueba</b>	<b>Resultado</b>
Coeficiente $r^2$	0.986
Coeficiente de Nash-Sutcliffe.	0.969
Prueba de normalidad.	0.931
Coeficiente de correlación de Pearson.	0.933

Con las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, se logró reproducir el proceso lluvia-escorrentamiento de la cuenca y los gastos resultado del modelo hidrológico, son válidos para ser introducidos como gastos de entrada al modelo hidráulico.

#### 10.3. Calibración del modelo hidráulico.

El proceso de calibración se realizó con la comparación de áreas de manchas de inundación para el evento del 5 de octubre de 1999 entre los resultados del modelo hidráulico Iber e imágenes satelitales obtenidas del satélite Landsat 5 con fecha del 21 de octubre de 1999 de la página de Earth Explorer:

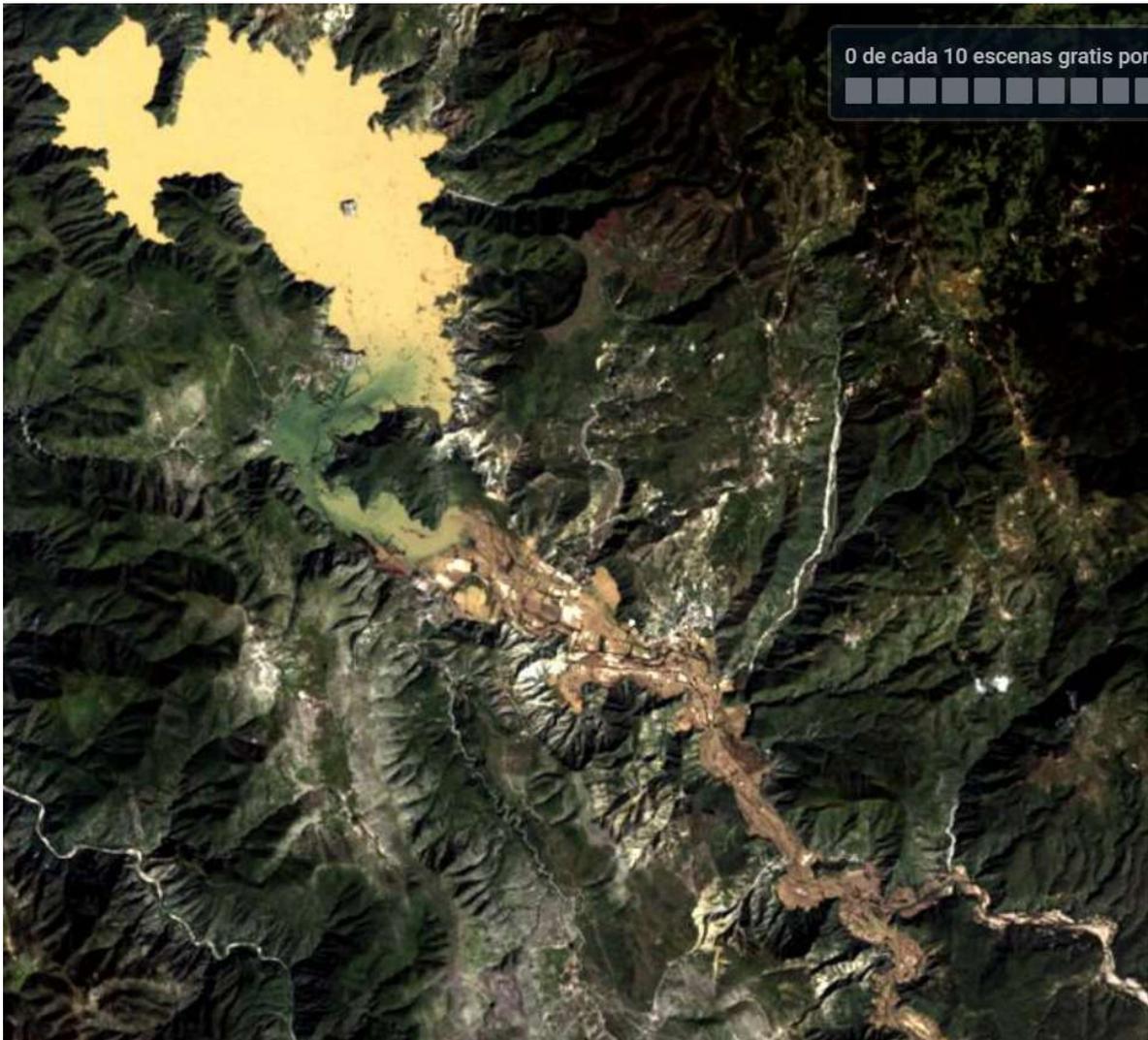


Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Figura 10.3. Imagen satelital Landsat 5 del 21 de octubre de 1999.

Sobre la imagen se trazó el contorno de la mancha de inundación para obtener el área de inundación en kilómetros cuadrados.

También se obtuvo la visualización de una imagen de la página de LandViewer del EOS (Earth Observing System) en donde fue posible trazar la envolvente de inundación y exportar el polígono en formato \*.shp.



Fuente: [https://eos.com/landviewer/?lat=20.53036&lng=-98.75633&z=11&id=LT05\\_L1TP\\_026046\\_19991021\\_20200907\\_02\\_T1&b=Red,Green,Blue&anti](https://eos.com/landviewer/?lat=20.53036&lng=-98.75633&z=11&id=LT05_L1TP_026046_19991021_20200907_02_T1&b=Red,Green,Blue&anti).

Figura 10.4. Imagen de solo visualización de fecha 21 de octubre de 1999.

Se realizó la corrida en el programa Iber versión 2.5. para el evento del 5 de octubre de 1999, los hidrogramas de entrada se obtuvieron del modelo hidrológico, a continuación, se presenta el hidrograma de entrada para la estación hidrométrica 26042 Venados, los hidrogramas de las entradas restantes se presentan en el anexo 2.

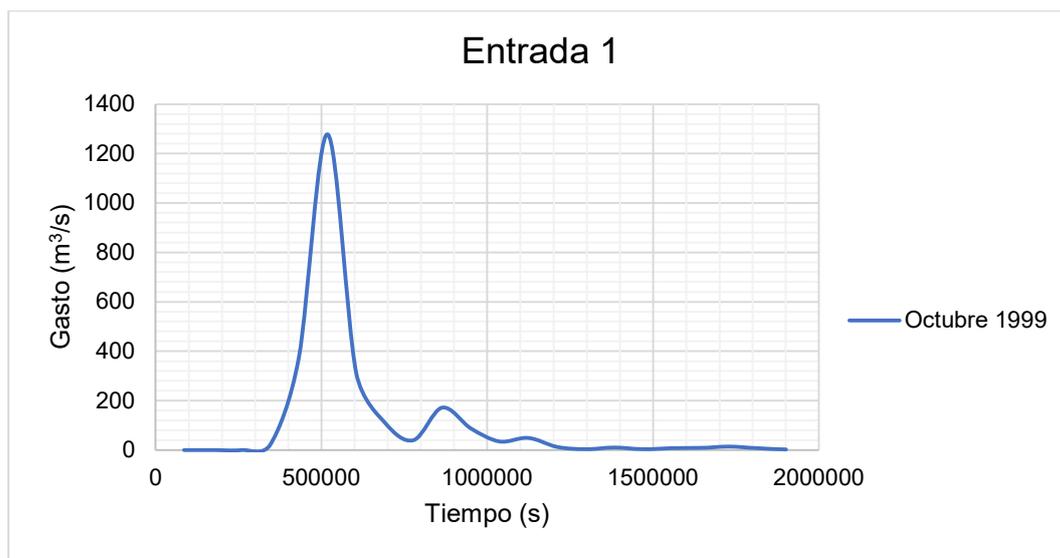


Figura 10.5. Hidrograma de entrada para la estación hidrométrica 26042 Venados. La mancha obtenida fue procesada en ArcGis 10.4.1. para la obtención del área.

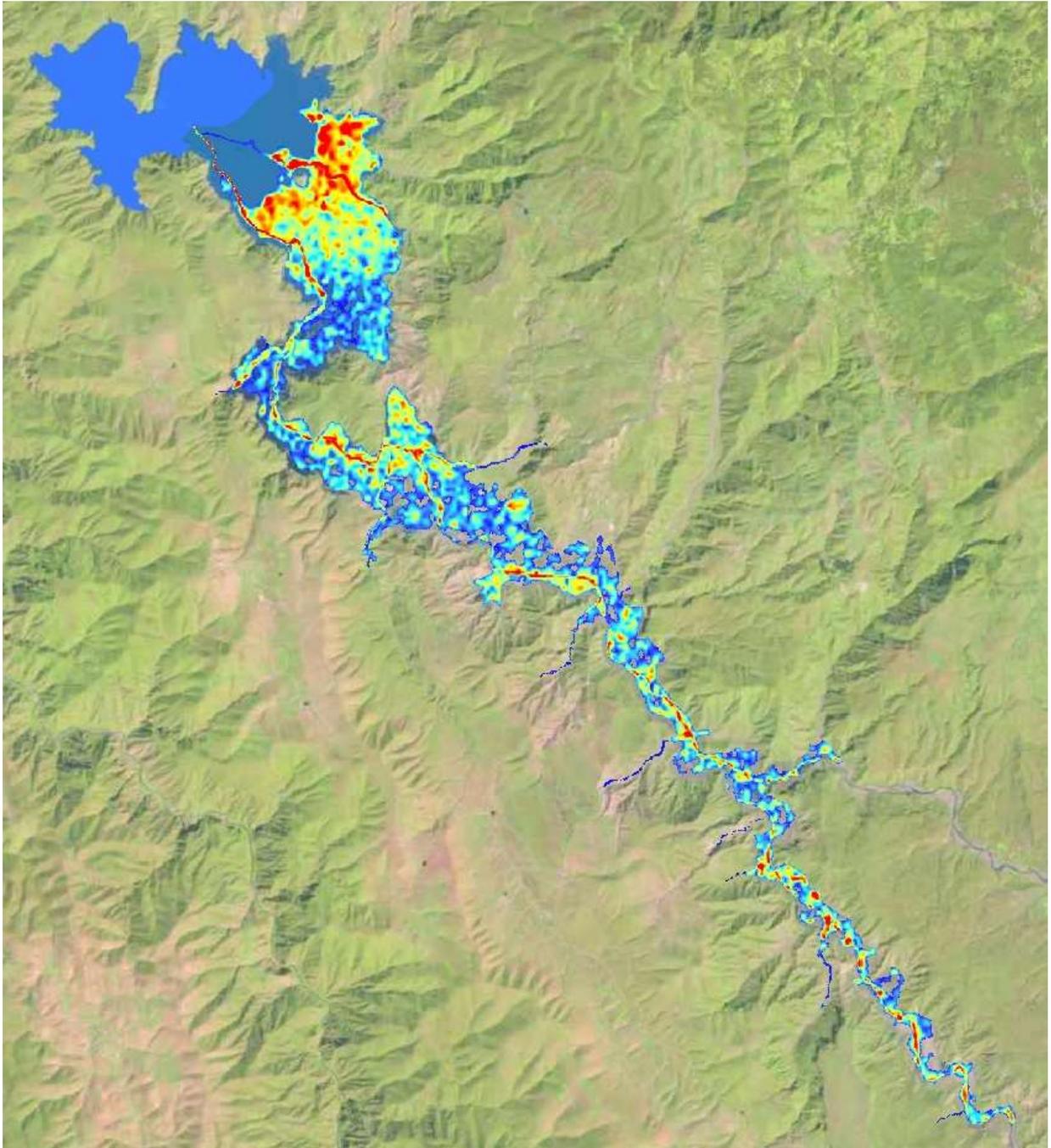


Figura 10.6. Resultado del modelo hidráulico en la imagen Landsat 5.

A continuación, se presenta el área de la mancha obtenidas en cada imagen de satélite y el modelo hidráulico Iber y el error porcentual entre cada una:

Cuadro 10.6. Error porcentual entre las áreas del modelo Iber e imagen Landsat.

	<b>Imagen Landsat 5</b>	<b>Resultados Iber</b>
Área (km <sup>2</sup> )	58.488	48.234
Error (%)		17.53%

Cuadro 10.7. Error porcentual entre las áreas del modelo Iber e imagen de solo visualización.

	<b>Imagen EOS LandViewer</b>	<b>Resultados Iber</b>
Área (km <sup>2</sup> )	57.694	48.234
Error (%)		16.40%

El porcentaje de confiabilidad del modelo hidráulico para la obtención de las manchas de inundación es del 82.47%, por lo que se aceptan los resultados obtenidos en el evento del 5 de octubre de 1999 y con ellos se toma como válido el modelo hidráulico y se corrieron los demás escenarios a los Tr de 2, 5, 10, 20 y 50.

#### **10.4. Riesgo en el D.R. 008 Metztlán.**

El riesgo será calculado como (9.11):

$$Riesgo (R) = CPV$$

Es decir:

$$Riesgo (R) = Peligro \times Vulnerabilidad \times Valor de exposición$$

El cálculo se hará para un escenario particular, es decir para periodos de retorno definidos, los periodos de retorno a analizar en el presente trabajo son: 2, 5, 10, 20 y 50 años.

$$Riesgo (R) = CP_{Tr}V_{Tr} \quad (9.16)$$

El riesgo está dado en términos monetarios.

Para explicar la metodología desarrollada, solo se presentará el cálculo del riesgo para un Tr de 20 años debido a que es el periodo de retorno al que se puede asociar el evento del 5 de octubre de 1999 con que fue calibrado el modelo hidráulico, el análisis de riesgo para los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 50 años se presenta en los anexos 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

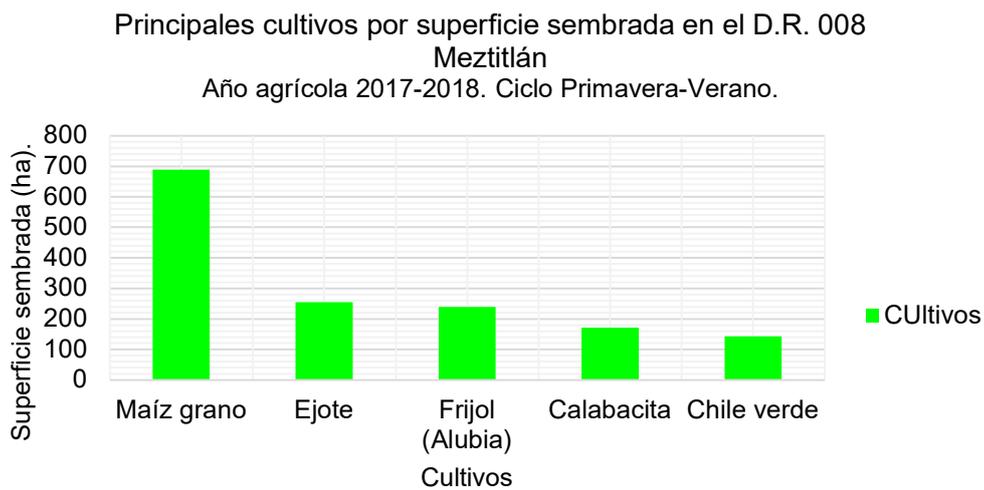
##### **10.4.1. Principales cultivos.**

Se realizó un análisis de los principales cultivos por superficie sembrada en el distrito de riego en cada ciclo productivo, el ciclo primavera-verano comienza el 01 de marzo y termina el 30 de septiembre y el ciclo otoño-invierno comienza el 01 de octubre y termina el 28 de febrero.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, año agrícola 2018.

Figura 10.7. Superficie sembrada en el D.R. 008 Metztlitlán, ciclo otoño-invierno.



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, año agrícola 2018.

Figura 10.8. Superficie sembrada en el D.R. 008 Metztlitlán, ciclo primavera-verano.

De acuerdo, a lo anterior, el principal cultivo sembrado en el distrito de riego es el maíz. Se siembran dos tipos de maíz, el maíz grano y el maíz elote (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, 2017).

El siguiente cuadro muestra la duración del ciclo productivo de cada tipo de maíz.

Cuadro 10.8. Duración del ciclo productivo del cultivo de maíz de grano y elote en el D.R. 008 Metztitlán.

<b>Maíz</b>	<b>Fecha de siembra</b>	<b>Cosecha</b>	<b>Duración ciclo</b>
Grano	15 de enero al 28 de febrero	Junio	4 meses 14% de humedad en grano
Elote	15 de junio al 30 de julio	Octubre	3 meses llenado de grano, lechoso

Fuente: INIFAP (2017).

El maíz sembrado en el ciclo productivo otoño-invierno por las fechas de siembra, se cosecha antes de las fechas con mayor precipitación, de esta manera el ciclo productivo afectado es el de primavera-verano, conocer las fechas de siembra del cultivo nos permite conocer la etapa fenológica en la que podría ser afectado por una probable inundación.

#### **10.4.2. Fenología del cultivo de maíz.**

La planta es de porte robusto con tallo simple, erecto, puede alcanzar 4 m de altura, no tiene ramificaciones ni entrenudos pero si una médula esponjosa. Presenta inflorescencia masculina y femenina separada dentro de la misma planta; la primera tiene una panícula (conocida como espigón o penacho) de coloración amarilla que posee una cantidad muy elevada de polen, en el orden de 20 a 25 millones de granos; en cada florecilla que compone la panícula se presentan tres estambres donde se desarrolla el polen. La inflorescencia femenina tiene un contenido menor en granos de polen (alrededor de 800 a 1000 granos) que se forman en unas estructuras vegetativas llamadas espádices, las cuales se disponen de forma lateral (SAGARPA, 2017).

La siguiente imagen muestra las etapas vegetativa y reproductiva del cultivo de maíz.

								
Fases	Fase vegetativa					Fase reproductiva		
Días a inicio fase después de la siembra	0	4-5	10-15	25-30	30-55	55-65	65-90	90-110
Etapas	Siembra	Germinación Emergencia	Establecimiento	Diferenciación de órganos	Alargamiento entre nudos	Floración, polinización y fecundación	Llenado grano	Madurez fisiológica
Descripción	La semilla posee 5 hojas preformadas y una raíz principal llamada radícula	Germinación: la radícula atraviesa el grano. Emergencia: el colióptilo emerge del suelo	En el estado de 2-3 hojas, la planta comienza a fotosintetizar y ya no depende de las reservas del grano.	Cuando la planta tiene de 6-8 hojas desarrolladas, la yema apical se transforma en inflorescencia masculina (panícula), las yemas axilares se transforman en inflorescencia femenina (espiga engrosada)	Los entrenudos del tallo se alargan rápidamente, se desarrolla la panícula y la espiga.	Masculina: la panícula se hace visible y las anteras comienzan a liberar polen. Femenina: aparición de estigmas, ocurre la polinización y fecundación de óvulos.	Los granos acumulan almidón, proteínas y lípidos pasando por un estado lechoso, pastoso y duro de acuerdo a su contenido de agua y materia seca.	Los granos finalizaron su llenado. Un punto negro aparece en su base en el sitio de unión con la tusa. La humedad del grano es generalmente inferior al 40%

Fuente: Vega-Serratos (2017).

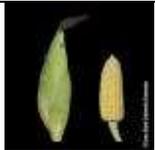
Figura 10.9. Fenología del cultivo de maíz.

### A. Etapas de crecimiento.

Las etapas de crecimiento del maíz se clasifican como vegetativas (V) o reproductivas (R). El método del cuello de la hoja es un método que se utiliza para organizar el maíz mientras se encuentra en etapas vegetativas. Con este método, las etapas vegetativas se basan en el número de cuellos de hojas visibles. La etapa comienza en la emergencia (VE), y cada nueva hoja con un cuello de hoja completamente desarrollado se denomina etapa V (n). El estado vegetativo de las hojas de las plantas de maíz termina cuando el maíz desarrolla una espiga (VT); una vez que la planta tiene estigmas visibles fuera de las cáscaras, ha alcanzado la primera etapa reproductiva (R1) (Licht, 2022).

Cuadro 10.9. Etapas de crecimiento del cultivo de maíz.

Etapa vegetativa		
	VE	Emergencia: el brote (coleóptilo) ha emergido del suelo.

<b>Etapa vegetativa</b>		
	V1	Primera hoja: la hoja inferior tiene un cuello visible; esta hoja tiene una punta redondeada.
	V2	Segunda hoja: dos de las hojas más bajas tienen un collar visible, la segunda hoja y las siguientes tienen puntas puntiagudas.
	V(n)	Hoja n: collares de hoja "n" presentes, la mayoría de los híbridos de maíz producen entre 18 y 21 hojas.
	VT (Vermont)	Borla: se ven las ramas más bajas de la borla.
<b>Etapa reproductiva</b>		
	R1	Seda: una o más sedas se extienden fuera de las hojas de la cáscara.
	R2	Blíster: los granos se asemejan a "ampollas" con líquido transparente.
	R3	Leche: granos llenos de líquido "lechoso".
	R4	Masa: dentro de los granos hay una consistencia "masosa".
	R5	Abolladura: se forma una abolladura en el grano y la línea de leche avanzada hacia la punta del grano.
	R6	Madurez fisiológica: granos en la máxima acumulación de materia seca: se formará una "capa negra" en la base del grano (2-3 días después de la madurez fisiológica).

Fuente: Licht (2022).

### **B. Altura de la planta de maíz en relación a la etapa fenológica.**

De acuerdo con Salas (2018) la altura que alcanza la planta de maíz conforme a los días de desarrollo son las siguientes:

Cuadro 10.10. Altura de la planta de maíz conforme a los días de desarrollo.

<b>Días</b>	<b>Altura (m)</b>
20	0.5
30	1.0
40	1.5
60	2.0
79	2.5

Fuente: Salas (2018).

### **Cultivo de maíz en el D.R. 008 Metztlán.**

La altura total de la planta de maíz que alcanza en la zona es de 2.30 metros, la altura de mazorca es de 1.20 m (Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense, 2016).

#### **10.4.3. Índice de peligro.**

El índice de riesgo será construido para el cultivo de maíz, debido a que, por superficie sembrada, es el principal cultivo del D.R. 008 en los dos ciclos productivos, primavera-verano y otoño invierno.

El D.R. 008 reporta producción de dos tipos de maíz, grano y elote, la fecha de siembra del maíz de grano es del 15 de enero al 28 de febrero, considerando que el ciclo del maíz es de 4 meses debido a que al momento de la cosecha el grano debe tener un 14% de humedad, la cosecha se realiza en el mes de junio, la fecha de siembra del maíz elote es del 15 de junio al 30 de julio, el ciclo del cultivo es de 3 meses debido a que es cuando está en la fase llenado de grano y en un estado lechoso, la cosecha se realiza en el mes de octubre. De acuerdo con lo anterior, el maíz elote es afectado por las inundaciones por la fecha de ocurrencia de estas en los meses de septiembre y octubre.

De esta manera, se considera que la altura total de la planta de maíz que alcanza en la zona es de 2.30 m, la altura de mazorca es de 1.20 m (Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense, 2016) y la velocidad máxima permisible es de 0.25 m/s de acuerdo con Citeau (2003), con las consideraciones anteriores, se propone los siguientes criterios de peligro para el cultivo de maíz elote.

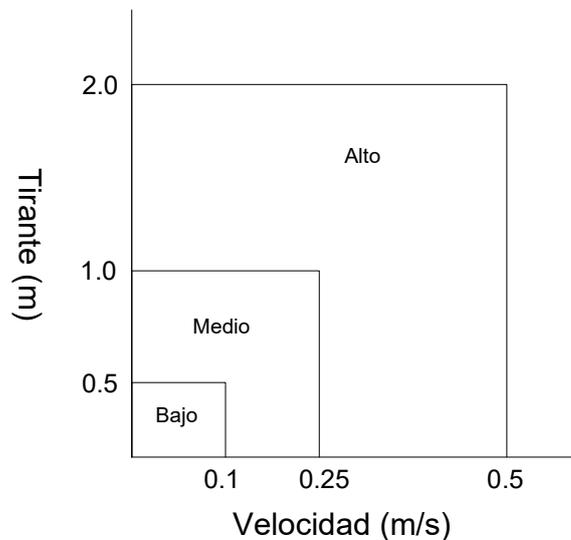


Figura 10.10. Criterios de peligrosidad propuesto para esta metodología.

De acuerdo con la figura 10.10, el producto de tirante por velocidad nos dará la clasificación de la peligrosidad, lo cual se presenta en el cuadro 10.11.

Cuadro 10.11. Determinación del índice de peligro.

Índice de peligro		
Tirante (m)	Velocidad (m/s)	Tirante x Velocidad
0.50	0.10	0.05
1.00	0.25	0.25
2.00	0.50	1.00

La tipificación para el índice de peligro es adimensional y va de 0 a 1, representado de la siguiente manera en el cuadro 10.12, donde se presenta la clasificación del índice de peligro.

Cuadro 10.12. Clasificación del índice de peligro.

Índice de peligro	
Peligrosidad	Tipificación (adim)
Baja	0.05
Media	0.25
Alta	1.00

Con los valores de peligro tipificado se generó el mapa de peligro para un Tr de 20 años, los mapas para los Tr de 2, 5, 10 y 50 años se encuentran en el anexo 3.

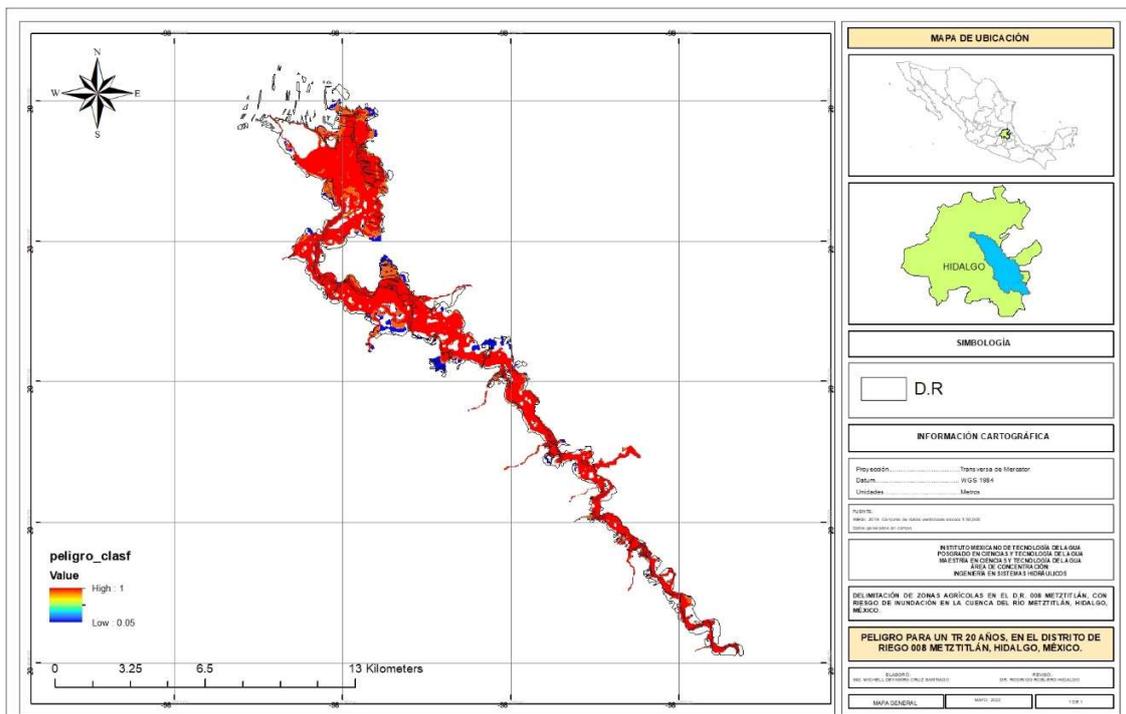


Figura 10.11. Mapa de peligro para un Tr de 20 años.

La superficie para cada clasificación de peligro de acuerdo con el periodo de retorno es la siguiente:

Cuadro 10.13. Área inundada (ha) por Tr por clasificación del peligro.

Peligro	Área inundada (ha) por Tr				
	2	5	10	20	50
<b>Bajo</b>	316.13	158.78	186.60	216.59	197.07
<b>Medio</b>	291.51	213.83	314.57	455.02	477.18
<b>Alto</b>	491.21	1433.51	1562.02	2692.25	3384.15
<b>Total</b>	1098.85	1806.11	2063.19	3363.85	4058.39

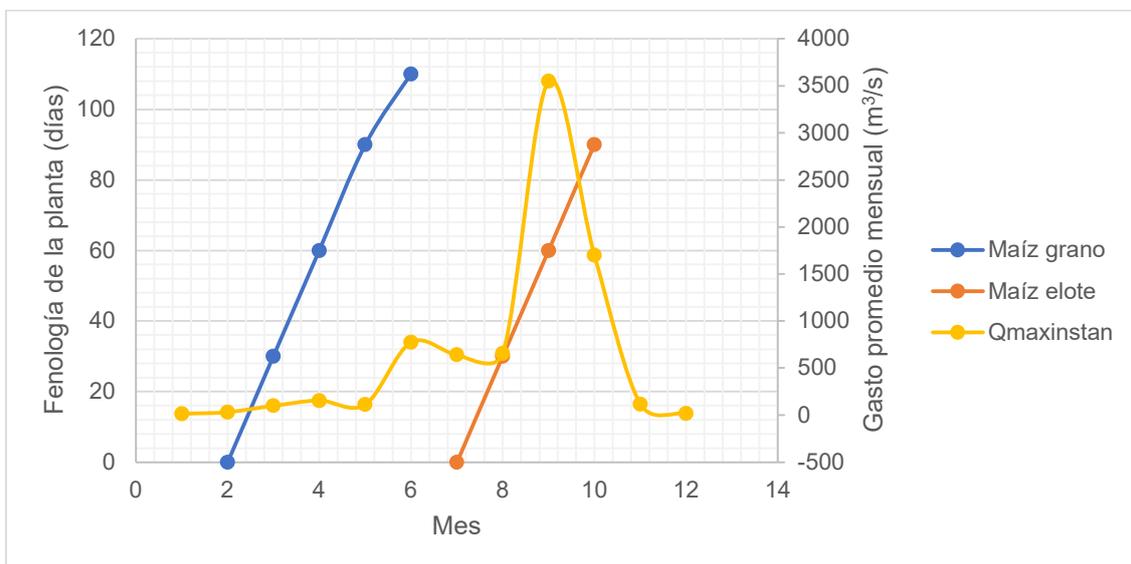
#### 10.4.4. Índice de vulnerabilidad.

El primer factor por considerar para la generación del índice de vulnerabilidad es la profundidad de la inundación, para ello, se retoman los valores de altura promedio que alcanzan las plantas de maíz en la zona y en base a ello se proponen valores de profundidad de inundación que pueden dejar vulnerable a la planta.

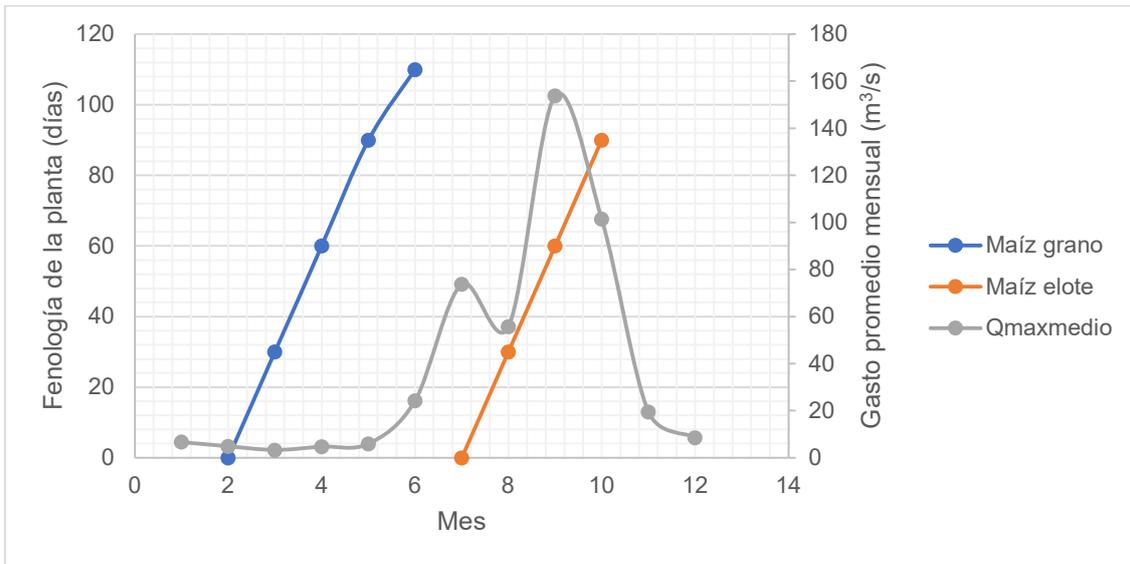
Cuadro 10.14. Profundidad de la inundación propuesta para generar el índice de vulnerabilidad.

Profundidad de la inundación (m)
0.5
1.0
1.5
2.0

El segundo factor es la fenología del cultivo, para ello se realizó un cruce entre la fenología del cultivo y los gastos máximos medios e instantáneos mensuales, en base a las gráficas se determinaron las etapas fenológicas susceptibles a ser afectadas por las inundaciones.



a) Fenología del cultivo (días) y gasto máximo instantáneo mensual (m³/s).



b) Fenología del cultivo (días) y gasto máximo y medio mensual ( $m^3/s$ ).

Figura 10.12. Fenología del cultivo vs gastos máximos instantáneos y medios mensuales.

De acuerdo con la gráfica, las etapas fenológicas que podrían ser afectadas por una inundación son alargamiento entre nudos, floración, polinización y fecundación y llenado de grano, una vez definidas las etapas, es importante conocer los días transcurridos desde la siembra hasta la etapa fenológica susceptible de ser afectada, para ello:

Cuadro 10.15. Días de desarrollo por etapa fenológica.

<b>Etapas fenológicas</b>	<b>Días</b>
Alargamiento entre nudos	30-55
Floración, polinización y fecundación	55-60
Llenado de grano	65-90

Los días transcurridos son importantes para conocer la altura de la planta de maíz de acuerdo con los días de desarrollo, los siguientes valores de altura en relación a los días transcurridos desde la siembra, fueron tomados de Salas (2018).

Cuadro 10.16. Altura de la planta conforme a la etapa fenológica.

<b>Días</b>	<b>Altura (m)</b>
20	0.5

Días	Altura (m)
30	1.0
40	1.5
60	2.0
79	2.5

La altura alcanzada por la planta de maíz conforme a los días de desarrollo fue utilizada para realizar las combinaciones de vulnerabilidad.

Para las combinaciones de vulnerabilidad de la planta de maíz, se consideraron las profundidades de inundación propuestas y las etapas fenológicas, a estas se les asignó una clave, que se presentan en los cuadros 10.17 y 10.18:

Cuadro 10.17. Clave por etapa fenológica.

Clave	Etapa fenológica
EF1	Alargamiento entre nudos
EF2	Floración, polinización y fecundación
EF3	Llenado de grano

Cuadro 10.18. Clave por profundidad propuesta.

Clave	Profundidad de la inundación (m)
P1	0.5
P2	1.0
P3	1.5
P4	2.0

Se realizaron las combinaciones de vulnerabilidad tomando en cuenta la altura alcanzada por la planta de maíz, en el cuadro 10.19 se presentan estas combinaciones, de tal manera que cada letra de dicho cuadro, B, M y A representan una clasificación de vulnerabilidad.

Cuadro 10.19. Combinaciones para determinar la vulnerabilidad.

Profundidad	Etapa fenológica		
	EF1	EF2	EF3
P1	M	B	B
P2	A	M	M
P3	A	A	A
P4	A	A	A

Una vez clasificada la vulnerabilidad, se realizó la tipificación con valores adimensionales que van de 0 a 1, presentados en el cuadro 10.20 y se construyeron las funciones de vulnerabilidad de acuerdo con la etapa fenológica en la que se encuentre la planta de maíz, que se presentan en los cuadros 10.21 y 10.22 y figuras 10.13 y 10.14.

Cuadro 10.20. Clasificación y tipificación de la vulnerabilidad.

<b>Vulnerabilidad</b>		<b>Tipificación</b>
B	Baja	0.25
M	Media	0.50
A	Alta	1.00

Cuadro 10.21. Tipificación de la función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 1.

<b>Función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 1</b>	
<b>Profundidad de la inundación (m)</b>	<b>Vulnerabilidad (adim)</b>
0.5	0.5
1.0	1.0
1.5	1.0
2.0	1.0

Gráficamente:

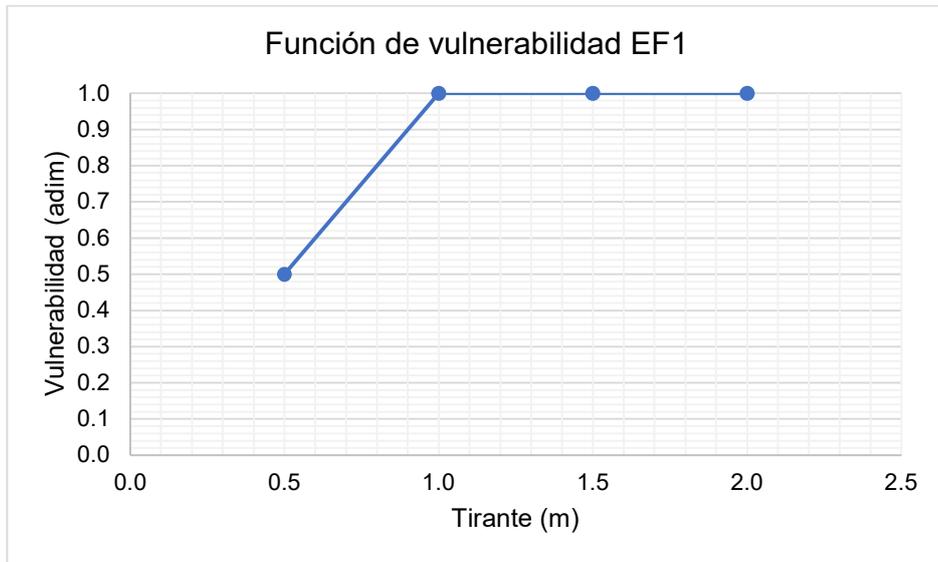


Figura 10.13. Gráfica de la función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 1.

Cuadro 10.22. Tipificación de la función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 2 y 3.

<b>Función de vulnerabilidad para la etapa fenológica 2 y 3</b>	
<b>Profundidad de la inundación (m)</b>	<b>Vulnerabilidad (adim)</b>
0.5	0.25
1.0	0.50
1.5	1.00
2.0	1.00

Gráficamente:



La superficie para cada clasificación de vulnerabilidad de acuerdo con el periodo de retorno es la siguiente:

Cuadro 10.23. Área inundada (ha) por Tr por clasificación de vulnerabilidad.

Vulnerabilidad	Área inundada (ha) por Tr				
	2	5	10	20	50
<b>Bajo</b>	50.12	158.78	160.16	136.68	345.47
<b>Medio</b>	49.54	213.83	226.46	199.79	185.50
<b>Alto</b>	999.19	1433.51	1676.56	3027.39	3527.43
<b>Total</b>	1098.85	1806.11	2063.19	3363.85	4058.39

#### 10.4.5. Valor de exposición.

La obtención del valor de exposición, se basó en la duración de la inundación, asociada con el daño que puede generar, para ello, lo primero fue recopilar información sobre el tiempo máximo de sumersión que resiste el cultivo, de acuerdo con Citeau (2003) el tiempo es de instantáneo a 1 día y como resultado de la combinación de factores, obtiene porcentajes de daños, para Baró-Suárez et al. (2007) si la planta de maíz tiene una altura superior a 30 cm la planta puede resistir más de seis días bajo los efectos de la humedad, si es menor a 30 cm la planta es más susceptible a los efectos de humedad y si la zona permanece inundada más de tres días, los efectos negativos son considerables.

Los porcentajes de afectación en el rendimiento del cultivo fueron propuestos adaptados de Citeau (2003) y Baró-Suárez et al. (2007).

Cuadro 10.24. Afectación del rendimiento del cultivo en relación a la duración de la inundación.

Duración (días)	Afectación en el rendimiento
Instantáneo a 1 día	10%
2 a 3	60%
mayor a 3	100%

Con el porcentaje de afectación en el rendimiento del cultivo, se calcularon las pérdidas económicas con la siguiente fórmula:

$$P\acute{e}rdidas\ econ\acute{o}micas = \acute{A}rea\ afectada \times Rendimiento \times Precio \quad (9.17)$$

Donde:

Área: el área está dada en hectáreas (ha).

Rendimiento: el rendimiento está dado en toneladas por hectárea (ton/ha).

Precio: el precio está dado en \$/ton.

Como el cálculo del riesgo se hizo para escenarios en particular, se analizó por periodos de retorno con la siguiente fórmula (9.16):

$$Riesgo\ (R) = CP_{Tr}V_{Tr}$$

Para el cálculo de las pérdidas económicas se tomarán los siguientes valores de referencia:

Cuadro 10.25. Valores de referencia de rendimiento y precio del maíz.

Rendimiento del maíz (ton/ha):	9.8
Precio (\$/ton):	\$6,000.00

El cálculo se hizo para un periodo de retorno de 20 años.

Primero se analizó la duración de la inundación, la cual fue de más de 2 días, este dato fue obtenido de la simulación con el modelo hidráulico Iber, dando como resultado una afectación en el rendimiento de 60%, se cuantificó el área afectada por la mancha de inundación de acuerdo con la clasificación del peligro para obtener las pérdidas económicas por área afectada.

Cuadro 10.26. Pérdidas económicas por clasificación del peligro.

Peligro	Área afectada (Ha)	Rendimiento (con afectación) (ton/ha)	Precio (\$/ton) x Rendimiento (ton/ha)	Valor económico de la cosecha con rendimiento afectado (Pérdidas económicas)	Pérdidas económicas totales (\$)
Bajo	216.59	3.92	23520.00	\$5,094,105.94	\$7,641,158.91

Peligro	Área afectada (Ha)	Rendimiento (con afectación) (ton/ha)	Precio (\$/ton) x Rendimiento (ton/ha)	Valor económico de la cosecha con rendimiento afectado (Pérdidas económicas)	Pérdidas económicas totales (\$)
Medio	455.02	3.92	23520.00	\$10,702,047.95	\$16,053,071.93
Alto	2692.25	3.92	23520.00	\$63,321,635.75	\$94,982,453.63

El mapa de exposición para un periodo de retorno de 20 años es el siguiente, los mapas para los Tr de 2, 5, 10 y 50 años se encuentran en el anexo 5.

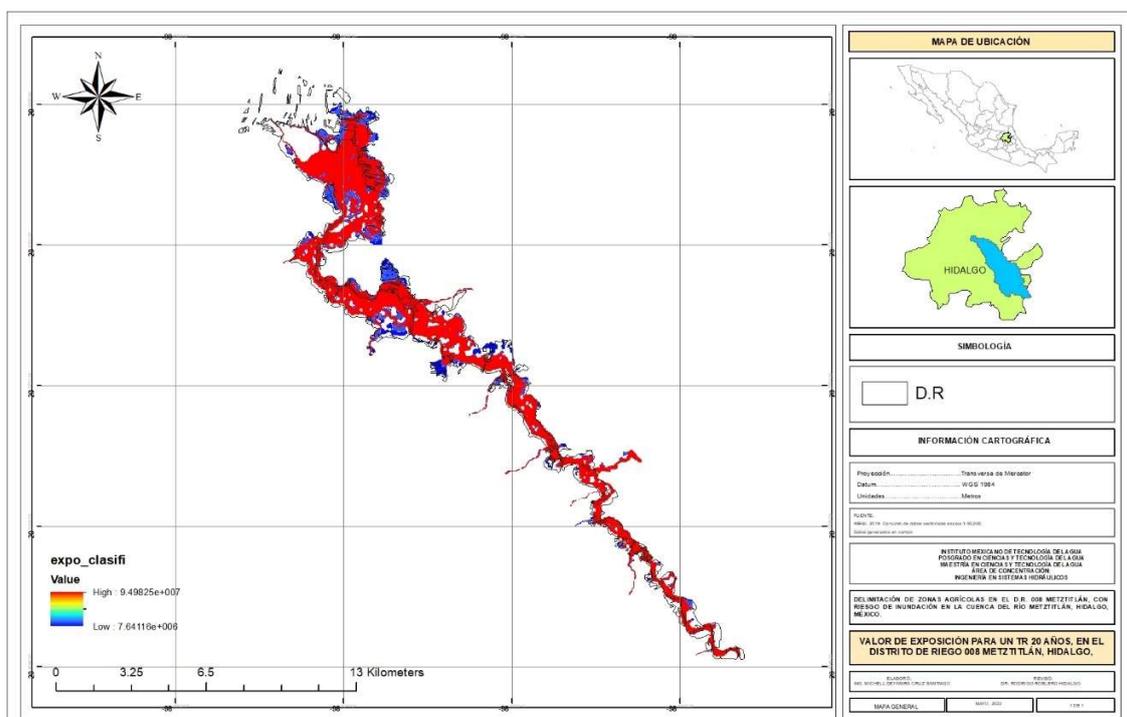


Figura 10.16. Mapa de exposición para un Tr de 20 años.

Valor de exposición para cada clasificación de peligro de acuerdo con el periodo de retorno es la siguiente:

Cuadro 10.27. Valor de exposición para cada clasificación de peligro por Tr.

Exposición	\$ por Tr				
	2	5	10	20	50
<b>Bajo</b>	\$11,153,111.92	\$5,601,710.38	\$6,583,151.28	\$7,641,158.91	\$6,952,666.67
<b>Medio</b>	\$10,284,448.06	\$7,543,857.27	\$11,097,912.09	\$16,053,071.93	\$16,834,789.62
<b>Alto</b>	\$17,329,945.91	\$50,574,138.69	\$55,108,166.64	\$94,982,453.63	\$119,392,649.54
<b>Total</b>	\$38,767,505.89	\$63,719,706.34	\$72,789,230.01	\$118,676,684.47	\$143,180,105.83

#### 10.4.6. Riesgo.

Con los datos de pérdidas calculados, se calculó el riesgo, para ello primero se hizo el cruce de peligro por vulnerabilidad con los valores de tipificación por cada clasificación.

Cuadro 10.28. Resultados de multiplicar peligro por vulnerabilidad.

Peligro	Vulnerabilidad		
	0.25	0.5	1.0
<b>0.05</b>	0.01	0.03	0.05
<b>0.25</b>	0.06	0.13	0.25
<b>1.0</b>	0.25	0.50	1.00

Y se generó la matriz donde se multiplicó el valor de exposición generado para cada clasificación del peligro por los coeficientes de peligro por vulnerabilidad:

Cuadro 10.29. Matriz del valor de exposición por los coeficientes de peligro por vulnerabilidad para un Tr de 20 años.

Valor de exposición	Peligro x Vulnerabilidad		
\$7,641,158.91	0.01	0.03	0.05
\$16,053,071.93	0.06	0.13	0.25
\$94,982,453.63	0.25	0.50	1.00

Se aplicó la fórmula para el cálculo del riesgo, es decir: multiplicar el valor de exposición por cada coeficiente obtenido del peligro por vulnerabilidad:

Cuadro 10.30. Cálculo del riesgo para un Tr de 20 años.

<b>Valor de exposición x Peligro x Vulnerabilidad</b>		
(\$7,641,158.91) (0.01)	(\$7,641,158.91) (0.03)	(\$7,641,158.91) (0.05)
(\$16,053,071.93) (0.06)	(\$16,053,071.93) (0.13)	(\$16,053,071.93) (0.25)
(\$94,982,453.63) (0.25)	(\$94,982,453.63) (0.50)	(\$94,982,453.63) (1.00)

Se obtuvo la matriz de riesgo.

Cuadro 10.31. Matriz de riesgo para un Tr de 20 años.

<b>Riesgo</b>		
\$ 95,514.49	\$ 191,028.97	\$ 382,057.95
\$ 1,003,317.00	\$ 2,006,633.99	\$ 4,013,267.98
\$ 23,745,613.41	\$ 47,491,226.81	\$ 94,982,453.63

Con los valores obtenidos se realizó la clasificación de riesgo y se obtuvo el mapa de riesgo para un Tr de 20 años:

Cuadro 10.32. Clasificación del riesgo para un Tr de 20 años.

<b>Clasificación</b>	<b>Riesgo</b>
Bajo	\$ 95,514.49 - \$1,003,317.00
Medio	\$1,003,317.00- \$23,745,613.41
Alto	\$23,745,613.41 - \$94,982,453.63

El mapa de riesgo para un periodo de retorno de 20 años es el siguiente, los mapas para los Tr de 2, 5, 10 y 50 años se encuentran en el anexo 6.

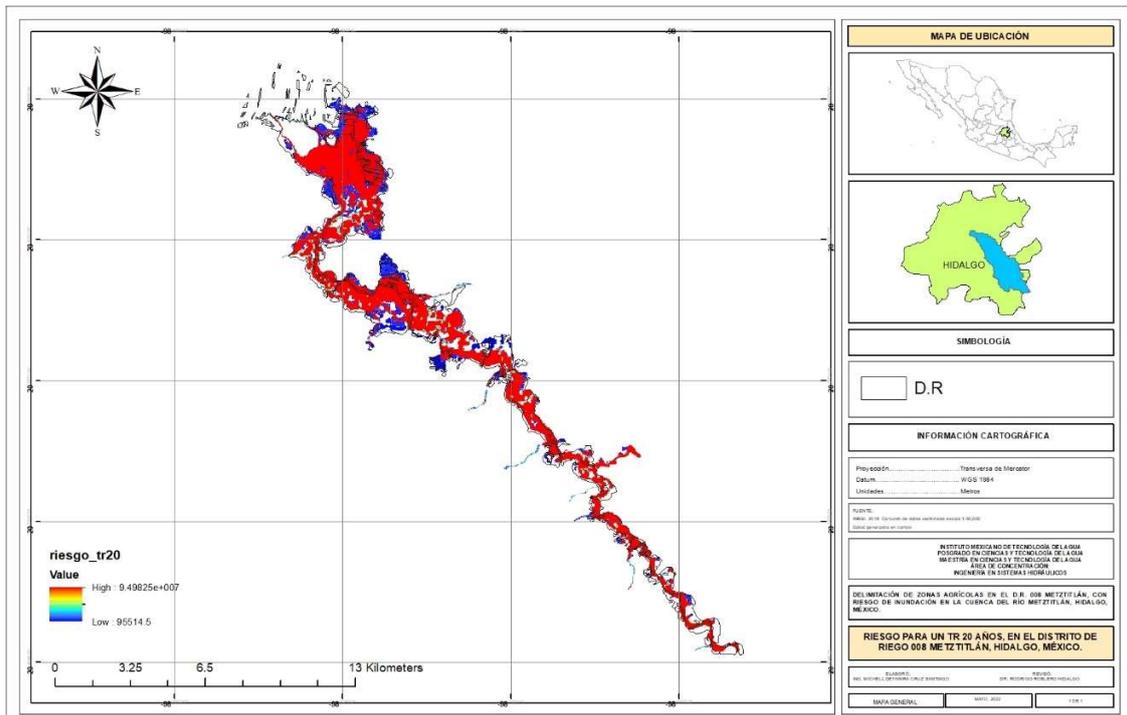


Figura 10.17. Mapa de riesgo para un Tr de 20 años.

Con los valores de riesgo obtenidos se realizó el cálculo del índice de riesgo con la fórmula definida previamente, obteniendo los siguientes coeficientes:

Cuadro 10.33. Índice de riesgo conforme a la matriz de riesgo para un Tr de 20 años.

Índice de Riesgo		
0.000	0.001	0.002
0.005	0.010	0.020
0.120	0.240	0.480

Con los valores obtenidos, se realizó la clasificación del índice de riesgo de la siguiente manera:

Cuadro 10.34. Índice de riesgo para un Tr de 20 años.

Clasificación	Índice de riesgo
Bajo	0.000-0.005
Medio	0.005-0.120
Alto	0.120-0.480

El mapa de índice de riesgo para el periodo de retorno de 20 años es el siguiente, los mapas para los Tr de 2, 5, 10 y 50 años se encuentran en el anexo 7.

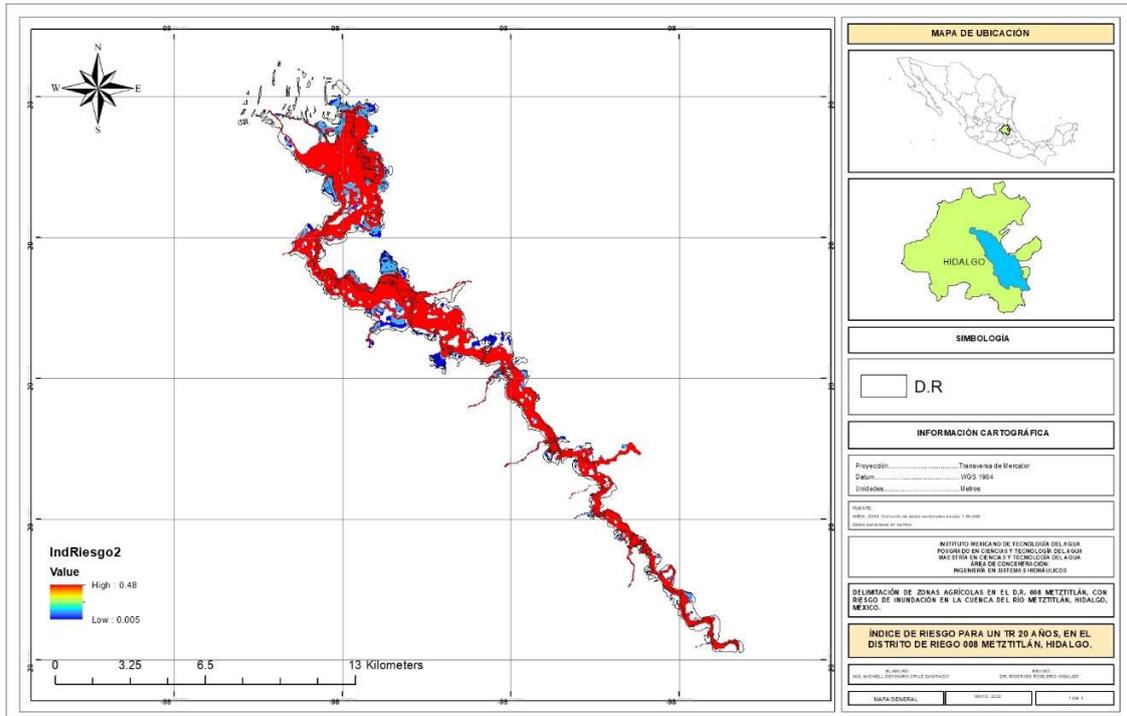


Figura 10.18. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 20 años.

Los valores de índice de riesgo para cada clasificación de acuerdo con el periodo de retorno es el siguiente:

Cuadro 10.35. Valores del índice de riesgo por clasificación para cada Tr.

Clasificación	Índice de riesgo por Tr				
	2	5	10	20	50
Bajo	0.010	0.004	0.060	0.005	0.004
Medio	0.067	0.119	0.114	0.120	0.125
Alto	0.268	0.476	0.454	0.480	0.500

La superficie para cada clasificación de índice de riesgo de acuerdo con el periodo de retorno es la siguiente:

Cuadro 10.36. Área inundada (ha) para cada clasificación de índice de riesgo por Tr.

Índice de Riesgo	Área inundada (ha) por Tr				
	2	5	10	20	50
<b>Bajo</b>	335.415	271.488	229.527	249.856	348.961
<b>Medio</b>	272.482	315.732	276.865	421.908	326.924
<b>Alto</b>	490.955	1218.893	1556.795	2692.088	3382.508
<b>Total</b>	1098.852	1806.114	2063.187	3363.852	4058.393

#### 10.4.7. Riesgo en pérdidas por hectárea.

Con las pérdidas obtenidas para el máximo valor de pérdida por categoría de riesgo y el costo de producción que fue obtenido del Sistema de Costos Agrícolas de FIRA para el estado de Hidalgo, se calculó la utilidad probable por clasificación de riesgo, el cual es el siguiente:

Cuadro 10.37. Utilidad probable por hectárea.

Clasificación del Riesgo	Ingreso probable con 100% de rendimiento	Riesgo (\$)	Costo de producción (\$)	Utilidad probable (\$)	Utilidad probable con el 60% de afectación (\$)/ha
Bajo	\$12,735,264.85	\$1,003,317.00	\$6,910,613.87	\$4,821,333.99	\$22,260.58
Medio	\$26,755,119.89	\$23,745,613.41	\$14,518,292.69	-\$11,508,786.21	-\$25,292.98
Alto	\$158,304,089.38	\$94,982,453.63	\$85,901,506.46	-\$22,579,870.71	-\$ 8,387.00

Los cálculos realizados, indican que, para un riesgo alto, la pérdida por hectárea es de \$8,387.00, esto se debe a que el riesgo se reparte entre una mayor cantidad de hectáreas afectadas por esta clasificación.

## **11. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

Se obtuvo el riesgo en términos monetarios para un escenario en particular, es decir, por periodos de retorno, realizar el cálculo de esta manera permitió además de conocer el riesgo total por las áreas afectadas y por hectárea, clasificar el riesgo en bajo, medio y alto representado en mapas.

La superficie afectada de acuerdo con la clasificación de peligro sigue el comportamiento de a mayor periodo de retorno mayor superficie con peligro alto, para el periodo de retorno de 20 años, la superficie clasificada para un peligro alto es de 2,692.25 ha, indicando que el 75.75% de la superficie total del D.R. 008 tiene un peligro alto.

La superficie afectada de acuerdo con la clasificación de vulnerabilidad sigue el mismo comportamiento de la clasificada por peligro, es decir, a mayor periodo de retorno la superficie vulnerable es mayor, para el periodo de retorno de 20 años la superficie clasificada con vulnerabilidad alta es de 3,027.39 ha, indicando que el 85.19 % de la superficie total del D.R. 008 tiene una vulnerabilidad alta.

El valor de exposición está dado en pérdidas económicas y relacionado con la clasificación del peligro, como el cálculo se hizo para el total de superficie afectada por clasificación a mayor área las pérdidas económicas son mayores, para un periodo de retorno de 20 años, las pérdidas ascienden a \$94,982,453.63 para una exposición alta.

La zona de mayor riesgo se encuentra en las márgenes del río para todos los periodos de retorno simulados, el riesgo alto para un periodo de retorno de 20 años esta entre \$23,745,613.41 a \$94,982,453.63, con lo cual el índice de riesgo para riesgo alto es de 0.12 a 0.48.

El cálculo de pérdidas por ha para todos los periodos de retorno simulados por clasificación de riesgo bajo aun permite tener una utilidad, para riesgo medio, las pérdidas son mayores a la de riesgo alto, porque al ser menor la cantidad de hectáreas afectadas se incrementan las pérdidas.

El periodo de retorno de 20 años está asociado el evento del 5 de octubre de 1999 y es el que más daños ha generado hasta la fecha, con el análisis para un periodo de retorno de 50 años el 95.23 % de la superficie total del D.R. 008 se encuentra en peligro alto y el 99.26% de la superficie total del D.R. se encuentra en vulnerabilidad alta, si ocurriera un evento asociado a un periodo de retorno de 50 años, sería totalmente destructivo para el D.R. 008.

## **12. CONCLUSIONES.**

Los daños generados en el sector agrícola por inundación son menores a los daños en zonas urbanas, sin embargo, para un D.R., representa una pérdida de gran impacto, afectando el abasto de alimentos.

El índice de riesgo es diferente para cada periodo de retorno, sin embargo, para los periodos de retorno simulados índices mayores a 0.2 corresponden a pérdidas totales.

Los resultados de la calibración del modelo hidrológico indican que se pudo reproducir el proceso lluvia-escurrimiento que ocurre en la cuenca de estudio.

Los resultados de la calibración del modelo hidráulico indican que el modelo puede reproducir las manchas de inundación.

La construcción de las funciones vulnerabilidad usando los parámetros de profundidad y estacionalidad de la inundación representa uno de los principales resultados obtenidos.

La construcción del mapa de riesgo se obtuvo en términos monetarios, producto de la combinación de los parámetros que afectan los cultivos: profundidad, velocidad, estacionalidad y duración de la inundación desarrollados en la metodología propuesta.

La metodología propuesta permitirá concientizar a los tomadores de decisión de las pérdidas que representan las inundaciones en el sector agrícola, siendo el productor el más vulnerable, no solo es el hecho de que pierda la cosecha sino de lo invertido no recupera nada y probablemente quede endeudado.

Los seguros agrícolas protegen diversos cultivos contra diferentes riesgos climáticos, biológicos o antes de la germinación, existen 3 tipos de seguros, satelitales, paramétricos y tradicionales, la metodología propuesta al aplicarse permitirá evaluar las zonas de riesgo considerando varios factores y no solo, como en el caso de los seguros paramétricos, basándose en niveles críticos de lluvia tanto para cada cultivo como por cada una de las etapas vegetativas o con

respecto a los seguros tradicionales que se sustentan en la determinación de un nivel de rendimiento promedio.

Para un análisis más completo de la cuantificación del riesgo en un D.R., sería de gran valor contar con el patrón de cultivos, costos de producción, valor de la cosecha, rendimientos, información precisa de los ciclos productivos y el diagnóstico de la infraestructura.

### 13. FUENTES CONSULTADAS.

- Aparicio, M. F. J. (1992). Fundamentos de Hidrología de Superficie. In Grupo Noriega Editores (Ed.), *Editorial Limusa* (Primera, Vol. 53, Issue 9).
- Balica, S. F. (2007). Development and Application of Flood Vulnerability Indices for Various Spatial Scales. *M.Sc Thesis, April*, 157.
- Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Esteller-Alberich, M. V., & Calderón, G. (2007a). Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte I. Propuesta metodológica. *Ingeniería Hidráulica En México*, 22(1), 91–102.
- Baró-Suárez, J. E., Díaz-Delgado, C., Esteller-Alberich, M. V., & Calderón, G. (2007b). Curvas de daños económicos provocados por inundaciones en zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte II. Caso de estudio en la cuenca alta del río Lerma, México. *Ingeniería Hidráulica En México*, 22(3), 71–85.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología básica y aplicada*. [www.gits.ws](http://www.gits.ws)
- Brémond, P., & Grelot, F. (2012). Taking into account recovery to assess vulnerability: Application to farms exposed to flooding. *IEMSs 2012 - Managing Resources of a Limited Planet: Proceedings of the 6th Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, 2584–2592.
- Brémond, P., Grelot, F., & Agenals, A. L. (2013). Review Article: Economic evaluation of flood damage to agriculture - Review and analysis of existing methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10), 2493–2512. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2493-2013>
- Breña, P. A. F., & Jacobo, V. M. A. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*.
- Campos Aranda, D. F. (1984). *Procesos del Ciclo Hidrológico: Vol. I*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campos Aranda, D. F. (2007). *Estimación y aprovechamiento del escurrimiento*.
- Campos Aranda, D. Francisco. (2010). *Introducción a la hidrología urbana*. Printego.

- Carmona, A. M., & Rosales, C. H. (2015). *Potencia de la prueba estadística de normalidad Jarque-Bera frente a las pruebas de Anderson-Darling, Jarque-Bera Robusta, Chi-cuadrada, Chen-Shapiro y Shapiro-Wilk*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Cavazos, O. G. (2020). *Metodología para la determinación de mapas de peligro por inundación en ciudades ubicadas aguas abajo de presas de almacenamiento*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- CENAPRED. (2004). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*.
- CENAPRED. (2014a). *Diagnóstico de Peligros e Identificación de Riesgos de Desastres en México* (O. Zepeda Ramos & S. González Martínez, Eds.; 2014th ed.).
- CENAPRED. (2014b). *Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación en zonas urbanas*. CENAPRED.
- CENAPRED. (2019a). *Impacto socioeconómico de los principales desastres. Resumen ejecutivo 2018*. 1–20.
- CENAPRED. (2019b). *Inundaciones*. Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CENAPRED. (2020). *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México 2019. Resumen ejecutivo*.
- Chávez Morales, J. (2014). *Hidrología superficial*.
- Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- CONAGUA. (2011). *Manual para el control de inundaciones*. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)
- CONAGUA. (2014). *Lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por inundación*.
- CONAGUA. (2016). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Año Agrícola 2015-2016*.
- FAO. (2018). *Los desastres causan pérdidas agrícolas millonarias, con la sequía a la cabeza*. <http://www.fao.org/news/story/es/item/1107192/icode/>

- Forbes. (2017). *En México se pierden cada año 230 mdd por inundaciones*. <https://www.forbes.com.mx/mexico-pierden-230-mdd-cada-ano-por-inundaciones/#:~:text=Las inundaciones en México generan,más pérdidas en el mundo.>
- Forster, S., Kuhlmann, B., Lindenschmidt, K. E., & Bronstert, A. (2008). Assessing flood risk for a rural detention area. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(2), 311–322. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-311-2008>
- Gómez, J. Fco., Aparicio, JAVIER, & Patiño, C. (2010). *Manual de análisis de frecuencias en hidrología*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Gómez Martínez, J. F. (2021). *Curso: Modelación del escurrimiento en cuencas con HEC-HMS*.
- Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: Metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(3), 5–25. <https://doi.org/10.24850/jtyca-2017-03-01>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, A. y P. (2017). *Agenda Técnica Agrícola Hidalgo*.
- IPCC. (2012). National systems for managing the risks from climate extremes and disasters. In *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.009>
- Jain, S. K. (2013). *Introduction to hydrologic modeling*.
- Juárez Dehesa, J. I. (2014). *Estimación del hidrograma de salida en una cuenca usando un modelo hidrológico de parámetros distribuidos y un modelo hidráulico bidimensional en volúmenes finitos con un módulo hidrológico*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. In *Advances in Geosciences* (Vol. 5).
- Larios, T. H. (2014). *Riesgo por inundación asociada a eventos de precipitación extraordinaria en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz*. Colegio de Postgraduados.

- Licht, M. (2022). *Corn Growth Stages*. Iowa State University. <https://crops.extension.iastate.edu/encyclopedia/corn-growth-stages>
- López-Herrera, M. et al. (2015). *Problemática de contaminación en la zona agrícola de la Reserva de la Biosfera Barranca de Metztitlán, Hidalgo, México*. January 2016.
- McCuen, R. H. (1998). Hydrologic Analysis and Desing. In *Pretince Hall* (Second).
- Mendoza Cariño, M., Bautista Olivas, A. L., Quevedo Nolasco, A., & Mendoza Cariño, D. (2018). Análisis hidrológico de largo plazo en la cuenca del río Metztitlán Hidalgo, México, y su relación con el cambio climático . *Hidrobiologica*, 28(1), 1–14.
- Mendoza, M., Quevedo, A., Nikolskii, I., Rubiños, E., & Hernández, E. (2011). Impacto y caudales ambientales del túnel propuesto en la lagu na metztitlán, Hidalgo, México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 2(4), 111–129.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thielen, A. (2010). Review article “assessment of economic flood damage.” *Natural Hazards and Earth System Science*, 10(8), 1697–1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- Merz, B., Thielen, A. H., & Goch, M. (2007). Flood Risk Mapping at the Local Scale: Concepts and Challenges. *Springer, Dordrecht*, 25. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3_13)
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2012). *Manual básico de usuario*. [www.gidhome.com](http://www.gidhome.com)
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2014). *Manual de referencia hidráulico*.
- Nania, L. S. (2007). *Manual básico de HEC-HMS 3.0.0 y HEC-GeoHMS 1.1*.
- Ortiz-Gómez, R., González-Camacho, J. M., & Chávez-Morales, J. (2015). Modelo de asignación de agua considerando un caudal ambiental mínimo en la cuenca del río metztitlán en hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(7), 703–721.
- Ponvert-Délisles, D. R., Lau, A., & Balamaseda, C. (2007). La vulnerabilidad del sector agrícola frente a los desastres. Reflexiones generales. *Zonas Áridas*, 11(1), 174–194.

- Restrepo, L. F., & Julián González L, ; (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20, 183–192.
- Reynoso Santos, R., Valdez Lazalde, J. R., Escalona Maurice, M. J., & Santos Posadas, H. M. (2015). Análisis de la dinámica del uso del suelo de la cuenca Metztlán en Hidalgo , México Analysis of land use dynamics in Metztlán watershed in Hidalgo , México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXVI(3), 102–111.
- Roblero, R. (2013). *Modelación hidrometeorológica de áreas con riesgos de inundación en la cuenca del río La Sierra, en los estados Chiapas y Tabasco, México.* 295.  
<http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1955>
- SAGARPA. (2017). *Maíz grano blanco y amarillo mexicano.*
- Sánchez San Roman, Javier. (2015). HEC-HMS. Manual elemental. *Univ. Salamanca (España)*, 1–12.
- SIAP. (2020). *SIAP.* <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Solis, Y. (2014). *Construcción de curvas de costos por daños por inundación a las zonas agrícolas e infraestructura urbana y red carretera del país.*
- Sun, Z., Liu, X., Zhu, X., & Pan, Y. (2016). Agriculture flood risk assessment based on information diffusion. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016-November*, 4391–4394.  
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730144>
- Tariq, M. A. U. R., Rajabi, Z., & Muttill, N. (2021). An evaluation of risk-based agricultural land-use adjustments under a flood management strategy in a floodplain. *Hydrology*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology8010053>
- UNDRR & CRED. (2019). *An overview of the last 20 years the last 20 years.*
- UNDRR, CEPAL, O. A. (2019). *Medición y Registro de Indicadores Relativos a la Reducción del Riesgo de Desastres (RRD) -*. 66.
- Universidad Tecnológica de la Sierra Hidalguense. (2016). *Evaluación de híbridos comerciales de maíz en el municipio de Lolotla, Estado de Hidalgo.*
- USACE. (2022). *HEC-HMS.* <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

- Vega Serratos, B. E. (2017). *Metodología para la cuantificación del riesgo por inundaciones fluviales. Caso de aplicación en Campeche, México*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2017/junio/0760358/Index.html>
- Vega-Serratos, B. E., Domínguez-Mora, R., & Posada-Vanegas, G. (2018). Seasonal flood risk assessment in agricultural areas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 9(3), 92–127. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-03-04>
- Vélez-Upegui, J. J., & Botero-Guérrez, A. (2011). *Estimación del tiempo concentración y de rezago en la cuenca experimental urbana de la Quebrada San Luis , Manizales*. 78–51.
- Yildirim, E., & Demir, I. (2022). Agricultural flood vulnerability assessment and risk quantification in Iowa. *Science of The Total Environment*, 826, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154165>

## 14. ANEXOS.

### Anexo 1. Cuadros auxiliares para la determinación del número de curva (NC).

Cuadro 0.1. Cuadro de decisión para determinar el grupo de suelo y el grupo de suelo resultante de las combinaciones de grupos de suelo según el USDA que corresponde a la edafología de México.

Tipo de suelo (INEGI)	Unidad Calificadora	Grupo hidrológico de suelo		
		Gruesa	Media	Fina
Gleysol Histosol Planosol Plintosol Solonchak	abruptico, albico, alcalico, andico, arenico, calcico, crómico, cutánico, dístrico, endoesquelético, endoestagnico, endopetrogípsico, endosálico, episódico, esquelético, estagnico, ferrálico, férrico, fíbrico, flúvico, fólico, gélico, gípsico, gipsírico, grúmico, háplico, hipercálcico, hiperdístrico, hiperesquelético, hipergípsico, hiperócrico, hipersalico, hipersódico, hipocálcico, hipoferrálico, hipolúvico, hipoplíntico, hiposálico, hiposódico, hístico, húmico, mázico, melánico, mesotrófico, mólico, molihúmico, nátrico, ócrico, ortodístrico, páquico, paralítico, pélico, petrosálico, prótico, réico, réndzico, ródico, rúbico, rúptico, sálico, saprihístico, silándico, sódico, téfrico, úmbrico, umbrihúmico, vítrico, yérmico.	B	C	D
Solonetz	calcárico, endoglético, endoléptrico, endopétrico, endopetrocálcico, endopetrodúrico, endoplíntico, epiglético, epiléptico, epipétrico, epipetrocálcico, epipetrodúrico, epiplíntico, eútrico, glético, hiperéutrico, léptico, lítico, lúvico, nítico, pétrico, petrocálcico, petrodúrico, plíntico, profóndico, síltico takírico, vétrico			
Acrisol Alisol Cambisol Gipsisol Lixisol Luvisol	abruptico, albico, alcalico, andico, arenico, arídico, calcico, crómico, cutánico, dístrico, endoesquelético, endoestagnico, endopetrogípsico, endosálico, endosódico, epiesquelético, epipetrogípsico, episálico, episódico, esquelético, estagnico, ferrálico, férrico, fíbrico, flúvico, fólico, gélico, gípsico, gipsírico, grúmico, háplico, hipercálcico, hiperdístrico, hiperesquelético, hipergípsico, hiperócrico, hipersalico, hipersódico, hipocálcico, hipoferrálico, hipolúvico, hipoplíntico, hiposálico, hiposódico, hístico, húmico, mázico, melánico, mesotrófico, mólico, molihúmico, nátrico, ócrico, ortodístrico, páquico, paralítico, pélico, petrosálico, prótico, réico, réndzico, ródico, rúbico, rúptico, sálico, saprihístico, silándico, sódico, téfrico, úmbrico, umbrihúmico, vítrico, yérmico.	B	B	C
Nitosol Vertisol	calcárico, endoglético, endoléptrico, endopétrico, endopetrocálcico, endopetrodúrico, endoplíntico, epiglético, epiléptico, epipétrico, epipetrocálcico,	B	C	D

Tipo de suelo (INEGI)	Unidad Calificadora	Grupo hidrológico de suelo		
		Gruesa	Media	Fina
	epipetrodúrico, epiplíntico, eútrico, gléyico, hiperéutrico, léptico, lítico, lúvico, nítrico, pétrico, petrocálcico, petrodúrico, plíntico, profóndico, síltico takírico, vértico			
Andosol Arenosol Calcisol Chernozem Durisol Fluvisol Kastañozems  Leptosol	abrupto, albico, alcálcico, ándico, arénico, cálcico, crómico, cutánico, dístrico, endoesquelético, endoestágnico, endopetrogípsico, endosálcico, endosódico, epiesquelético, epipetrogípsico, episálcico, episódico, esquelético, estágnico, ferrálcico, férrico, fibrico, flúvico, fólico, gélico, gípsico, gipsírico, grúmico, háplico, hipercálcico, hiperdístrico, hiperesquelético, hipergípsico, hiperótrico, hipersálcico, hipersódico, hipocálcico, hipoferrálcico, hipolúvico, hipoplíntico, hiposálcico, hiposódico, hístico, húmico, mázico, melánico, mesotrófico, mólico, molihúmico, nátrico, ótrico, ortodístrico, páquico, paralítico, pélico, petrosálcico, prótico, réico, réndzico, róxico, rúbico, rúptico, sálcico, saprihístico, silándico, sódico, tétrico, úmbrico, umbrihúmico, vítrico, yérmico.	A	B	C
Phaeozems Regosol  Umbrisol	calcárico, endogléyico, endoléptico, endopétrico, endopetrocálcico, endopetrodúrico, endoplíntico, epigléyico, epiléptico, epipétrico, epipetrocálcico, epipetrodúrico, epiplíntico, eútrico, gléyico, hiperéutrico, léptico, lítico, lúvico, nítrico, pétrico, petrocálcico, petrodúrico, plíntico, profóndico, síltico takírico, vértico	B	C	D

Fuente: Hernández (2014).

Cuadro 0.2. Agrupación de los usos de suelo en México dentro de los usos de suelo establecidos en el TR-55.

Clasificación INEGI	Tipo de vegetación INEGI	Uso de suelo TR-55
Áreas forestales	Bosque de oyamel Bosque de pino Bosque de pino-encino Bosque de tascate Bosque de encino Bosque cultivado Bosque de encino-pino Bosque mesófilo de montaña Bosque de mezquite Selva media subperennifolia Selva mediana perennifolia Selva baja perennifolia Selva alta subperennifolia Selva alta perennifolia Selva mediana caducifolia Selva baja caducifolia Matorral subtropical	Tierras agrícolas: "Bosques"

<b>Clasificación INEGI</b>	<b>Tipo de vegetación INEGI</b>	<b>Uso de suelo TR-55</b>
	Selva mediana subcaducifolia Selva baja espinosa caducifolia Selva baja espinosa caducifolia Selva baja espinosa subperennifolia Mezquital tropical Palmar natural	
Matorral y Desiertos	Chaparral Matorral crasicaule Matorral desértico micrófilo Matorral desértico rosetófilo Matorral espinoso tamaulipeco Matorral rosetófilo costero Matorral sarcocaule Matorral sarco-crasicaule Matorral sarco-crasicaule de neblina Matorral submontano Mezquital desértico	Vegetación árida y semiárida: "Arbusto o Matorral de desierto"
	Vegetación de desiertos arenosos Vegetación de dunas costeras Vegetación gipsófila Vegetación halófila Vegetación halófila xerófila	Vegetación árida y semiárida: "Vegetación Herbácea"
Pastizales	Pastizal gipsófilo Pastizal halófilo Pastizal natural Pradera de alta montaña Sabana	Tierras agrícolas: "Pastos y Praderas"
Vegetación inducida	Bosque inducido Palmar inducido	Tierras agrícolas: "Bosques"
	Pastizal inducido Sabanoide	Tierras agrícolas: "Pastos y Praderas"
Vegetación hidrófila y cuerpos de agua	Bosque de galería Selva de galería Vegetación de galería Tular Popal Vegetación de petén Vegetación halófila hidrófila Manglar cuerpo de agua	"Área impermeable o cuerpo de agua"
Cultivos	Pastizal cultivado	Tierras agrícolas: "pastos y praderas"
	Agricultura de riego	Tierras agrícolas cultivadas (cultivo en fila)
	Agricultura de temporal	Tierras agrícolas cultivadas (granos pequeños)
	Agricultura de humedad acuícola	"Área impermeable o cuerpo de agua"
Zonas	Zona urbana	Áreas urbanas: "Espacios"

<b>Clasificación INEGI</b>	<b>Tipo de vegetación INEGI</b>	<b>Uso de suelo TR-55</b>
urbanas	Localidad Asentamientos humanos	abiertos”
Desprovisto de vegetación	Desprovisto de vegetación	Tierras agrícolas: “Brush”
Sin vegetación aparente	Sin vegetación aparente (incluye vegetación efímera de desierto)	Áreas urbanas del desierto occidental: “Desierto natural”

Fuente: Hernández (2014).

Cuadro 0.3. Asignación del número de curva para los usos de suelo que se presentan en la República Mexicana.

<b>Clasificación INEGI</b>	<b>Uso de suelo TR-55</b>	<b>Tipo de vegetación INEGI (uso)</b>	<b>Condición hidrológica</b>	<b>Número de curva (NC) por grupo de suelo</b>			
				<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Áreas forestales	Tierras agrícolas “Bosques”	Bosque de oyamel	Pobre	45	66	77	83
		Bosque de pino					
		Bosque de pino-encino					
		Bosque de tascate					
		Bosque de encino	Media	36	60	73	79
		Bosque cultivado					
		Bosque de encino-pino					
		Bosque mesófilo de montaña					
		Bosque de mezquite					
		Selva media subperennifolia					
		Selva mediana perennifolia					
		Selva baja perennifolia					
		Selva alta subperennifolia					

Clasificación INEGI	Uso de suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI (uso)	Condición hidrológica	Número de curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
		Selva alta perennifolia Selva mediana caducifolia Selva baja caducifolia Matorral subtropical Selva mediana subcaducifolia Selva baja espinosa caducifolia Selva baja espinosa caducifolia Selva baja espinosa subperennifolia Mezquital tropical Palmar natural	Buena	30	55	70	77
Matorral y Desiertos	Vegetación árida y semiárida: "Arbusto o Matorral de desierto"	Chaparral Matorral crasicaule Matorral desértico micrófilo Matorral desértico rosetófilo Matorral espinoso tamaulipeco Matorral rosetófilo costero Matorral sarcocaulo Matorral sarcocaulo crasicaule Matorral sarcocaulo de neblina	Pobre       Media	63       55	77       72	85       81	88       86

Clasificación INEGI	Uso de suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI (uso)	Condición hidrológica	Número de curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
		Matorral submontano Mezquital desértico	Buena	49	68	79	84
	Vegetación árida y semiárida: "Vegetación Herbácea"	Vegetación de desiertos arenosos Vegetación de dunas costeras	Pobre	63	80	87	93
		Vegetación gipsófila Vegetación halófila	Media	55	71	81	89
		Vegetación halófila xerófila	Buena	49	62	74	85
Pastizales	Tierras agrícolas: "Pastos y Praderas"	Pastizal gipsófilo	Pobre	68	79	86	89
		Pastizal halófilo	Media	49	69	79	84
		Pastizal natural	Buena	39	61	74	80
		Pradera de alta montaña Sabana	Protegidos del pastoreo	30	58	71	78
Vegetación inducida	Tierras agrícolas: "Bosques"	Bosque inducido Palmar	Pobre	45	66	77	83
		inducido	Media	36	60	73	79
			Buena	30	55	70	77
	Tierras agrícolas: "Pastos y Praderas"	Pastizal inducido	Pobre	68	79	86	89
			Media	49	69	79	84
		Sabanoide	Buena	39	61	74	80

Clasificación INEGI	Uso de suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI (uso)	Condición hidrológica	Número de curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Vegetación hidrófila y cuerpos de agua	“Área impermeable o cuerpo de agua”	Bosque de galería Selva de galería Vegetación de galería Tular Popal Vegetación de petén Vegetación halófila hidrófila Manglar cuerpo de agua	N/A	98			
Cultivos	Tierras agrícolas: “pastos y praderas”	Pastizal cultivado	Protegidos de pastoreo	30	58	71	78
	Tierras agrícolas cultivadas (cultivo en fila)	Agricultura de riego	Pobre	69	78	84	87
			Buena	64	74	81	84
	Tierras agrícolas cultivadas (granos pequeños)	Agricultura de temporal	Pobre	63	74	81	84
Buena			60	72	80	83	
“Área impermeable o cuerpo de agua”	Agricultura de humedad acuicola	N/A	98				

Clasificación INEGI	Uso de suelo TR-55	Tipo de vegetación INEGI (uso)	Condición hidrológica	Número de curva (NC) por grupo de suelo			
				A	B	C	D
Zonas urbanas	Áreas urbanas: "Espacios abiertos"	Zona urbana Localidad Asentamientos humanos	N/A	52	70	80	84
Desprovisto de vegetación	Tierras agrícolas: "Brush"	Desprovisto de vegetación	Pobre	48	67	77	83
Sin vegetación aparente	Áreas urbanas del desierto occidental: "Desierto natural"	Sin vegetación aparente (incluye vegetación efímera de desierto)	N/A	63	77	85	88

Fuente: Hernández (2014).

## Anexo 2. Hidrogramas de entrada del modelo hidráulico.

### Hidrogramas de entrada para la calibración del modelo hidráulico.

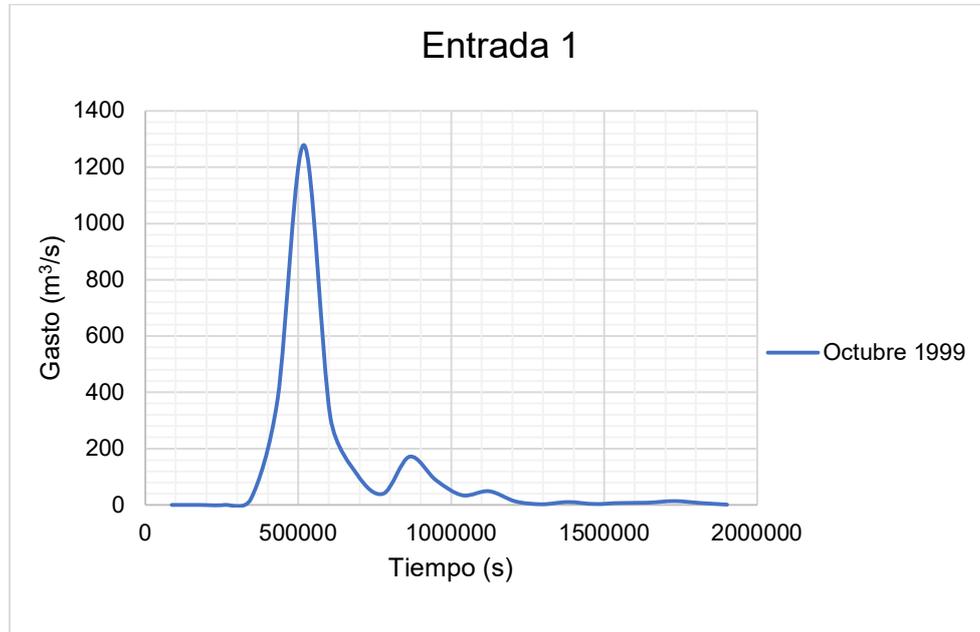


Figura 0.1. Hidrograma de entrada 1 para calibración del modelo hidráulico.



Figura 0.2. Hidrograma de entrada 2 para calibración del modelo hidráulico.

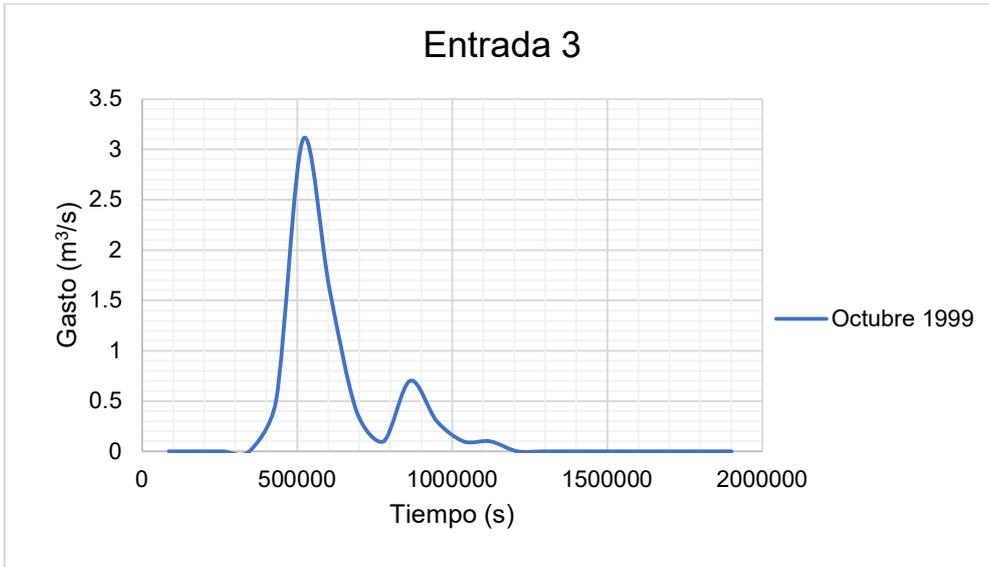


Figura 0.3. Hidrograma de entrada 3 para calibración del modelo hidráulico.

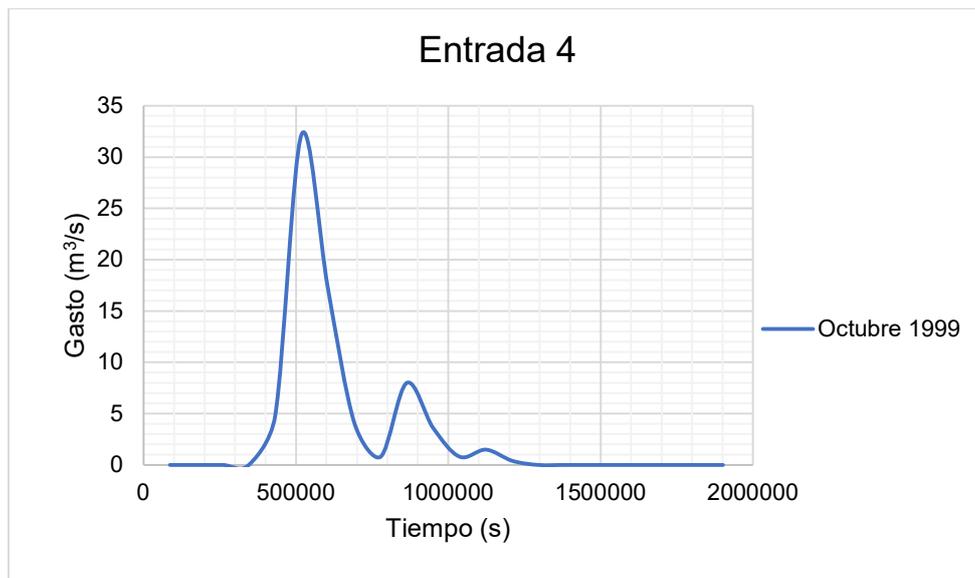


Figura 0.4, Hidrograma de entrada 4 para calibración del modelo hidráulico.

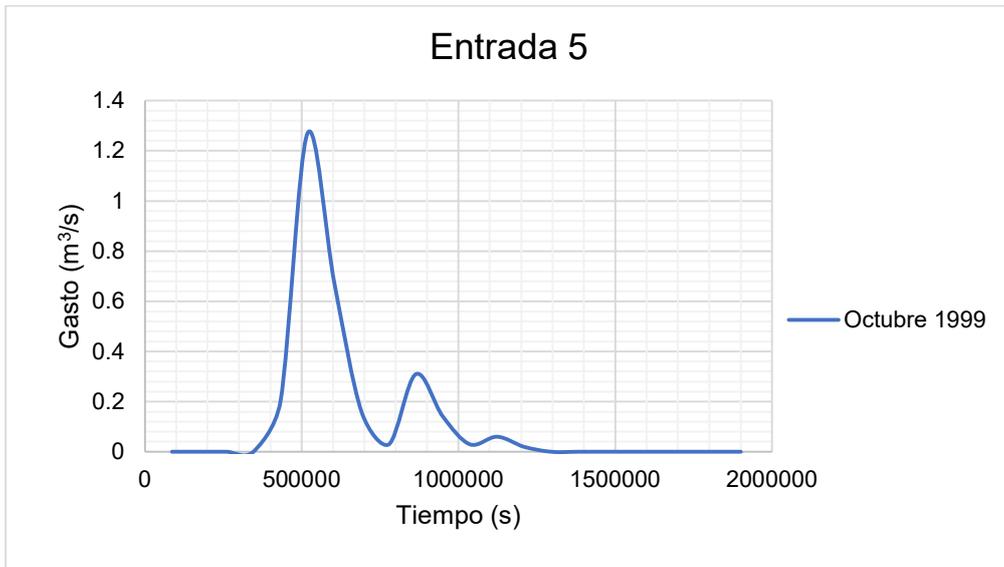


Figura 0.5. Hidrograma de entrada 5 para calibración del modelo hidráulico.

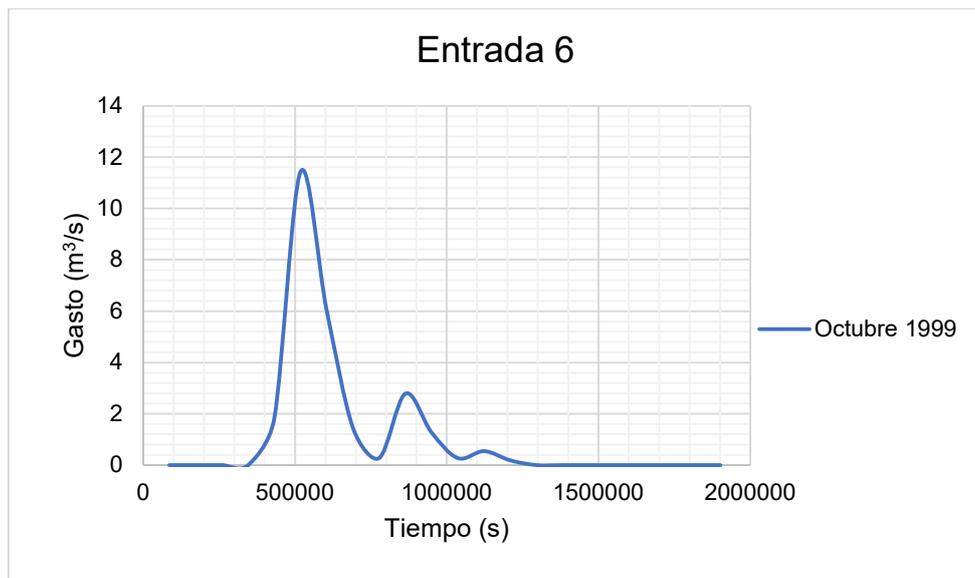


Figura 0.6. Hidrograma de entrada 6 para calibración del modelo hidráulico.



Figura 0.7. Hidrograma de entrada 7 para calibración del modelo hidráulico.

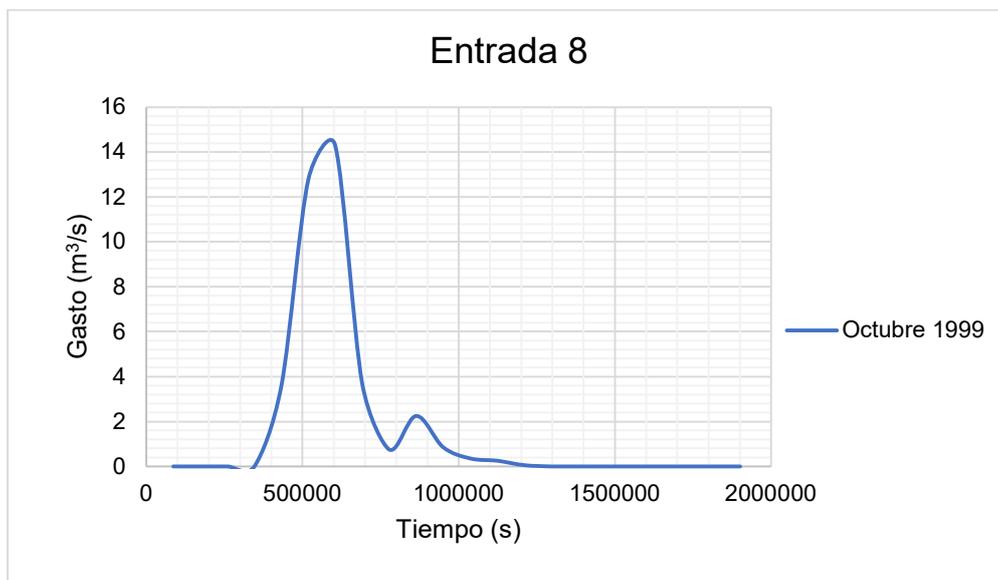


Figura 0.8. Hidrograma de entrada 8 para calibración del modelo hidráulico.



Figura 0.9. Hidrograma de entrada 9 para calibración del modelo hidráulico.



Figura 0.10. Hidrograma de entrada 10 para calibración del modelo hidráulico.

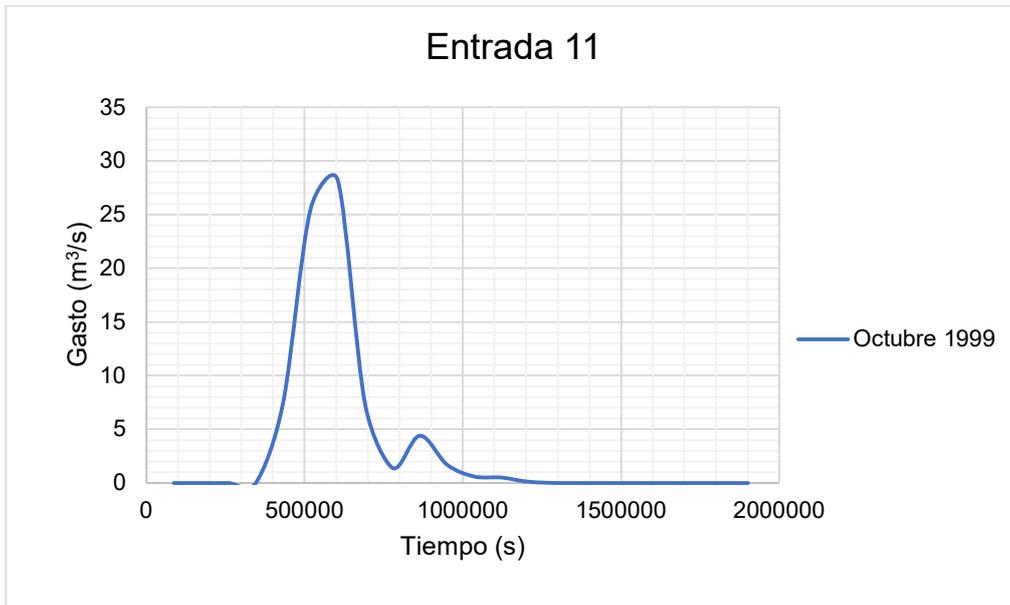


Figura 0.11. Hidrograma de entrada 11 para calibración del modelo hidráulico.



Figura 0.12. Hidrograma de entrada 12 para calibración del modelo hidráulico.

**Hidrogramas de entrada para las simulaciones del periodo de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 20 y 50 años.**

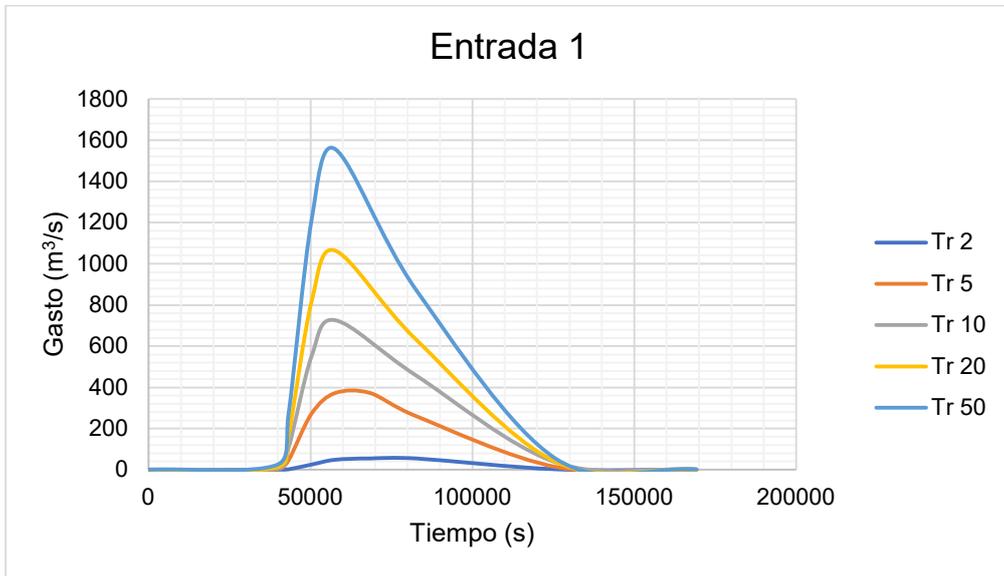


Figura 0.13. Hidrogramas de la entrada 1 de cada periodo de retorno.

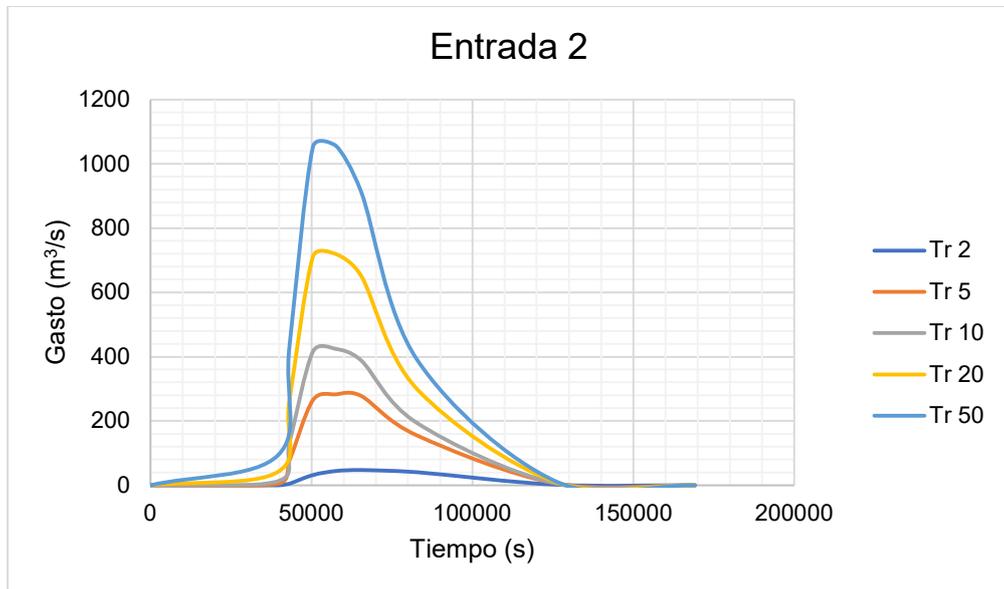


Figura 0.14. Hidrogramas de la entrada 2 de cada periodo de retorno.

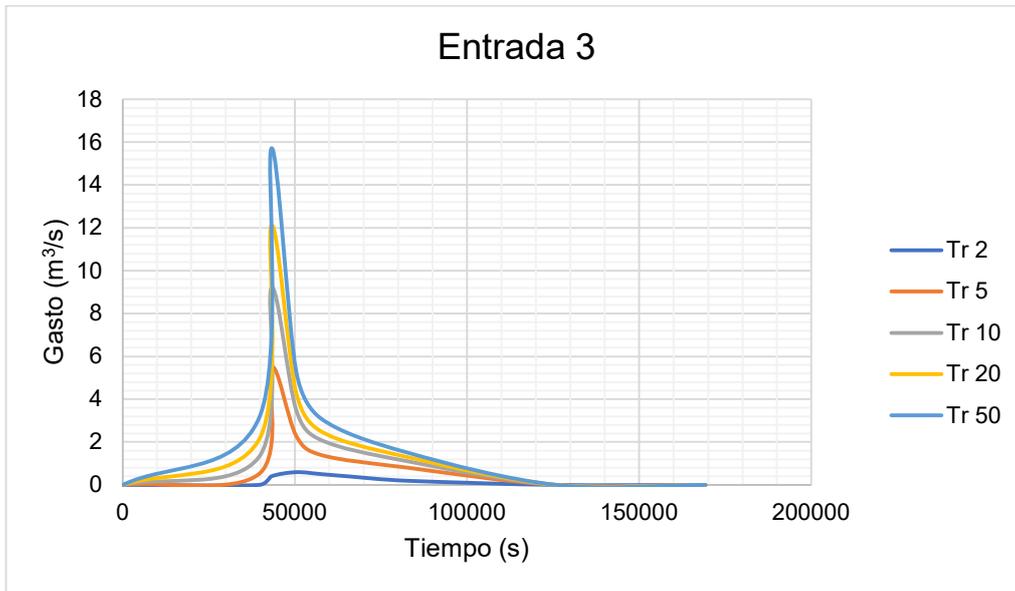


Figura 0.15. Hidrogramas de la entrada 3 de cada periodo de retorno.

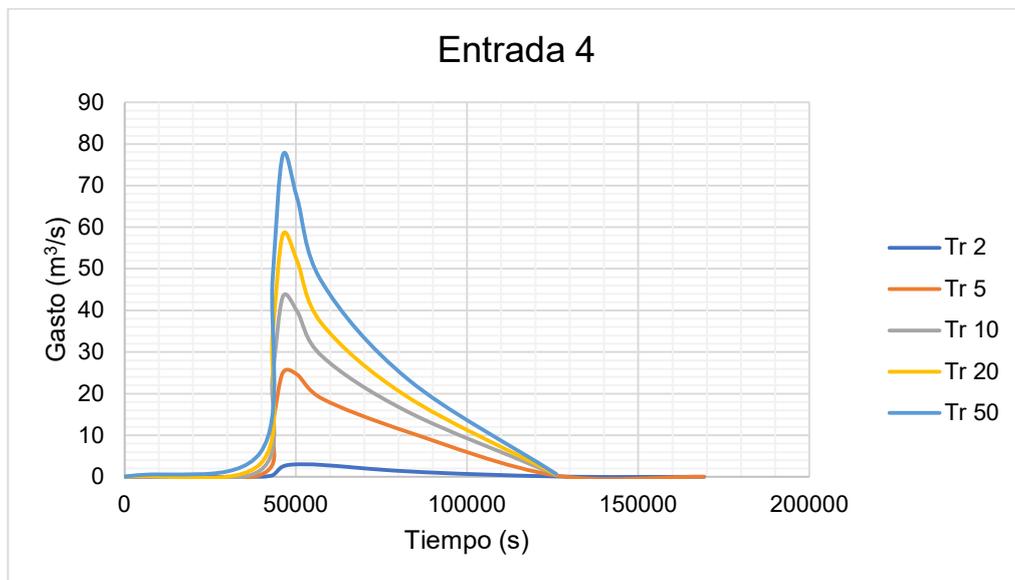


Figura 0.16. Hidrogramas de la entrada 4 de cada periodo de retorno.

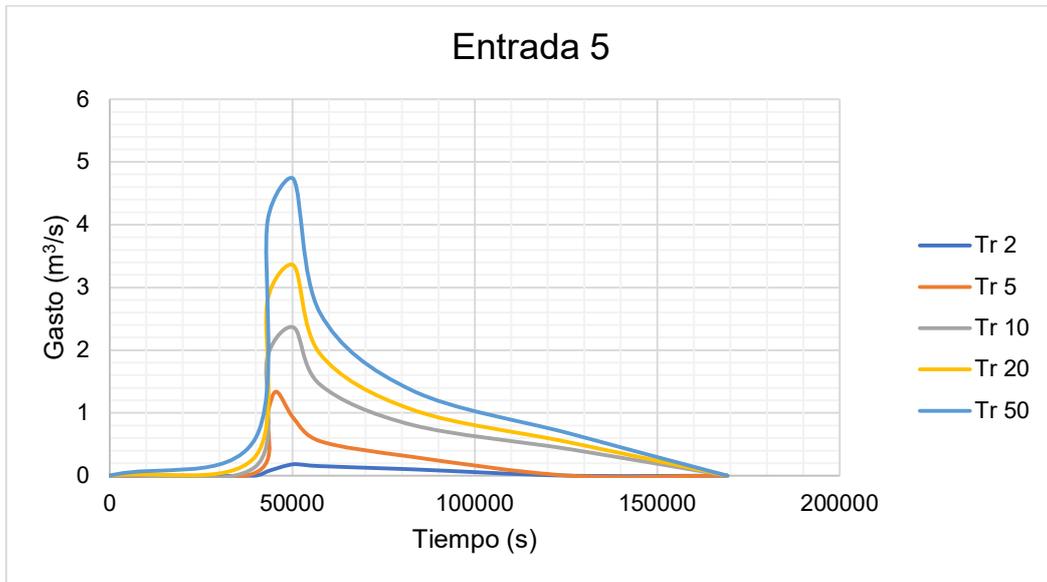


Figura 0.17. Hidrogramas de la entrada 5 de cada periodo de retorno.

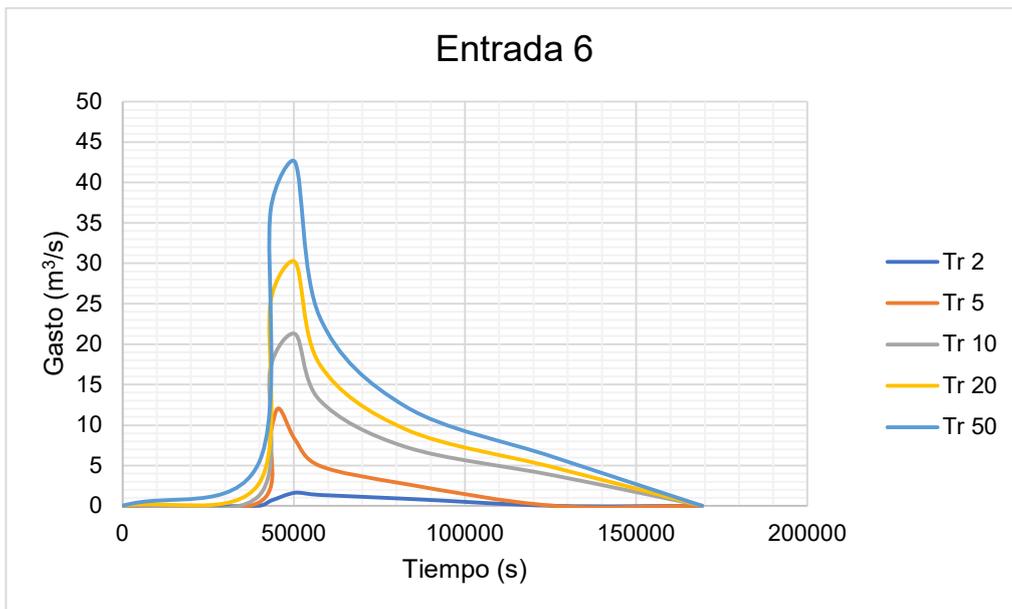


Figura 0.18. Hidrogramas de la entrada 6 de cada periodo de retorno.

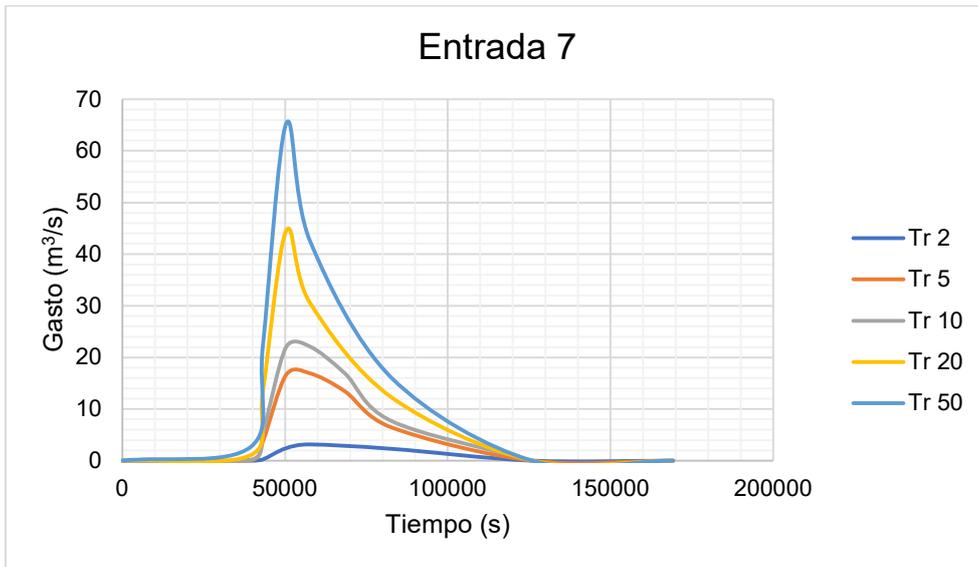


Figura 0.19. Hidrogramas de la entrada 7 de cada periodo de retorno.

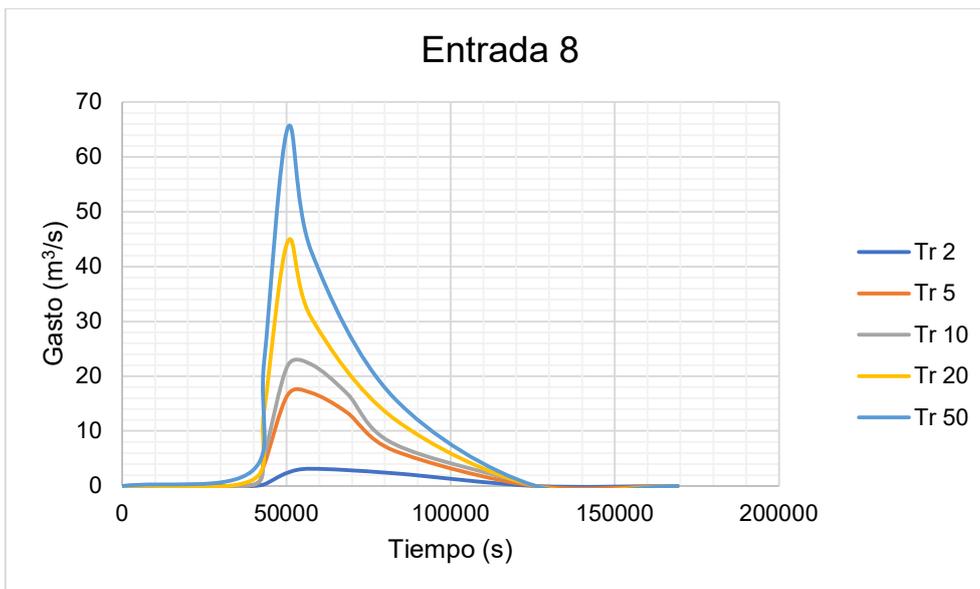


Figura 0.20. Hidrogramas de la entrada 8 de cada periodo de retorno.

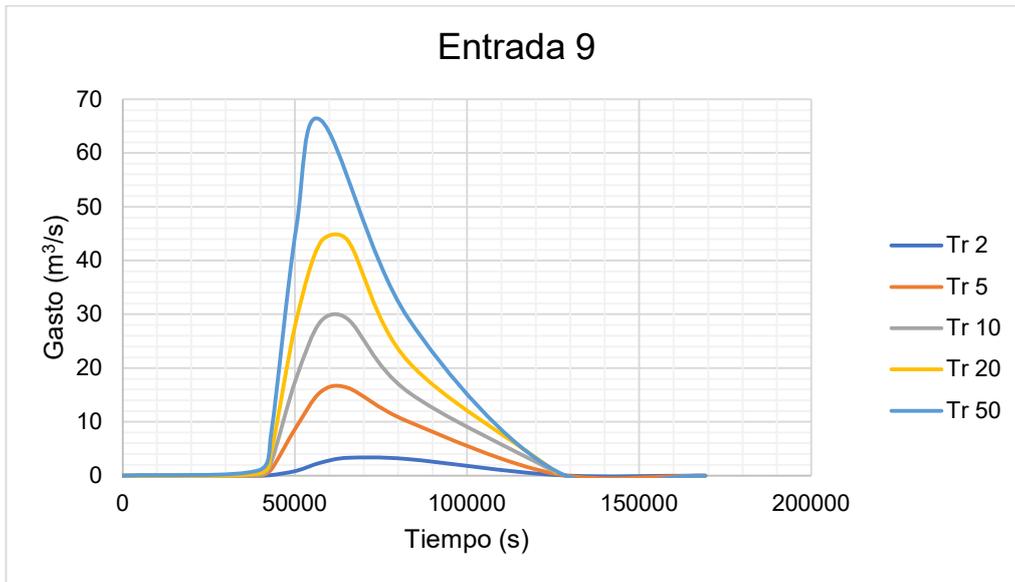


Figura 0.21. Hidrogramas de la entrada 9 de cada periodo de retorno.

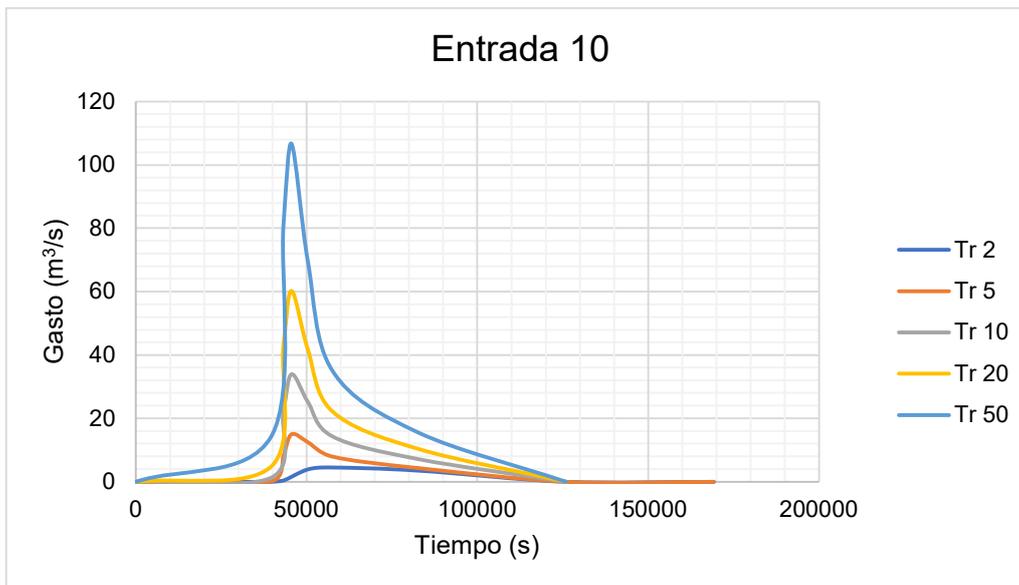


Figura 0.22. Hidrogramas de la entrada 10 de cada periodo de retorno.

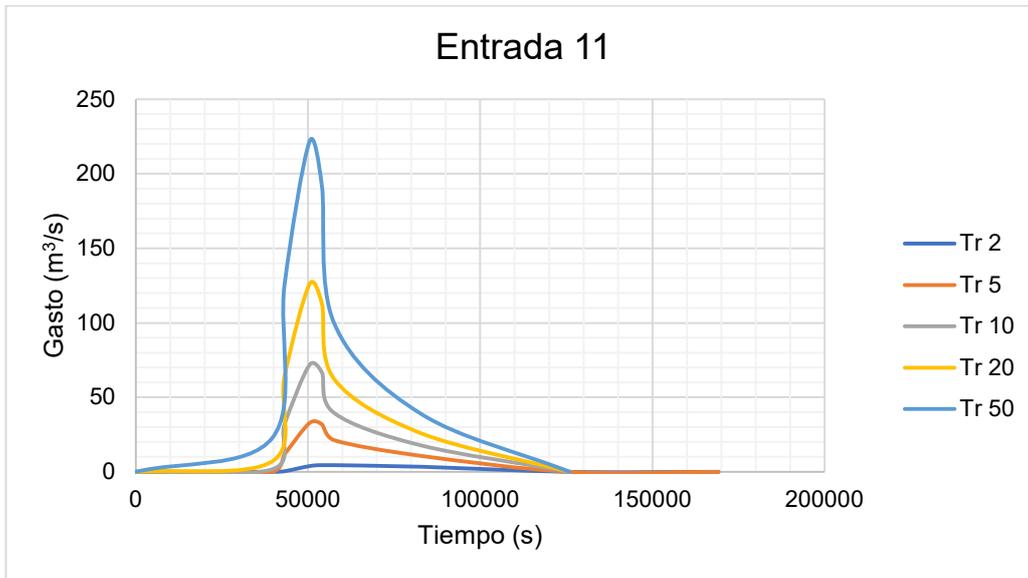


Figura 0.23. Hidrogramas de la entrada 11 de cada periodo de retorno.

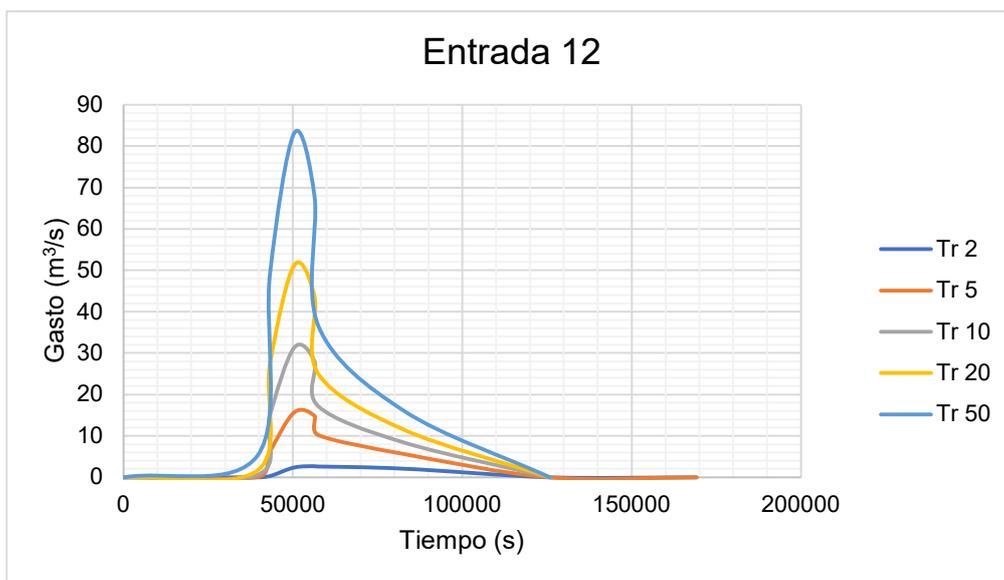


Figura 0.24. Hidrogramas de la entrada 12 de cada periodo de retorno.

### Anexo 3. Mapas de peligro por inundación en el D.R. 008 Metztlán.

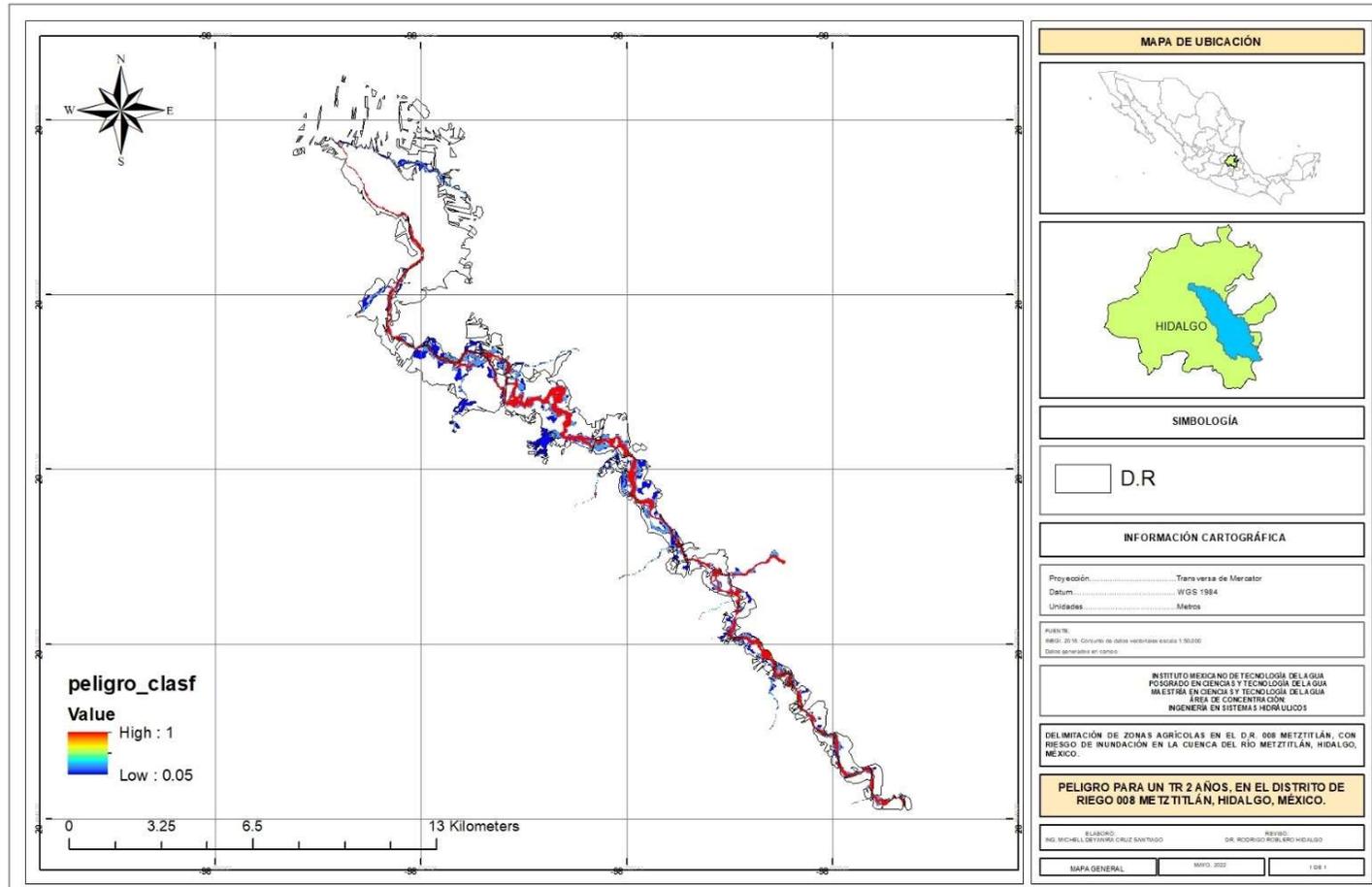


Figura 0.1. Mapa de peligro para un Tr de 2 años.

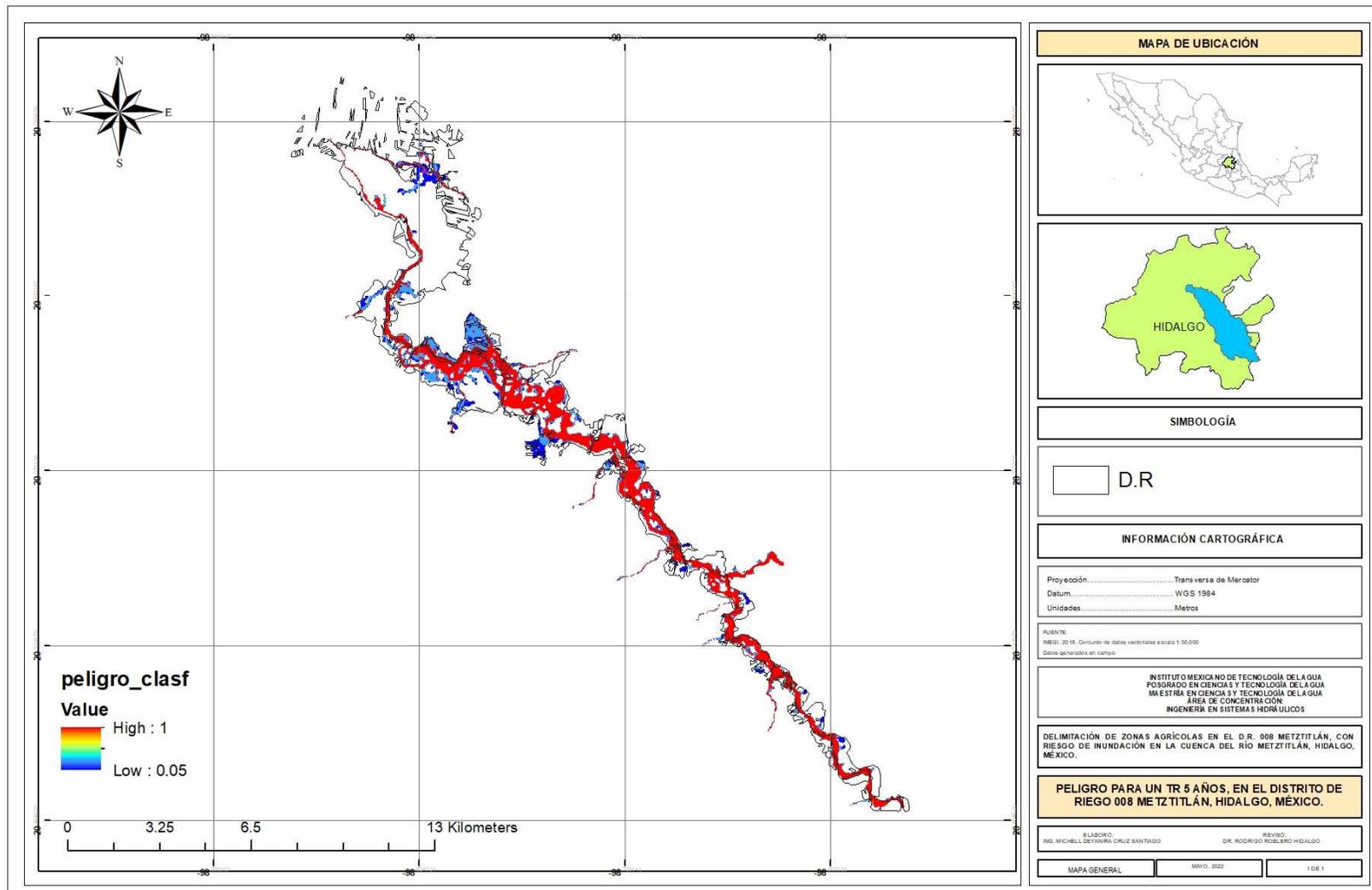


Figura 0.2. Mapa de peligro para un Tr de 5 años.

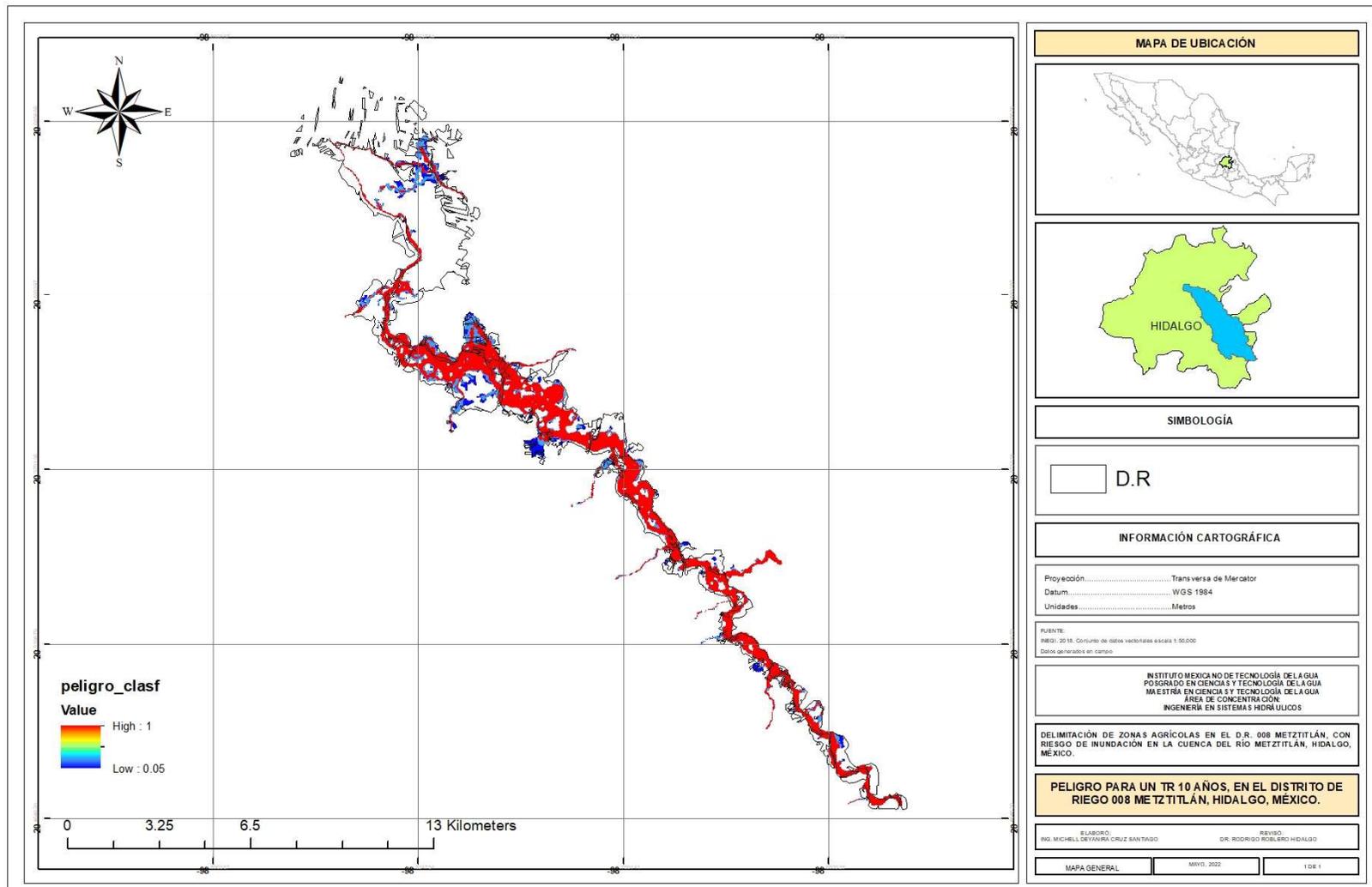


Figura 0.3. Mapa de peligro para un Tr de 10 años.

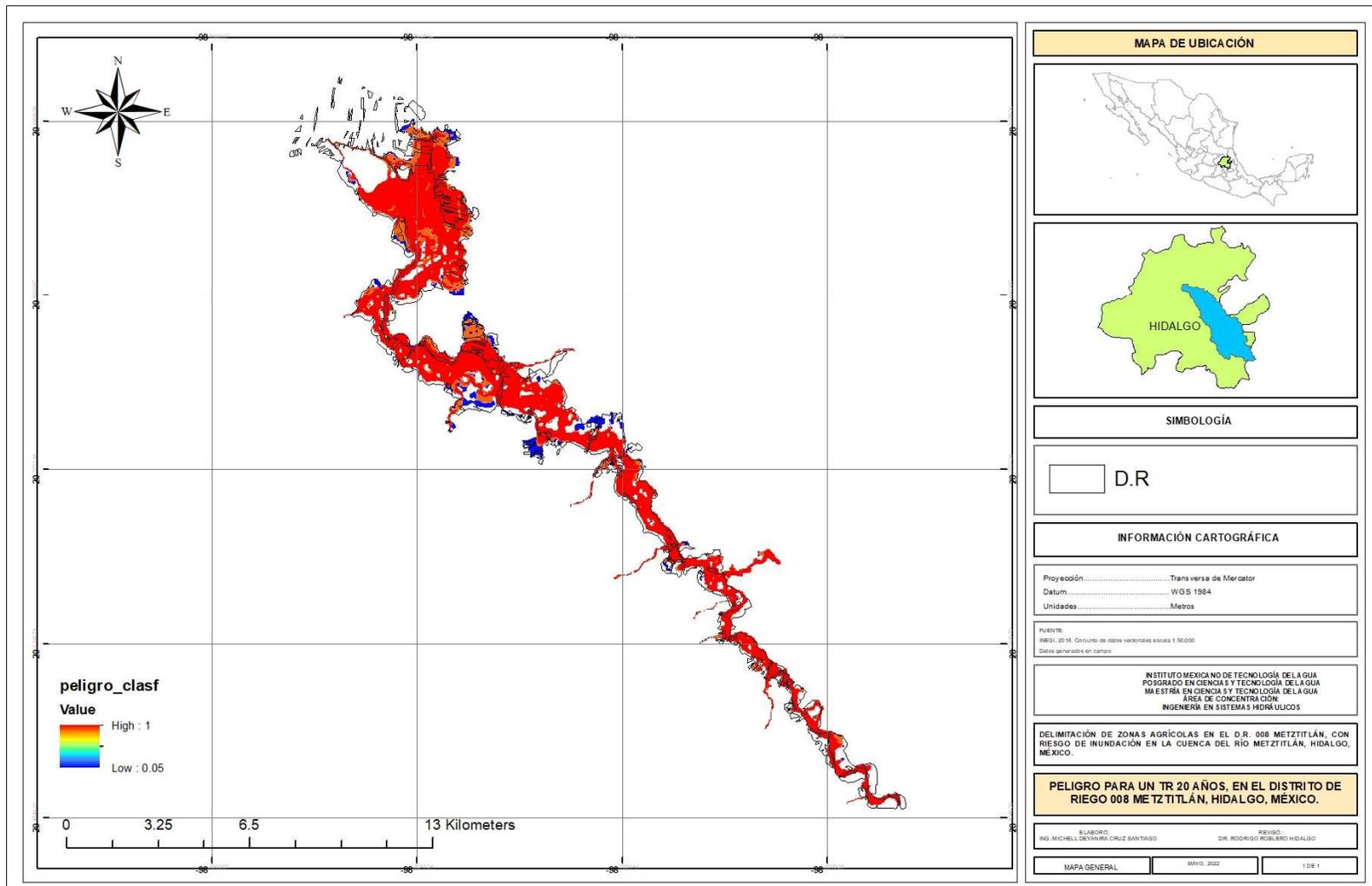


Figura 0.4. Mapa de peligro para un Tr de 20 años.

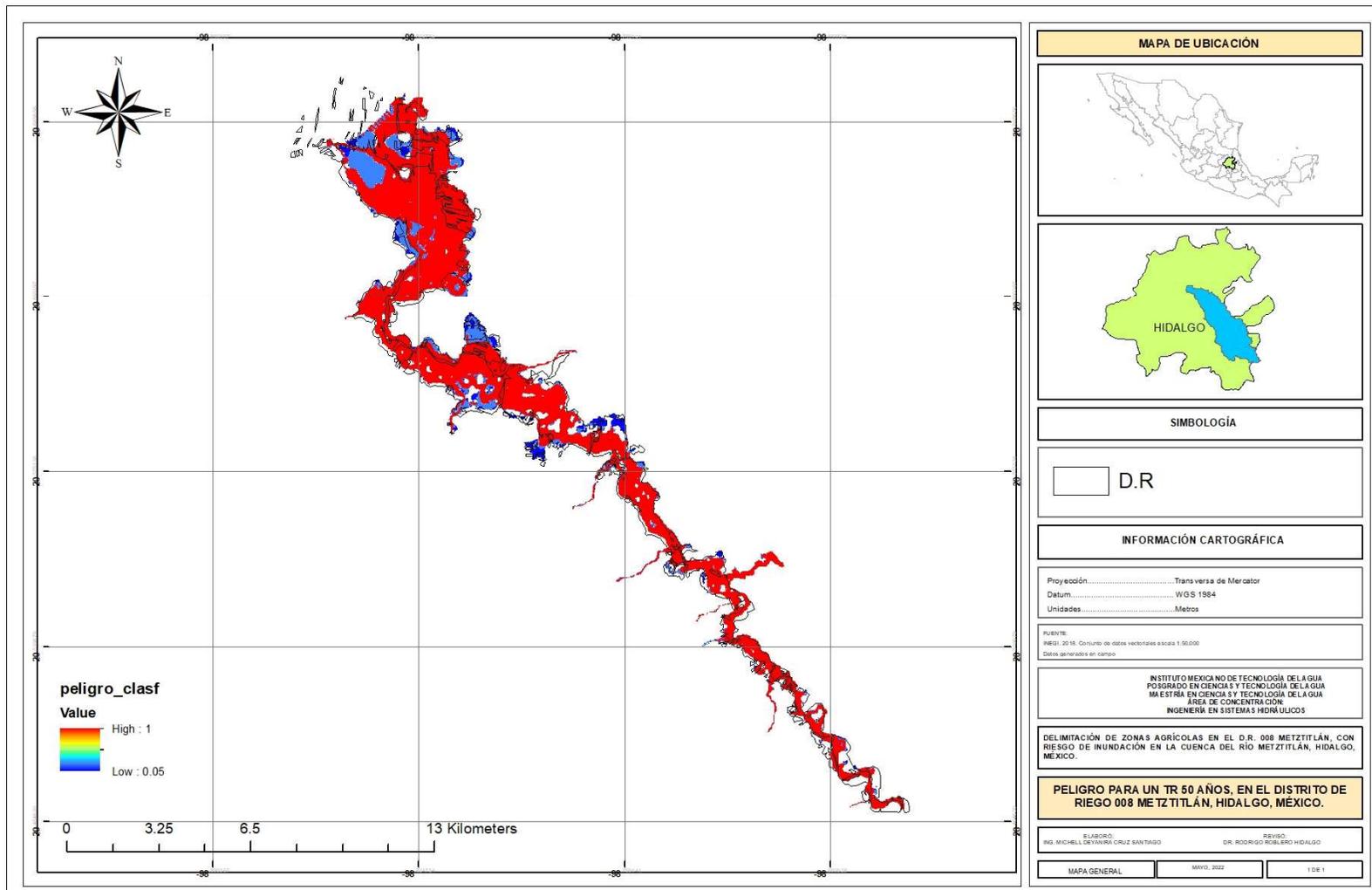


Figura 0.5. Mapa de peligro para un Tr de 50 años.

### Anexo 4. Mapas de vulnerabilidad por inundación en el D.R. 008 Metztitlán.

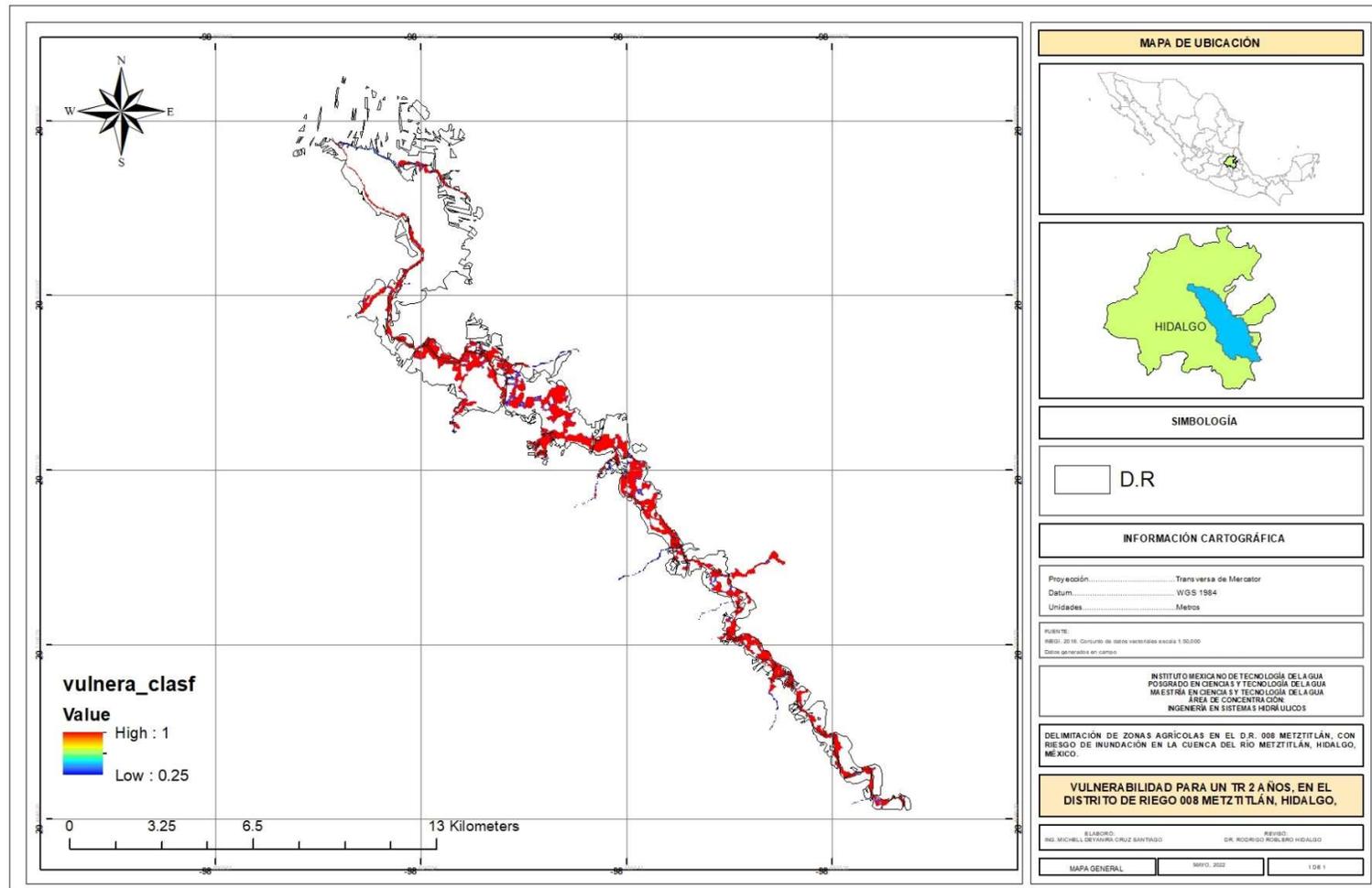


Figura 0.1. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 2 años.

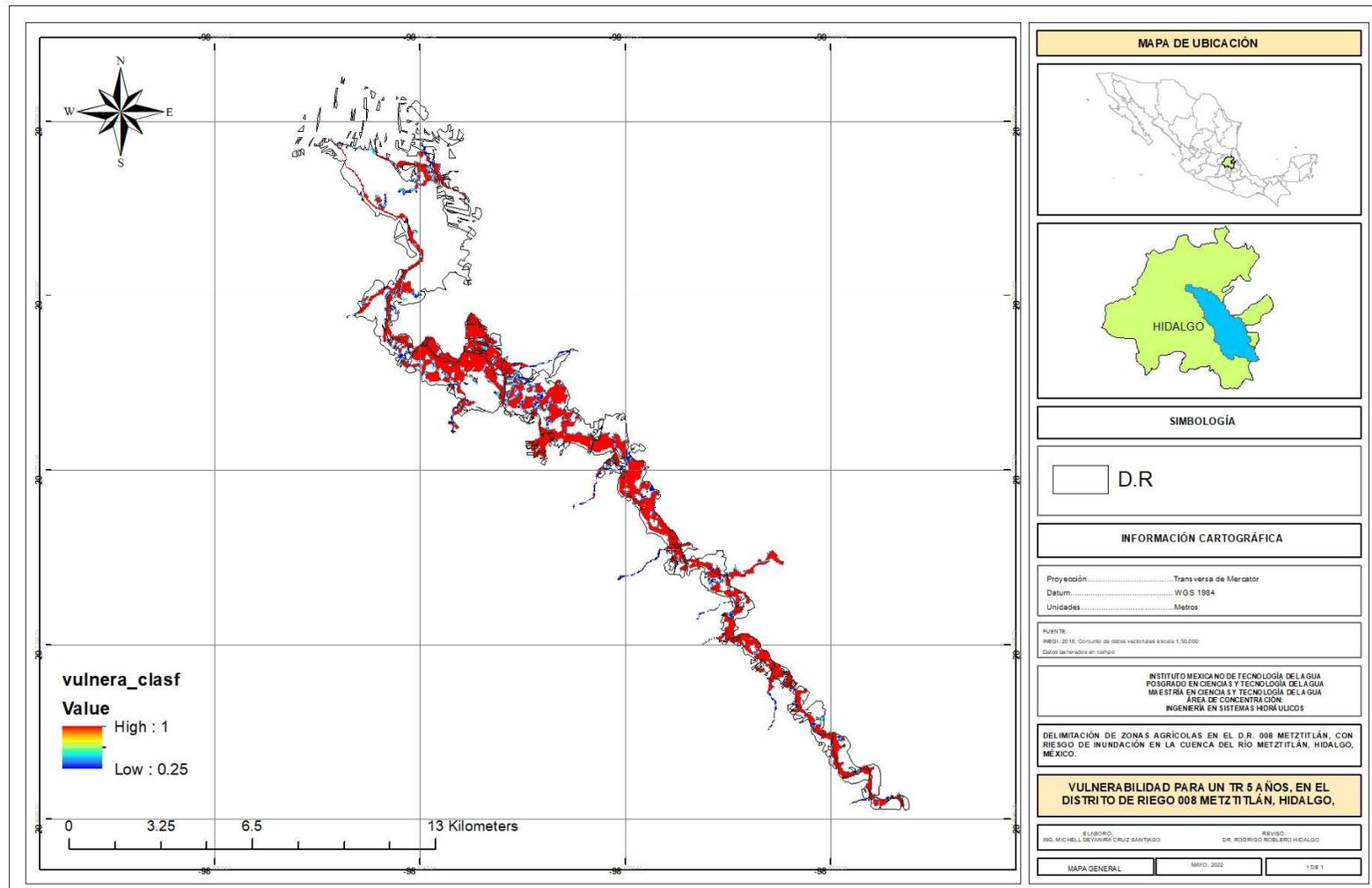


Figura 0.2. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 5 años.

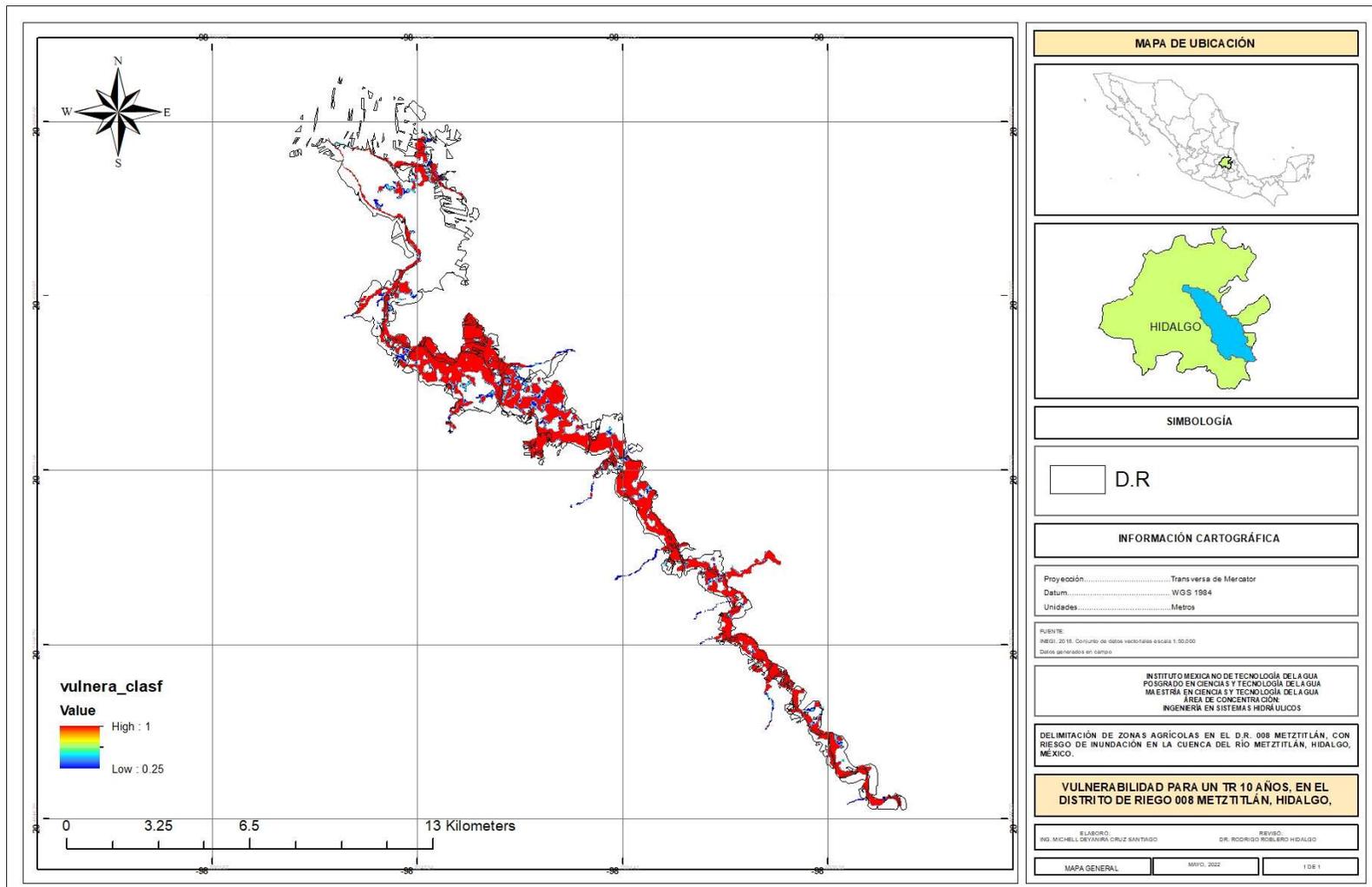


Figura 0.3. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 10 años.

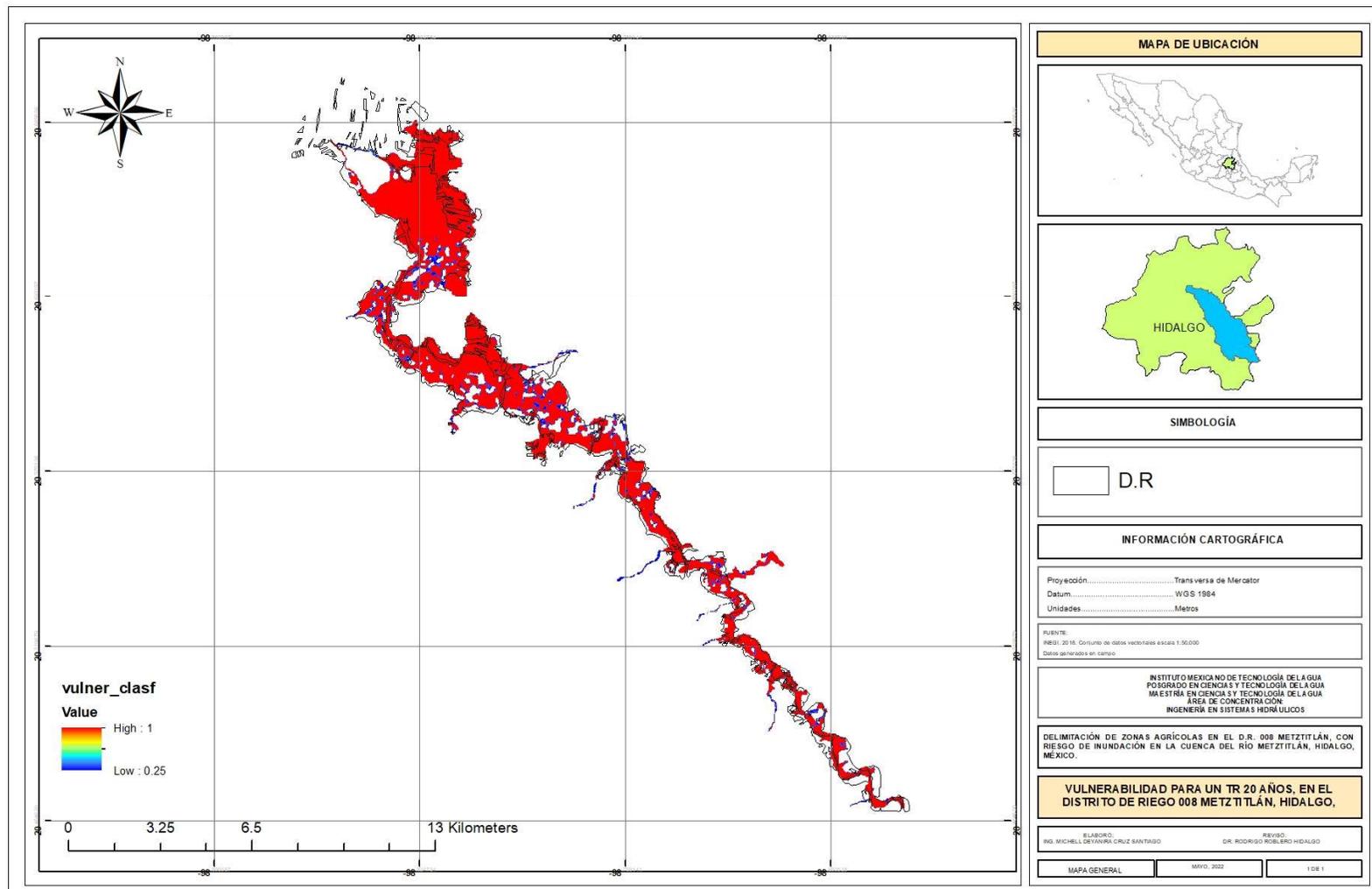


Figura 0.4. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 20 años.

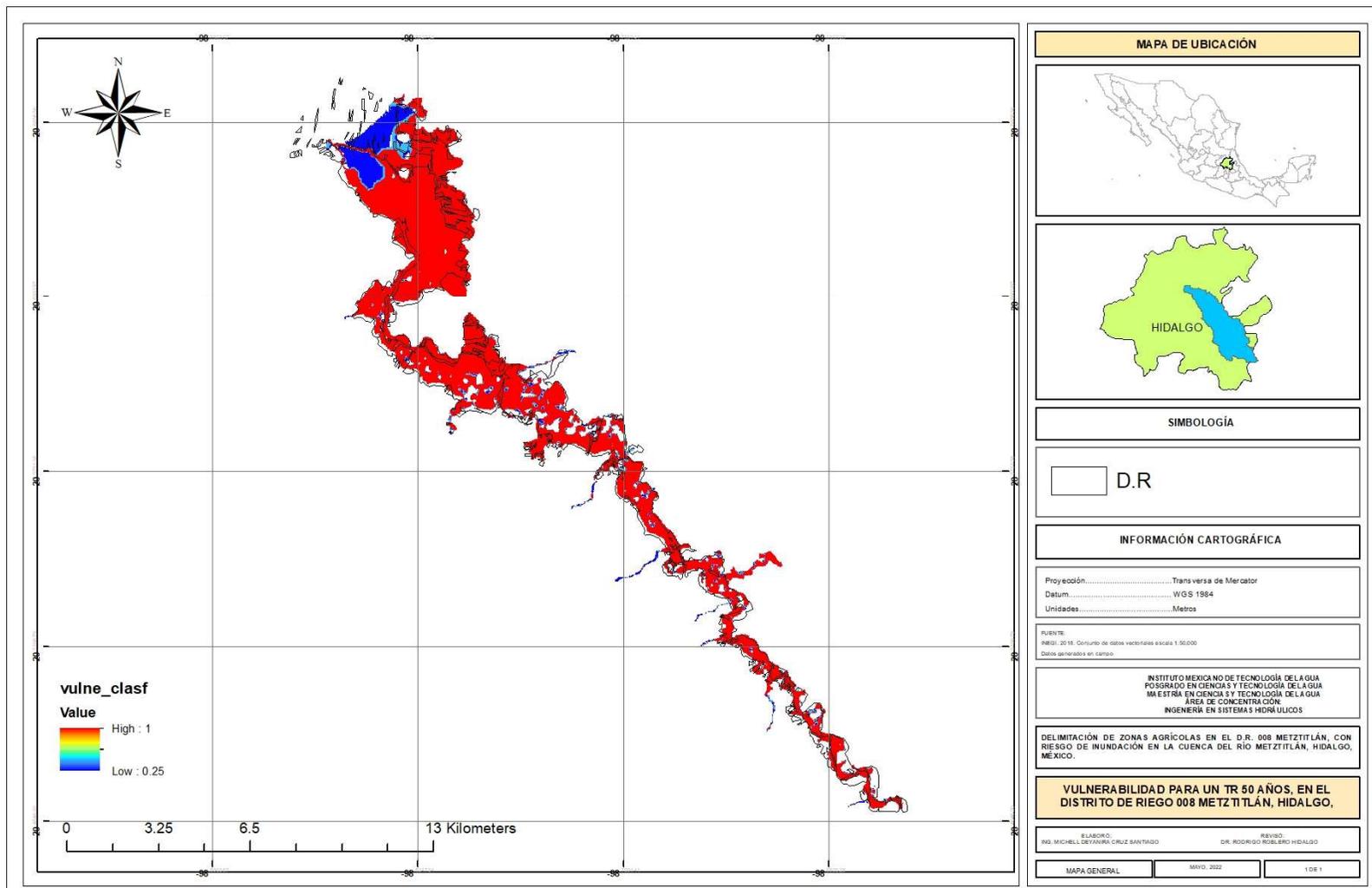


Figura 0.5. Mapa de vulnerabilidad para un Tr de 50 años.

## Anexo 5. Mapas de exposición por inundación en el D.R. 008 Metztlán.

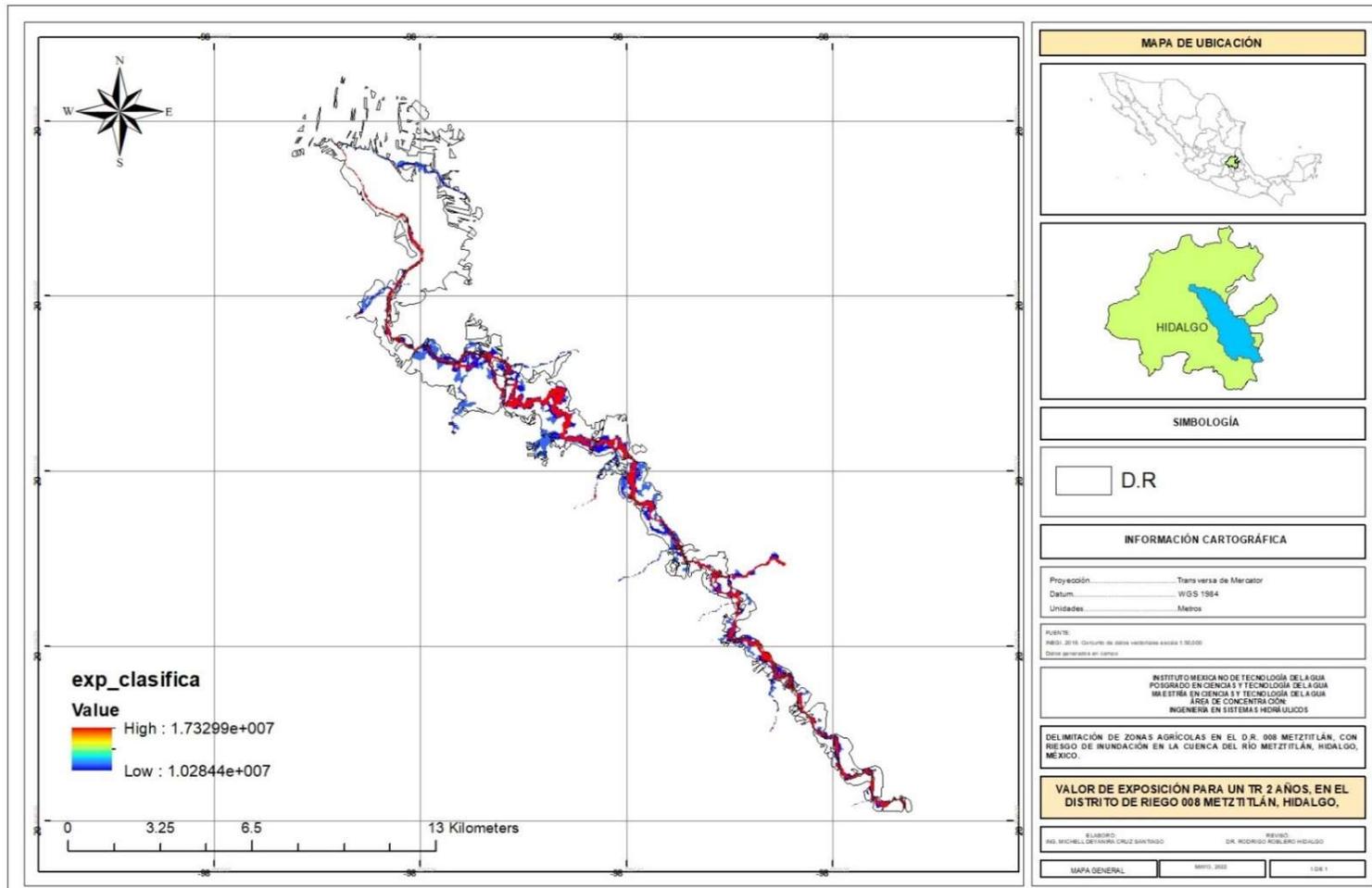


Figura 0.1. Mapa de exposición para un Tr de 2 años.

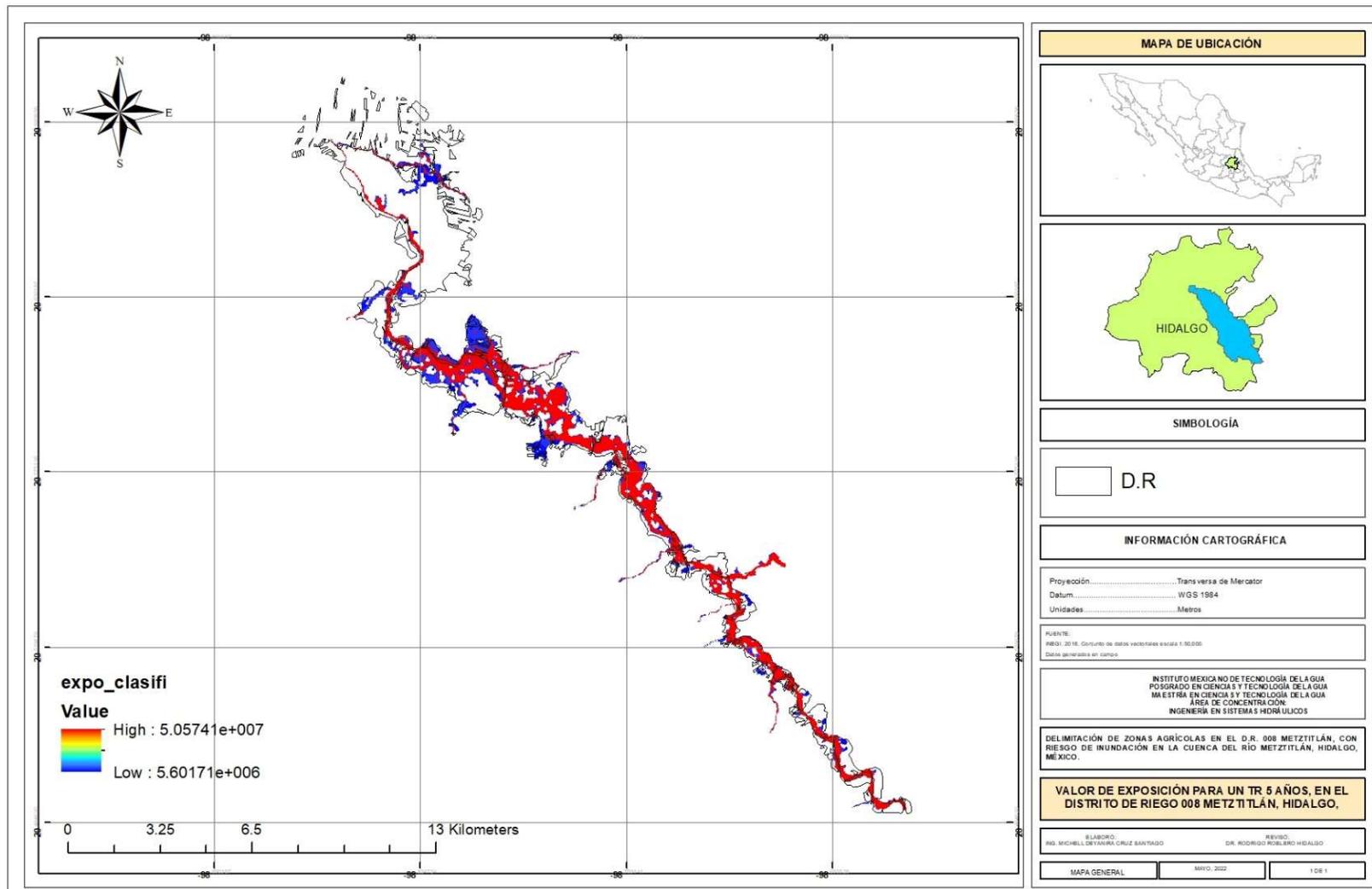


Figura 0.2. Mapa de exposición para un Tr de 5 años.

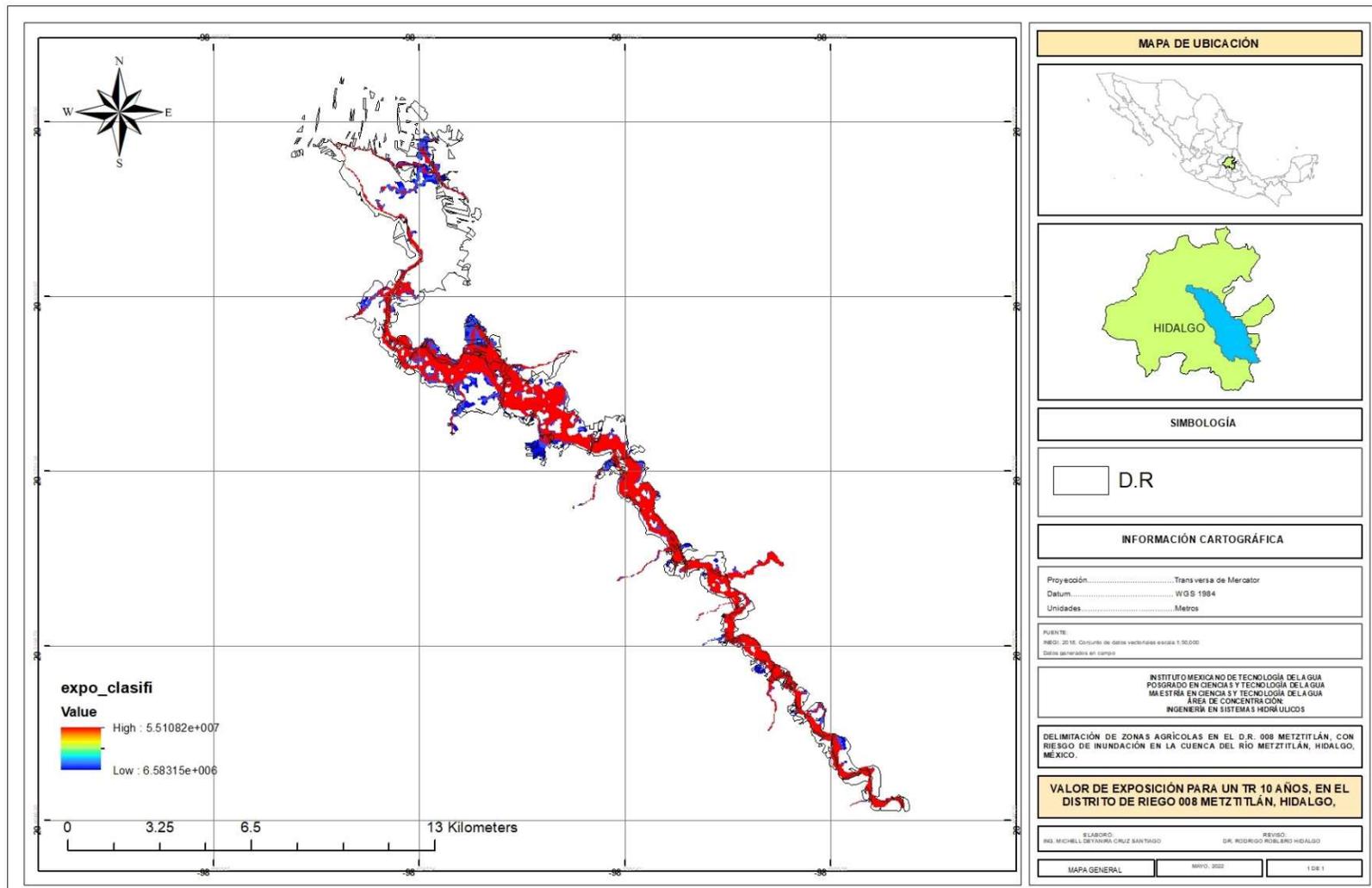


Figura 0.3. Mapa de exposición para un Tr de 10 años.



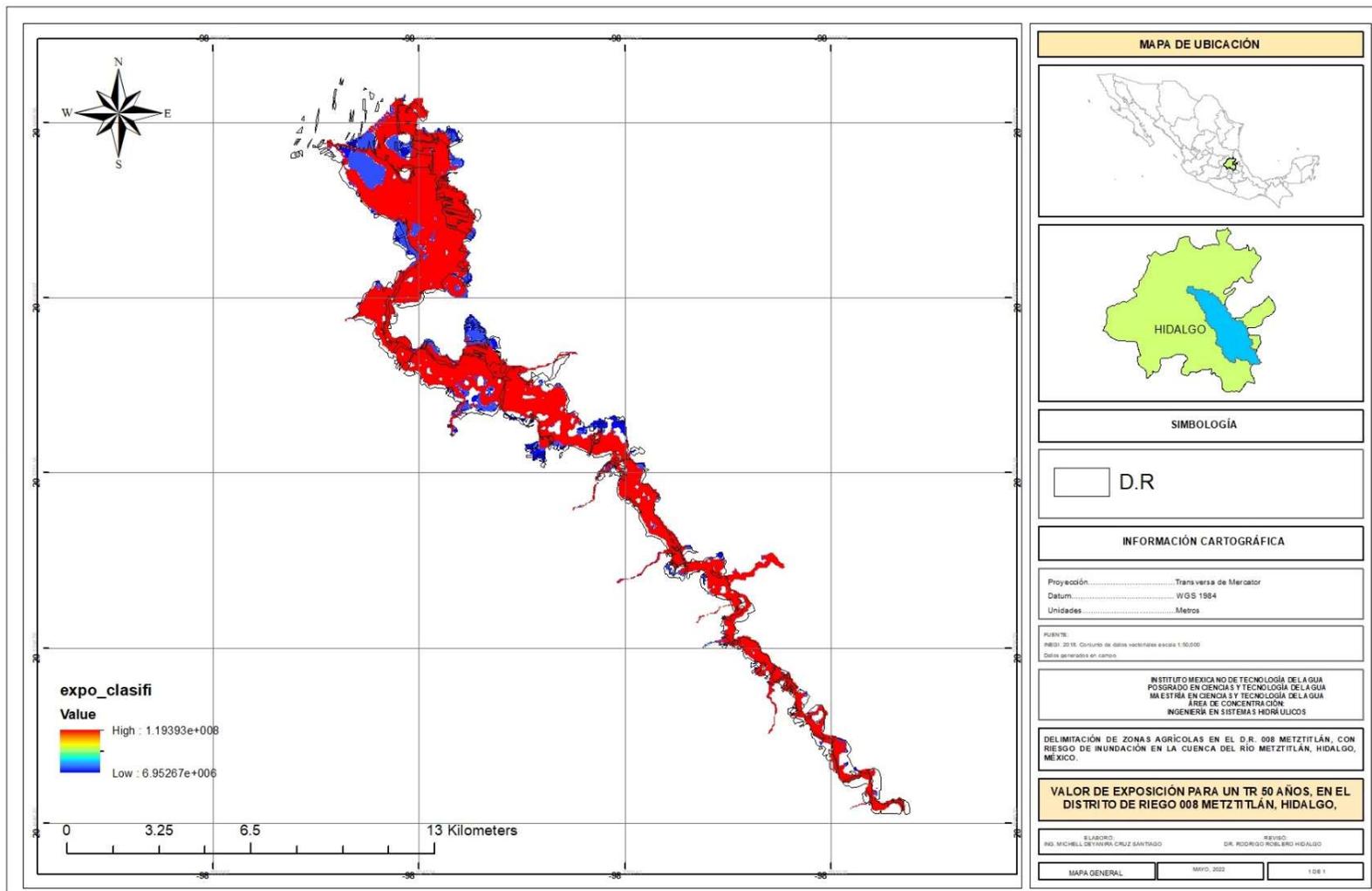


Figura 0.5. Mapa de exposición para un Tr de 50 años.

## Anexo 6. Mapas de riesgo por inundación en el D.R. 008 Metztlán.

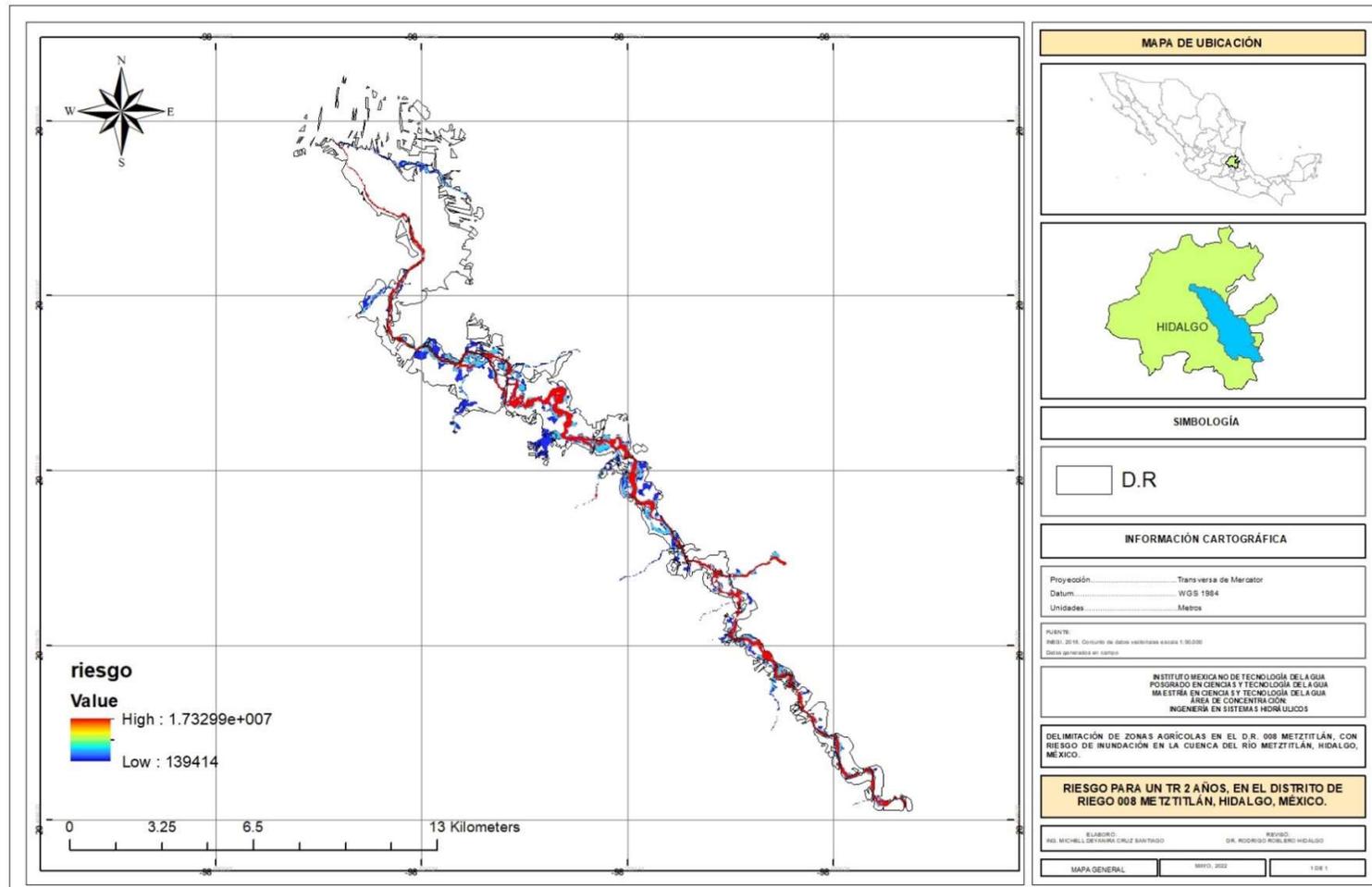


Figura 0.1. Mapa de riesgo para un Tr de 2 años.

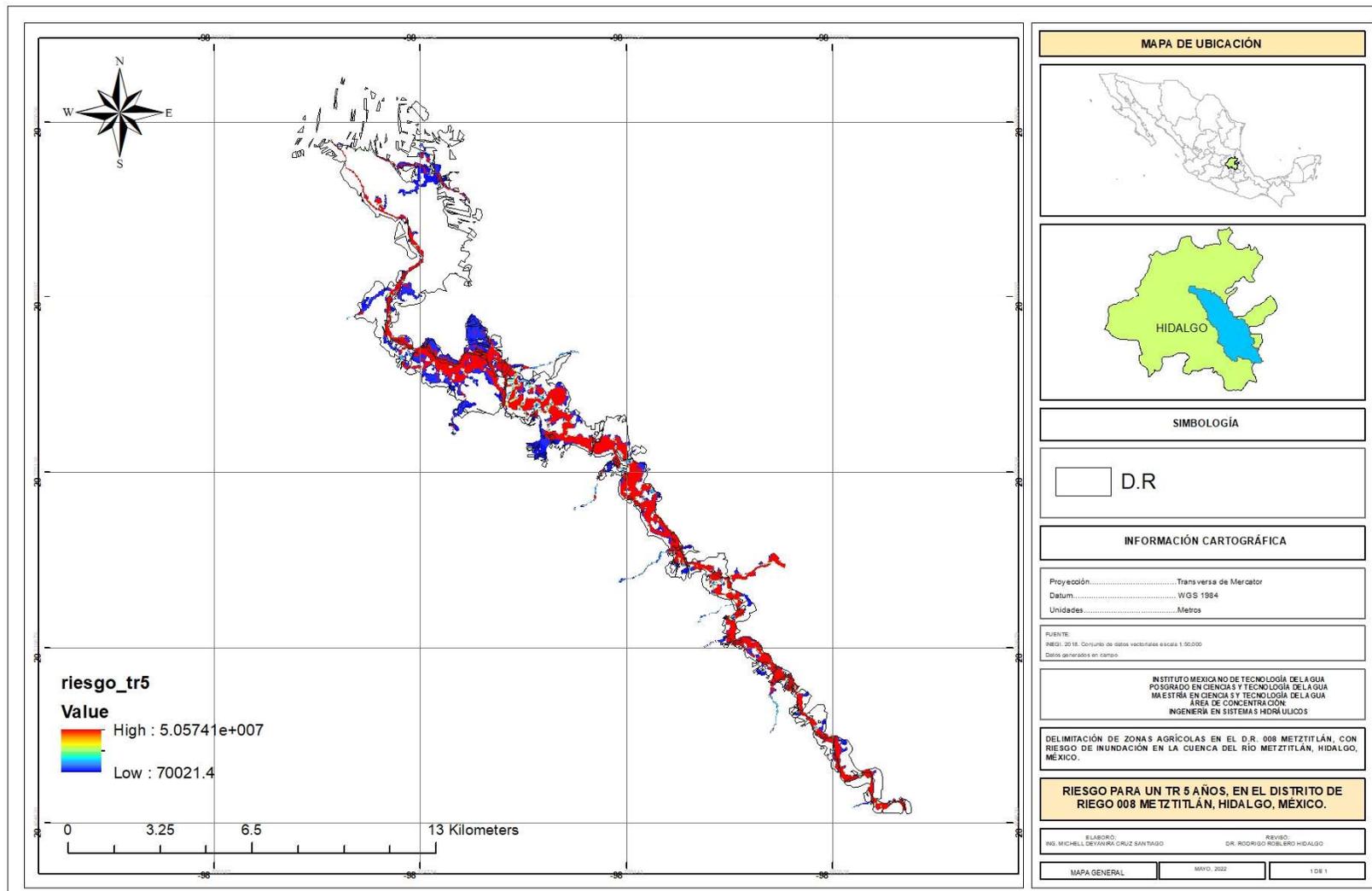


Figura 0.2. Mapa de riesgo para un Tr de 5 años.

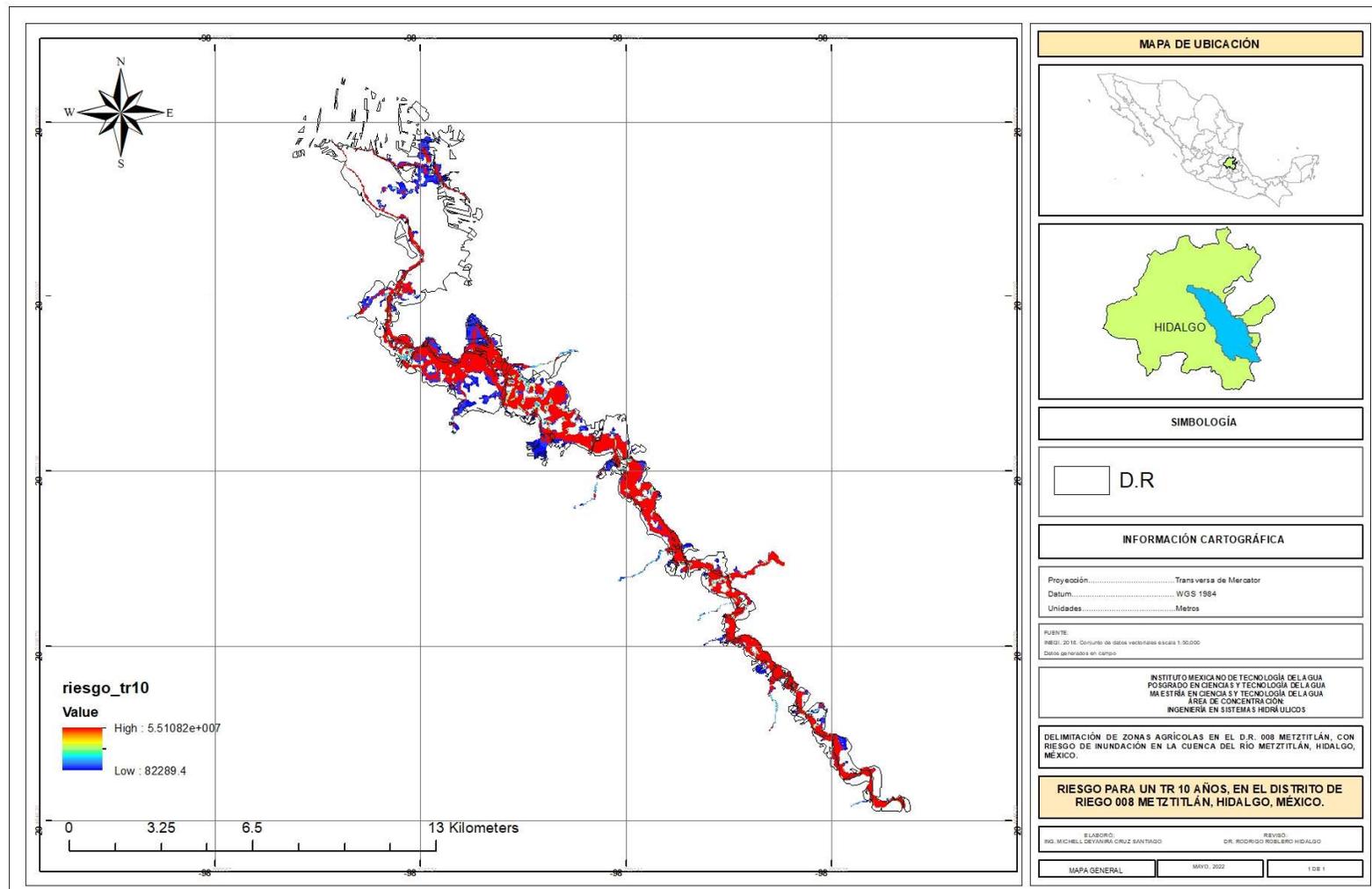


Figura 0.3. Mapa de riesgo para un Tr de 10 años.

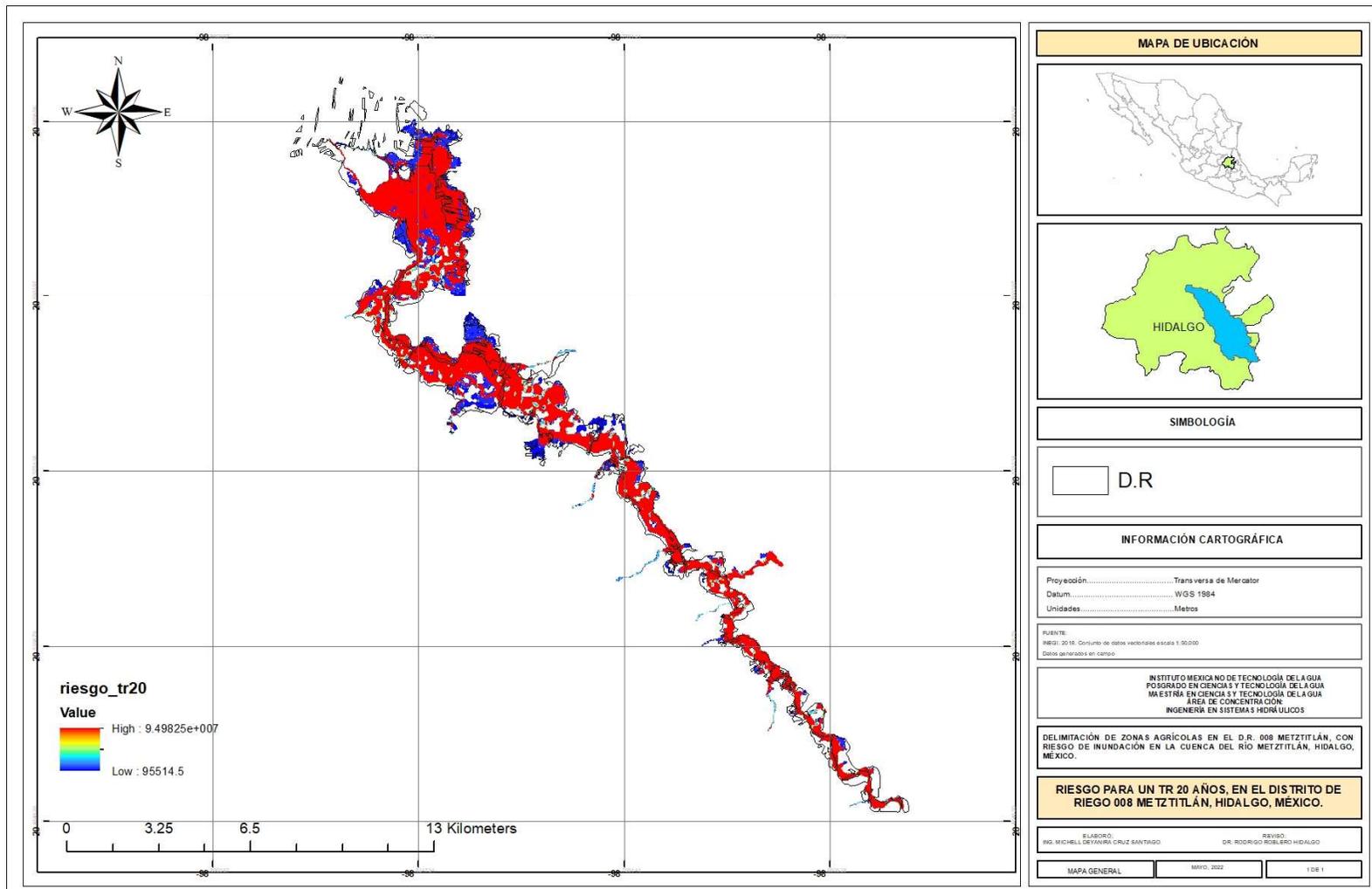


Figura 0.4. Mapa de riesgo para un Tr de 20 años.

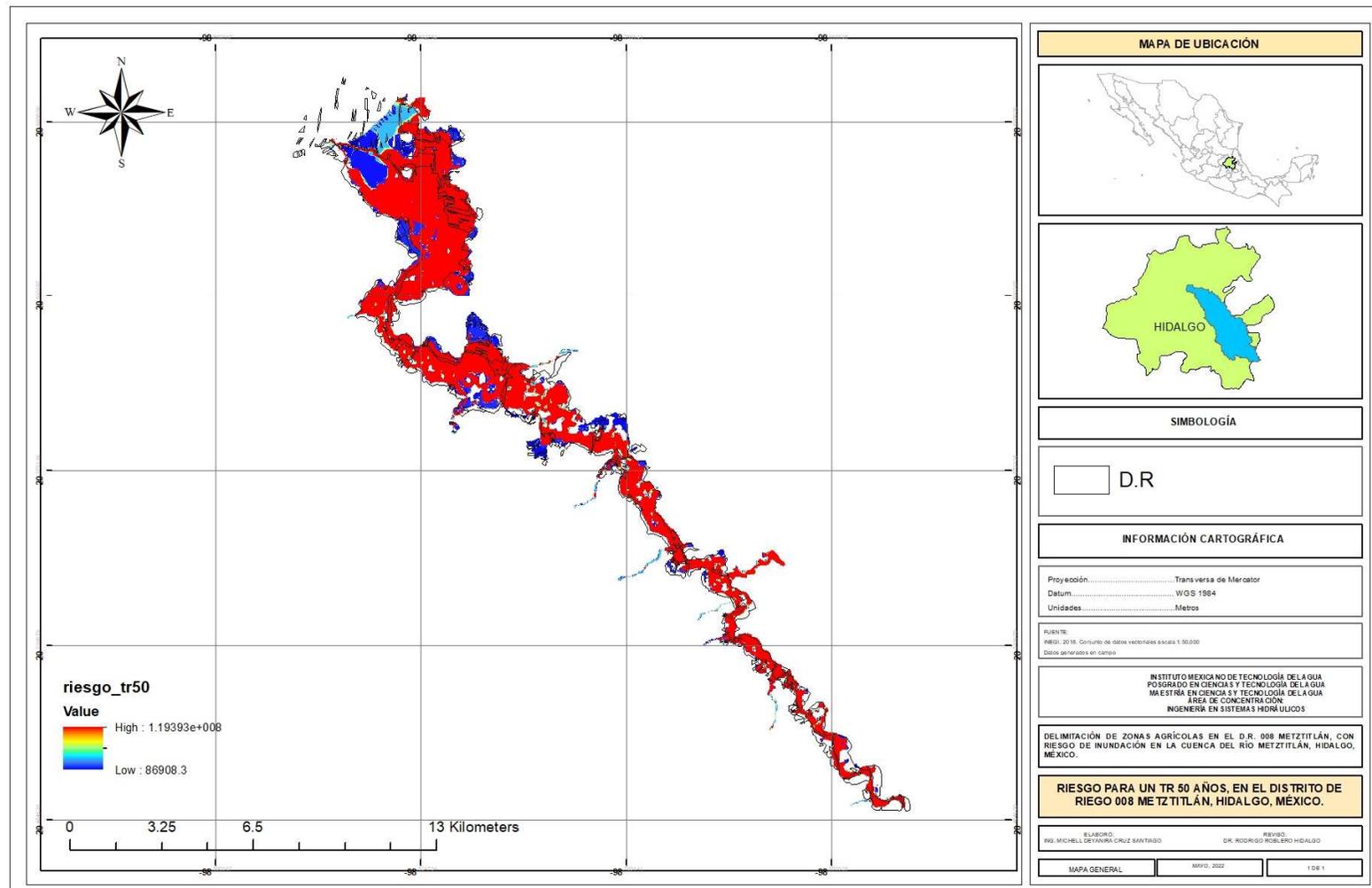


Figura 0.5. Mapa de riesgo para un Tr de 50 años.

## Anexo 7. Mapas de índice de riesgo por inundación en el D.R. 008 Metztitlán.

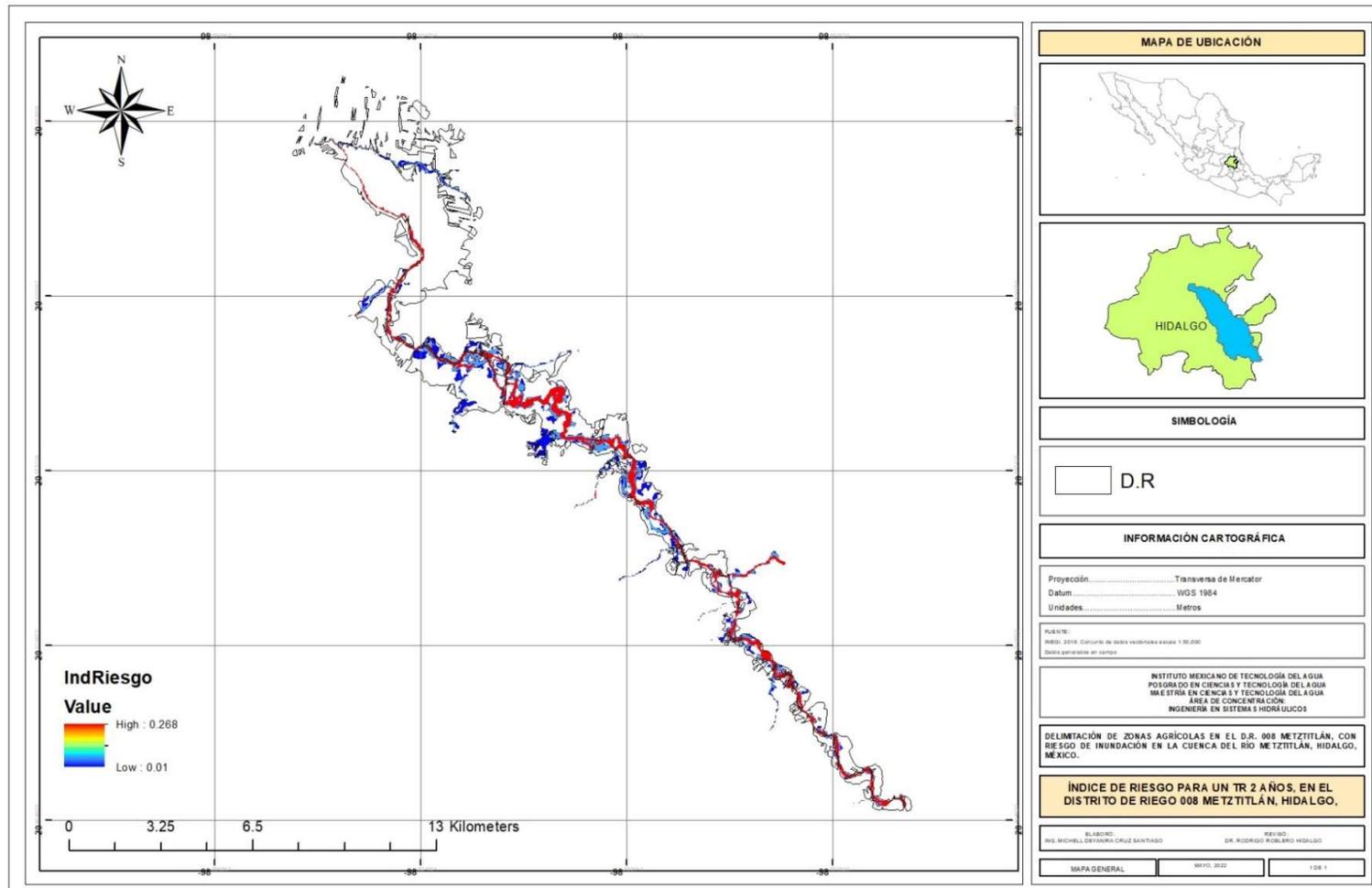


Figura 0.1. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 2 años.

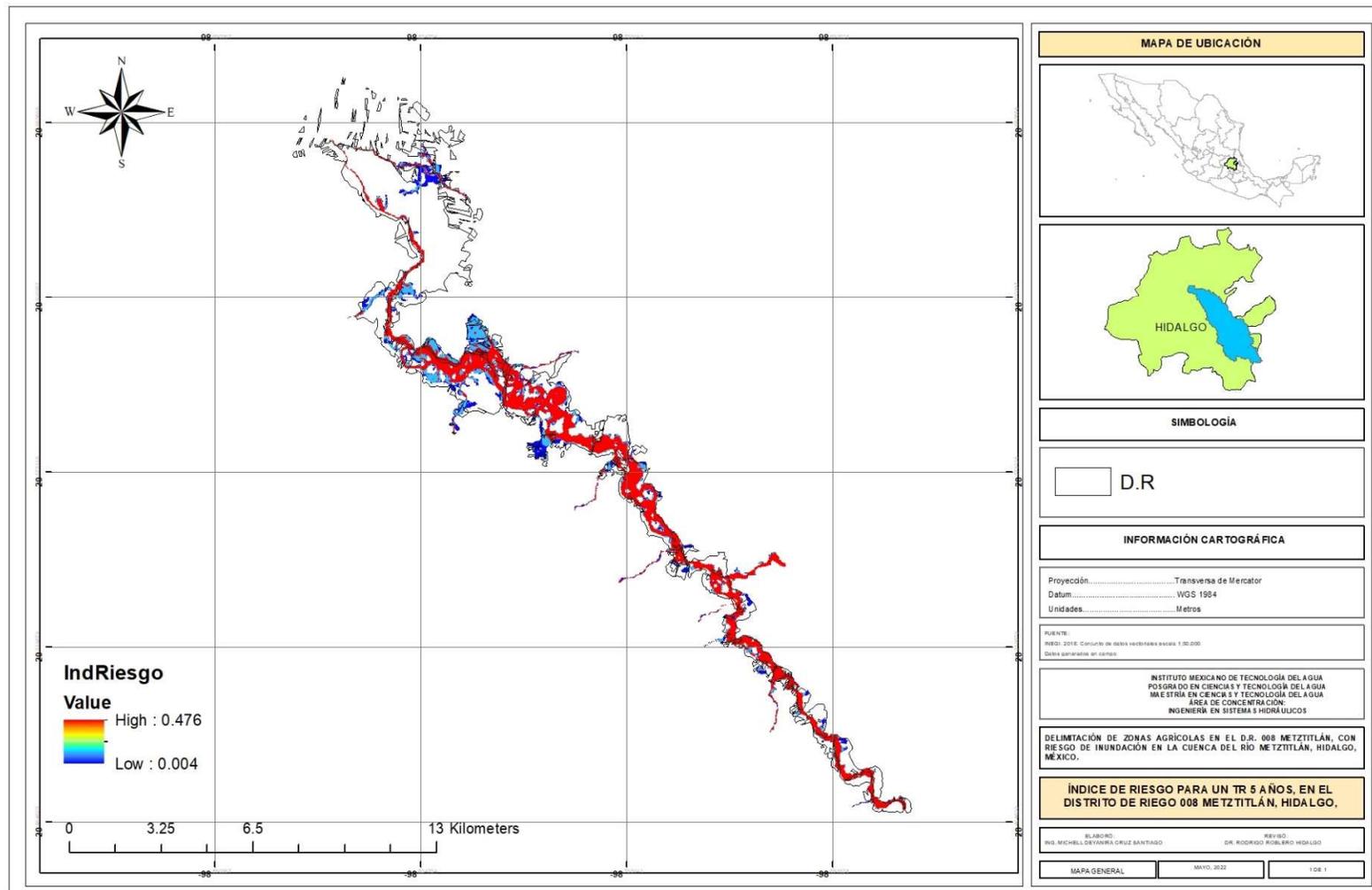


Figura 0.2. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 5 años.

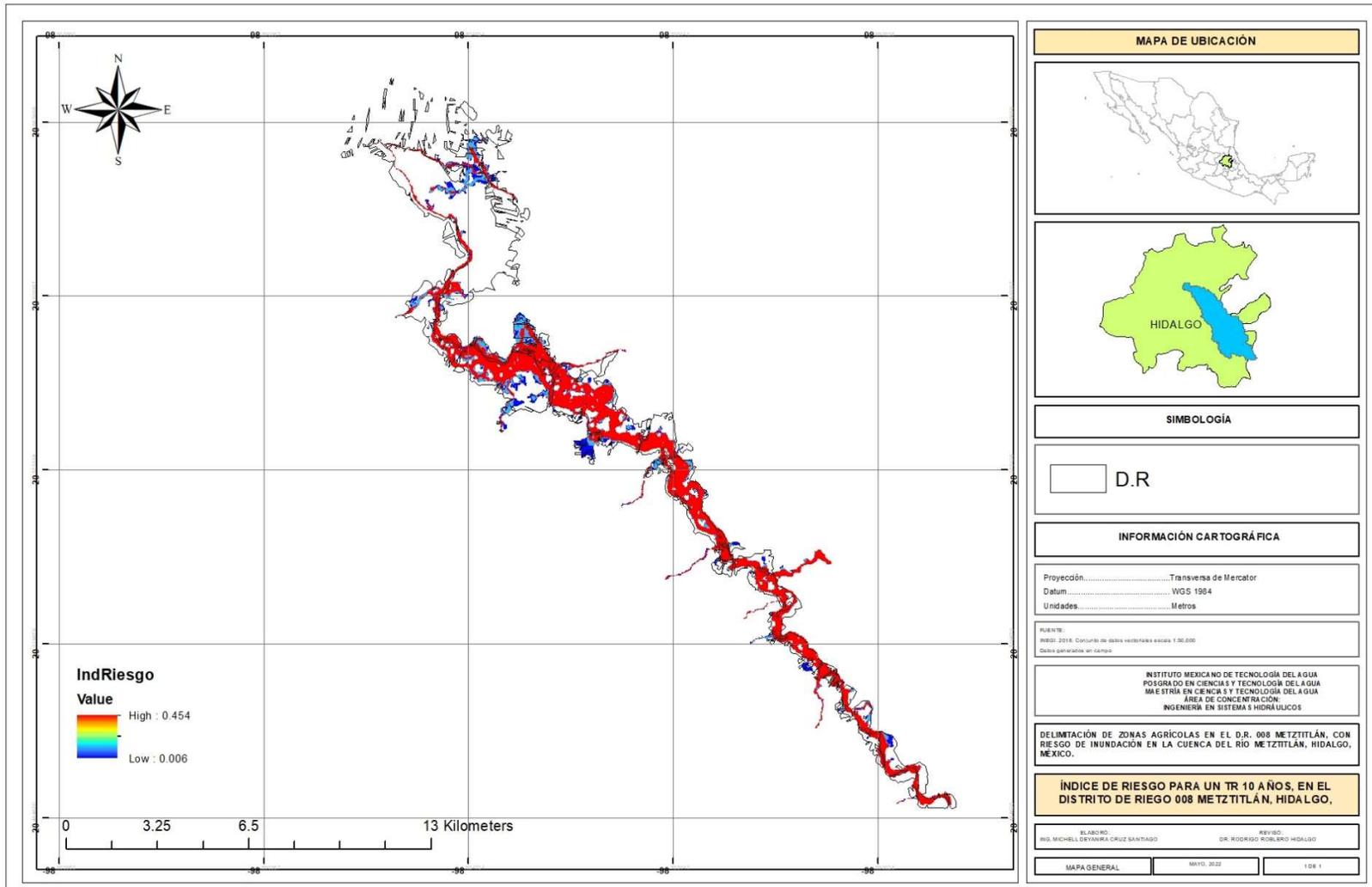


Figura 0.3. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 10 años.

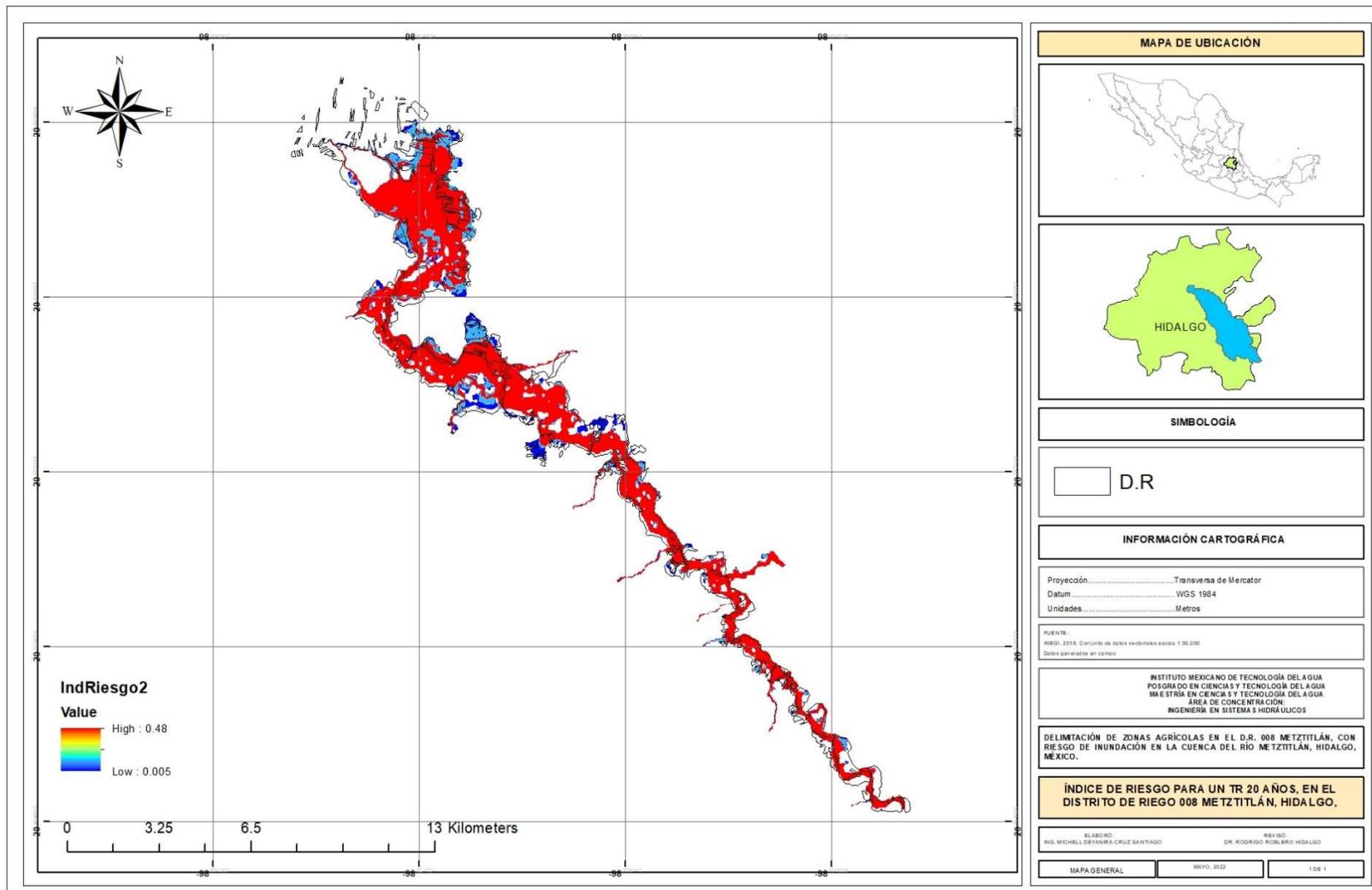


Figura 0.4. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 20 años.

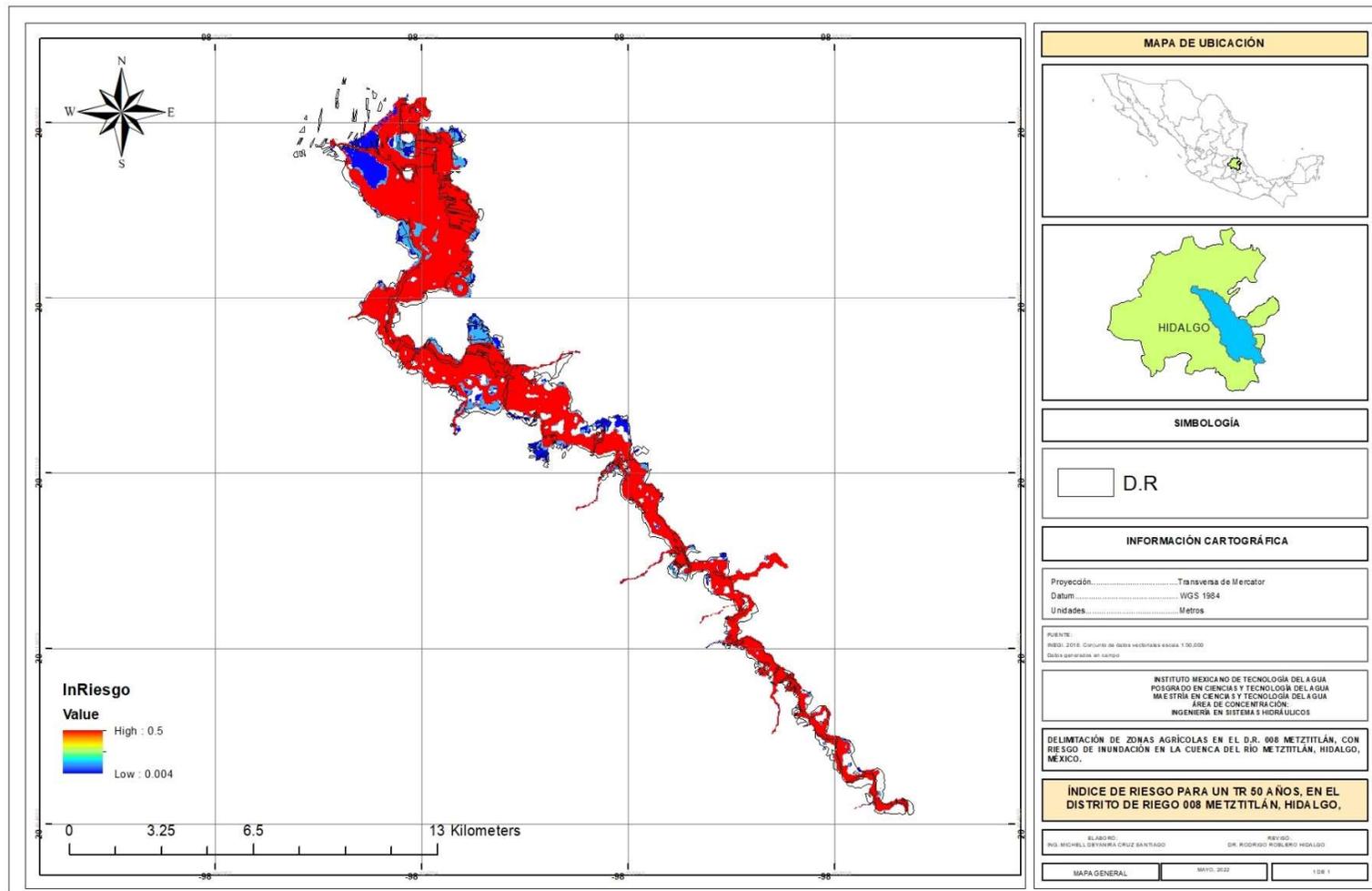


Figura 0.5. Mapa de índice de riesgo para un Tr de 50 años.

## Anexo 8. Utilidad probable por clasificación de riesgo para diferente periodo de retorno.

A continuación, se presentan la utilidad probable por hectárea por clasificación de riesgo, las utilidades negativas representan las pérdidas totales por hectárea.

Utilidad probable por hectárea para un Tr de 2 años.

Cuadro 0.1. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 2 años.

Clasificación del Riesgo	Ingreso probable con 100% de rendimiento	Riesgo (\$)	Costo de producción (\$)	Utilidad probable (\$)	Utilidad probable con el 60% de afectación (\$)/ha
Bajo	\$18,588,519.87	\$642,778.00	\$10,086,801.08	\$7,858,940.79	\$24,859.74
Medio	\$17,140,746.76	\$4,332,486.48	\$9,301,187.19	\$3,507,073.09	\$12,030.74
Alto	\$28,883,243.19	\$17,329,945.91	\$15,673,089.12	-\$4,119,791.85	-\$8,387.00

Utilidad probable por hectárea para un Tr de 5 años.

Cuadro 0.2. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 5 años.

Clasificación del Riesgo	Ingreso probable con 100% de rendimiento	Riesgo (\$)	Costo de producción (\$)	Utilidad probable (\$)	Utilidad probable con el 60% de afectación (\$)/ha
Bajo	\$9,336,183.97	\$471,491.08	\$5,066,150.03	\$3,798,542.86	\$23,923.51
Medio	\$12,573,095.44	\$12,643,534.67	\$6,822,614.90	-\$6,893,054.13	-\$32,236.42
Alto	\$84,290,231.15	\$50,574,138.69	\$45,738,918.46	-\$12,022,826.00	-\$8,387.00

Utilidad probable por hectárea para un Tr de 10 años.

Cuadro 0.3. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 10 años.

Clasificación del Riesgo	Ingreso probable con 100% de rendimiento	Riesgo (\$)	Costo de producción (\$)	Utilidad probable (\$)	Utilidad probable con el 60% de afectación (\$)/ha
Bajo	\$10,971,918.80	\$693,619.51	\$5,953,758.73	\$4,324,540.57	\$23,175.80

<b>Clasificación del Riesgo</b>	<b>Ingreso probable con 100% de rendimiento</b>	<b>Riesgo (\$)</b>	<b>Costo de producción (\$)</b>	<b>Utilidad probable (\$)</b>	<b>Utilidad probable con el 60% de afectación (\$)/ha</b>
Medio	\$18,496,520.15	\$13,777,041.66	\$10,036,878.71	-\$5,317,400.23	-\$16,903.89
Alto	\$91,846,944.40	\$55,108,166.64	\$49,839,463.52	-\$13,100,685.76	-\$8,387.00

Utilidad probable por hectárea para un Tr de 20 años.

Cuadro 0.4. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 20 años.

<b>Clasificación del Riesgo</b>	<b>Ingreso probable con 100% de rendimiento</b>	<b>Riesgo (\$)</b>	<b>Costo de producción (\$)</b>	<b>Utilidad probable (\$)</b>	<b>Utilidad probable con el 60% de afectación (\$)/ha</b>
Bajo	\$12,735,264.85	\$1,003,317.00	\$6,910,613.87	\$4,821,333.99	\$22,260.58
Medio	\$26,755,119.89	\$23,745,613.41	\$14,518,292.69	-\$11,508,786.21	-\$25,292.98
Alto	\$158,304,089.38	\$94,982,453.63	\$85,901,506.46	-\$22,579,870.71	-\$8,387.00

Utilidad probable por hectárea para un Tr de 50 años.

Cuadro 0.5. Utilidad probable por hectárea para un Tr de 50 años.

<b>Clasificación del Riesgo</b>	<b>Ingreso probable con 100% de rendimiento</b>	<b>Riesgo (\$)</b>	<b>Costo de producción (\$)</b>	<b>Utilidad probable (\$)</b>	<b>Utilidad probable con el 60% de afectación (\$)/ha</b>
Bajo	\$11,587,777.78	\$1,052,174.35	\$6,287,946.02	\$4,247,657.42	\$21,553.94
Medio	\$28,057,982.70	\$29,848,162.38	\$15,225,273.03	-\$17,015,452.71	-\$35,658.61
Alto	\$198,987,749.23	\$119,392,649.54	\$107,977,927.12	-\$28,382,827.43	-\$8,387.00