



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS

**Facultad de Ingeniería
Campus I**

Coordinación de Investigación y Posgrado



*CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO POR INUNDACIONES
PARA LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ UTILIZANDO
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA E INDICADORES
SOCIOECONOMICOS, INTEGRADOS EN UN SISTEMA DE
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA*

Tesis que para obtener el grado de:

Maestra en Ingeniería con formación en Hidráulica

Presenta:

YRMA YSELA CETINA HERNÁNDEZ PS1908

Directora de Tesis:

DRA. DELVA DEL ROCÍO GUICHARD ROMERO

Tuxtla Gutiérrez Chiapas; Junio de 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE INGENIERÍA C-I



Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
20 de junio del 2022
Oficio No. F.I.01.1141/2022

**C. YRMA YSELA CETINA HERNÁNDEZ
ALUMNA DE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CON FORMACIÓN EN HIDRÁULICA
PRESENTE.**

Con base en el Reglamento de Evaluación Profesional para los egresados de la Universidad Autónoma de Chiapas, y habiéndose cumplido con las disposiciones en cuanto a la aprobación por parte de los integrantes del jurado en el contenido de su Tesis Titulada:

**“CÁLCULO DEL ÍNDICE DE RIESGO POR INUNDACIONES PARA LA CIUDAD DE TUXTLA GUTIÉRREZ
UTILIZANDO CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA E INDICADORES SOCIOECONÓMICOS,
INTEGRADOS EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA”.**

CERTIFICO el **VOTO APROBATORIO** emitido por este jurado, y autorizo la impresión de dicho trabajo para que sea sustentado en su Examen Profesional para obtener el grado de Maestra en Ingeniería con formación en Hidráulica.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE
“POR LA CONCIENCIA DE LA NECESIDAD DE SERVIR”**

**DR. JOSÉ ALONSO FIGUEROA GALLEGOS
ENCARGADO DE DIRECCIÓN**



**DIRECCIÓN DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Ccp. Dra. Daisy Escobar Castillejos, Coordinadora de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería.
Archivo minutorio
JAFG/DEC/tpg*



Código: FO-113-05-05

Revisión: 0

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS DE TÍTULO Y/O GRADO.

El (la) suscrito (a) Yrma Ysela Cetina Hernández,
Autor (a) de la tesis bajo el título de "Cálculo del índice de riesgo por inundaciones para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez utilizando características físicas de la cuenca e indicadores socioeconómicos, integrados en un sistema de información geográfica,"
presentada y aprobada en el año 20 22 como requisito para obtener el título o grado de Maestra en Ingeniería con formación en Hidráulica, autorizo a la Dirección del Sistema de Bibliotecas Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH), a que realice la difusión de la creación intelectual mencionada, con fines académicos para que contribuya a la divulgación del conocimiento científico, tecnológico y de innovación que se produce en la Universidad, mediante la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Consulta del trabajo de título o de grado a través de la Biblioteca Digital de Tesis (BIDITE) del Sistema de Bibliotecas de la Universidad Autónoma de Chiapas (SIBI-UNACH) que incluye tesis de pregrado de todos los programas educativos de la Universidad, así como de los posgrados no registrados ni reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACYT.
- En el caso de tratarse de tesis de maestría y/o doctorado de programas educativos que sí se encuentren registrados y reconocidos en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), podrán consultarse en el Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma de Chiapas (RIUNACH).

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas; a los 30 días del mes de Agosto del año 2022.


Yrma Ysela Cetina Hernández

Nombre y firma del Tesista o Tesistas

Índice General

| | |
|---|-----------|
| Capítulo 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Contexto de la investigación..... | 1 |
| 1.2. Problemática..... | 2 |
| 1.3 Justificación | 2 |
| 1.4 Delimitación espacial..... | 4 |
| 1.5. Estado del conocimiento..... | 5 |
| 1.6. Objetivos de investigación..... | 8 |
| Capítulo 2. Marco Teórico..... | 9 |
| 2.1. Concepto de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo | 9 |
| 2.2. Concepto de Sistema de Información Geográfica | 10 |
| 2.3. Variables del ciclo hidrológico | 12 |
| 2.4. Características de la cuenca | 12 |
| 2.5. Indicadores Socioeconómicos..... | 15 |
| Capítulo 3. Desarrollo de la Investigación | 16 |
| 3.1. Tipo y diseño de la investigación | 16 |
| 3.2. Elementos geográficos, variables hidrológicas y socioeconómicas ... | 16 |
| 3.3. Construcción del índice de riesgo por inundación..... | 17 |
| 3.3.1. Indicador Hidrológico | 19 |
| 3.3.1.1. Respuesta Hidrológica | 19 |
| 3.3.1.2. Zonificación | 24 |
| 3.3.1.3. Isoyetas..... | 27 |
| 3.3.2. Indicador de Exposición..... | 37 |
| 3.3.2.1. Densidad de población | 37 |
| 3.3.2.2. Tipo de vivienda | 41 |
| 3.3.3. Indicador de Vulnerabilidad Social..... | 44 |
| 3.3.3.1. Grupos Vulnerables | 44 |
| 3.4. Discusión de resultados, Conclusiones y Trabajo a Futuro | 46 |

| | |
|---|-----------|
| ANEXO A. Indicador Hidrológico | 48 |
| Anexo A1. Respuesta Hidrológica..... | 48 |
| Anexo A.2. Zonificación | 55 |
| Anexo A.3. Isoyetas | 58 |
| Referencias Bibliográficas | 62 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Fig. 3.1. Microcuencas del río Sabinal..... | 18 |
| Fig. 3.2. Factor de Forma de las Microcuencas del río Sabinal..... | 22 |
| Fig. 3.3. Coeficiente de Compacidad de las Microcuencas del río Sabinal | 22 |
| Fig. 3.4. Pendiente Media del Cauce Principal de las Microcuencas del Río Sabinal | 23 |
| Fig. 3.5. Pendiente Media de las Microcuencas del Río Sabinal..... | 23 |
| Fig. 3.6. Respuesta Hidrológica | 24 |
| Fig. 3.7. Mancha Urbana de Tuxtla Gutiérrez y Tirante Máximo (Tr = 50) | 25 |
| Fig. 3.8. Zonificación para Tr = 20 | 26 |
| Fig. 3.9. Zonificación para Tr = 50 | 26 |
| Fig. 3.10. Zonificación para Tr = 100..... | 27 |
| Fig. 3.11. Ajuste a la distribución Gumbel usando Hidroesta..... | 28 |
| Fig. 3.12. Isoyetas para un Tr = 50..... | 31 |
| Fig. 3.13. Precipitación promedio de la microcuenca San Francisco (Tr50) | 32 |
| Fig. 3.14. Precipitación Promedio para un Tr = 2..... | 34 |
| Fig. 3.15. Precipitación Promedio para un Tr = 50..... | 34 |
| Fig. 3.16. Precipitación promedio para un Tr =100..... | 35 |
| Fig. 3.17. Componente Isoyetas | 36 |
| Fig. 3.18. Indicador Hidrológico..... | 37 |
| Fig. 3.19. Densidad de Población | 39 |
| Fig. 3.20. Densidad de Población | 41 |
| Fig. 3.21. Tipo de Vivienda | 43 |
| Fig. 3.22. Indicador de Exposición..... | 43 |
| Fig. 3.23. Indicador de Vulnerabilidad Social..... | 45 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1. Evolución de la población en la cuenca del Río Sabinol | 3 |
| Tabla 3.1. Microcuencas del Río Sabinol..... | 18 |
| Tabla 3.2. Clasificación del Índice de Compacidad (K_c) | 19 |
| Tabla 3.3. Clasificación del Factor de Forma (K_f) | 20 |
| Tabla 3.4. Pendiente Media de la Cuenca | 20 |
| Tabla 3.5. Parámetros morfométricos de las microcuencas del Río Sabinol | 21 |
| Tabla 3.6. Estaciones en la cuenca del Río Sabinol | 28 |
| Tabla 3.7. Valores Regionales..... | 29 |
| Tabla 3.8. Valores de precipitación por estación | 30 |
| Tabla 3.9. Precipitación promedio obtenida con el método de isoyetas | 33 |
| Tabla 3.10. Densidad de Población | 38 |
| Tabla 3.11. Valores de referencia entre Densidad de Población y Vulnerabilidad..... | 39 |
| Tabla 3.12. Indicador de Densidad de Población | 40 |
| Tabla 3.13. Intervalos de vulnerabilidad según el tipo de vivienda..... | 41 |
| Tabla 3.14. Indicador de Vulnerabilidad..... | 42 |
| Tabla 3.15. Intervalos Grupos Vulnerables..... | 44 |
| Tabla 3.16. Grupos Vulnerables | 45 |
| Tabla 4.1. Microcuencas con índice de riesgo alto..... | 46 |
| Tabla 4.2. Microcuencas con índice de riesgo medio | 46 |
| Tabla 4.3. Microcuencas con índice de riesgo bajo | 47 |

Capítulo 1. Introducción

1.1. Contexto de la investigación

La Organización Meteorológica Mundial (WMO), en el Glosario Internacional de Hidrología, establece que una inundación es el “Desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua” (WMO, 2012).

A nivel mundial las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre. De acuerdo con la Cruz Roja Internacional, durante el periodo 1919-2004, han colaborado con ayuda en más eventos de inundaciones que de cualquier otro tipo, en gran medida porque el acelerado desarrollo de las comunidades modifica los ecosistemas locales, incrementando el riesgo de inundación al que están expuestas muchas poblaciones. (Salas y Jiménez, 2019, pág.3).

“Un promedio anual aproximado de 196 millones de personas en más de 90 países se encuentran expuestas a inundaciones catastróficas” (PNUD, 2004).

Las inundaciones pluviales ocurren como consecuencia de la precipitación, y se presentan cuando el terreno se ha saturado y el agua de lluvia excedente comienza a acumularse, pudiendo permanecer horas o días.

Las inundaciones fluviales se generan cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie de terreno cercano a ellos; en este tipo de inundaciones el agua desbordada corresponde a precipitaciones registradas en cualquier parte de la cuenca tributaria y el volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces, se va incrementando con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más desarrollo (longitud).

Las inundaciones costeras se presentan cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y permite que éste penetre tierra adentro, en las zonas costeras, generando el cubrimiento de grandes extensiones de terreno.

Las inundaciones lentas se presentan como resultado de la saturación del terreno por una precipitación; conforme el escurrimiento avanza hacia la salida de la cuenca, se incrementa

proporcionalmente con el área drenada. Si el volumen que fluye por los cauces excede la capacidad de éstos, se presentan desbordamientos sobre sus márgenes y el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno.

Las inundaciones súbitas son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas (Salas y Jiménez, 2019).

1.2. Problemática

En México y en el estado de Chiapas, a nivel gubernamental, se tienen registros oficiales de inundaciones periódicas ocasionadas por el desbordamiento del Río Sabinal, el cual atraviesa la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y desemboca en el Río Grijalva.

Existen estudios y proyectos que describen la problemática de las inundaciones en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez por el desbordamiento del Río Sabinal y proponen diversas acciones de prevención y mitigación, tales como el “Programa de Manejo Integrado de la Subcuenca del Río Sabinal, Chiapas” (2014), el Atlas de Riesgos de Tuxtla Gutiérrez (2005) y el Plan de Manejo Integral de la Cuenca del Río Sabinal (2009).

La revisión de los registros, estudios y proyectos relacionados con las inundaciones en Tuxtla Gutiérrez, permite concluir que la información se ubica en diferentes plataformas, y consiste principalmente en mapas que muestran las zonas de riesgo por inundación.

Lo relevante es que los datos desplegados no están asociados a tablas de atributos con información que integre las características físicas de la cuenca y los indicadores socioeconómicos, los cuales intervienen en la identificación de zonas de vulnerabilidad y riesgo, y permiten brindar información útil para el diseño de acciones de mitigación y prevención, por la parte institucional, para así beneficiar a la sociedad en general.

1.3 Justificación

El informe “La reducción de riesgos de desastres”, realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), indica que aproximadamente el 75 % de la población mundial, en más de 100 países, está expuesta periódicamente al menos a un

terremoto, un ciclón tropical, una inundación o una sequía. Se ha registrado que los desastres provocados por estos fenómenos naturales arrojan un saldo de más de 184 muertos por día en distintas partes del mundo. (PNUD, 2004).

En la cuenca del río Sabinal, en donde se ubican los municipios de Berriozábal, Ocozocoautla de Espinosa, San Fernando y Tuxtla Gutiérrez, la evolución de la población, muestra un crecimiento acelerado, ocasionando el incremento de asentamientos irregulares ubicados en zonas inundables y coloca en situación de riesgo a estos habitantes. En la tabla 1.1 se puede apreciar el incremento poblacional reciente:

Tabla 1.1. Evolución de la población en la cuenca del Río Sabinal

| <i>Evolución de la Población en la Cuenca del Río Sabinal</i> | | | |
|---|----------------|----------------|----------------|
| <i>Municipio</i> | <i>1995</i> | <i>2000</i> | <i>2010</i> |
| Berriozábal | 18,789 | 22,103 | 34,187 |
| Ocozocoautla de Espinosa | 89 | 121 | 85 |
| San Fernando | 16,223 | 18,911 | 24,409 |
| Tuxtla Gutiérrez | 382,391 | 430,180 | 546,621 |
| Total | 417,492 | 471,315 | 605,302 |

Nota. Elaboración propia con información del Censo de Población y Vivienda 1995, Censo de Población y Vivienda 2000 y Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI

Para lograr el involucramiento de la sociedad es indispensable contar con una base de información geográfica que conjunte diferentes capas temáticas en una herramienta de visualización interactiva, que contribuya a crear conciencia de nuestras vulnerabilidades frente a las amenazas, para estar en posibilidad de tomar medidas de prevención y mitigación del riesgo ante inundaciones.

Mediante el acopio, procesamiento y análisis de la información generada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y la Secretaría de Protección Civil del Estado de Chiapas, entre otras instancias, es posible construir una metodología para la obtención del índice de riesgo por inundaciones e integrar los resultados en un SIG

que brinde información confiable en apoyo a la sociedad: “Para poder intervenir el riesgo es necesario reconocerlo, medirlo y representarlo mediante modelos, mapas, índices, etc., que tengan significado para la sociedad y para los tomadores de decisiones” (Cardona, 2007).

1.4 Delimitación espacial

La ciudad de Tuxtla Gutiérrez, en Chiapas, México, se ubica dentro de la cuenca del río Sabinal y en épocas diferentes ha sufrido inundaciones que han tenido consecuencias importantes para su población. El trabajo que aquí se propone es el de examinar los factores que inciden en el análisis de riesgo por inundación, orientado a salvaguardar la integridad de los habitantes de este espacio urbano.

De acuerdo con la publicación en el Diario Oficial de la Federación, la cuenca del Río Sabinal está ubicada dentro de la región hidrológica No. 30 denominada Grijalva-Usumacinta, en la cuenca administrativa Grijalva-Tuxtla Gutiérrez, drena una superficie de 382 kilómetros cuadrados y se encuentra delimitada al norte por las cuencas hidrológicas Chapopote y Presa Chicoasén, al este por la cuenca hidrológica Presa Chicoasén, al sur por la cuenca hidrológica Suchiapa y al oeste por las cuencas hidrológicas de La Venta y Chapopote (DOF, 2018).

Dentro de la cuenca se localizan los municipios de Berriozábal, Ocozocoautla de Espinosa, San Fernando y Tuxtla Gutiérrez, así como 271 localidades, de las cuales cinco son urbanas (Tuxtla Gutiérrez, Copoya, Berriozábal, San Fernando y El Progreso), el resto se identifican como localidades rurales (con menos de 2500 habitantes).

Los datos del Censo de Población y Vivienda del año 2010 del INEGI, indican que la población de la cuenca es de 605,302 habitantes, de los cuales el 90.3% habita en el municipio de Tuxtla Gutiérrez.

La presente investigación se acota para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, capital del estado de Chiapas, por ser la de mayor representatividad poblacional en la cuenca del Río Sabinal.

1.5. Estado del conocimiento

El informe realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el año 2005, denominado “*Indicadores de Riesgo de Desastre y Gestión de Riesgos*”, describe, para doce países de América Latina y el Caribe, cuatro indicadores que miden el impacto potencial de peligros naturales, la vulnerabilidad de esos países, y su capacidad para manejar los riesgos. El desarrollo de este sistema de indicadores se basa en datos de Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, República Dominicana, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Jamaica, México, Perú, y Trinidad y Tobago. La actualización del informe al 2007 considera una ampliación de la base de datos de los países e incluye a Bolivia y Nicaragua (Cardona, 2007).

Hernández R.E. et al. (2017) describen una metodología de análisis de riesgo por inundación aplicada a la cuenca urbana del río Atemajac, Jalisco, México, la cual dirigen a quienes toman decisiones con el objetivo de mitigar daños. La metodología emplea modelación numérica e índices económicos, sociales y ambientales, obteniendo resultados que muestran zonas de riesgo y de alta vulnerabilidad por tramos del río Atemajac, así como mapas de inundación y daños.

Jiménez et al. (2012) presentan una publicación denominada *Mapa de Índices de Riesgo a Escala Municipal por Fenómenos Hidrometeorológicos*, mediante la que detallan un método para la generación de mapas de riesgo por varios fenómenos hidrometeorológicos, para los municipios de la República Mexicana, utilizando variables tales como la densidad de población, el grado de vulnerabilidad social e índices de peligro de fenómenos hidrometeorológicos, obteniendo una estimación de riesgo y su jerarquización municipal. Dentro de los fenómenos hidrometeorológicos que se citan ahí están huracanes, tormentas de nieve o nevadas, tormentas de granizo, tormentas eléctricas, heladas y ondas de calor, pero no se incluyen inundaciones.

Los índices se definen como una medida compuesta que combina y sintetiza más de un indicador y/o estadística, que se ponderan de acuerdo a diferentes métodos. Los índices proveen una medida sumaria valiosa que tiene ventajas comunicativas y pueden servir para incrementar la conciencia ciudadana y alertar a decisores. (Quiroga, 2017).

De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), citado en (SEMARNAT, 2005), “[...] frecuentemente se utilizan palabras como parámetro e índice como sinónimos, sin embargo, no tienen el mismo significado. Un parámetro se define como cualquier propiedad que es medida u observada, mientras que un índice designa a un conjunto agregado ponderado de parámetros o indicadores.”

Con respecto a los Sistemas de Información Geográfica, existen esfuerzos importantes que relacionan esta útil herramienta con el manejo de información sobre inundaciones.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) integran operaciones de gestión de bases de datos con gran potencial de análisis de información, con capacidad para visualizar información espacial como un elemento importante para comunicar, difundir e intercambiar conocimiento y proporcionan una plataforma base para interpretar cómo factores físicos, sociales y económicos interactúan en un contexto espacial. (Vázquez-Jiménez et al., 2014, pág. 153)

“Un SIG es un software específico que permite a los usuarios crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos” (SGN, 2017).

De acuerdo con Alcocer-Yamanaka et al. (2016), los mapas de peligro se obtienen a través del análisis del comportamiento de la precipitación, la infraestructura urbana y la delimitación de cuencas, considerando los parámetros geomorfológicos, tales como el área y longitud del cauce principal.

La Universidad de Barcelona realizó la implementación de un SIG con las bases de datos de inundaciones en Cataluña para el período 1901-2000, con el propósito de sistematizar la información recopilada y su conexión con datos gráficos que permiten cartografiar esta información y analizarla a partir de consultas sencillas, superposiciones y cálculo de variables (Barnolas y Llasat, 2005).

En Colombia se han realizado algunos trabajos relacionados con el uso de los SIG en cuencas en riesgo de inundación, como es el caso del desarrollo por medio de sistemas de información geográfica, de un modelo para el análisis de tipo predictivo, con amenaza de inundación para la cuenca alta del Río Bogotá en el sector de Cota Cundinamarca y límites con la localidad de Suba (Alvarado Bello, 2014).

En México, a partir de información publicada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el Servicio Sismológico Nacional (SMN), el Laboratorio de Observación de la Tierra (LANOT) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), estas dos últimas por sus siglas en inglés, se integró el Atlas Nacional de Riesgos, el cual es un sistema de información sobre riesgos y contiene una base de datos de los fenómenos naturales y antrópicos.

A nivel mundial, las instancias gubernamentales y no gubernamentales, universidades e instituciones de investigación han desarrollado y aplicado diversos modelos de evaluación del riesgo por inundación, tales como:

El método Hazus-MH, el cual se constituye como una herramienta de estimación de las pérdidas potenciales en infraestructura e impacto social por terremotos, huracanes e inundaciones. El objetivo del componente de inundaciones es proporcionar información para la toma de decisiones sobre uso del suelo en zonas propensas a inundaciones, basada en software SIG y desarrollada y distribuida por la Federal Emergency Management Agency (FEMA) de los Estados Unidos (FEMA, 2020).

El método LATIS, basado en la estimación del riesgo ante una probabilidad de evento, herramienta que se ha implementado con éxito en Bélgica y Jamaica, e identifica las áreas de alto riesgo para las inundaciones fluviales y calcula el costo anual esperado en relación a los daños. En el esquema metodológico, se desarrollan dos mapas: un mapa de daños y un mapa de vulnerabilidad (Glas et al. 2017).

La denominada Agricultural flash flood es una metodología que consiste en 4 procesos fundamentales: 1. Mapas de peligro (profundidad y velocidad), 2. Funciones de daño, 3. Mapas de uso del suelo y 4. Construcción del modelo de pérdida económica. La metodología consiste en la aplicación de lenguaje de programación (Python), modelación hidráulica (Mike Flood) y un sistema de información geográfica (GIS) (Pinos et al., 2017).

Los métodos descritos se enfocan a la evaluación del riesgo por inundación y aunque se han desarrollado en diferentes partes del mundo, guardan entre sí la similitud de la utilización de herramientas de SIG para alcanzar el objetivo, lo que nos muestra claramente la importancia actual de este tipo de sistemas.

1.6. Objetivos de investigación

Calcular el índice de riesgo por inundaciones en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, integrando en un Sistema de Información Geográfica las características físicas de la cuenca y los indicadores socioeconómicos disponibles, que intervienen en la identificación de zonas de riesgo, brindando información de utilidad para la identificación de acciones de mitigación y prevención, a las instituciones involucradas y a la sociedad en general.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Concepto de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo

Se puede decir que:

Riesgo es la probabilidad de ocurrencia de daños, pérdidas o efectos indeseables sobre sistemas constituidos por personas, comunidades o sus bienes, como consecuencia del impacto de eventos o fenómenos perturbadores. La probabilidad de ocurrencia de tales eventos en un cierto sitio o región constituye una amenaza, entendida como una condición latente de posible generación de eventos perturbadores. El Peligro se define como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino de cierta intensidad, durante un cierto periodo de tiempo y en un sitio dado. (Guevara et al., 2006, Pág. 15,16).

El riesgo es la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. Los factores que lo componen son la amenaza y la vulnerabilidad. La vulnerabilidad son las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza. Con estos factores se compone la siguiente fórmula de riesgo:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} \times \text{Vulnerabilidad}$$

A su vez los factores de la vulnerabilidad son la exposición, susceptibilidad y resiliencia, expresando su relación en la siguiente fórmula:

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} \times \text{Susceptibilidad} / \text{Resiliencia}$$

En donde la exposición es la condición de desventaja debido a la ubicación, posición o localización de un sujeto, objeto o sistema expuesto al riesgo. La susceptibilidad es el grado de fragilidad interna de un sujeto, objeto o sistema para enfrentar una amenaza y recibir un posible impacto debido a la ocurrencia de un evento adverso y la resiliencia es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (CIIFEN, 2020).

La amenaza se define como un fenómeno, sustancia, actividad humana o condición peligrosa que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales. La amenaza hidrometeorológica es un proceso o fenómeno de origen atmosférico, hidrológico u oceanográfico que puede ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (UNISDR, 2009).

Es posible afirmar que las inundaciones son una amenaza hidrometeorológica que, por sus consecuencias de destrucción y letalidad, es necesario prever.

Para ello, es conveniente recordar lo que se describió en páginas precedentes, que las inundaciones se clasifican de acuerdo a su origen, o bien al tiempo que tardan en presentarse sus efectos. Los principales tipos de inundaciones de acuerdo con su origen son las inundaciones pluviales, fluviales y costeras y, de acuerdo con el tiempo de respuesta de la cuenca, pueden ser inundaciones lentas o súbitas.

2.2. Concepto de Sistema de Información Geográfica

El concepto tiene varias acepciones y puede ser enfocado desde diferentes puntos de vista: como un software o programa informático; como proyecto y sistema de información orientado a la gestión o planificación territorial y como ambiente de trabajo de múltiples disciplinas orientado al análisis espacial (DeMers, 2008).

Goodchild y Kemp (1990) proporcionan una definición de SIG, dictada por el National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA): “Sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”.

Según la Universidad de Edimburgo: “Un SIG puede ser considerado como un equivalente high-tech del mapa. Un mapa individual contiene mucha información que es usada de

modos diferentes por diferentes individuos u organizaciones. Los SIG representan un medio de localizarnos en relación al mundo que nos rodea.” (University of Edinburgh, 2021).

ESRI lo define como: “Un sistema de información geográfica (SIG) integra hardware, software y datos para capturar, administrar, analizar y mostrar todas las formas de información geográficamente referenciada. Un SIG permite ver, comprender, interpretar y visualizar los datos de muchas maneras que revelan las relaciones, patrones y tendencias en forma de mapas, informes y gráficos.” (ESRI, 2021).

Según Peña (2006, pág.4), “Mediante los SIG se pueden realizar operaciones entre las capas, y así obtener resultados en formato imagen o en tablas. Todos estos resultados pueden utilizarse para la elaboración de análisis y modelos. Por lo tanto, no hay que considerar a los SIG como una herramienta sólo de captura, almacenamiento, manejo y presentación de mapas.”

QGIS es un sistema de información geográfica de código abierto; el proyecto nació en mayo de 2002, con el objetivo inicial de proporcionar un visor de datos SIG. Sin embargo, QGIS ha llegado al punto de su evolución en el que se está utilizando para las necesidades diarias de visualización de datos GIS, para la captura de datos, para el análisis avanzado de GIS y para presentaciones en forma de mapas, atlas e informes sofisticados. QGIS admite una gran cantidad de formatos de datos vectoriales y ráster.

QGIS se publica bajo la Licencia Pública General GNU (GPL), esto significa que se puede inspeccionar y modificar el código fuente, garantizando el acceso a un programa GIS gratuito. QGIS se ejecuta actualmente en la mayoría de las plataformas, tales como UNIX, Windows y MacOs (QGIS, 2021).

2.3. Variables del ciclo hidrológico

Es importante decir que, según Gutiérrez, “El ciclo hidrológico puede representarse como un sistema cuyos componentes principales son la precipitación, la evaporación y el escurrimiento” (Gutiérrez Caiza, 2014).

Parafraseando a Breña Puyol y Jacobo Villa, a este ciclo hidrológico lo conforman diferentes variables, las cuales se relacionan entre sí por medio de los procesos hidrológicos. (Breña Puyol y Jacobo Villa, 2006).

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 escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre una y otra, y que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. (Aparicio, 1992).

2.4. Características de la cuenca

Las características físicas de una cuenca desempeñan un papel esencial en el estudio y comportamiento de algunos de los componentes del ciclo hidrológico; estas características dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje, entre otros) (Gutiérrez Caiza, 2014, Pág.48).

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari et al., 2013).

Algunas de las características físicas de una cuenca se definen de la siguiente manera:

Área de drenaje, es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica, medida en alguna unidad de superficie, como km² o hectáreas.

Perímetro de la Cuenca, es la longitud total de la divisoria de aguas, desde el inicio del punto de estudio hasta finalizar en el mismo.

Forma de la cuenca, la forma de la cuenca interviene de manera importante en las características del hidrograma de descarga de un río, particularmente en los eventos de avenidas máximas y está relacionado con el tiempo de concentración de la cuenca (Gutiérrez Caiza, 2014).

La forma de la cuenca se determina utilizando el índice de forma y la relación de alargamiento. El índice de forma es la relación del perímetro de la cuenca entre el perímetro que tendría un círculo con el mismo valor de área, por lo que se determina cuanto se aleja la forma de la cuenca de un círculo. Según Horton, un valor de factor de forma superior a la unidad proporciona el grado de achatamiento de la misma y por consecuencia con tendencia a concentrar el escurrimiento de una lluvia intensa formando fácilmente grandes crecidas.

Índice de Compacidad, relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una cuenca teórica circular de igual área, determinando la forma de la cuenca.

$$Kc = \frac{P}{2(\pi A)}$$

Siendo:

| | |
|----|--------------------------------------|
| Kc | Índice de compacidad |
| P | Perímetro de la cuenca en km |
| A | Área de la cuenca en km ² |

Pendiente Media de la Cuenca, es un parámetro que mide la pendiente media en dos 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.

El método de mayor aplicación es el Horton: para estimar la pendiente media en la cuenca de análisis se traza una malla cuyo eje principal (x), siga aproximadamente el sentido del cauce principal.

A partir de la malla, se mide la longitud de cada línea de la malla comprendida dentro de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada línea con las curvas de nivel.

La pendiente de la cuenca en cada dirección de la malla se calcula con el apoyo de las expresiones siguientes:

$$S_x = \frac{N_x D}{L_x} \qquad S_y = \frac{N_y D}{L_y}$$

Siendo:

- S_x Pendiente en el sentido x
- S_y Pendiente en el sentido y
- N_x Número total de intersecciones y tangencias de líneas de la malla con curvas de nivel, en el sentido x
- N_y Número total de intersecciones y tangencias de líneas de la malla con curvas de nivel, en el sentido y
- D Equidistancia entre curvas de nivel
- L_x Longitud total de líneas de la malla en sentido x , dentro de la cuenca
- L_y Longitud total de líneas de la malla en sentido y , dentro de la cuenca

Horton considera que la pendiente media de la cuenca puede determinarse como:

$$S = \frac{ND \operatorname{Sec} \theta}{L}$$

Siendo:

- S Pendiente media de la cuenca
- N $N_x + N_y$
- L $L_x + L_y$
- θ Ángulo entre las líneas de malla y las curvas de nivel

Por practicidad Horton sugiere utilizar un valor promedio para $\theta=1.57$

Pendiente Media del Cauce Principal, se establece a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud de este (Cruz et al., 2015).

En la actualidad, herramientas metodológicas tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la interpretación de imágenes satelitales, permiten realizar la

caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas y de las redes de drenaje (Gaspari et al., 2013).

2.5. Indicadores Socioeconómicos

Para la definición de indicadores socioeconómicos, se parte del concepto de indicador, término que se refiere al resultado de una observación o rasgo que mide y refleja diferentes aspectos de una condición o componente del riesgo. Los indicadores son entonces valores de referencia de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad o el riesgo mismo, o cualquier otro aspecto de una zona o un sitio determinado, y que tiene en cuenta tanto aspectos físicos como económicos, sociales y ambientales (Carreño et al., 2013).

“El riesgo no sólo depende de la posibilidad que se presenten eventos o fenómenos naturales intensos, sino también de las condiciones de vulnerabilidad que favorecen o facilitan que se desencadenen desastres cuando se presentan dichos fenómenos” (Cardona, 2007).

Las características socioeconómicas de la población se centran en los indicadores socioeconómicos y en el índice de marginación urbana, cuyos valores han sido publicados en México por el Consejo Nacional de Población (Conapo), con base a los censos de Población y Vivienda del INEGI. (Cruz et al., 2015).

Capítulo 3. Desarrollo de la Investigación

3.1. Tipo y diseño de la investigación

Hernández R. et al. (2014), afirman que el diseño de investigación se refiere al plan o estrategia para obtener la información que se desea. En este tenor, propone dos tipos de diseño: experimental y no experimental. El diseño de investigación experimental se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes para analizar los efectos sobre una o más variables dependientes; por el contrario, en el diseño no experimental se observan las variables y sus relaciones en su contexto natural.

“En la investigación no experimental las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se puede influir en ellas, porque ya sucedieron, al igual que sus efectos” (Hernández R. et al., 2014, pág.267).

En el diseño longitudinal, se recolectan datos a través del tiempo y se analizan los cambios en las variables (Hernández R. et al., 2014, pág.278).

El presente estudio es de tipo no experimental y longitudinal, ya que se recopilarán datos y se integrarán en capas de información, las cuales serán analizadas y ponderadas, para la obtención del índice de riesgo por inundación en Tuxtla Gutiérrez.

3.2. Elementos geográficos, variables hidrológicas y socioeconómicas

Las fuentes principales de información que serán incluidas son el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), entre otros.

Los datos considerados para su procesamiento, integración y análisis son:

Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), Publicado en 2013, con una resolución de 15m x 15 m.

El Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) es un producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones(Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular. (INEGI, 2021b).

Marco Geoestadístico 2010, el cual es un sistema diseñado por el INEGI, para georreferenciar la información estadística de los censos y encuestas; proporciona la ubicación de las localidades, municipios y entidades del país, utilizando coordenadas geográficas. Divide al territorio nacional en áreas con límites identificables en campo, denominadas Áreas geoestadísticas, con tres niveles de desagregación: Estatal (AGEE), Municipal (AGEM) y Básica (AGEB), esta última puede ser urbana o rural (INEGI, 2021a).

Registros históricos de precipitación de las estaciones ubicadas en el área de influencia de la cuenca del Río Sabinal (CONAGUA, 2020).

Atlas Nacional de Riesgos, el cual muestra la ocurrencia de fenómenos de origen nacional que afectan a nuestro país, a partir de información publicada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres, el Laboratorio de Observación de la Tierra (LANOT) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA).

3.3. Construcción del índice de riesgo por inundación

Inicialmente se realiza la delimitación de microcuencas a partir de la información generada por el INEGI: Continuo de Elevación Digital y Cuenca Tuxtla Gutiérrez.

Las microcuencas generadas se muestran en la figura 3.1 y fueron comparadas con las proporcionadas por el Organismo de Cuenca Frontera Sur de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); se realizaron trabajos de edición y ajuste, hasta obtener la mayor similitud entre ambas capas y se procedió a agregar un campo de nombres siguiendo la misma nomenclatura, tal y como se relaciona en la tabla 3.1.

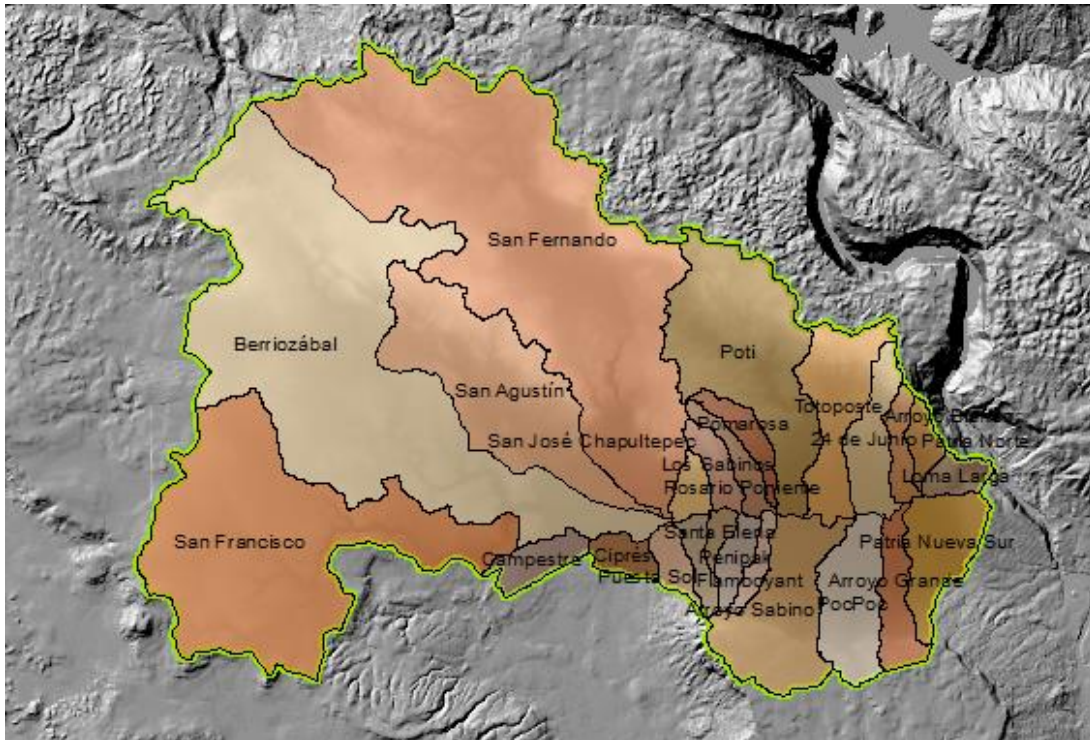


Fig. 3.1. Microcuencas del río Sabinal
Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y CONAGUA

Tabla 3.1. Microcuencas del Río Sabinal

| Número | Cuenca |
|--------|-------------------|
| 1 | 24 de Junio |
| 2 | Arroyo Blanco |
| 3 | Arroyo Grande |
| 4 | Arroyo Sabino |
| 5 | Berriozábal |
| 6 | Campestre |
| 7 | Ciprés |
| 8 | Flamboyant |
| 9 | Loma Larga |
| 10 | Lomas Mactumactzá |
| 11 | Los Sabinos |
| 12 | Patria Norte |

| Número | Cuenca |
|--------|----------------------|
| 13 | Patria Nueva Sur |
| 14 | Penipak |
| 15 | PocPoc |
| 16 | Pomarosa |
| 17 | Poti |
| 18 | Puesta Sol |
| 19 | Rosario Poniente |
| 20 | San Agustín |
| 21 | San Fernando |
| 22 | San Francisco |
| 23 | San José Chapultepec |
| 24 | Santa Elena |
| 25 | Totoposte |

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y CONAGUA

3.3.1. Indicador Hidrológico

Este indicador tiene tres componentes: *Respuesta Hidrológica*, basada en los parámetros morfométricos de cada microcuenca; *Zonificación*, la cual se construye con los tirantes máximos para diferentes períodos de retorno e *Isoyetas*, mismas que se generan a partir de la precipitación para diferentes períodos de retorno.

3.3.1.1. Respuesta Hidrológica

Para las microcuencas delimitadas se procede a la obtención de los parámetros: *área de drenaje*, *perímetro*, *longitud máxima*, *longitud cauce principal*, *factor de forma*, *índice de compacidad o coeficiente de Gravelius*, *pendiente media de la cuenca* y *pendiente media del cauce principal*, para lo cual utilizamos el software Qgis.

En el Anexo A.1, se explica detalladamente la obtención de estos parámetros.

Con los parámetros obtenidos para cada microcuenca, se identifica la respuesta hidrológica y se asigna un valor al indicador.

Para la interpretación de los valores obtenidos se emplean las tablas de referencia 3.2., 3.3. y 3.4.

Tabla 3.2. Clasificación del Índice de Compacidad (K_c)

| K_c | Forma de la Cuenca |
|-------------|------------------------------------|
| 1 – 1.25 | Casi redonda a Oval-Redonda |
| 1.25 – 1.50 | Oval Redonda a Oval-Oblonga |
| 1.50 – 1-75 | Oval oblonga a Rectangular oblonga |
| >1.75 | Rectangular |

Fuente: Adaptado de Gaspari et al. (2013).

Tabla 3.3. Clasificación del Factor de Forma (K_f)

| Valores K_f | Forma de la Cuenca |
|---------------|---------------------------|
| < 0.22 | Muy alargada |
| 0.22 -0.30 | Alargada |
| 0.30 - 0.37 | Ligeramente alargada |
| 0.37 – 0.45 | Ni alargada ni ensanchada |
| 0.45 -0.60 | Ligeramente ensanchada |
| 0.60 – 0.80 | Ensanchada |
| 0.80 – 1.20 | Muy ensanchada |
| >1.20 | Rodeando el desague |

Fuente: Adaptado de Strahler (1957), citado por Sellers et al. (2015)

Tabla 3.4. Pendiente Media de la Cuenca

| Pendiente Media (%) | Tipo de Relieve |
|---------------------|-----------------|
| 0 – 3 | Plano |
| 3 -7 | Suave |
| 7 -12 | Mediano |
| 12 – 20 | Accidentado |
| 20 – 35 | Fuerte |
| 35 – 50 | Muy fuerte |
| 50 -75 | Escarpado |
| >75 | Muy escarpado |

Fuente: Adaptado de López Cadenas de Llano (1998), citado por Gaspari et al. (2013)

Los resultados de los parámetros morfométricos para cada microcuenca se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Parámetros morfométricos de las microcuencas del Río Sabinal

| Microcuenca | Área | Perímetro | Compacidad (K _c) | Longitud | | Factor de Forma (K _f) | Cota Mínima | Cota Máxima | Pendiente Media | |
|----------------------|-------|-----------|------------------------------|----------|-------|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------------|--------|
| | | | | Cuenca | Cauce | | | | Cauce | Cuenca |
| 24 de Junio | 6,88 | 18,13 | 1,95 | 5,90 | 3,69 | 0,20 | 500 | 678 | 4,82 | 15,09 |
| Arroyo Blanco | 2,92 | 12,15 | 2,01 | 4,10 | 4,00 | 0,17 | 499 | 1017 | 12,95 | 17,01 |
| Arroyo Grande | 5,62 | 17,78 | 2,12 | 4,90 | 6,00 | 0,23 | 502 | 924 | 7,03 | 13,25 |
| Arroyo Sabino | 16,12 | 24,54 | 1,72 | 5,90 | 5,65 | 0,46 | 519 | 839 | 5,66 | 14,94 |
| Berriozábal | 88,98 | 82,70 | 2,47 | 20,50 | 24,71 | 0,21 | 573 | 1019 | 1,80 | 12,03 |
| Campestre | 3,93 | 11,67 | 1,66 | 3,40 | 3,42 | 0,34 | 592 | 655 | 1,84 | 7,23 |
| Ciprés | 2,76 | 8,08 | 1,37 | 1,60 | 1,64 | 1,08 | 573 | 601 | 1,71 | 3,39 |
| Flamboyant | 2,55 | 11,10 | 1,96 | 3,50 | 3,41 | 0,21 | 547 | 827 | 8,21 | 16,65 |
| Loma Larga | 2,58 | 8,18 | 1,44 | 2,60 | 3,07 | 0,38 | 383 | 501 | 3,84 | 36,89 |
| Lomas Mactumactzá | 1,98 | 10,84 | 2,17 | 3,60 | 3,60 | 0,15 | 538 | 799 | 7,25 | 13,15 |
| Los Sabinos | 3,14 | 11,09 | 1,76 | 3,50 | 3,04 | 0,26 | 539 | 872 | 10,95 | 24,66 |
| Patria Norte | 2,32 | 8,76 | 1,62 | 3,30 | 3,03 | 0,21 | 490 | 795 | 10,07 | 19,89 |
| Patria Nueva Sur | 8,92 | 16,83 | 1,59 | 5,10 | 5,99 | 0,34 | 493 | 743 | 4,17 | 9,86 |
| Penipak | 2,86 | 9,93 | 1,66 | 3,40 | 3,40 | 0,25 | 539 | 870 | 9,74 | 12,58 |
| PocPoc | 10,38 | 18,36 | 1,61 | 5,70 | 7,51 | 0,32 | 502 | 859 | 4,75 | 11,41 |
| Pomarosa | 3,21 | 15,09 | 2,38 | 4,80 | 5,56 | 0,14 | 536 | 918 | 6,87 | 23,07 |
| Poti | 27,44 | 36,74 | 1,98 | 10,50 | 8,47 | 0,25 | 532 | 1037 | 5,96 | 23,64 |
| Puesta del Sol | 2,66 | 9,13 | 1,58 | 3,10 | 2,09 | 0,28 | 561 | 686 | 5,98 | 10,85 |
| Rosario Poniente | 3,09 | 14,65 | 2,35 | 4,50 | 4,89 | 0,15 | 539 | 939 | 8,18 | 17,31 |
| San Agustín | 28,58 | 37,87 | 2,00 | 12,30 | 14,48 | 0,19 | 568 | 1139 | 3,94 | 18,77 |
| San Fernando | 92,58 | 73,60 | 2,16 | 18,50 | 22,21 | 0,27 | 559 | 1022 | 2,08 | 20,22 |
| San Francisco | 55,73 | 52,77 | 1,99 | 12,30 | 19,55 | 0,37 | 620 | 1070 | 2,30 | 11,04 |
| San José Chapultepec | 2,37 | 8,10 | 1,48 | 2,20 | 2,05 | 0,49 | 554 | 839 | 13,90 | 13,01 |
| Santa Elena | 1,38 | 6,15 | 1,48 | 2,20 | 1,50 | 0,29 | 539 | 606 | 4,47 | 8,77 |
| Totoposte | 11,60 | 25,04 | 2,07 | 6,70 | 7,60 | 0,26 | 511 | 1234 | 9,51 | 19,11 |

Se procede al análisis de los valores de estos parámetros, con el objetivo de catalogar la respuesta hidrológica para cada microcuenca.

Los valores obtenidos del *factor de forma*, *coeficiente de compacidad*, *pendiente media de la cuenca* y *pendiente media del cauce principal*, se almacenan en un archivo con formato shape file, y con apoyo de QGis se realiza la conversión de polígono a ráster con los valores de cada parámetro, generando así cuatro archivos, sobre cada uno de los cuales se realiza una clasificación de tres niveles.

La clasificación de acuerdo con el *factor de forma* se muestra en la figura 3.2, observando que la microcuenca Ciprés presenta un riesgo alto; las microcuencas San José Chapultepec y Arroyo Sabino, presentan un riesgo medio y las restantes 23 microcuencas son de riesgo bajo, lo cual indica que con base al *factor de forma* la mayoría de las microcuencas tienen una baja tendencia a la concentración de escurrimientos.

La *pendiente media del cauce principal* en la figura 3.4, identifica las microcuencas San José Chapultepec, Los Sabinos, Arroyo Blanco y Patria Norte, con un nivel de riesgo medio.

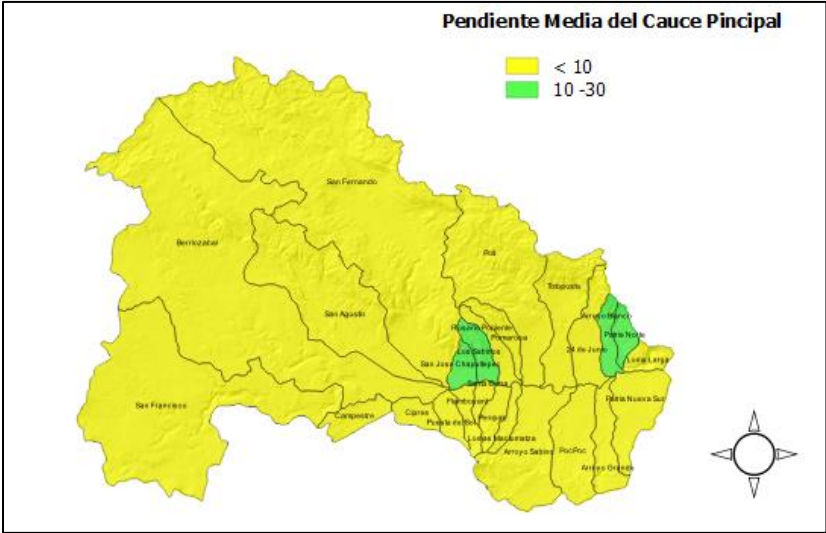


Fig. 3.4. Pendiente Media del Cauce Principal de las Microcuencas del Río Sabinal

La *pendiente media* de las microcuencas en la figura 3.5, muestra que dieciocho de las veinticinco microcuencas presentan un nivel de riesgo alto, debido a su accidentada pendiente, seis microcuencas tienen nivel de riesgo medio y únicamente una microcuenca se considera de riesgo bajo.

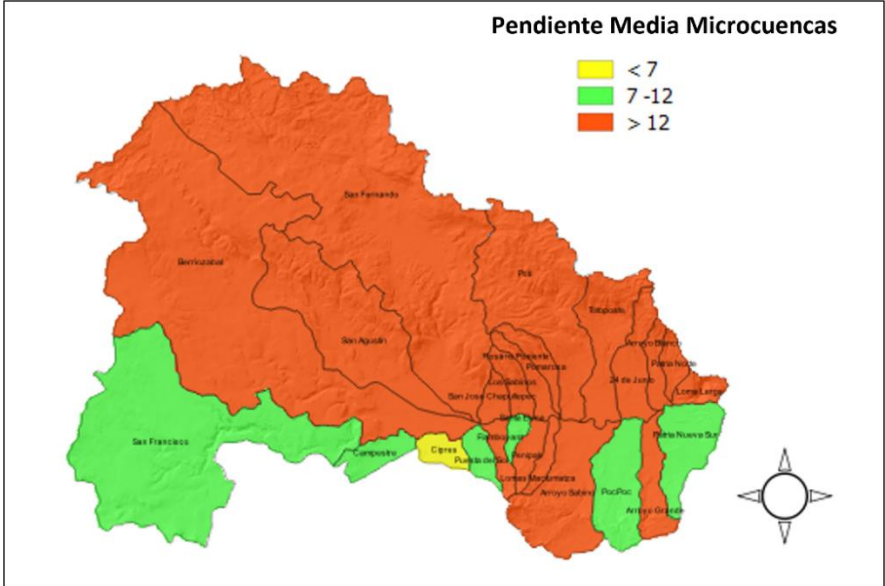


Fig. 3.5. Pendiente Media de las Microcuencas del Río Sabinal

Con apoyo del software QGis, se procede a la generación de la estadística de celdas, para obtener un archivo ráster de salida con valores calculados en función de los valores de las celdas de los cuatro archivos mostrados en las figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5, obteniendo así el componente de Respuesta hidrológica (figura 3.6), el cual indica que diecinueve de las microcuencas presentan un riesgo alto ante inundaciones y seis microcuencas son de riesgo medio.

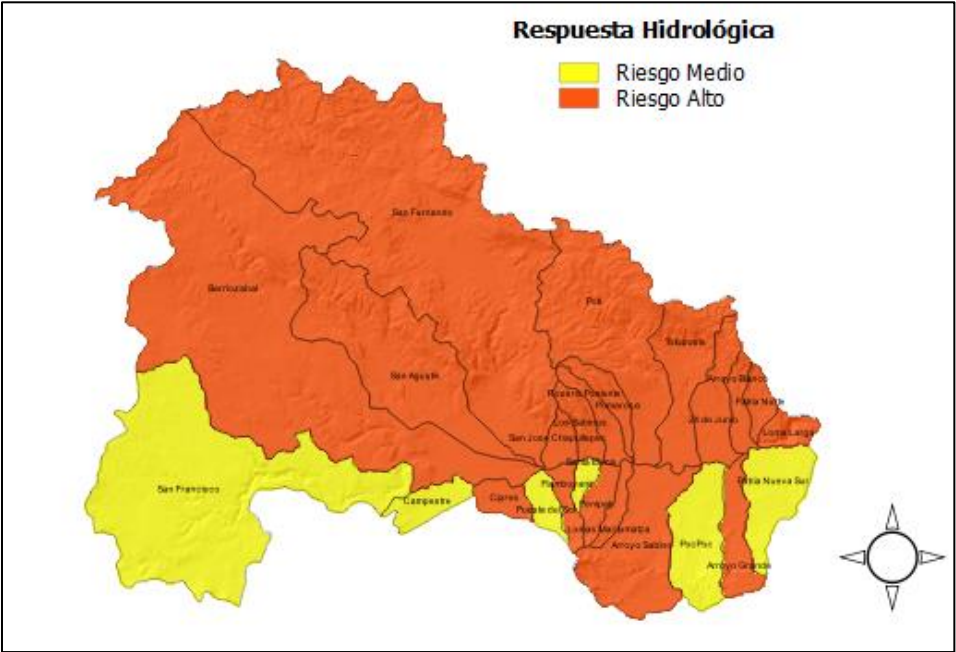


Fig. 3.6. Respuesta Hidrológica

3.3.1.2. Zonificación

Utilizando el tirante máximo para diferentes períodos de retorno, generado por CENAPRED y CONAGUA, así como el Inventario Nacional de Manzanas del INEGI, se identifican zonas de riesgo.

El procedimiento se explica a detalle en el Anexo A.2.

En la figura 3.7, se muestra el tirante máximo para un período de retorno de 50 años, para la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, así como la delimitación de las microcuencas.

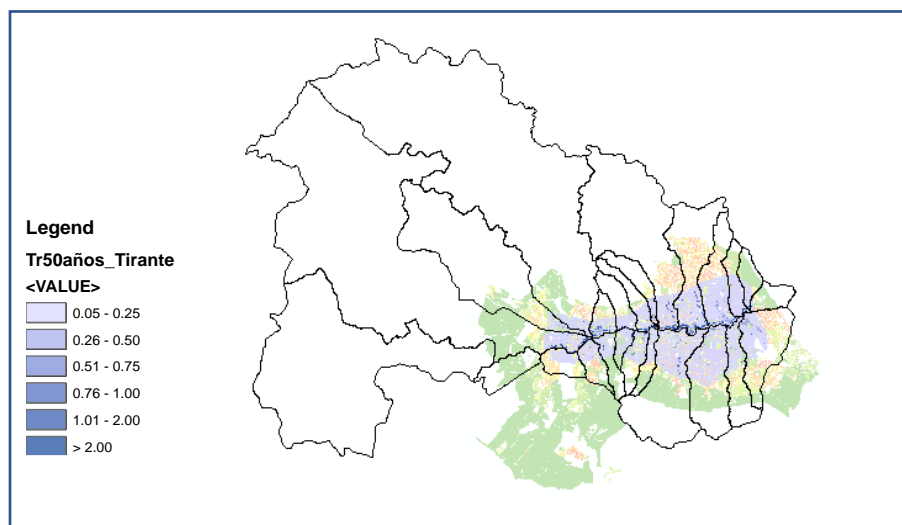


Fig. 3.7. Mancha Urbana de Tuxtla Gutiérrez y Tirante Máximo (Tr = 50)

Según lo expuesto por Alcocer-Yamanaka et al. (2016), un tirante de 0.3 m se considera con un nivel de peligro nulo debido a que no alcanza a rebasar el nivel de banqueteta promedio, por lo que el agua no llegaría a entrar en los hogares. En el intervalo de 0.3 a 0.5 metros, el nivel de peligro se considera bajo, es decir, el daño a la estructura de la casa, así como al menaje, no es considerable. En tirantes de 0.5 a 1.5 metros, el nivel de peligro es medio, debido a que el daño a muebles y estructura del hogar tiende a ser elevado. Cuando el nivel del agua supera 1.5 metros de altura, el peligro se cataloga como alto.

En este orden de ideas, se calculan porcentajes de las áreas con tirantes de afectación mayor a 0.3 m; cuando este es menor de 5 por ciento, se asigna valor 1; entre 5 y 10 por ciento, se asigna valor 2 y para porcentajes mayores a 10, se asigna valor 3. Donde 1 indica riesgo bajo, 2 riesgo medio y 3 riesgo alto.

En las figuras 3.8,.3.9 y 3.1.0, se muestra el resultado de la asignación de valores para períodos de retorno (Tr) de 20, 50 y 100 años, respectivamente, observando de manera general que, a mayor período de retorno, se incrementa el nivel de riesgo.

Así, es posible observar que las microcuencas Berriozábal, Poti, 24 de Junio y Arroyo Blanco, incrementan su nivel de riesgo para un período de retorno de 50 años con respecto al de 20 años.

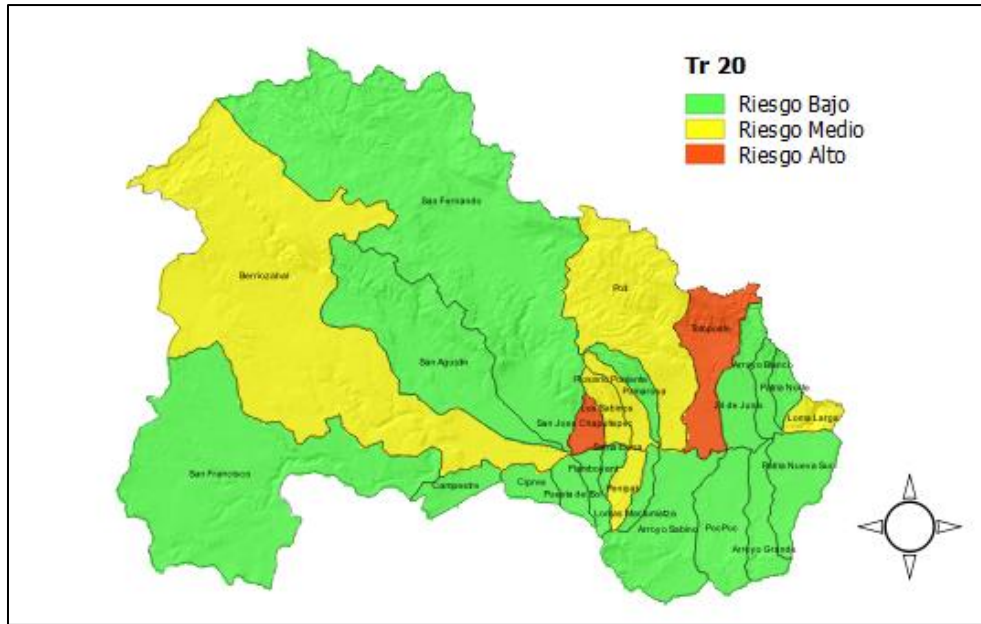


Fig. 3.8. Zonificación para Tr = 20

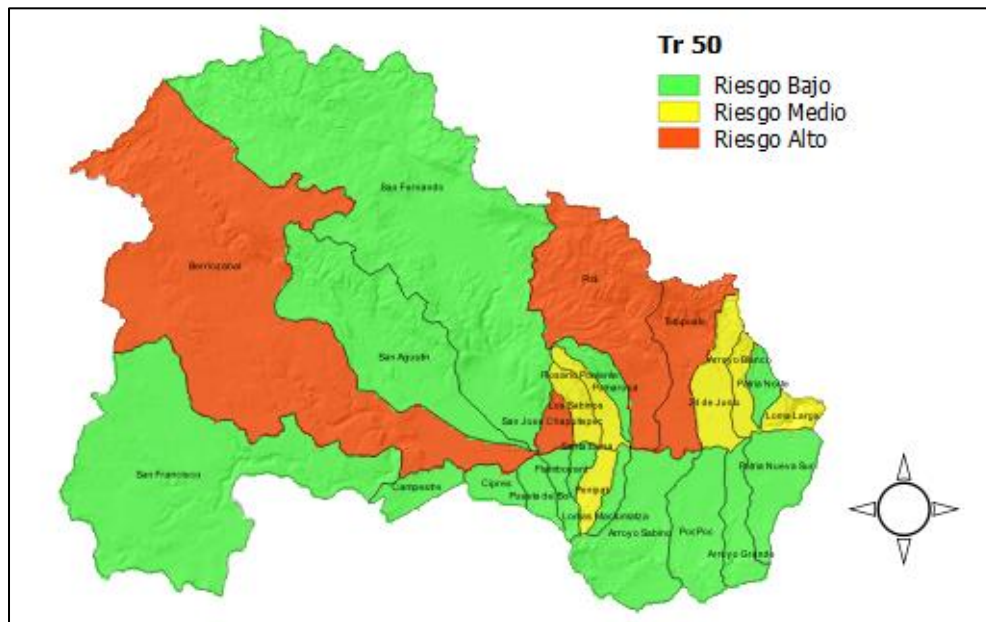


Fig. 3.9. Zonificación para Tr = 50

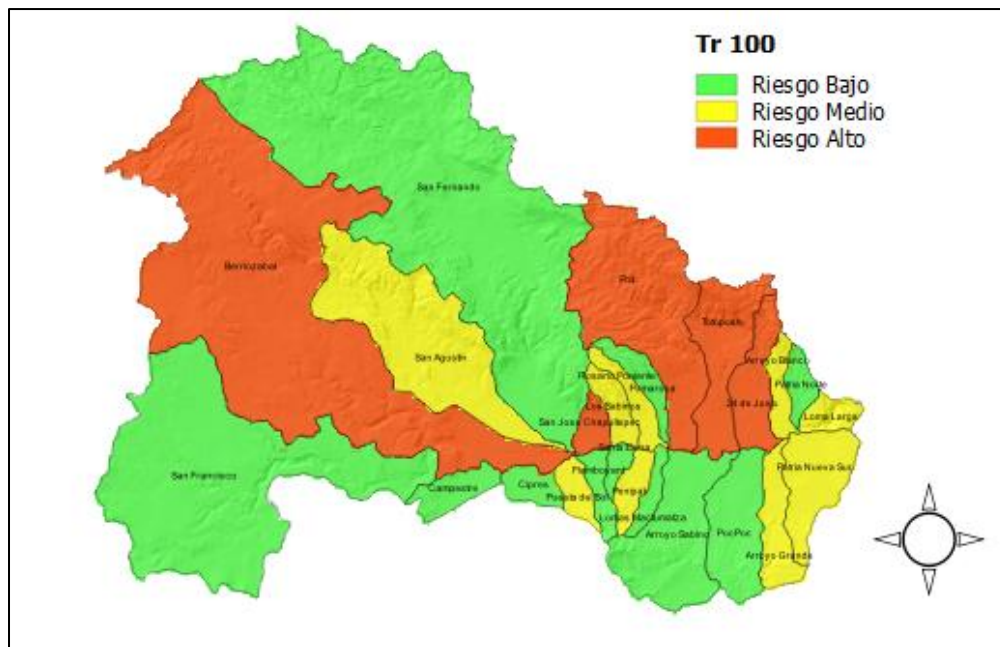


Fig. 3.10. Zonificación para Tr = 100

Las alcantarillas se calculan para pasar el gasto de diseño sin producir un desbordamiento tal que comprometa la integridad de la superestructura. El gasto de diseño se basa en consideraciones hidrológicas. El período de retorno (el cual es el recíproco de la frecuencia) varía típicamente entre 10 y 50 años. (Ponce, 2015).

En la presente investigación se utiliza el Tr de 50 años considerando que las zonas identificadas en peligro de inundación corresponden a asentamientos humanos, en donde es indispensable contar con un sistema de alcantarillas pluviales.

3.3.1.3. Isoyetas

Se identificaron y seleccionaron once estaciones climatológicas convencionales, ubicadas en el área de influencia de la zona de estudio y se procedió a la extracción de registros de precipitaciones de la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM).

En la tabla 3.6 se muestran las estaciones seleccionadas y el número de años de registro.

Tabla 3.6. Estaciones en la cuenca del Río Sabinal

| Clave | Estación | Municipio | Latitud | Longitud | msnm | Registro (Años) |
|-------|------------------------|-------------------------|-----------|-----------|------|-----------------|
| 7319 | SAN FERNANDO | SAN FERNANDO | 16°52'23" | 93°13'37" | 950 | 37 |
| 7238 | EL SABINAL | TUXTLA GUTIERREZ | 16°45'33" | 93°05'19" | 498 | 27 |
| 7069 | GRIJALVA | CHICOASEN | 16°58'10" | 93°06'17" | 841 | 29 |
| 7202 | TUXTLA GUTIERREZ (DGE) | TUXTLA GUTIERREZ | 16°45'10" | 93°07'00" | 543 | 69 |
| 7039 | EL BOQUERON | SUCHIAPA | 16°38'39" | 93°09'26" | 500 | 67 |
| 7123 | OCOZOCAUTLA | OCOZOCAUTLA DE ESPINOSA | 16°45'03" | 93°22'26" | 838 | 64 |
| 7134 | PUENTE COLGANTE | CHIAPA DE CORZO | 16°44'26" | 93°01'52" | 418 | 69 |
| 7176 | TUXTLA GUTIERREZ (CFE) | TUXTLA GUTIERREZ | 16°45'42" | 93°06'10" | 532 | 47 |
| 7372 | BERRIOZABAL | BERRIOZABAL | 16°47'49" | 93°15'55" | 890 | 32 |
| 7229 | SANTO DOMINGO (CFE) | CHIAPA DE CORZO | 16°43'00" | 93°03'00" | 500 | 40 |
| 7363 | LA SELVA | OCOZOCAUTLA DE ESPINOSA | 17°00'30" | 93°28'30" | 526 | 18 |

Nota. Elaboración propia con información del CLICLOM

Con el apoyo del software Hidroesta, el cual tiene como objetivo facilitar y simplificar los cálculos a realizar en estudios hidrológicos (Villón, 2012), se analizan las distribuciones de probabilidad de los registros de lluvia máxima en 24 horas y se elige la que mejor se ajusta, que para este caso resultó ser la de Gumbel.

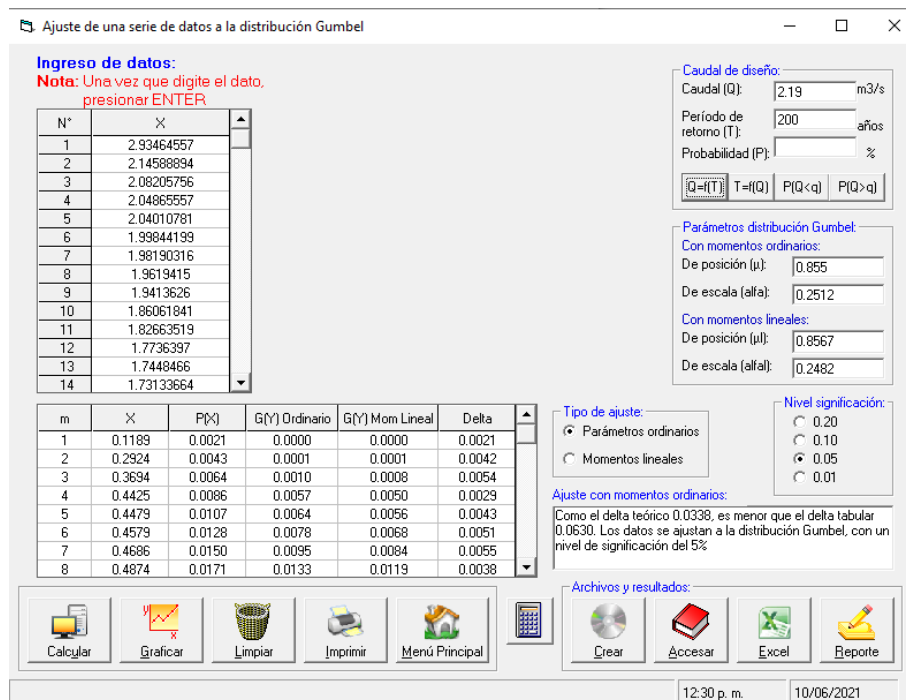


Fig. 3.11. Ajuste a la distribución Gumbel usando Hidroesta

El objetivo final en este apartado es la construcción de Isoyetas para diferentes períodos de retorno, por lo que se obtienen los valores regionales para diferentes períodos de retorno utilizando el software Hidroesta, los valores obtenidos se presentan en la tabla 3.7

Tabla 3.7. Valores Regionales

| Tr | Valor Regional |
|-------|----------------|
| 2 | 0.95 |
| 5 | 1.23 |
| 10 | 1.42 |
| 20 | 1.60 |
| 50 | 1.84 |
| 100 | 2.01 |
| 200 | 2.19 |
| 500 | 2.42 |
| 1000 | 2.60 |
| 5000 | 3.00 |
| 10000 | 3.18 |

Nota. Valores regionales de precipitación generados como resultado del procesamiento de los registros de lluvia máxima en 24 horas, empleando Hidroesta

Para calcular los valores de precipitación (mm) por estación, los valores regionales se multiplican por la media de cada estación. Los resultados de esta operación se indican en la tabla 3.8

Tabla 3.8. Valores de precipitación por estación

| Tr | 7319 | 7238 | 7069 | 7202 | 7039 | 7123 | 7134 | 7176 | 7372 | 7229 | 7363 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 64.10 | 65.13 | 65.24 | 68.96 | 69.80 | 70.12 | 70.17 | 70.21 | 73.00 | 85.32 | 93.31 |
| 5 | 83.00 | 84.33 | 84.47 | 89.29 | 90.37 | 90.79 | 90.85 | 90.90 | 94.51 | 110.47 | 120.81 |
| 10 | 95.82 | 97.35 | 97.51 | 103.08 | 104.33 | 104.81 | 104.88 | 104.95 | 109.11 | 127.54 | 139.47 |
| 20 | 107.97 | 109.69 | 109.88 | 116.15 | 117.55 | 118.10 | 118.18 | 118.25 | 122.95 | 143.70 | 157.15 |
| 50 | 124.16 | 126.15 | 126.36 | 133.57 | 135.18 | 135.81 | 135.90 | 135.99 | 141.39 | 165.26 | 180.72 |
| 100 | 135.63 | 137.80 | 138.03 | 145.91 | 147.67 | 148.36 | 148.46 | 148.55 | 154.45 | 180.53 | 197.42 |
| 200 | 147.78 | 150.14 | 150.39 | 158.98 | 160.90 | 161.65 | 161.75 | 161.85 | 168.28 | 196.69 | 215.09 |
| 500 | 163.30 | 165.91 | 166.19 | 175.68 | 177.79 | 178.62 | 178.74 | 178.85 | 185.95 | 217.35 | 237.68 |
| 1000 | 175.44 | 178.25 | 178.55 | 188.74 | 191.02 | 191.91 | 192.03 | 192.16 | 199.79 | 233.52 | 255.36 |
| 5000 | 202.44 | 205.68 | 206.02 | 217.78 | 220.41 | 221.43 | 221.58 | 221.72 | 230.52 | 269.45 | 294.65 |
| 10000 | 214.58 | 218.02 | 218.38 | 230.85 | 233.63 | 234.72 | 234.87 | 235.02 | 244.35 | 285.61 | 312.33 |

Con apoyo del software QGis, se procede a la generación de Isoyetas; para ello se cuenta con un archivo en formato shape file de los puntos de las estaciones y la precipitación obtenida para los diferentes períodos de retorno. El procedimiento se detalla en el Anexo A.3.

Se genera el ráster con los valores de estas precipitaciones usando algún método de interpolación y se crean las isolíneas. Se selecciona dentro de los métodos disponibles, tales como IDW (Inverso Proporcional a la Distancia), Spline (ajusta la superficie a los valores de entrada usando métodos de polinomios y mínimos cuadrados) y Kriging (se utiliza cuando existe una correlación espacial entre los datos, empleada en suelos y geología), entre otros. (Suárez-Medina y Astudillo-Enríquez, 2011).

Se realizó la interpolación con los tres métodos, obteniendo resultados similares con Kriging y Spline, se elige utilizar los resultados con Spline por ofrecer una mejor representación visual.

La figura 3.12 muestra las isoyetas para un período de retorno de 50 años, generadas con el método Spline.

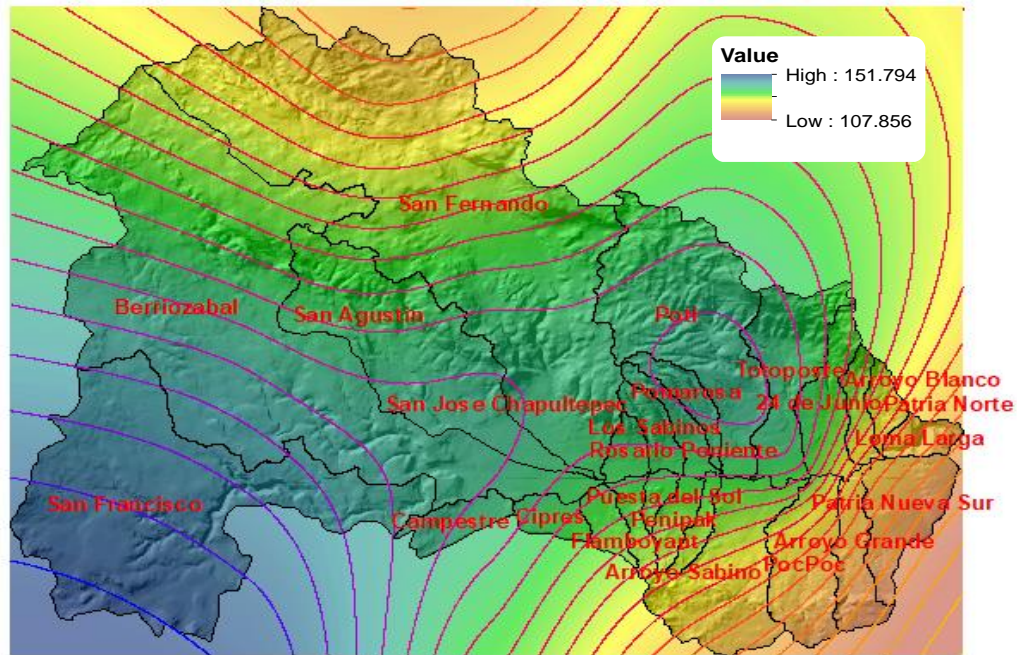
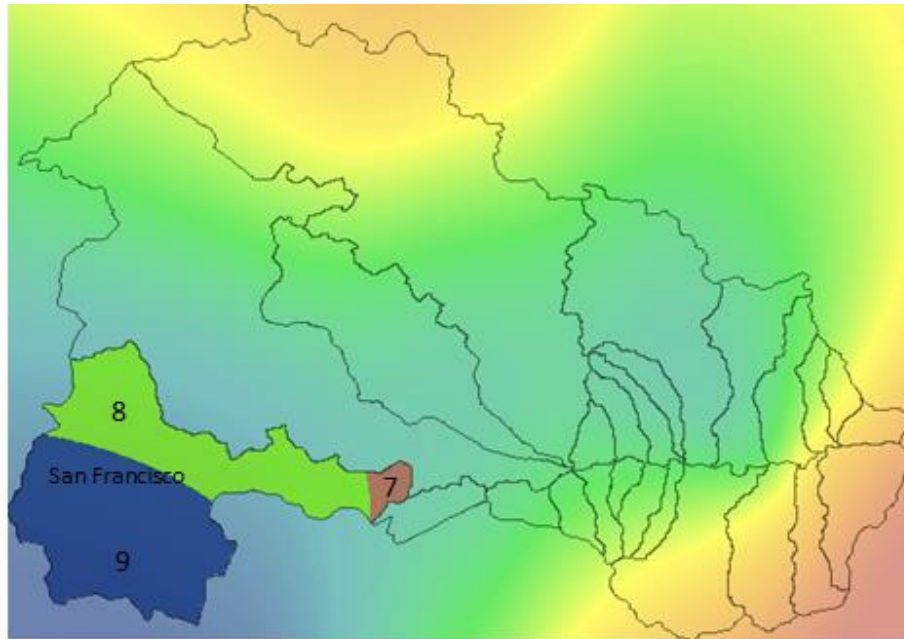


Fig. 3.12. Isoyetas para un $Tr = 50$

Nota. Las isoyetas fueron generadas con el shape file de estaciones y los valores de precipitación obtenidos a partir de los valores regionales.

Una vez generadas las isoyetas, se utiliza estadística por zonas para obtener las áreas y los valores máximos y mínimos de los polígonos dentro de cada microcuenca, obteniendo la precipitación media.

La figura 3.13 ejemplifica el proceso, para la microcuenca San Francisco para un $Tr = 50$



| Cálculo de la precipitación promedio de la microcuenca San Francisco | | | | | |
|---|-------------|---------------------|---------------|-------------------------|---------------------|
| Polígono | Mínimo (mm) | Máximo (mm) | Promedio (mm) | Area (km ²) | Promedio*Area |
| 7 | 140.84 | 142.03 | 141.44 | 186.34 | 26,355.14 |
| 8 | 142.03 | 146.91 | 144.47 | 22,926.01 | 3,312,140.89 |
| 9 | 146.91 | 150.84 | 148.87 | 30,939.32 | 4,606,081.68 |
| | | | Suma | 54,051.67 | 7,944,577.72 |
| | | Hp Prom (mm) | 146.98 | | |

Fig. 3.13. Precipitación promedio de la microcuenca San Francisco (Tr50)

Nota. Para la microcuenca San Francisco para un Tr = 50 se obtuvieron tres polígonos (7, 8 y 9) comprendidos entre isolíneas, los valores de precipitación máximos y mínimos son promediados y multiplicados por el área de su correspondiente polígono; la suma del promedio por el área se divide entre la suma de las áreas, para obtener la precipitación promedio.

Siguiendo el mismo procedimiento para cada microcuenca, se calculan los valores de precipitación promedio para diferentes períodos de retorno, los cuales se presentan en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Precipitación promedio obtenida con el método de isoyetas

| Microcuenca | Hp Promedio (mm) | | |
|----------------------|------------------|--------|--------|
| | Tr2 | Tr50 | Tr100 |
| 24 de Junio | 69.16 | 133.96 | 146.34 |
| Arroyo Blanco | 67.05 | 129.87 | 141.87 |
| Arroyo Grande | 61.57 | 119.24 | 130.28 |
| Arroyo Sabino | 65.52 | 126.91 | 138.63 |
| Berriozábal | 71.27 | 138.04 | 150.80 |
| Campestre | 72.42 | 140.27 | 153.23 |
| Ciprés | 70.54 | 136.62 | 149.24 |
| Flamboyant | 68.64 | 132.94 | 145.23 |
| Loma Larga | 63.90 | 121.47 | 132.69 |
| Lomas Mactumactzá | 67.95 | 131.62 | 143.78 |
| Los Sabinos | 71.37 | 138.23 | 151.00 |
| Patria Norte | 65.94 | 127.72 | 139.52 |
| Patria Nueva Sur | 60.96 | 118.07 | 128.98 |
| Penipak | 68.48 | 132.63 | 144.89 |
| PocPoc | 63.76 | 123.49 | 134.90 |
| Pomarosa | 71.70 | 138.87 | 151.70 |
| Poti | 71.53 | 138.54 | 151.34 |
| Puesta Sol | 70.30 | 134.11 | 146.50 |
| Rosario Poniente | 71.41 | 138.31 | 151.09 |
| San Agustín | 71.17 | 137.85 | 150.59 |
| San Fernando | 67.78 | 131.28 | 143.41 |
| San Francisco | 75.80 | 146.81 | 160.38 |
| San José Chapultepec | 71.09 | 137.68 | 150.40 |
| Santa Elena | 69.40 | 134.43 | 146.85 |
| Totoposte | 71.10 | 137.70 | 150.43 |

Estos valores de precipitación promedio se agregan a la tabla de atributos de las microcuencas para representar de manera gráfica los resultados, observando un incremento en la precipitación a mayor período de retorno, según muestran las figuras 3.14, 3.15 y 3.16.

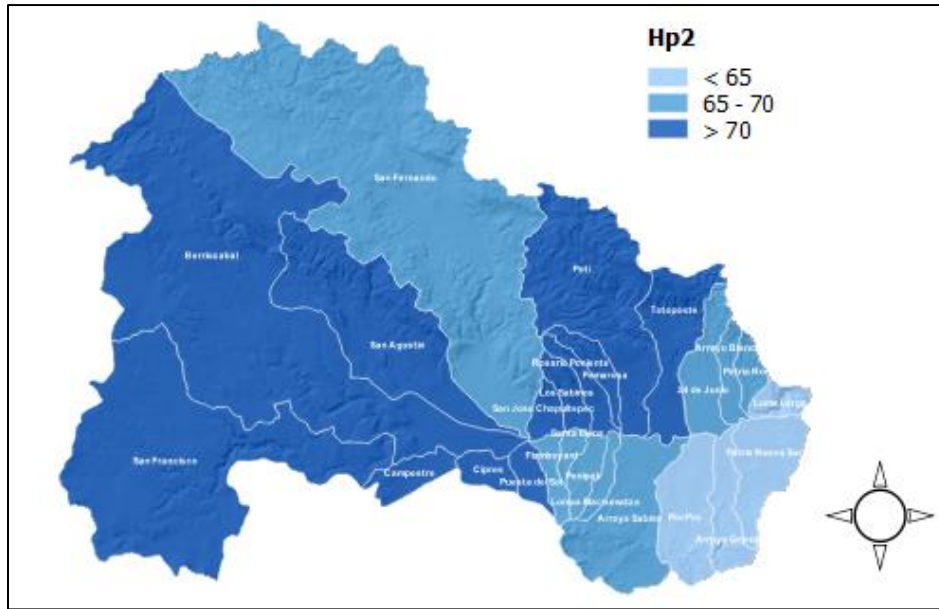


Fig. 3.14. Precipitación Promedio para un $Tr = 2$

Nota. Representación gráfica de los valores de precipitación promedio obtenidos con el método de isoyetas para un periodo de retorno de 2 años.

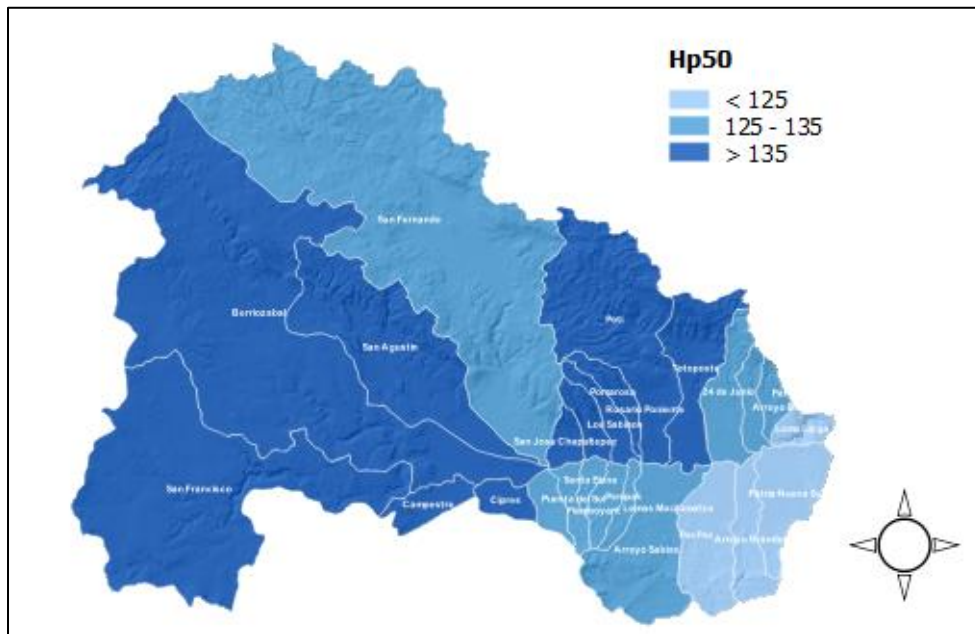


Fig. 3.15. Precipitación Promedio para un $Tr = 50$

Nota. Representación gráfica de los valores de precipitación promedio obtenidos con el método de isoyetas para un periodo de retorno de 50 años.

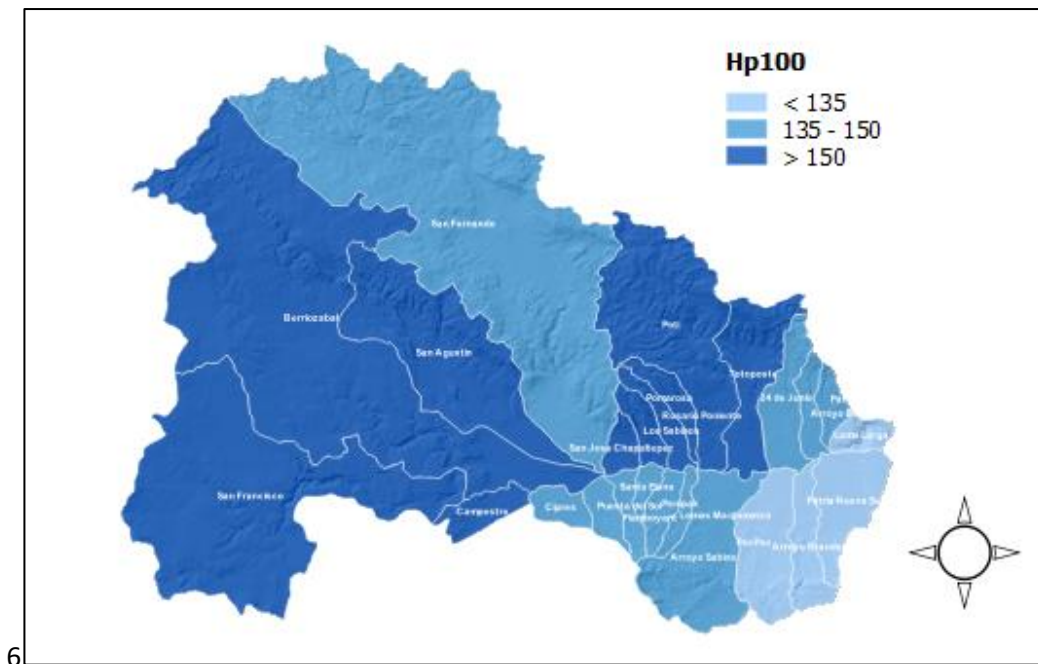


Fig. 3.16. Precipitación promedio para un $Tr = 100$

Nota. Representación gráfica de los valores de precipitación promedio obtenidos con el método de isoyetas para un periodo de retorno de 100 años.

De acuerdo con los datos obtenidos de precipitación media para cada microcuenca para un Tr de 50 años, se procede a realizar una clasificación de tres niveles, para asignar un valor al indicador, comprendido entre 1 y 3.

Los datos de precipitación promedio de cada microcuenca se ordenan de menor a mayor y para efectos del presente trabajo se determinan tres intervalos, el primero comprende a las cuencas con precipitación promedio menor a 125 mm y serán consideradas con nivel de riesgo bajo, el segundo está formado por cuencas con precipitación promedio de 125-135 mm y se consideran de riesgo medio, el tercer intervalo incluye a las cuencas con valores de precipitación promedio mayores a 135 mm y se consideran de riesgo alto.

La figura 3.17 muestra el mapa con la aplicación de esta propuesta de clasificación, la cual se aplica con fines de normalización con respecto a los componentes Respuesta hidrológica y Zonificación.

El componente Isoyetas muestra el riesgo para cada microcuenca en función de la precipitación promedio, observando que 11 microcuencas presentan un riesgo alto, 10 riesgo medio y únicamente 4 son catalogadas como de riesgo bajo.

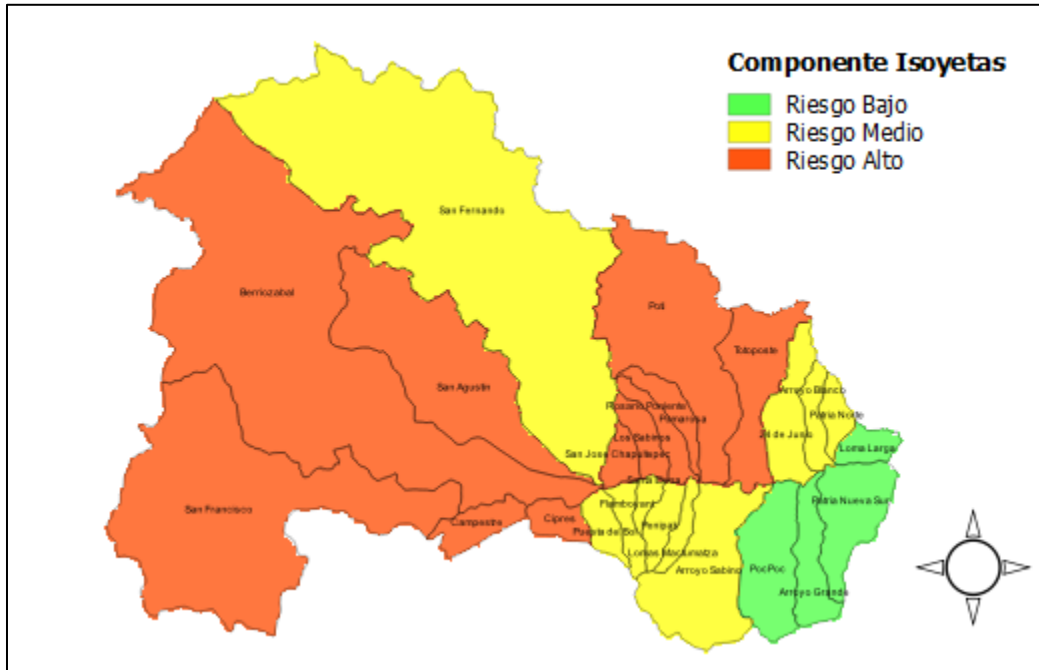


Fig. 3.17. Componente Isoyetas

Finalmente, para generar el Indicador hidrológico, se realiza el álgebra de mapas de los componentes Respuesta hidrológica, Zonificación e Isoyetas, esto utilizando la calculadora ráster de Qgis, esta herramienta permite realizar cálculos sobre los valores de pixel de los mapas de entrada, los resultados se escriben en un nuevo ráster de salida.

El resultado es el Indicador hidrológico de la figura 3.18, la cual muestra un panorama general de alerta, con doce microcuencas con un nivel de riesgo alto y trece microcuencas con nivel de riesgo medio.

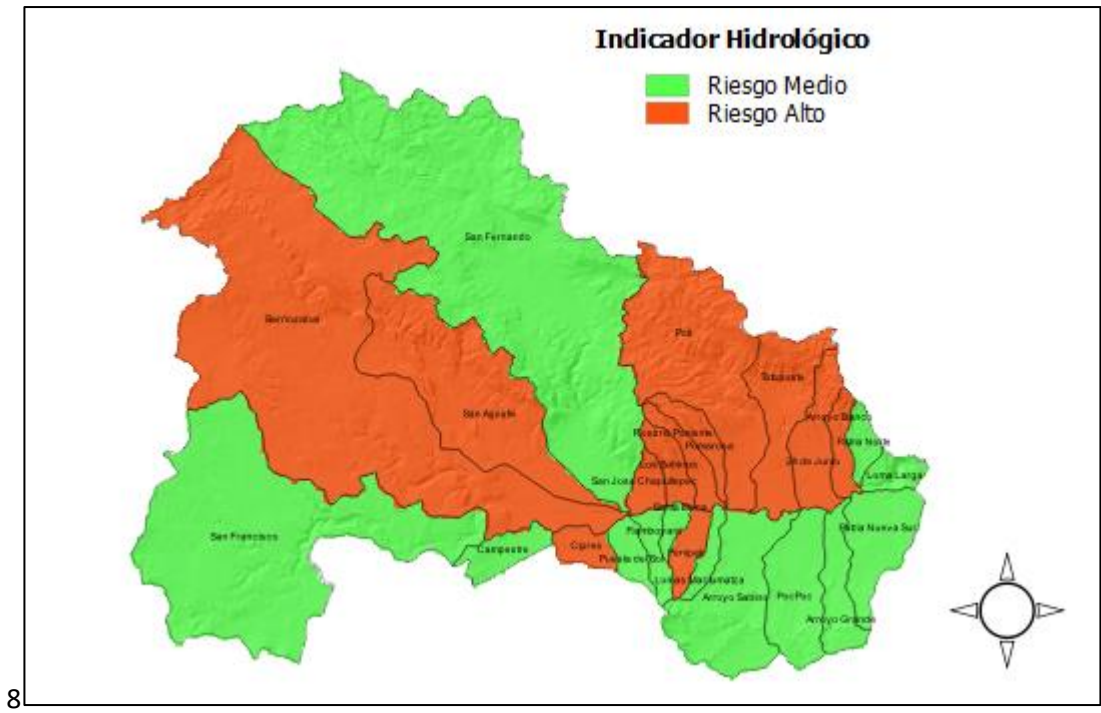


Fig. 3.18. Indicador Hidrológico

3.3.2. Indicador de Exposición

El indicador de exposición se construye a partir de dos componentes: Densidad de Población y Tipo de Vivienda; el primer componente identifica las microcuencas con mayor número de habitantes por kilómetro cuadrado y el segundo identifica las microcuencas con viviendas vulnerables, las cuales se consideran con esta característica si carecen de servicios básicos de agua y drenaje.

3.3.2.1. Densidad de población

De acuerdo con el INEGI, para saber que tan concentrada o dispersa se encuentra la población, se busca la relación que existe entre la cantidad de personas que viven en un lugar y la extensión del espacio que habitan. A esta relación se le denomina densidad de población o población relativa

Para conocer la densidad de población a nivel de microcuenca, se divide el número de habitantes y el área de la mancha urbana para cada una de las microcuencas. La tabla 3.10 muestra los resultados generados.

Tabla 3.10. Densidad de Población

| Microcuenca | Area (km ²) | Habitantes | Area Mancha Urbana (km ²) | Densidad de Población (Habitantes por km ²) |
|----------------------|-------------------------|------------|---------------------------------------|---|
| 24 de Junio | 6.88 | 56,143 | 5.14 | 10,917 |
| Arroyo Blanco | 2.92 | 32,164 | 3.04 | 10,588 |
| Arroyo Grande | 5.62 | 21,295 | 6.87 | 3,100 |
| Arroyo Sabino | 16.12 | 57,152 | 15.08 | 3,790 |
| Berriozábal | 88.98 | 19,814 | 9.29 | 2,133 |
| Campestre | 3.93 | 1,419 | 4.22 | 336 |
| Ciprés | 2.76 | 17,031 | 2.52 | 6,745 |
| Flamboyant | 2.55 | 4,209 | 7.65 | 550 |
| Loma Larga | 2.58 | 6,409 | 2.22 | 2,882 |
| Lomas Mactumactzá | 1.98 | 12,749 | 4.30 | 2,966 |
| Los Sabinos | 3.14 | 5,891 | 1.75 | 3,366 |
| Patria Norte | 2.32 | 10,450 | 3.20 | 3,264 |
| Patria Nueva Sur | 8.92 | 57,062 | 7.65 | 7,459 |
| Penipak | 2.86 | 12,401 | 5.21 | 2,379 |
| PocPoc | 10.38 | 60,852 | 8.34 | 7,297 |
| Pomarosa | 3.21 | 9,349 | 0.83 | 11,219 |
| Poti | 27.44 | 43,824 | 3.68 | 11,924 |
| Puesta del Sol | 2.66 | 21,316 | 4.21 | 5,058 |
| Rosario Poniente | 3.09 | 9,102 | 1.52 | 5,980 |
| San Agustín | 28.58 | 13,138 | 7.79 | 1,687 |
| San Fernando | 92.58 | 17,564 | 5.32 | 3,303 |
| San Francisco | 55.73 | 200 | 2.24 | 89 |
| San José Chapultepec | 2.37 | 13,341 | 1.93 | 6,924 |
| Santa Elena | 1.38 | 2,402 | 2.48 | 969 |
| Totoposte | 11.60 | 69,878 | 6.78 | 10,302 |

Las microcuencas Poti, Pomarosa, 24 de Junio, Arroyo Blanco y Totoposte, encabezan la lista superando los 10,000 habitantes por kilómetro cuadrado. Esto se muestra de manera gráfica en la figura 3.19.

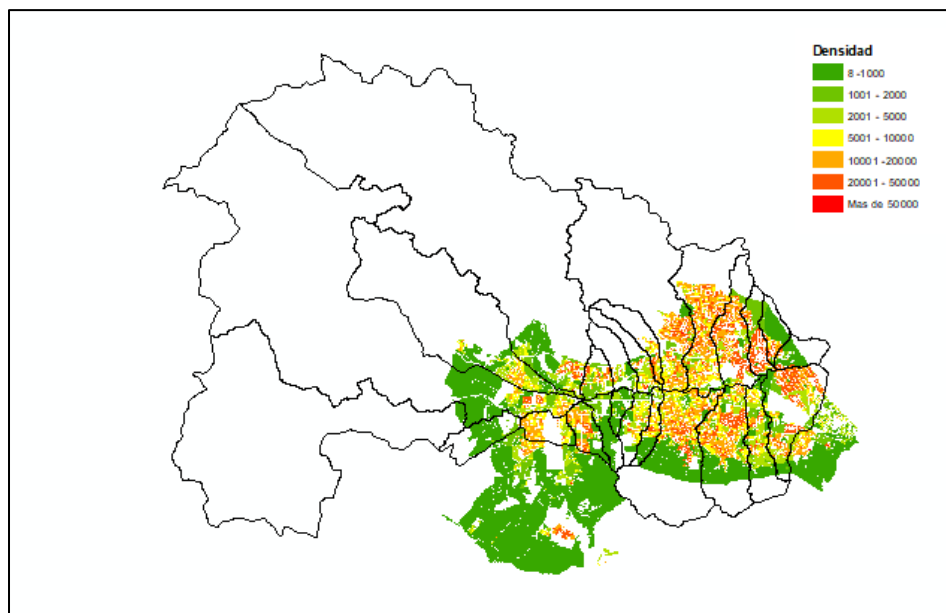


Fig. 3.19. Densidad de Población

De acuerdo a los valores máximos y mínimos obtenidos, se propone considerar los siguientes valores de referencia (tabla 3.11.) con respecto a la densidad de población, asumiendo que la vulnerabilidad es directamente proporcional a la densidad de población, a mayor densidad de población mayor vulnerabilidad.

Tabla 3.11. Valores de referencia entre Densidad de Población y Vulnerabilidad

| Densidad de Población | Vulnerabilidad |
|-----------------------|----------------|
| 1 – 5,000 | Baja |
| 5,001 – 10,000 | Media |
| >10,000 | Alta |

Estos intervalos son aplicados a los valores de densidad de población, generando la tabla 3.12, se agregan a la tabla de atributos de microcuencas y su representación se ilustra en la figura 3.20.

Tabla 3.12. Indicador de Densidad de Población

| Microcuenca | Indicador Densidad de Población |
|----------------------|--|
| 24 de Junio | Alto |
| Arroyo Blanco | Alto |
| Arroyo Grande | Bajo |
| Arroyo Sabino | Bajo |
| Berriozábal | Bajo |
| Campestre | Bajo |
| Ciprés | Medio |
| Flamboyant | Bajo |
| Loma Larga | Bajo |
| Lomas Mactumactzá | Bajo |
| Los Sabinos | Bajo |
| Patria Norte | Bajo |
| Patria Nueva Sur | Medio |
| Penipak | Bajo |
| PocPoc | Medio |
| Pomarosa | Alto |
| Poti | Alto |
| Puesta del Sol | Medio |
| Rosario Poniente | Medio |
| San Agustín | Bajo |
| San Fernando | Bajo |
| San Francisco | Bajo |
| San José Chapultepec | Medio |
| Santa Elena | Bajo |
| Totoposte | Alto |

Fuente: Elaboración propia basado en la densidad de población calculada y aplicando los valores de referencia propuestos.

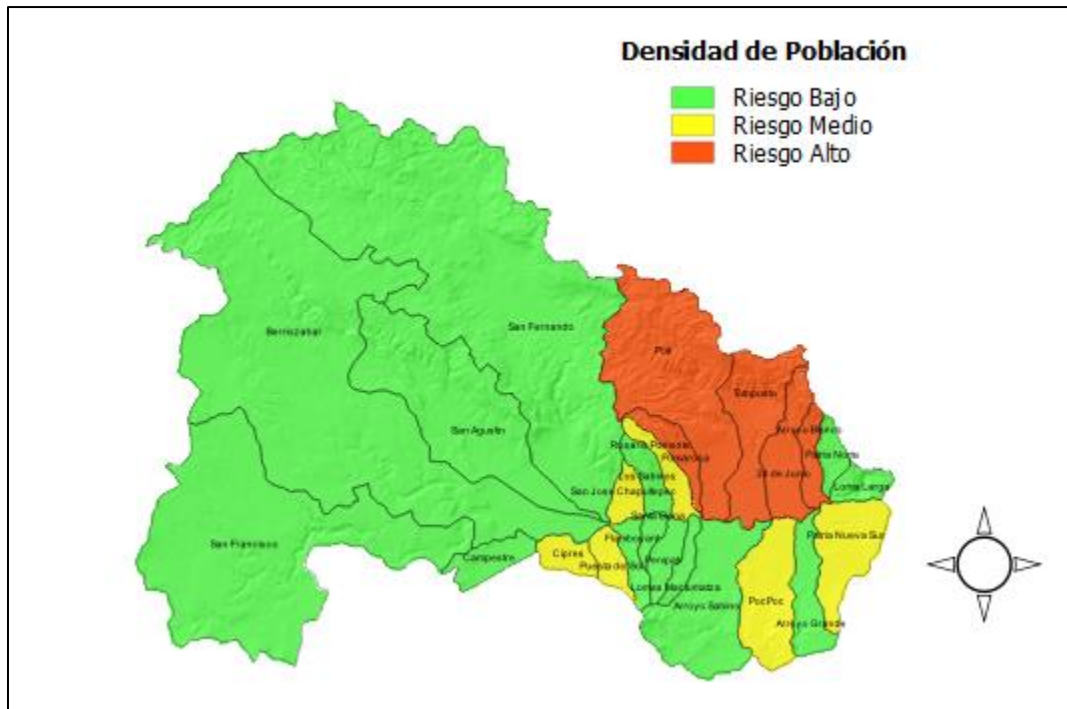


Fig. 3.20. Densidad de Población

3.3.2.2. Tipo de vivienda

Considerando como característica de vulnerabilidad aquellas viviendas que no cuentan con servicios básicos (agua y drenaje), se genera el componente Tipo de vivienda, el cual se determina como $(\text{Viviendas vulnerables} / \text{Total de viviendas}) \times (100)$.

Con base al análisis de los valores obtenidos, se propone aplicar los intervalos de la tabla 3.13

Tabla 3.13. Intervalos de vulnerabilidad según el tipo de vivienda

| % | Vulnerabilidad |
|----------|----------------|
| 0 - 30 | Baja |
| 31 - 50 | Media |
| 51 - 100 | Alta |

Con los datos obtenidos y aplicando los intervalos de vulnerabilidad, el componente Tipo de vivienda, resulta según lo expuesto en la tabla 3.14 y representado en la figura 3.21

Tabla 3.14. Indicador de Vulnerabilidad

| Microcuenca | Viviendas Particulares Habitadas | | | Indicador de Viviendas Vulnerables |
|----------------------|----------------------------------|-------------|----|------------------------------------|
| | Total | Vulnerables | % | |
| 24 de Junio | 14,512 | 1,140 | 8 | Bajo |
| Arroyo Blanco | 8,599 | 1,525 | 18 | Bajo |
| Arroyo Grande | 5,443 | 525 | 10 | Bajo |
| Arroyo Sabino | 15,823 | 1,088 | 7 | Bajo |
| Berriozábal | 5,317 | 1,797 | 34 | Medio |
| Campestre | 354 | 227 | 64 | Alto |
| Ciprés | 4,294 | 1,079 | 25 | Bajo |
| Flamboyant | 1,150 | 142 | 12 | Bajo |
| Loma Larga | 1,480 | 337 | 23 | Bajo |
| Lomas Mactumactzá | 3,353 | 285 | 8 | Bajo |
| Los Sabinos | 1,716 | 128 | 7 | Bajo |
| Patria Norte | 2,638 | 546 | 21 | Bajo |
| Patria Nueva Sur | 14,139 | 1,829 | 13 | Bajo |
| Penipak | 3,298 | 498 | 15 | Bajo |
| PocPoc | 15,693 | 813 | 5 | Bajo |
| Pomarosa | 2,385 | 244 | 10 | Bajo |
| Poti | 11,512 | 2,275 | 20 | Bajo |
| Puesta del Sol | 5,585 | 677 | 12 | Bajo |
| Rosario Poniente | 2,550 | 104 | 4 | Bajo |
| San Agustín | 3,380 | 1,853 | 55 | Alto |
| San Fernando | 4,874 | 882 | 18 | Bajo |
| San Francisco | 46 | 36 | 78 | Alto |
| San José Chapultepec | 3,775 | 394 | 10 | Bajo |
| Santa Elena | 688 | 109 | 16 | Bajo |
| Totoposte | 17,450 | 2,644 | 15 | Bajo |

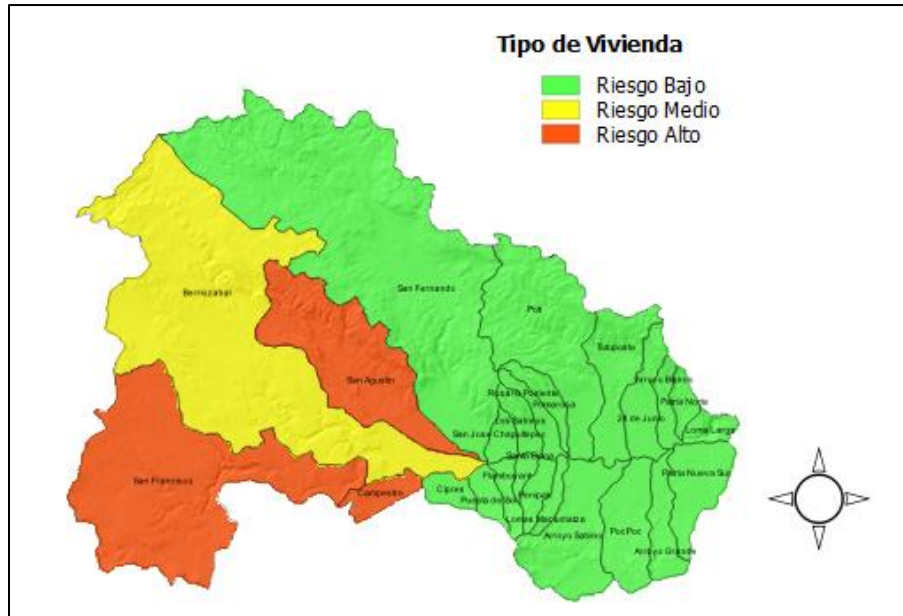


Fig. 3.21. Tipo de Vivienda

El indicador de Exposición resulta de la estadística por celda utilizando como entrada los componentes Densidad de población y Tipo de vivienda, el resultado gráfico se presenta en la figura 3.22.

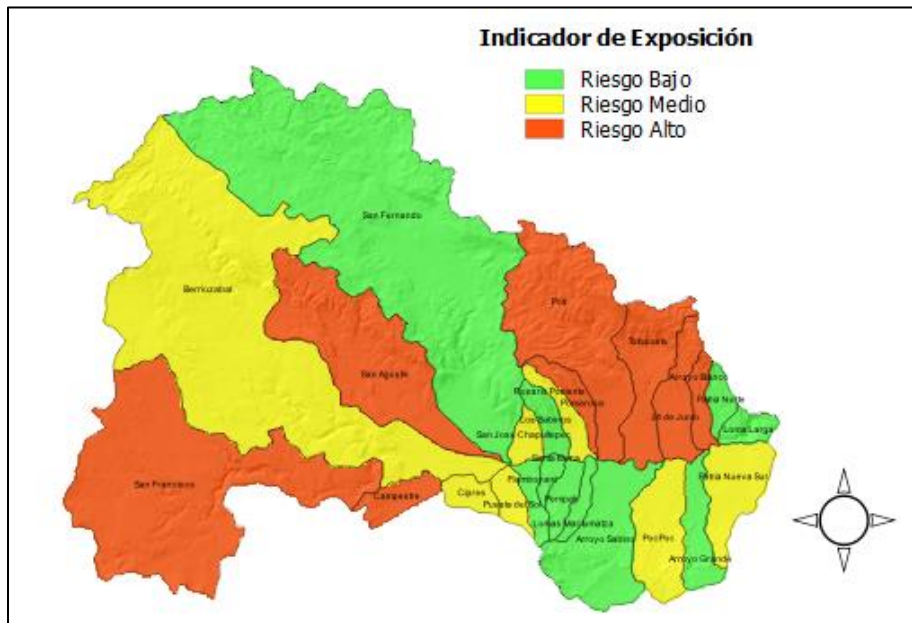


Fig. 3.22. Indicador de Exposición

El indicador de exposición permite identificar ocho microcuencas con un nivel de riesgo alto, las cuales son San Francisco, Campestre, San Agustín, Pomarosa, Poti, Totoposte, 24 de Junio y Arroyo Blanco; así como siete microcuencas con nivel de riesgo medio y diez microcuencas con nivel de riesgo bajo.

3.3.3. Indicador de Vulnerabilidad Social

Este indicador está basado en los grupos vulnerables, los cuales incluyen a la población mayor de 60 y menor de 14 años.

3.3.3.1. Grupos Vulnerables

Se identifican los grupos de población mayor de 60 años y menor de 14 años, asignando un valor determinado como $(\text{Población vulnerable} / \text{Población total}) * (100)$.

Con base al análisis de los resultados obtenidos, se propone aplicar los intervalos mostrados en la tabla 3.15

Tabla 3.15. Intervalos Grupos Vulnerables

| % | Vulnerabilidad |
|---------|----------------|
| 0 - 30 | Baja |
| 31 - 50 | Media |
| 51 -100 | Alta |

Los resultados de la aplicación de estos intervalos se presentan gráficamente en la figura 3.23 y se relacionan en la tabla 3.16.

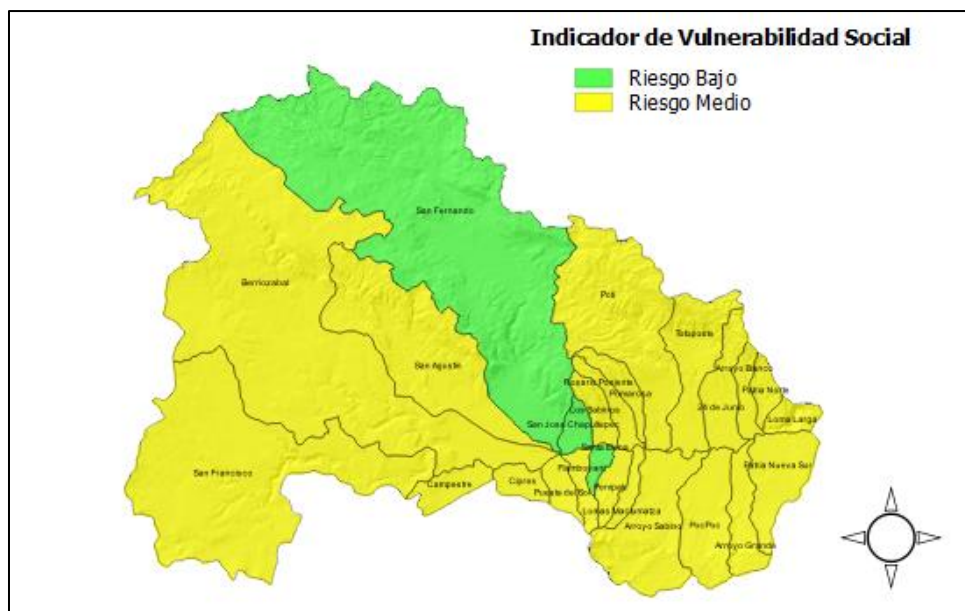


Fig. 3.23. Indicador de Vulnerabilidad Social

Tabla 3.16. Grupos Vulnerables

| Microcuenca | Población | Población Vulnerable | | | Indicador de Vulnerabilidad Social |
|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----|------------------------------------|
| | | < 14 años | > 60 años | % | |
| 24 de Junio | 56,143 | 14,795 | 3,081 | 32 | Medio |
| Arroyo Blanco | 32,164 | 9,190 | 1,266 | 33 | Medio |
| Arroyo Grande | 21,295 | 5,476 | 1,577 | 33 | Medio |
| Arroyo Sabino | 57,152 | 12,310 | 6,677 | 33 | Medio |
| Berriozábal | 19,814 | 5,124 | 1,393 | 33 | Medio |
| Campestre | 1,419 | 394 | 86 | 34 | Medio |
| Ciprés | 17,031 | 4,982 | 1,012 | 35 | Medio |
| Flamboyant | 4,209 | 885 | 376 | 30 | Medio |
| Loma Larga | 6,409 | 1,903 | 286 | 34 | Medio |
| Lomas Mactumactzá | 12,749 | 3,065 | 1,273 | 34 | Medio |
| Los Sabinos | 5,891 | 1,334 | 502 | 31 | Medio |
| Patria Norte | 10,450 | 3,129 | 404 | 34 | Medio |
| Patria Nueva Sur | 57,062 | 17,023 | 2,752 | 35 | Medio |
| Penipak | 12,401 | 3,035 | 1,072 | 33 | Medio |
| PocPoc | 60,852 | 14,891 | 5,419 | 33 | Medio |
| Pomarosa | 9,349 | 2,407 | 815 | 34 | Medio |
| Poti | 43,824 | 11,487 | 3,106 | 33 | Medio |
| Puesta del Sol | 21,316 | 5,457 | 1,380 | 32 | Medio |
| Rosario Poniente | 9,102 | 1,994 | 855 | 31 | Medio |
| San Agustín | 13,138 | 3,411 | 902 | 33 | Medio |
| San Fernando | 17,564 | 3,946 | 1,036 | 28 | Bajo |
| San Francisco | 200 | 54 | 6 | 30 | Medio |
| San José Chapultepec | 13,341 | 2,762 | 1,089 | 29 | Bajo |
| Santa Elena | 2,402 | 478 | 217 | 29 | Bajo |
| Totoposte | 69,878 | 19,253 | 4,505 | 34 | Medio |

3.4. Discusión de resultados, Conclusiones y Trabajo a Futuro

Las microcuencas delimitadas en la Cuenca del Río Sabinal presentan valores en los indicadores generados que las ubican con algún nivel de riesgo por inundación.

El análisis realizado permite identificar las microcuencas mostradas en la tabla 4.1, con el mayor nivel de riesgo, ya que presentan al menos dos indicadores con nivel alto.

Tabla 4.1. Microcuencas con índice de riesgo alto

| Microcuenca | Indicador | | |
|---------------|-------------|------------|----------------|
| | Hidrológico | Exposición | Vulnerabilidad |
| 24 de Junio | Alto | Alto | Medio |
| Arroyo Blanco | Alto | Alto | Medio |
| Campestre | Alto | Alto | Medio |
| Pomarosa | Alto | Alto | Medio |
| Poti | Alto | Alto | Medio |
| San Agustín | Alto | Alto | Medio |
| Totoposte | Alto | Alto | Medio |

El siguiente nivel de riesgo es ocupado por las microcuencas mostradas en la Tabla 4.2, las cuales presentan al menos dos indicadores con nivel medio o al menos uno alto y uno medio.

Tabla 4.2. Microcuencas con índice de riesgo medio

| Microcuenca | Indicador | | |
|----------------------|-------------|------------|----------------|
| | Hidrológico | Exposición | Vulnerabilidad |
| Berriozábal | Alto | Medio | Medio |
| Ciprés | Alto | Medio | Medio |
| Rosario Poniente | Alto | Medio | Medio |
| San Francisco | Medio | Alto | Medio |
| Patria Nueva Sur | Medio | Medio | Medio |
| PocPoc | Medio | Medio | Medio |
| Puesta del Sol | Medio | Medio | Medio |
| San José Chapultepec | Alto | Medio | Bajo |
| Los Sabinos | Alto | Bajo | Medio |
| Arroyo Grande | Medio | Bajo | Medio |
| Arroyo Sabino | Medio | Bajo | Medio |
| Flamboyant | Medio | Bajo | Medio |
| Loma Larga | Medio | Bajo | Medio |
| Lomas Mactumactzá | Medio | Bajo | Medio |
| Patria Norte | Medio | Bajo | Medio |
| Penipak | Medio | Bajo | Medio |

Las microcuencas con menor nivel de riesgo son aquéllas que presentan dos indicadores con nivel bajo (Tabla 4.3).

Tabla 4.3. Microcuencas con índice de riesgo bajo

| Microcuenca | Indicador | | |
|--------------|-------------|------------|----------------|
| | Hidrológico | Exposición | Vulnerabilidad |
| San Fernando | Medio | Bajo | Bajo |
| Santa Elena | Medio | Bajo | Bajo |

En la presente investigación se obtuvo el índice de riesgo de las microcuencas del río Sabinal, el cual se compone de tres indicadores: Indicador hidrológico, Indicador de exposición e Indicador de vulnerabilidad social. Se analizaron sus valores y se identificaron las microcuencas con riesgo alto, medio y bajo.

A continuación, a partir del desarrollo y resultados de esta investigación, se describen algunas actividades susceptibles de realizarse:

- a) Escalar el análisis a nivel de identificación de riesgos a las partes altas, medias y bajas de cada microcuenca, con base a la metodología desarrollada y el empleo del software manejador de información geográfica QGIS.
- b) Considerar la incorporación de nuevos elementos, tales como la red de drenaje y la información hidrométrica existente.
- c) Replicar la metodología para otras ciudades dentro de la cuenca, como Berriozábal y San Fernando.
- c) Poner a disposición de las instituciones gubernamentales y educativas el SIG realizado para la toma de decisiones relacionadas con la prevención y mitigación de inundaciones en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

ANEXO A. Indicador Hidrológico

Anexo A1. Respuesta Hidrológica

Procedimiento para obtener el área de drenaje

Abrir un proyecto nuevo en QGIS y cargar la capa de microcuencas (Fig.A1).

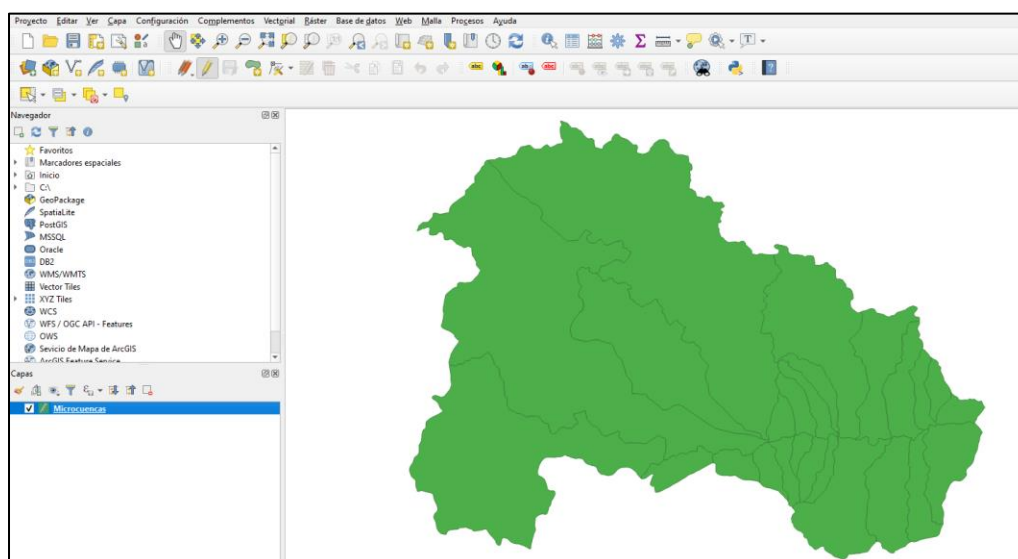


Figura A1

Agregar a la tabla de atributos un nuevo campo numérico denominado *Área*, de longitud 10 y precisión 2 decimales (Fig.A2), para lo cual es necesario activar el modo edición, haciendo clic en *Commutar edición* y *Columna nueva*.

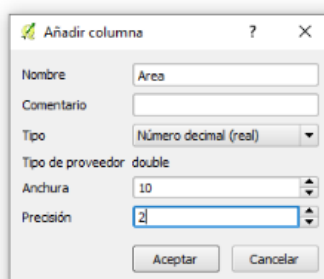


Figura A2

Una vez creado el nuevo campo, se utiliza la *Calculadora de Campos* de QGIS, haciendo click sobre el botón *Abrir Calculadora de Campos*, marcar la casilla *Actualizar campo existente* y seleccionar *AREA*, en el apartado de *Funciones*, desplegar *Geometría* y hacer clic sobre *\$area* (Fig.A3).

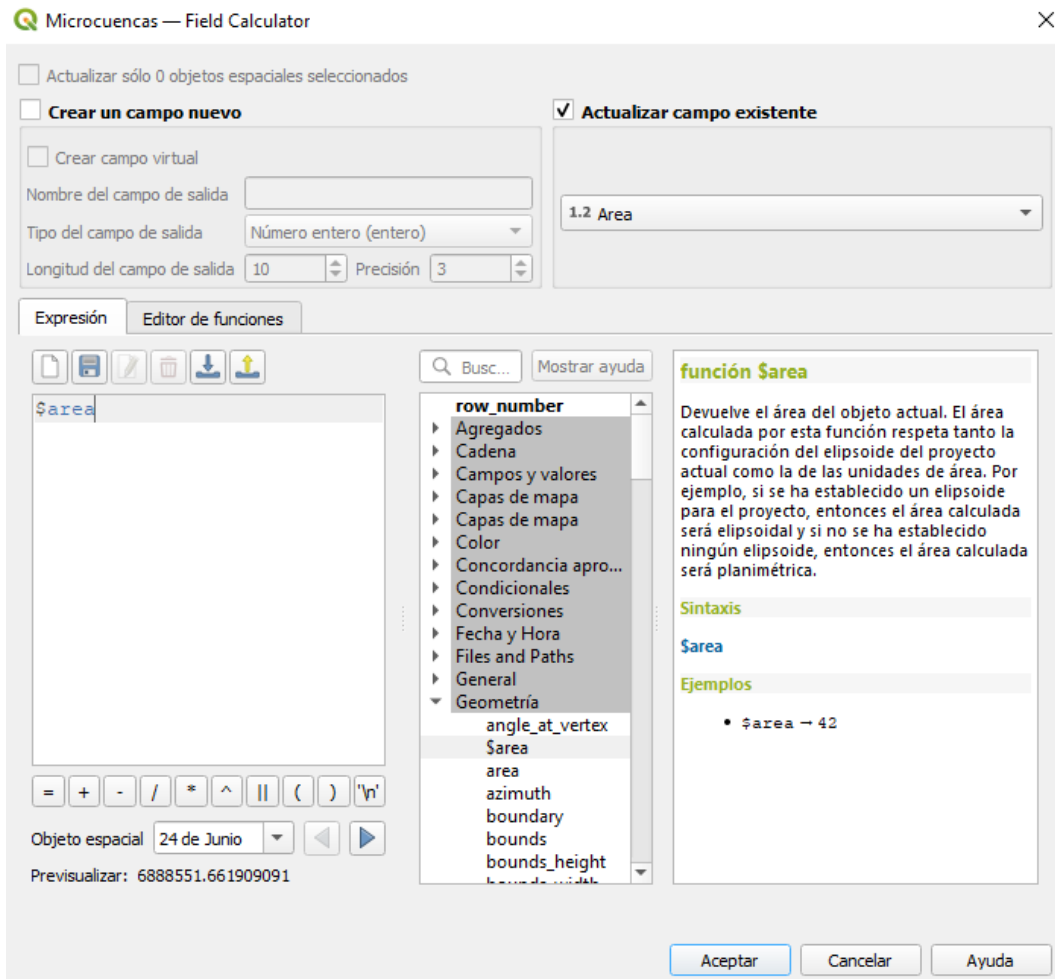


Figura A3

Hacer clic en *Aceptar* para obtener el área para cada una de las entidades geométricas de la capa.

Índice de Compacidad

En QGIS se crea el campo *Compacidad* y con apoyo de la calculadora de campos se introduce la fórmula: $Compacidad = \frac{Perímetro}{2\sqrt{\pi Area}}$, tal y como se muestra en la Fig.A4.

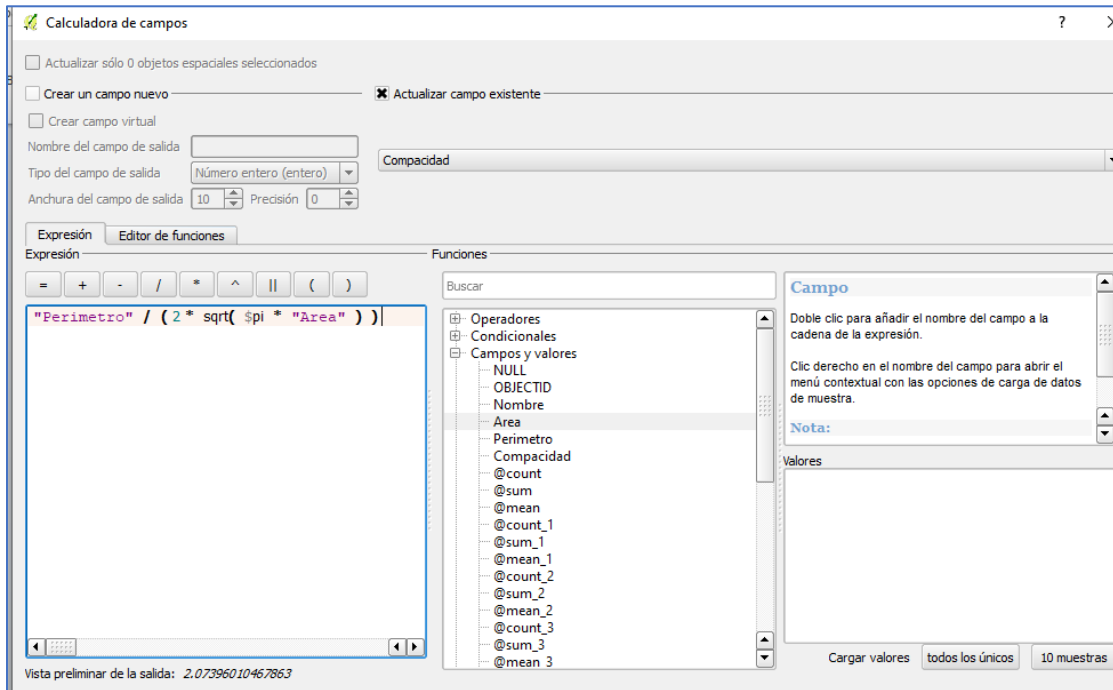


Figura A4

Factor de Forma

En la tabla de atributos agregar un nuevo campo numérico denominado *FForma*, de longitud 10 y precisión 2 decimales, estableciendo previamente el modo edición, haciendo clic en *Conmutar edición* y *Columna nueva*.

Se utiliza la calculadora de campos de QGIS, haciendo clic sobre el botón *Abrir Calculadora de Campos*, marcar la casilla *Actualizar campo existente* y seleccionar *FForma*, en el apartado de *Funciones*, desplegar *Campos* e introducir la fórmula *Area/LongMax* (Fig.A5).

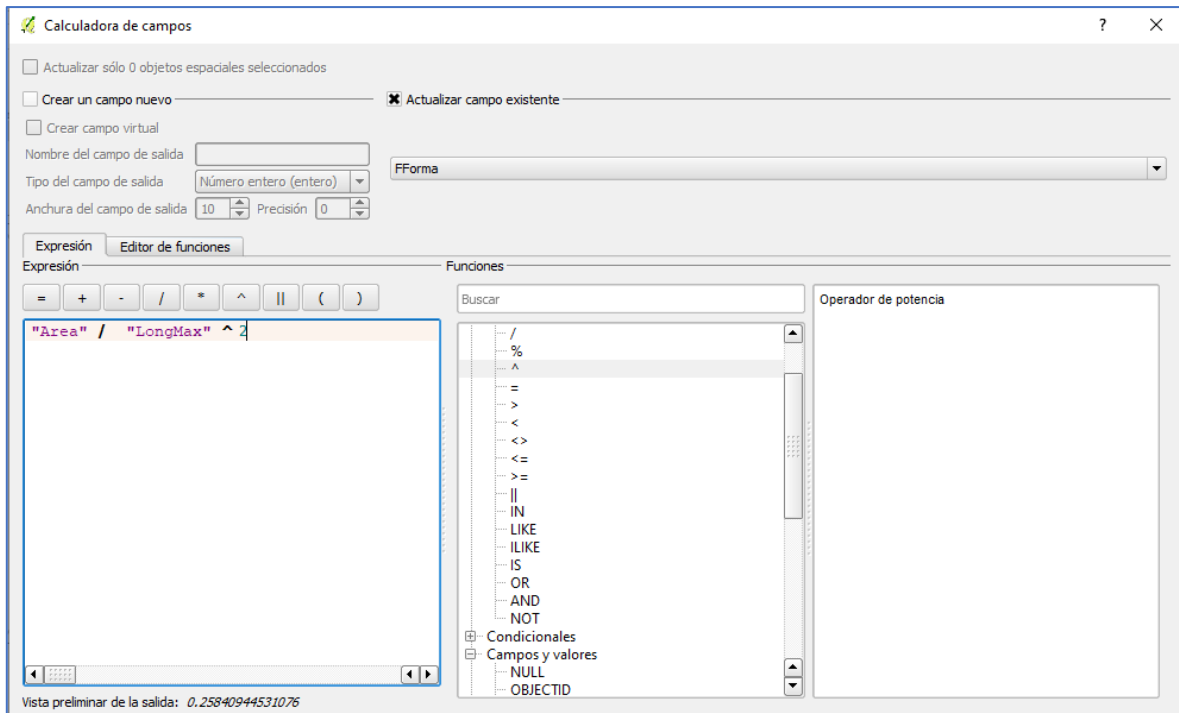


Figura A5

Pendiente Media de la Cuenca

Para el cálculo de la pendiente media de cada microcuenca, primero se obtiene el ráster de la cuenca del río Sabinal, para ello seleccionar *Procesos*, seleccionar *Caja de Herramientas* y realizar la extracción por máscara usado como entrada el Modelo Digital de Elevación y la capa de polígono de la cuenca del Río Sabinal.

Se procede a generar el mapa de pendientes, para lo cual se abre el ráster de la cuenca del río Sabinal, obtenido en el paso anterior y hacer clic en *Ráster, Análisis y Pendiente* (Fig.A6).

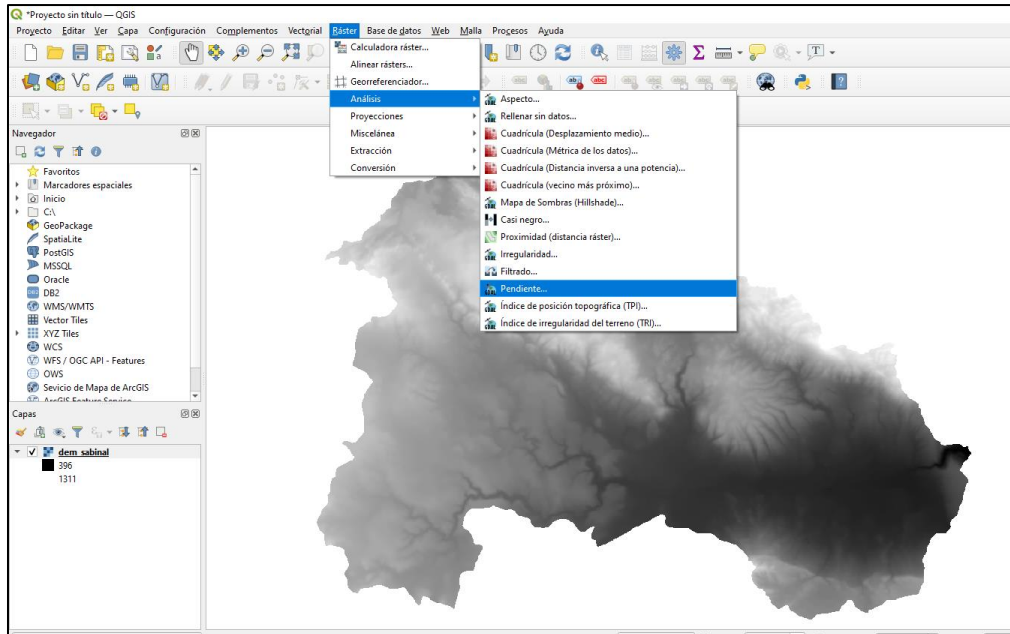


Figura A6

Posteriormente se genera la estadística de zona, lo que permite obtener el promedio de todas las pendientes generadas, utilizando el mapa de pendientes de la cuenca y el shape file de microcuencas, siendo este último la capa de polígonos que contiene las zonas (Fig.A7).

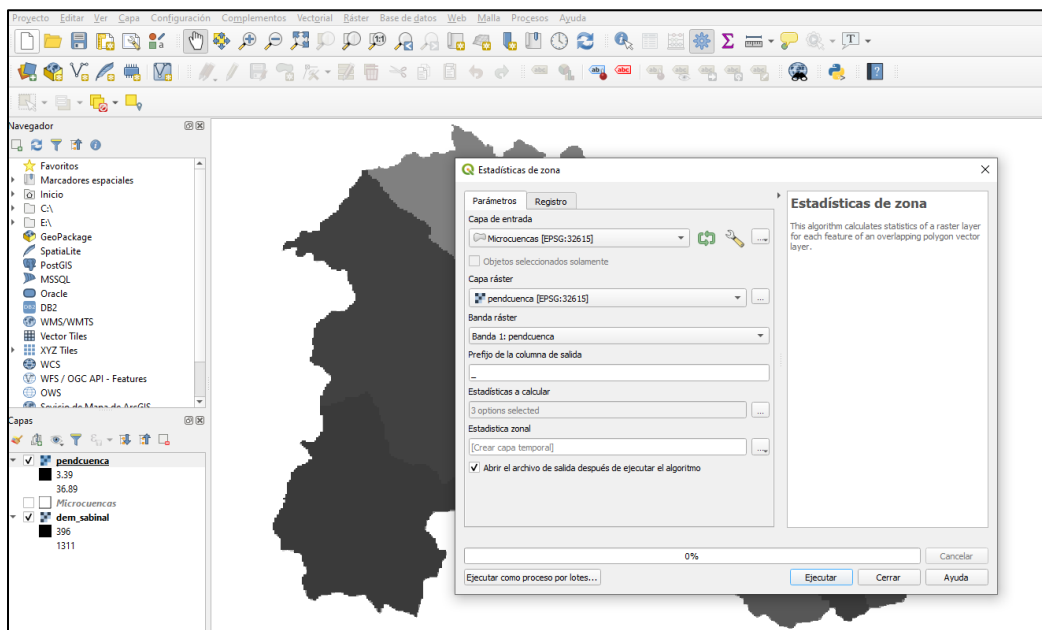


Figura A7

Pendiente Media del Cauce Principal

En el menú *Complementos*, seleccionar *Profile Tool* y *Terrain Profile* (Fig.A8).

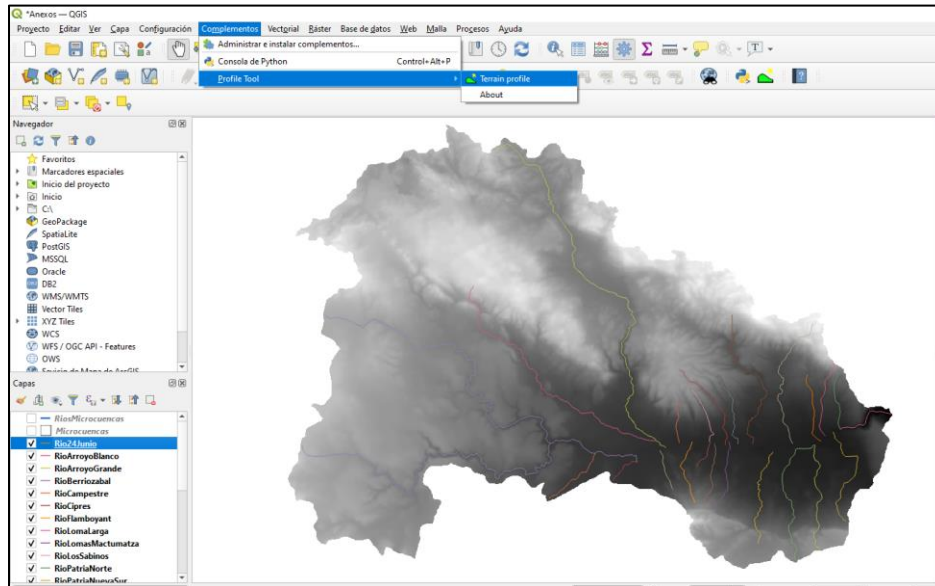


Figura A8

Una vez generado el perfil de cada cauce principal, se obtiene la longitud y la altura máxima y mínima, deslizando la línea vertical al inicio y al final del perfil o bien haciendo clic en la pestaña *Tabla* (Fig.A9).

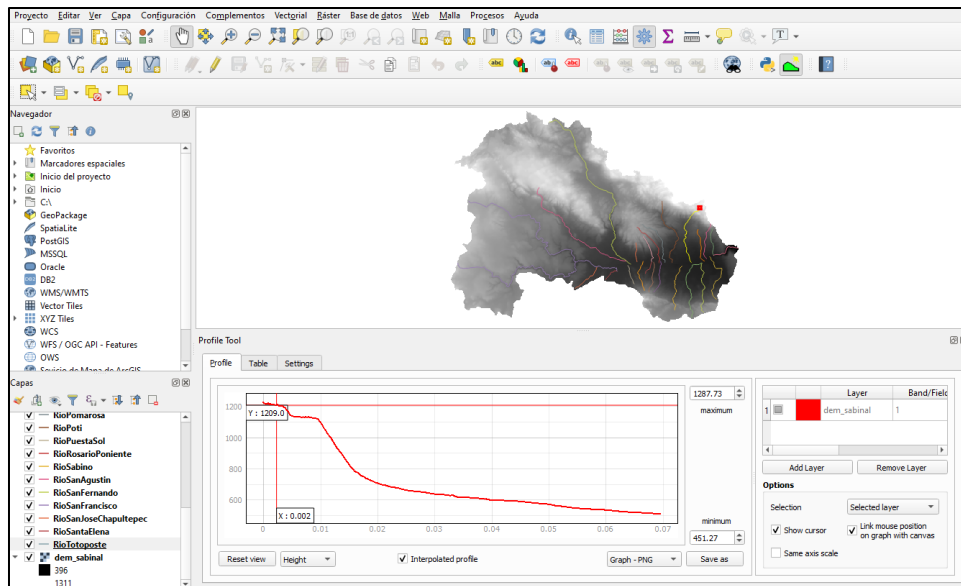


Figura A9

Los valores obtenidos para longitud, altura máxima y altura mínima se agregan como campos a la capa de microcuencas. Se adiciona un campo de pendiente media del cauce (PendienteC) y usando la calculadora de campos, emplear la fórmula:

$$\text{PendienteC} = (\text{Maxima-Mínima} / \text{Longitud del Cauce}) * 100$$

Anexo A.2. Zonificación

Procedimiento para llevar a cabo la zonificación

A partir del ráster de tirantes para los periodos de retorno 20, 50 y 100 años se realiza la extracción por máscara usando el shape file de microcuencas (Fig.A10).

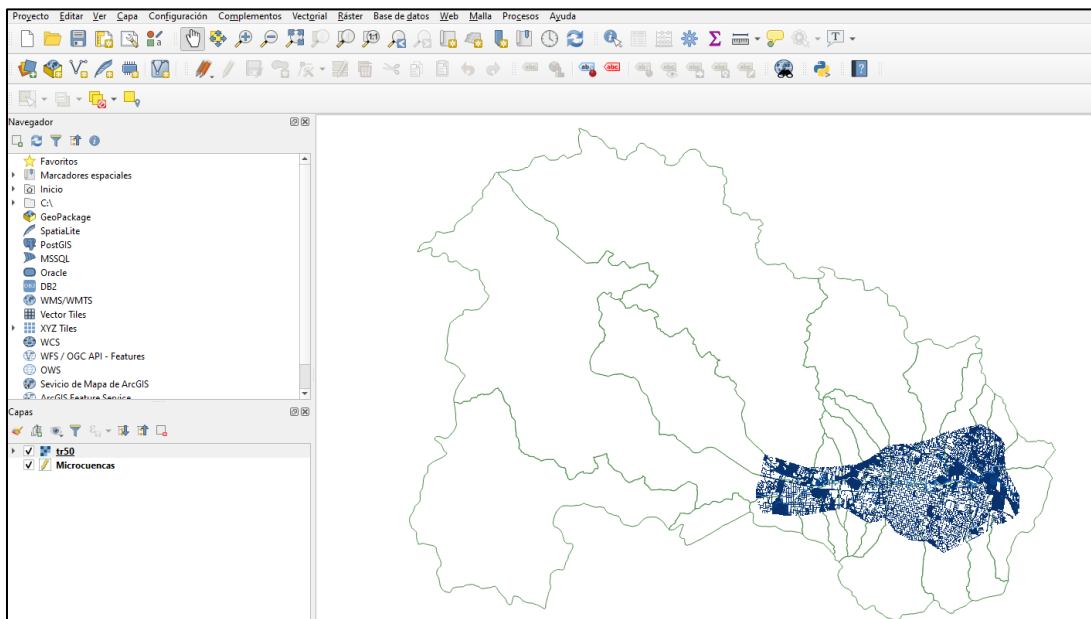


Figura A10

Se realiza una reclasificación, para generar un ráster con intervalos de 0-0.3 y mayor de 0.3, es decir se obtienen zonas con algún tipo de afectación (tirante mayor de 0.3 metros).

Para lo cual se selecciona *Procesos, Caja de Herramientas, Reclasificar por Tabla* (Fig. A11).

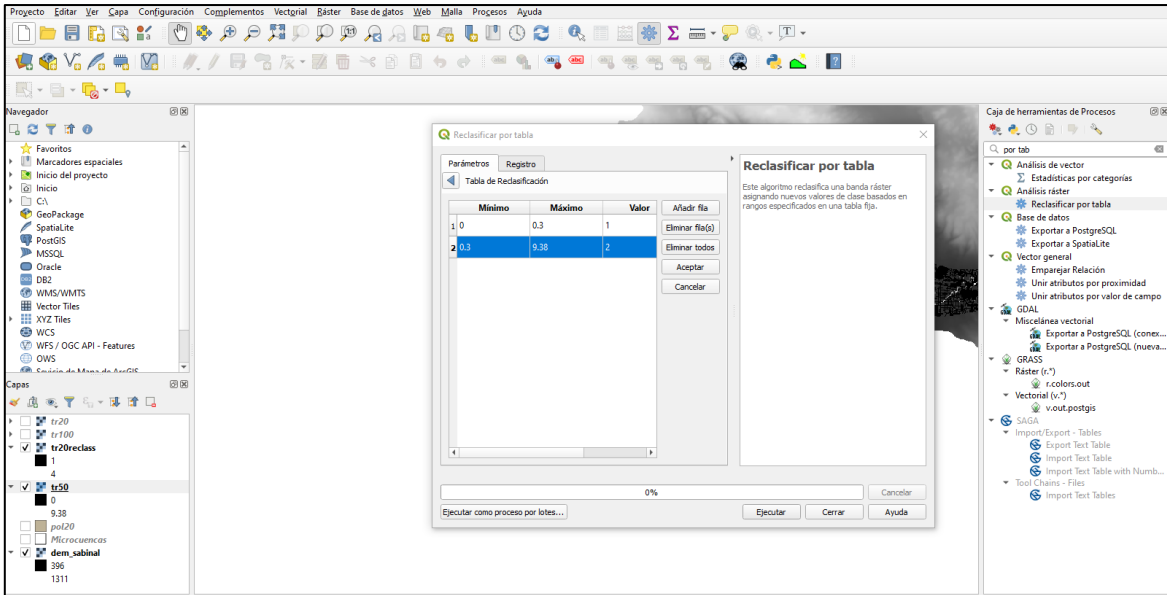


Figura A11

Se realiza la conversión a polígono, seleccionando *Ráster, Conversión, Poligonizar (ráster a vectorial)* (Fig.A12).

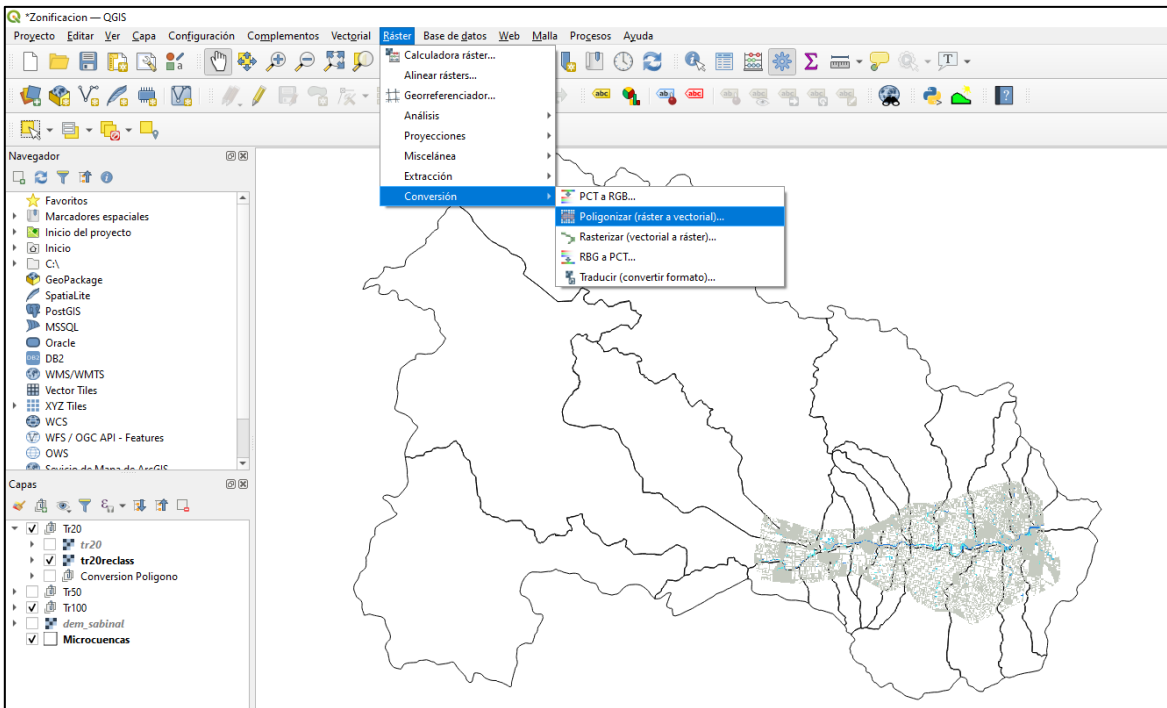


Figura A12

Se realiza el recorte de cada una de las microcuencas, para la cual se selecciona cada microcuenca y se hace click en el menú *Vectorial, Herramientas de Geoproceso y Cortar* (Fig.A13).

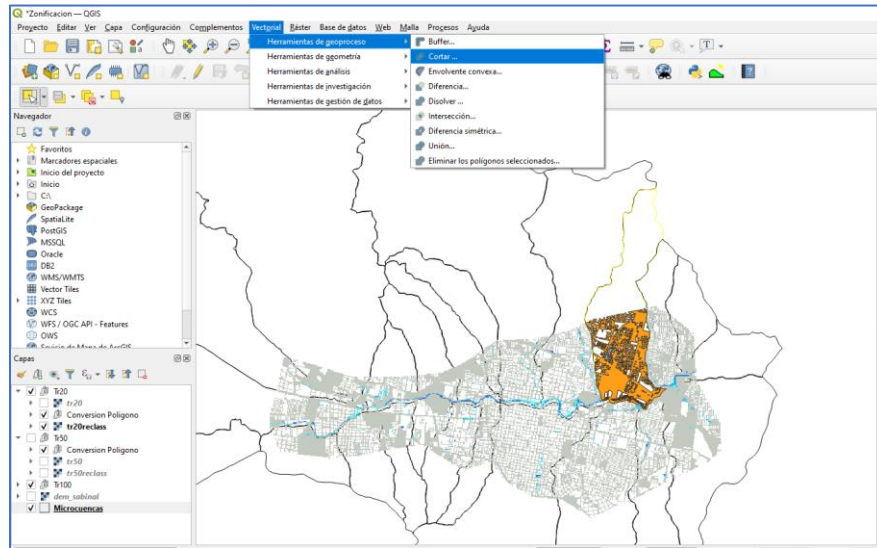


Figura A13

Se obtiene el área del recorte de cada una de las microcuencas (Fig.A14)

| ID | GRIDCODE | Cuenca | Area |
|------|----------|-------------|---------|
| 652 | 1 | Berriozabal | 1427.01 |
| 680 | 1 | Berriozabal | 394.35 |
| 751 | 1 | Berriozabal | 2116.00 |
| 752 | 1 | Berriozabal | 1815.04 |
| 884 | 2 | Berriozabal | 1587.00 |
| 885 | 3 | Berriozabal | 884.24 |
| 886 | 2 | Berriozabal | 1058.00 |
| 905 | 1 | Berriozabal | 1429.93 |
| 947 | 1 | Berriozabal | 6804.40 |
| 948 | 2 | Berriozabal | 338.77 |
| 950 | 3 | Berriozabal | 0.04 |
| 965 | 2 | Berriozabal | 529.00 |
| 966 | 4 | Berriozabal | 528.94 |
| 967 | 3 | Berriozabal | 529.00 |
| 984 | 4 | Berriozabal | 338.77 |
| 1004 | 3 | Berriozabal | 529.00 |

Figura A14

La tabla de atributos se copia a Excel para obtener los porcentajes de las áreas con tirantes de afectación mayores a 0.3 m.

Anexo A.3. Isoyetas

Procedimiento para obtener la precipitación promedio por el método de isoyetas

Con el shape file de estaciones, el cual contiene en la tabla de atributos la precipitación para diferentes periodos de retorno, interpolar usando Spline. Para ello en la caja de herramientas seleccionar *Ráster – Spline e Interpolación* (Fig.A15).

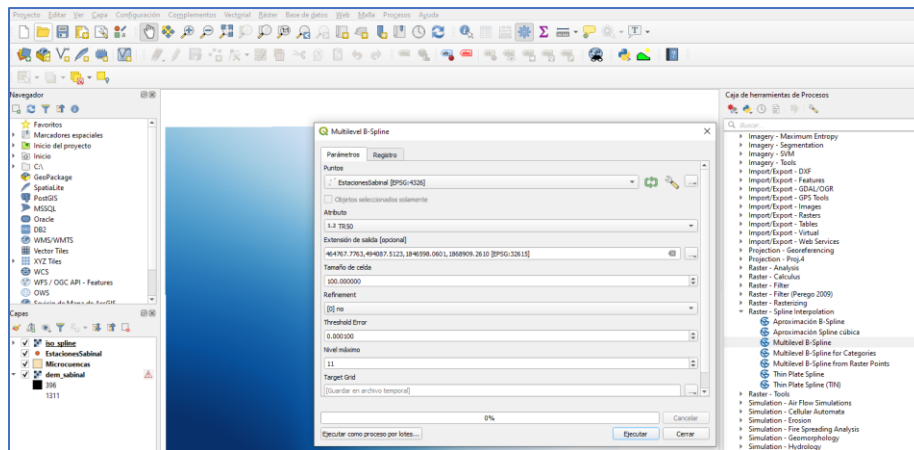


Figura A15

Se crean las isóneas utilizando las opciones *Ráster, Extracción, Curvas de nivel* (Fig. A16).

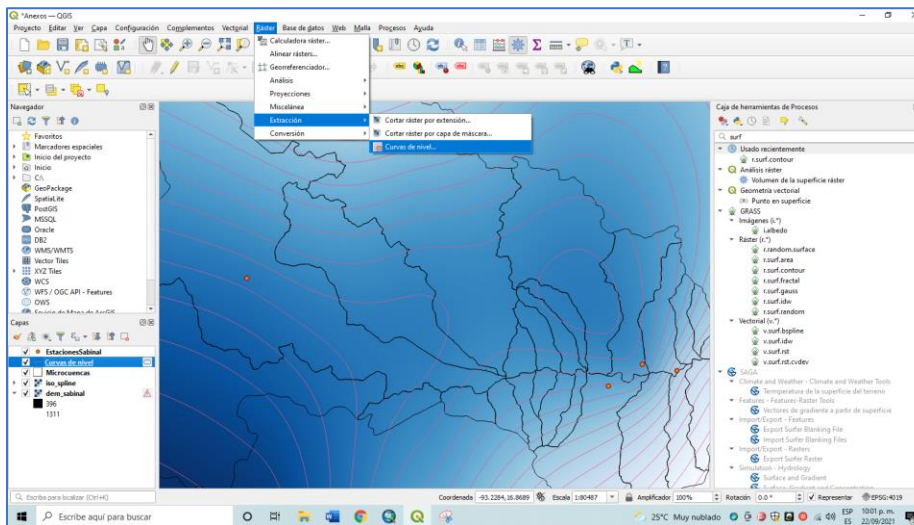


Figura A16

Se realiza una reclasificación para obtener las zonas comprendidas entre cada intervalo de isoyetas (Fig.A17).

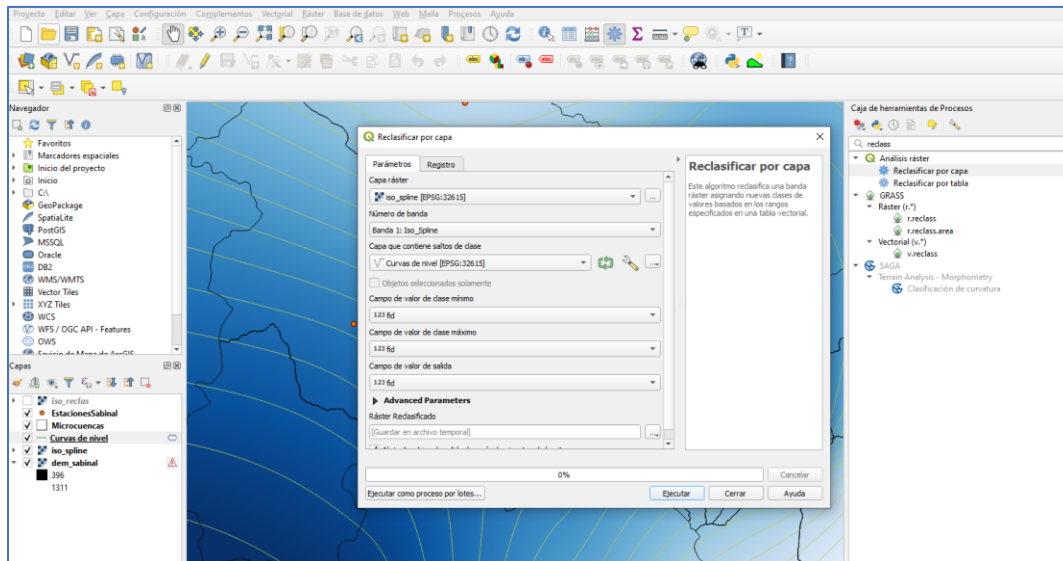


Figura A17

Se realiza la conversión del ráster reclasificado a polígono, el resultado obtenido se muestra en la Fig. A19.

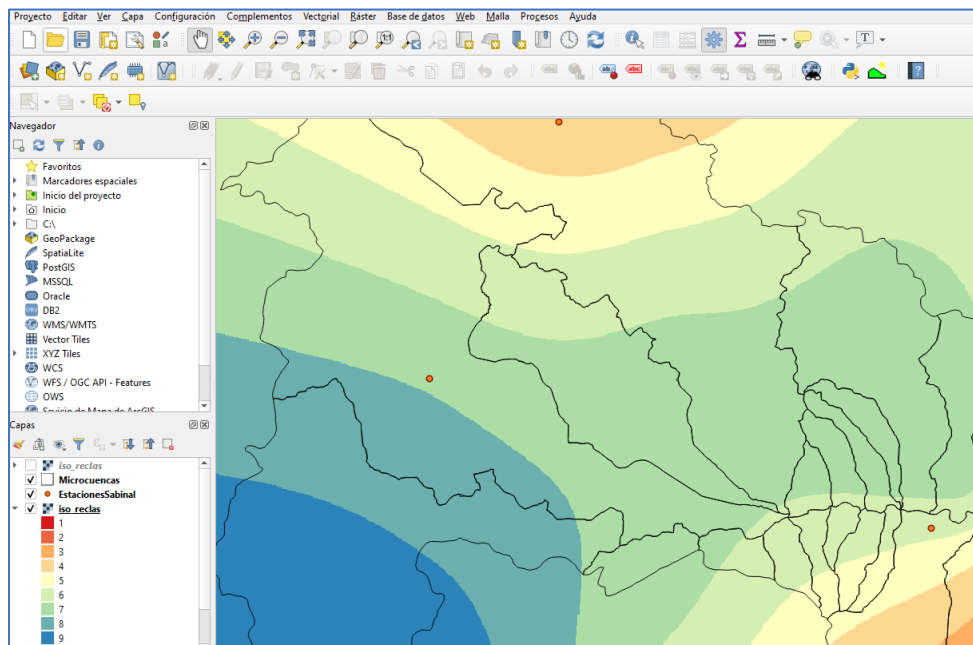


Figura A19

Extraer por máscara el ráster reclasificado con el shape de microcuencas y se realiza el recorte para cada microcuenca (Fig.A20).

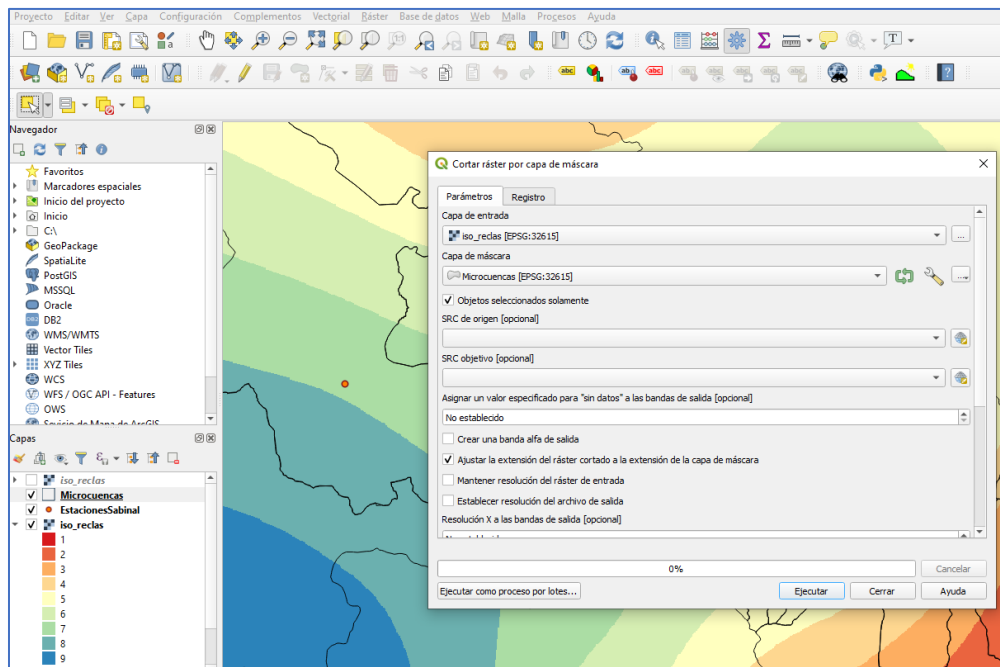


Figura A20

Se utiliza la *Estadística de zona* para obtener el valor máximo y mínimo para cada polígono (Fig.A21).

Para ello desde la caja de Herramientas, seleccionar *Análisis Ráster* y *Estadísticas de Zona* (Fig.A22).

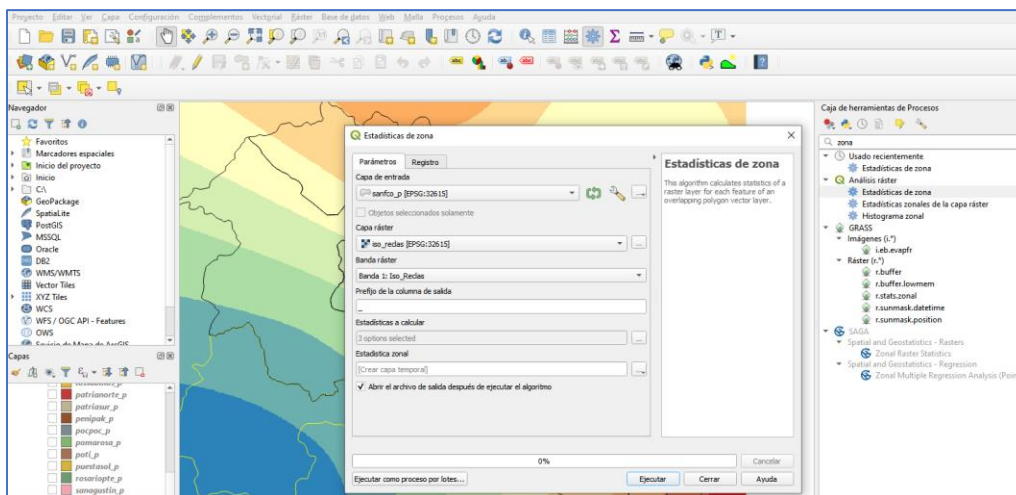
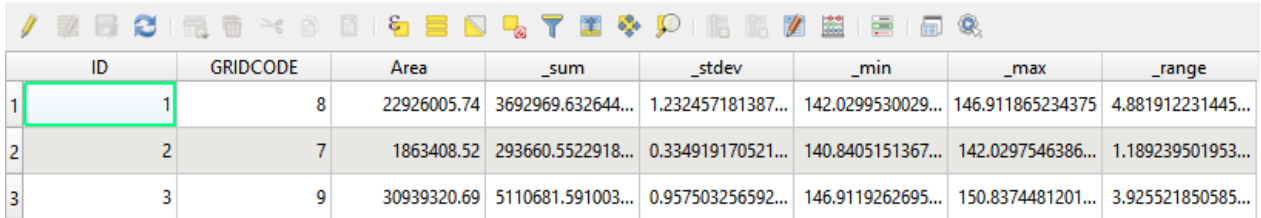


Figura 22

Los valores obtenidos para la microcuenca San Francisco se muestran en la Fig.23.

Estadística zonal — Features Total: 3, Filtered: 3, Selected: 0



| ID | GRIDCODE | Area | _sum | _stdev | _min | _max | _range | |
|----|----------|------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 1 | 8 | 22926005.74 | 3692969.632644... | 1.232457181387... | 142.0299530029... | 146.911865234375 | 4.881912231445... |
| 2 | 2 | 7 | 1863408.52 | 293660.5522918... | 0.334919170521... | 140.8405151367... | 142.0297546386... | 1.189239501953... |
| 3 | 3 | 9 | 30939320.69 | 5110681.591003... | 0.957503256592... | 146.9119262695... | 150.8374481201... | 3.925521850585... |

Figura A23

Con esta información se realiza el cálculo de la precipitación promedio en la microcuenca.

Este procedimiento se aplica a cada una de las microcuencas.

Referencias Bibliográficas

Alcocer-Yamanaka, V.H., Rodríguez-Varela, J.M., Bourguett-Ortiz, V.J., Llaguno-Guilberto, O.J. y Albornoz-Góngora, P.M. (2016). *Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas*. Tecnología y ciencias del agua, 7(5), 33-55.

Recuperado el 11 de marzo de 2022 de

https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500033

Alvarado Bello, S. (2014). *Uso de un Sistema de Información Geográfica para el Análisis de Amenaza por Inundaciones en la Cuenca Alta del Río Bogotá, Municipio de Cota, Límites Localidad de Suba* [Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1800/1/Uso-SIG-para-an%C3%A1lisis-amenaza-inundaciones-cuenca-alta-r%C3%ADo-Bogot%C3%A1.pdf>

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*, Limusa

Barnolas, M. y Llasat, M. (2005). *Aplicación de una herramienta SIG en el estudio de las inundaciones en Catalunya, 1901-2000*. Universidad de Barcelona. Recuperado el 23 de abril de 2020 de <https://www.tiempo.com/ram/1844/aplicacin-de-una-herramienta-sig-en-el-estudio-de-las-inundaciones-en-catalunya-1901-2000/>

Breña Puyol, A. y Jacobo Villa, M. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*, Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf

Cardona, O. (2007). *Indicadores de Riesgo de Desastre y de Gestión de Riesgos: Programa para América Latina y el Caribe. Informe Resumido*. Banco Interamericano de Desarrollo (BID) / Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Estudios Ambientales (IDEA). Disponible en <https://www.observatorioubogrd.cl/descargas/INDICE%20GESTION%20DEL%20RIESGO.pdf>

Carreño, M., Barbat, A., Marulanda, M. (2013), *Indicadores de amenaza, exposición y riesgo urbano*. En Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: el caso de Bogotá, Colombia (pp. 73-89). Recuperado el 25 de abril de 2022 de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/21114/carre%C3%B1o,%20barbat,%20marulanda.pdf>

CIIFEN (2020, Abril). Centro Internacional para la investigación del Fenómeno de El Niño. http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=84&Itemid=336&lang=es

CONAGUA (2020, Marzo). Comisión Nacional del Agua. www.gob.mx/conagua.

Cruz, R.B., Gaspari, F.J., Rodríguez, V.A., Carrillo, G.F., Téllez, L.J. (2015). *Análisis morfométrico de la cuenca hidrográfica del río Cuale, Jalisco, México*. Revista Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, (64),26-34. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/66784/Documento_completo___pdf?sequence=1&isAllowed=y

DeMers, M. (2008). *Fundamentals of Geographic Information Systems*. John Wiley and Sons, Inc., USA.

DOF (2018, 10 de abril). Diario Oficial de la Federación. *Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas pertenecientes a la región hidrológica número 30 Grijalva-Usumacinta*. <https://dof.gob.mx/index.php?year=2018&month=04&day=10#gsc.tab=0>

ESRI (2021, Junio). Environmental Systems Research Institute. <http://www.esri.com>

FEMA (Mayo,2020). Agencia Federal de Manejo de Emergencias de los Estados Unidos. Hazards U.S. Multi-Hazard (HAZUS-MH). <https://www.fema.gov/flood-maps/products-tools/hazus>

Gaspari, F.J., Rodríguez, V.A., Senisterra, G.E., Denegri, G.A., Delgado, M.I. y Besteiro, S.I. (2013). *Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina*, Revista científica del Comité de Medio Ambiente del Grupo Montevideo, AUGMODUS, (4),143-158. <https://revistas.unlp.edu.ar/domus/article/view/476>

Glas, H., Jonckheere, M., Mandal, A., James-Williamson, S., Maeyer, P., Deruyter, G. (2017). *A GIS-based tool for flood damage assessment and delineation of a methodology for future risk assessment: case study for Annotto Bay, Jamaica*. Revista Natural Hazards 88, 1867-257. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2920-5>

Goodchild, M. y Kemp, K. (eds.) (1990). NCGIA Core Curriculum in GIS. http://www.ncgia.ucsb.edu/pubs/cc1990/core_curriculum.html

Guevara, O., Quaas W., Fernández, V., Zepeda, R., Muñoz, H. y Torres, P. (2006). *Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Conceptos Básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) / Dirección General de Protección Civil. <https://repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/4049/1/ConceptosBasicosAtlas%20de%20Riesgos.pdf>

Gutiérrez Caiza, C. (2014). *Hidrología Básica y Aplicada*. Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6758/1/Hidrologia%20basica%20y%20aplicada.pdf>

Hernández, R., Fernández, C., Baptista M. (2014). *Metodología de la Investigación*, Ed. McGrawHill, México, D.F.

Hernández, R.E., Barrios, H. y Ramírez, A. (2017). *Análisis de Riesgo por Inundación: Metodología y Aplicación a la Cuenca Atemajac*, *Revista Tecnología y Ciencias del Agua* 8(3), 5-25, <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-01>

INEGI (2021a, Junio). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática www.inegi.org.mx.

INEGI. (2021b, Octubre). Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/

Jiménez, M., Baeza, C., Matías, L. y Eslava, H. (2012). *Mapas de Índices de Riesgo a Escala Municipal por Fenómenos Hidrometeorológicos*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México. www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Methodologias/Hidrometeorologico.pdf

Peña, J. (2006). Sistemas de Información Geográfica Aplicados a la Gestión del Territorio. *Revista de Geografía Norte Grande*. Ed. Club Universitario, España. 36,97-101 <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022006000200007>

Pinos, J., Timbe, L. y Orellana, D. (2017). *Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador*, *Revista semestral Maskana*, 8(2),147-162, Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC), Ecuador. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.11>

PNUD (2004). United Nations Development Programme. *Reducing Disaster Risk a Challenge for Development, A Global Report*. Recuperado el 23 de abril de 2020 de <https://www.undp.org/content/undp/en/home/librarypage/crisis-prevention-and-recovery/reducing-disaster-risk--a-challenge-for-development.html>

Ponce, V. (2015). *Fundamentos de la Hidráulica de Canales*, Edición en línea, <http://ponce.sdsu.edu/canales/>

QGIS (2021). Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto. <https://www.qgis.org/es/site/>

Quiroga, R. (2017). *Concepto de Dato, Estadística, Indicador. Fundamentos de recolección, compilación, validación, estructuración y descripción de series estadísticas y de indicadores*. [Material del Curso-Taller para Construir y Sostener Indicadores de Biodiversidad en Chile]. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/concepto_de_dato_estadistica_indicador._fundamentos_de_recoleccion_compilacion_validacion_estructuracion_y_descripcion_de_series_estadisticas_y_de_indicadores.pdf

Salas, M. y Jiménez, M. (2019). *Inundaciones*, Serie Fascículos, No. 3, segunda edición, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México. <https://escuelanacionaldeproteccioncivil.edu.mx/biblioteca-virtual/fasiculos/inundaciones/inundacionesfas.pdf>

Sellers, C., Corbelle, E., Buján, S. (2015), Morfología interpretativa de alta resolución con datos LIDAR en la cuenca del río Paute, Ecuador. Recuperado el 20 de septiembre de 2021 de <https://190.15.133.55/bibliotecas/publicaciones/UV-66.pdf#page=132>

SEMARNAT (2005). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Indicadores Básicos del Desempeño Ambiental de México: 2005*. PNUD / SEMARNAT.

SGN (2017). Servicio Geológico Nacional. *Sistemas de Información Geográfica*. Revisado el 21 de abril de 2020 en <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>

Suárez-Medina, M.A. y Astudillo-Enríquez, C. (2011). *Desarrollo del módulo ISOLINEAS en ArcGis. Aplicación cálculo de isoyetas en el estado de Guerrero*. V Congreso Internacional de Meteorología y XX Congreso Mexicano de Meteorología. Organización Mexicana de Meteorólogos A.C. (OMMAC) / Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Recuperado el 24 de mayo de 2022 en <http://www.ommac.org/congreso2011/document/extenso/Ext2011014.pdf>

UNISDR (2009). *Terminología sobre reducción del riesgo de desastres*. Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (UNISDR) Ginebra, Suiza. Recuperado el 20 de abril de 2022 de https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf

University of Edinburgh (2021), What is GIS?. Recuperado el 14 de Septiembre de 2021 de <http://gisweb.massey.ac.nz/topic/webreferencesites/whatisgis/edinburghwhatisgis/www.geo.ed.ac.uk/home/research/whatisgis.htm>

Vázquez-Jiménez, R., Manrique-González, I. y Ramos-Bernal, R. (2014). *SIG aplicado a la evaluación de vulnerabilidad en la ciudad de Tixtla, Guerrero, México*. VI Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica. Universidad de Alicante: Asociación Española de Geografía, Grupo de Tecnologías de la Información Geográfica. 153-162. Recuperado el 05 de marzo de 2022 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5431158>

Villón, M. (2012). *HidroEsta, software para cálculos hidrológicos y estadísticos aplicados a la Hidrología*. Revista Digital: Matemática, Educación e Internet. 12(2). <https://doi.org/10.18845/rdmei.v12i2.1678>

WMO (2012). *Glosario Hidrológico Mundial*. World Meteorological Organization. Recuperado el 15 de marzo de 2020 de www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf