



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Análisis del Riesgo por Inundación en la  
Ciudad de Villahermosa, Tabasco.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS

P r e s e n t a

Laura Olivia Rosique de la Cruz

J U R A D O

Director de Tesis: Dra. Rosa María Prol Ledesma  
Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez  
Dr. Raúl Aguirre Gómez  
Dra. Lilia Reyes Chávez  
Dr. Oscar Escolero Fuentes



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





Of. No. PCT/ELFM/474/10

Asunto: Aprobación de tema, asesor de tesis  
y asignación de jurado para examen de grado.

**LAURA OLIVIA ROSIQUE DE LA CRUZ**

Estudiante de Maestría

Presente,

El Comité Académico del Posgrado, reunido en sesión ordinaria el 6 de mayo del año en curso, aprobó el tema de tesis titulado "Análisis del riesgo por inundación en la Ciudad de Villahermosa, Tabasco". Así mismo ratificó a la Dra. Rosa María Prol Ledesma como asesora del mismo y designó a los siguientes investigadores como jurado para su examen de grado.

Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez

Presidente

Dr. Raúl Aguirre Gómez

Vocal

Dra. Rosa María Prol Ledesma

Secretario

Dra. Lilia Reyes Chávez

Suplente

Dr. Oscar Escolero Fuentes

Suplente

Sin otro particular por el momento, reciba un saludo cordial.

Atentamente,

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

Ciudad Universitaria, a 18 de mayo de 2010.

**COORDINADORA DEL PROGRAMA**

**DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ**

ELFM'lmf



# AGRADECIMIENTOS



A DIOS

*Que me ha permitido cumplir una meta más. Gracias por que hoy tengo poco que pedirte y tanto que agradecerte.*

A la UNAM

*Por haberme abierto sus puertas y permitirme continuar en la búsqueda de mi superación profesional.*

AL POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

*Por permitirme ser parte de su comunidad y apoyarme a lo largo de mis estudios de maestría.*

A la DRA. ROSA MA. PROL LEDESMA

*Por haber aceptado ser mi tutora, por su ayuda incondicional, por su confianza, por los conocimientos y las orientaciones brindadas, así como el tiempo dedicado a la realización de esta tesis, gracias.*

A la DRA. LILIA REYES CHAVEZ

*Por el apoyo y la asesoría brindada a lo largo de este trabajo, sin los cuales no hubiera sido posible concluir satisfactoriamente este proyecto.*

AL DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ

*Gracias por el apoyo a lo largo de la realización de este trabajo, el cual siguió de cerca desde sus inicios.*

AL DR. OSCAR ESCOLERO

*Por su apoyo, consejos y sugerencias que me permitieron concluir de manera satisfactoria.*

AL DR. MARIO ARTURO ORTIZ PÉREZ

*Porque aún sin conocerme decidió tomarse el tiempo de escucharme y conocer mi trabajo.*

## DEDICATORIA



### *A mis padres:*

Ramon y Rocío, sabiendo que no existirá una forma de agradecer toda una vida de sacrificios y esfuerzos, quiero dedicarles este trabajo y decirles que el objetivo logrado también es suyo porque la fuerza que me ayudo a conseguirlo fue su apoyo. Por lo que soy y por todo el tiempo que les robe pensando en mí, gracias. LOS AMO.

### *A mis hermanas:*

Mis princesas: Yazmín, Yanet y Rocío, por ser mis mejores amigas, mis cómplices y confidentes, porque el amor que nos une no sabe de distancias ni de enojos, porque en sus brazos puedo llorar de alegría y llorar de tristeza, pues se que siempre saldre consolada. Gracias por confiar en mí y alentarme continuamente para alcanzar mis metas. LAS AMO LELAS!!!

### *A mis compañeros y amigos:*

Porque han sido parte importante en mi vida, por que han celebrado conmigo cada uno de mis logros, por que han estado a mi lado aun cuando las cosas no van bien, Gracias.

Ana Belem, Ana Lucía, Dona, Horte, Azy, Anaíd, Vírý, Ruth, Lilia, Alejandra, Elsa, Brenda Pamela, Susí, Mara, Maguí, Magalí, Líz, Guillermo, Jorge, Jaime, Juan, Francisco, Roberto, Javier, Jorge Jaime, Alejandro, Ricardo y a todos aquellos que me han brindado su sincera amistad.

### *A mi amigo y novio:*

Ángel Emmanuel Zúñiga Tovar, por su incondicional ayuda para concluir este trabajo, por darme ánimos y alentarme a continuar, por las desveladas juntos, por aguantar mis histerias, gracias.

Pero sobre todo gracias porque estás siempre para comprenderme, para reír conmigo, para llorar conmigo. Por todos los secretos que hemos compartido y por todas las aventuras que hemos vivido, porque le das alegría a mi vida, gracias. TE AMO

## INDICE

### INTRODUCCIÓN

#### 1. Marco Teórico

1.1.Desastre	1
1.2.Riesgo	2
1.3.Amenaza	3
1.4.Vulnerabilidad	5

#### 2. Análisis de la amenaza

2.1.Inundación	7
2.1.1.Clasificación de las inundaciones	7
2.2.Área de Estudio	8
2.3.Estadística hidrológica	11
2.4.Análisis de frecuencia de gastos máximos anuales para la Ciudad de Villahermosa, Tabasco	11
2.4.1.Pruebas de homogeneidad	13
2.4.2.Estadísticos muestrales	17
2.4.3.Prueba de independencia de eventos	17
2.4.4.Periodo de retorno y probabilidad de no excedencia	18
2.4.5.Distribuciones de probabilidad para el análisis de máximos	20
2.5.Determinación de áreas con probabilidad de desbordamiento	26
2.5.1.Mapa de peligro por inundación para un periodo de retorno de 50 años	35
2.5.2.Mapa de peligro por inundación para un periodo de retorno de 100 años	36
2.5.3.Mapa de peligro por inundación para un periodo de retorno de 500 años	37
2.6.Cálculo de la probabilidad de peligro	38

#### 3. Diagnóstico de vulnerabilidad

3.1.Configuración Espacial de la Ciudad de Villahermosa	41
3.2. Desarrollo Urbano de la Ciudad de Villahermosa	43

3.3. Diagnostico de la vulnerabilidad para la Ciudad de Villahermosa	51
3.3.1. Ponderación de resultados	57
3.3.2. Mapa de Vulnerabilidad para la Ciudad de Villahermosa	59
<b>4. Análisis del riesgo</b>	
4.1. Cálculo del riesgo	60
4.2. Probabilidad de peligro	61
4.3. Diagnostico de vulnerabilidad	62
4.4. Cálculo del riesgo para los periodos de retorno T =50, T =100 y T =500 años	63
4.4.1. Mapa de riesgo por inundación para la Ciudad de Villahermosa T50 años	71
4.4.2. Mapa de riesgo por inundación para la Ciudad de Villahermosa T100 años	72
4.4.3. Mapa de riesgo por inundación para la Ciudad de Villahermosa T500 años	73
4.5. Impacto social y en viviendas	74
<b>5. Conclusiones y recomendaciones</b>	78
<b>6. Bibliografía</b>	87
<b>7. Apéndice</b>	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

❖ 2.1 Rompidos hidrológicos en el estado de Tabasco	10
❖ 2.2 Sección transversal 14+651.30 del río Grijalva	31
❖ 2.3 Curvas para determinar el tirante normal (Ven Te Chow)	32
❖ 3.1 Croquis planta de San Juan Bautista, capital del estado de Tabasco	44
❖ 3.2 Área urbana de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1946	45
❖ 3.3 Área urbana de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1964	46
❖ 3.4 Área urbana de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1972	47
❖ 3.5 Mapa de coberturas de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1980	50
❖ 3.6 Mapa de coberturas de la Ciudad de Villahermosa para el año de 2009	51

## ÍNDICE DE TABLAS

❖ 2.1 Localización y datos disponibles de las estaciones hidrométricas en la zona de estudio	12
❖ 2.2 Gastos máximos anuales registrados por las estaciones hidrométricas seleccionadas para el análisis	12
❖ 2.3 Valores obtenidos para la prueba estadística de Helmert	14
❖ 2.4 Valores obtenidos para la prueba estadística t de Student	14
❖ 2.5 Valores obtenidos para la prueba estadística de Cramer	15
❖ 2.6 Valores obtenidos para los estadísticos muestrales	17
❖ 2.7 Prueba de independencia de Anderson	18
❖ 2.8 Valores de los gastos máximos anuales, ordenados de mayor a menor	19
❖ 2.9 Distribución de probabilidad para los valores de la estación González (30062)	22
❖ 2.10 Cálculo de probabilidad de eventos para diferentes periodos de retorno T para los datos de la estación González	23

❖ 2.11 Distribución de probabilidad para los valores de la estación Las Gaviotas II (30083)	24
❖ 2.12 Cálculo de probabilidad de eventos para diferentes periodos de retorno T para los datos de la estación Las Gaviotas II (30083)	25
❖ 2.13 Error estándar de ajuste EE para las estaciones González y Las Gaviotas II	25
❖ 2.14 Elementos geométricos de las secciones transversales más comunes	29
❖ 2.15 Número de eventos que exceden las intensidades 1, 2 y 3 para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años	39
❖ 2.16 Número de eventos con intensidades 1, 2, 3 y 4 para un periodo de proyección de 500 años	39
❖ 2.17 Probabilidad de peligro estimada para un periodo de 50, 100 y 500 años	40
❖ 3.1 Extensión del área urbana para el periodo 1980-2009	48
❖ 3.2 Área y número de viviendas por distrito	53
❖ 3.3 Densidad poblacional y de vivienda por distrito	55
❖ 3.4 Valores mínimos y máximos correspondientes a Densidad poblacional	57
❖ 3.5 Ponderación de los valores de Densidad poblacional	57
❖ 3.6 Valores mínimos y máximos correspondientes a Densidad de viviendas	57
❖ 3.7 Ponderación de los valores de Densidad de vivienda	57
❖ 3.8 Resultado de la ponderación de los valores de densidad poblacional y de viviendas	58
❖ 3.9 Ponderación de nivel de ingresos	59
❖ 3.10 Ponderación del grado de vulnerabilidad	59
❖ 3.11 Vulnerabilidad para la Ciudad de Villahermosa	60
❖ 4.1 Ponderación del nivel de riesgo para un periodo de 50, 100 y 500 años	61
❖ 4.2 Probabilidad de peligro para 50, 100 y 500 años	62
❖ 4.3 Vulnerabilidad para el factor población de la Ciudad de Villahermosa	63
❖ 4.4 Cálculo del riesgo para un periodo de retorno de 50 años	64

❖ 4.5 Cálculo del riesgo para un periodo de retorno de 100 años	66
❖ 4.6 Cálculo del riesgo para un periodo de retorno de 500 años	64
❖ 4.7 Afectación ante el impacto de un evento para un periodo de retorno de 50 años	74
❖ 4.8 Afectación ante el impacto de un evento para un periodo de retorno de 100 años	75
❖ 4.9 Afectación ante el impacto de un evento para un periodo de retorno de 500 años	76

## INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Villahermosa, Tabasco, se localiza en el sureste de México entre los ríos Grijalva, Carrizal y Viejo Mezcalapa, a una altura promedio de 10 metros sobre el nivel del mar. Posee además de los ríos que la rodean lagunas interiores y una precipitación promedio anual de 2,168mm. Y es su ubicación geográfica y las características topográficas, aunado a factores de tipo antrópicos los que han propiciado que la ciudad se haya visto afectada por inundaciones en diferentes periodos desde su fundación.

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Analizar e integrar la información hidrológica de los ríos que circundan la Ciudad de Villahermosa con la finalidad de generar la cartografía de peligros por inundación correspondiente a tres tiempos de retorno (50, 100 y 500 años).
- Diagnosticar la vulnerabilidad teniendo como objetivo identificar y ubicar la población más vulnerable ante el impacto de un fenómeno hidrometeorológico como las inundaciones.
- Elaborar un mapa de riesgos para la zona de estudio

A fin de cumplir estos objetivos, la primera parte del trabajo considera el análisis de frecuencias de gastos máximos anuales para la ciudad de Villahermosa. Se determinan las áreas con probabilidad de desbordamiento para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años. Y se elabora la cartografía de peligro para cada periodo de retorno.

Posteriormente se analiza la configuración espacio-temporal de la Ciudad de Villahermosa y se realiza un diagnostico de vulnerabilidad, en el cual se toma en cuenta la densidad poblacional y de viviendas, así como el nivel de ingresos, para finalmente representar el grado de vulnerabilidad para cada periodo de retorno.

Finalmente se obtiene el nivel de riesgo por inundación para la Ciudad de Villahermosa, el cual es resultado de la combinación de tres variables: peligro, vulnerabilidad y exposición.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

### 1.1 DESASTRE

Según Lavell (2004) se puede definir desastre como una situación o proceso social que se desencadena como resultado de la manifestación de un fenómeno de origen natural, socio-natural o antrópico que, al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en una población y en su estructura productiva e infraestructura, causa alteraciones intensas, graves y extendidas en las condiciones normales de funcionamiento del país, región, zona, o comunidad afectada, las cuales no pueden ser enfrentadas o resueltas de manera autónoma utilizando los recursos disponibles a la unidad social directamente afectada.

Cuando hablamos de desastre se asocia en la mente de la mayoría de las personas un evento de gran magnitud, importantes pérdidas de vida, bienes y producción, con la necesidad de movilización de grandes cantidades de ayuda humanitaria y con sustanciales costos para el proceso de rehabilitación o reconstrucción de las sociedades afectadas, además de la impresión de la población de que todo fue resultado de la naturaleza.

Los desastres han ocurrido desde los orígenes de la humanidad, estos provocan pérdidas cada año por valor de miles de millones de euros asociadas a daños en asentamientos y en actividades económicas y, lo más grave, cientos de muertes. Afectan la Tierra en su totalidad. No hay espacio geográfico terrestre que pueda considerarse benigno y manso, indulgente y servidor de las necesidades del hombre, es decir, *terra mitis* en palabras de Plinio el Viejo, Olcinas (2002).

El siglo XX ha sido testigo de un mayor número de desastres, pareciera que la incidencia y el impacto de estos ha aumentado de manera relativamente rápida. Al respecto Fernández M. (1996) comenta que las estadísticas muestran que, efectivamente, el número de desastres se han incrementado, no así las manifestaciones de los fenómenos físico-naturales. Sin embargo, lo que realmente a ocurrido no es el aumento en el número de eventos naturales extremos sino más bien un incremento de la exposición de la población humana a estos fenómenos.

En América Latina el análisis y estudio de los desastres comenzó a tener auge durante los años 70, a partir de una serie de desastres de grandes proporciones como: el terremoto de 1970 en el Perú, el terremoto de Managua en 1972 y el de Guatemala en 1976 y el Huracán Fifi en Honduras en 1974, por mencionar algunos. La problemática de los desastres se estableció como un tema de importancia y su estudio se fortaleció con la declaración del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales, entre 1990 y 1999, Lavell A. (2004). En México, a raíz de los sismos del 19 y 20 de septiembre de 1985 se organizó el Sistema Nacional de Protección Civil.

Hasta hace poco tiempo se tenía la idea de que los desastres son producto de extremos de la naturaleza, hoy en día se ha llegado a reconocer que los desastres son el resultado de una mezcla compleja de riesgos naturales y acciones humanas inadecuadas y que son, a la vez, representaciones del déficit en el desarrollo. Un desastre es la consumación de un proceso, representa la materialización de condiciones de riesgo existente.

## **1.2 RIESGO**

Algunos autores definen el riesgo como “las consecuencias perversas de la modernidad” Mancilla (2000); lo consideran el resultado de una sociedad que busca justificar en el proceso de modernidad el hecho de una inadecuada relación entre el ser humano y el medio físico natural, y en este proceso entre lo social y lo natural se producen riesgos que escapan cada vez más del control de las instituciones que conducen y toman decisiones sobre el rumbo de la sociedad, permitiendo de esta manera la ocurrencia de eventos que ponen en peligro la vida y la propia estabilidad y desarrollo de la sociedad.

El riesgo de desastre, hace referencia a la probabilidad de que se manifieste una amenaza determinada sobre un sistema con un grado de vulnerabilidad dado, entendiéndose por vulnerable que tan propenso de sufrir daño es dicho sistema. Por lo tanto el riesgo depende de dos factores fundamentales: el peligro o amenaza y la vulnerabilidad (Lavell, 2004). El grado de riesgo dependerá entonces de la intensidad probable de la amenaza y los niveles

de vulnerabilidad existentes. Debido a esto, podemos decir que el riesgo es una condición dinámica y cambiante, por lo que no es posible predecir con certeza sus alcances.

En resumen la existencia de un riesgo implica la presencia de un agresor potencial al cual se le denomina amenaza, mientras que la propensión o susceptibilidad del sistema a sufrir su impacto se identifica como vulnerabilidad. Al respecto Lavell (2006) comenta que debido a ello es frecuente que se expresa el riesgo como:

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

Mancilla (2000) considera que además de la amenaza y el grado de vulnerabilidad se deben tomar en cuenta las acciones de prevención – mitigación que se hayan implementado, expresando el riesgo como:

$$\text{Riesgo} = (\text{Amenaza} * \text{Prevención})(\text{Vulnerabilidad} * \text{Mitigación})$$

Para el CENAPRED (2006) en términos de probabilidad, el riesgo es resultado de la interrelación de tres factores: el peligro, la vulnerabilidad y la exposición. En donde el peligro es la probabilidad de que se presente en un espacio determinado un evento de una cierta intensidad que sea capaz de afectarlo; el grado de exposición está determinado por la cantidad de personas y bienes ubicados en el espacio propenso a ser dañado y se le puede asociar un valor monetario y finalmente la vulnerabilidad se refiere a la susceptibilidad del espacio para ser dañado y se expresa como una probabilidad de daño.

$$\text{Riesgo} = (\text{Peligro} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Exposición})$$

### **1.3 AMENAZA**

Allan Lavell (1996) fue el primero en incorporar una visión global sobre la concepción del riesgo al desagregar las amenazas en cuatro diferentes tipos según su fuente de origen, Lavell consideró como naturales las amenazas que derivan de la misma dinámica de la

naturaleza tales como: sismos, huracanes, erupciones volcánicas, etc. Aquellas amenazas que son resultado de acciones humanas (explosiones, incendios, accidentes tecnológicos y otros) las denominó antrópicas. Y consideró como amenazas socio-naturales las que son resultado de prácticas humanas con el ambiente natural.

Las amenazas naturales se clasifican en 4 tipos:

- Geotectónicas: sismos, actividad volcánica, desplazamientos horizontales y verticales de tierra, y los tsunamis o maremotos.
- Geomórficas: deslizamientos y avalanchas, hundimientos y la erosión terrestre y costera.
- Meteorológicas: huracanes, tormentas tropicales, tornados, trombas, granizadas, sequías, tormentas de nieve, oleajes fuertes e incendios espontáneos.
- Meteorológicas: inundaciones, desbordamientos, anegamientos y agotamiento de acuíferos.

Las amenazas socio-naturales que se producen o se acentúan por algún tipo de intervención humana sobre la naturaleza se pueden dividir en:

- Inundaciones
- Deslizamientos
- Hundimientos
- Sequías
- Erosión costera
- Incendios rurales
- Agotamiento de acuíferos

Amenazas antrópicas-contaminantes son aquellas basadas y construidas sobre elementos de la naturaleza, pero que no tienen una expresión en la naturaleza misma. Son resultado de agentes que alteran y/o transforman los elementos de la tierra: aire, agua y tierra. Entre ellas podemos mencionar:

- Derrames
- Dispersiones o emisiones de sustancias químico-tóxicas
- Procesos de eliminación o depósito de desechos líquidos y sólidos de origen doméstico

Las amenazas antrópico-tecnológicas tienen su origen en la esfera social, debido a que la falta de previsión, controles y normatividad en los procesos de producción y distribución industrial pueden ser las causas de futuros desastres.

En México, el Sistema Nacional de Protección Civil para clasificar los riesgos se basa en el tipo de fenómeno perturbador que lo produce, de esta manera distingue fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, químicos, sanitarios y socio-organizativos.

Para el estudio de los peligros o amenazas, es importante encontrar los parámetros cuantitativos que puedan ser medidos. Con esta finalidad, se pueden distinguir dos medidas: la magnitud y la intensidad. La magnitud se refiere a la medida del tamaño del fenómeno, de su potencial destructivo y de la energía que libera. La intensidad es una medida de fuerza con la que se manifiesta el fenómeno en un determinado sitio. Cada fenómeno tiene una sola magnitud pero las intensidades son tantas como los sitios en donde interesa determinar su efecto (CENAPRED, 2006).

En cuanto al segundo elemento en la ecuación del riesgo: la vulnerabilidad, Wilches Chau (1993) la define como la incapacidad que presenta una población para absorber, mediante el autoajuste, los efectos de un determinado cambio en su medio ambiente, o sea su "inflexibilidad" o incapacidad para adaptarse a ese cambio.

#### **1.4 VULNERABILIDAD**

La vulnerabilidad es resultado de la interacción de los elementos que componen una comunidad, lo que la convierte en un sistema dinámico. A la interacción antes mencionada Chau le da el nombre de vulnerabilidad global, la cual es resultado de la existencia de vulnerabilidad física, económica, política, social, técnica, ideológica, cultural, educativa, ecológica e institucional, las cuales crean las condiciones en un sistema de interacción compleja para su existencia;

La vulnerabilidad es la condición en virtud de la cual una población está o queda expuesta o en peligro de resultar afectada por un fenómeno de origen humano o natural, llamado amenaza. Y se refiere también a la capacidad de dicha población para recuperarse. Es una expresión del desequilibrio, entre la estructura social y el medio físico-constructivo y natural que lo rodea. La vulnerabilidad, entonces, nunca puede tener un valor absoluto, sino que depende siempre del tipo e intensidad de la amenaza.

## **CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LA AMENAZA**

### **2.1 INUNDACIÓN**

Según Olcina et al. (2002) se tiene una inundación cuando un determinado curso de agua rebasa su cauce debido a un aporte cuantioso de agua desde fuera del sistema, de manera que el flujo que se genera y evacua con relativa rapidez supera la capacidad de evacuación del cauce, por lo que el agua pasa a ocupar tierras que por lo general no se encuentran sumergidas.

Para Smith (1996), físicamente, corresponde a un nivel elevado de un flujo de agua que sobrepasa el límite natural o artificial de un río. Las inundaciones también se presentan cuando los niveles de agua de lagos, lagunas, acuíferos, etc. superar un cierto valor crítico e invaden las tierras adyacentes, o cuando el mar supera su nivel medio y anega zonas costeras.

Las causas de las inundaciones son diversas, pueden ocurrir por lluvias extremas, por desbordamiento de ríos, ascenso del nivel medio del mar, por la rotura de bordos, diques y presas, o bien, por las descargas de agua de los embalses (Schanze et al. 2006) y su magnitud dependerá de factores tales como la profundidad y la velocidad del agua, la duración de la inundación así como el arrastre de sólidos, sedimentos y productos químicos (Smith, 1996)

#### **2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS INUNDACIONES**

Las inundaciones se pueden clasificar de acuerdo con el tiempo de respuesta de la cuenca en: inundaciones lentas o rápidas (CENAPRED, 2004). La respuesta hidrológica dependerá de las características fisiográficas de la cuenca. En cuencas con respuesta hidrológica lenta se generan avenidas en un tiempo del orden de varias horas o días. Mientras que en cuencas con respuesta hidrológica rápida se generan inundaciones en un tiempo que va desde unos cuantos minutos hasta un par de horas.

Inundación lenta se produce cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una cuenca, generando un incremento paulatino de los caudales de los ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento; se produce entonces el desbordamiento y la inundación de las áreas planas aledañas al cauce principal. Las crecientes así producidas son inicialmente lentas y tienen una gran duración.

Una inundación súbita es el resultado de lluvias repentinas e intensas. El área de la cuenca aportante es reducida y tiene fuertes pendientes. El aumento de los caudales se produce cuando la

cuenca recibe la acción de las tormentas durante determinadas épocas del año, por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración. Estas inundaciones son generalmente las que causan mayores estragos en la población por ser intempestivas.

Las inundaciones también pueden clasificarse de acuerdo a su origen en: inundaciones fluviales, pluviales y costeras (CENAPRED, 2004).

Las inundaciones pluviales son resultado de la acumulación de agua precipitada (lluvia, granizo, nieve, principalmente) sobre una determinada zona. Se presentan cuando el suelo se satura o en zonas urbanas con insuficiencia o carencia de drenaje, el agua acumulada puede permanecer horas o días.

Las inundaciones fluviales son resultado de un escurrimiento superficial superior a la capacidad de conducción del cauce del río, lo cual provoca que este sea superado y el agua excedente se desborde sobre zonas cercanas.

Las inundaciones en zonas costeras incluidos los estuarios y deltas, implican la inundación de la tierra por agua salobre o salina. Generalmente se producen cuando el nivel medio del mar asciende debido a la marea y se agrava cuando los niveles de la marea alta se ven incrementados por encima de lo normal por las condiciones de marea de tormenta, o cuando los grandes flujos de inundación de agua dulce desembocan en un estuario.

## **2.2 ÁREA DE ESTUDIO**

La Ciudad de Villahermosa, Tabasco, localizada al sureste de México. Se ubica a los 92°56' longitud W y 17°59' latitud N. Forma parte de las subcuencas: río Grijalva, río Carrizal y río Mezcalapa los cuales pertenecen a la cuenca Grijalva-Villahermosa, que forma parte de la región hidrológica número 30 Grijalva-Usumacinta.

Villahermosa es una llanura fluvial y de pantanos. Los suelos en que se asienta la ciudad son de textura arcillosa: Gleysoles, Cambisoles y Acrisoles, predominando los suelos aluviales resultado de material acarreado y depositado por los ríos que desembocan en el Golfo de México (Pérez, 2006). Su altura varía entre 4 y 10 metros sobre el nivel del mar y su precipitación promedio anual es de 2,168.0 mm.

De acuerdo con informes tanto de la Comisión Nacional del Agua (Conagua), como del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el río Grijalva se origina en la sierra de Cuchumatanes en Guatemala, atraviesa la depresión central de Chiapas antes de llegar a Tabasco y en el límite entre estos estados cambia su nombre por Mezcalapa, el río Mezcalapa aguas abajo se divide en los ríos Samaria y Carrizal, este último recorre la ciudad de Villahermosa de oeste a norte; al sureste de la ciudad de oeste a este se encuentra el río Viejo Mezcalapa y en la confluencia de los ríos Viejo Mezcalapa, Pichucalco y de la Sierra a la altura del sitio conocido como la Majahua el río Grijalva recupera su nombre con un caudal aumentado principalmente por las aguas del río la Sierra para unirse finalmente al noreste de Villahermosa con el río Carrizal. Y son estas características geográficas aunadas a factores de tipo antrópico los que han propiciado que la ciudad se haya visto afectada por inundaciones en diferentes periodos desde su fundación.

La historia de las inundaciones en el estado de Tabasco y en particular en la Ciudad de Villahermosa no es un suceso actual, pues según datos recabados del Diccionario de Tabasco y memorias de cronistas españoles se tienen registros de inundaciones desde el siglo XVI, los registros históricos dan cuenta de las inundaciones en 1868, 1879, 1889, 1912, 1927, 1932, 1944, 1952, 1959, 1963, 1967, 1969, 1973, 1980, 1990, 1999 y la más reciente ocurrida en 2007. Sin embargo, mención especial merece el curso y caudal del río Grijalva que históricamente se ha caracterizado por su gran dinamismo, lo que ha generado la formación de “rompidos” o divagaciones que han afectado el sistema ecológico de la región. Los rompidos se generan por las intensas lluvias y la saturación de agua del suelo en combinación con las grandes avenidas provenientes de la cuenca alta. Las propias condiciones hidrológicas de la ciudad de Villahermosa se alteraron sustancialmente desde el rompido de 1675 cuando por razones económico-militares se cegó el cauce del río Mezcalapa desviándose las aguas hacia el brazo que pasaba por la antigua San Juan Bautista, hoy la Ciudad de Villahermosa. La formación de rompidos por la inestabilidad que caracteriza la parte baja del sistema Grijalva-Mezcalapa, ha sido recurrente a lo largo de la historia de Tabasco, afectándose particularmente a la ciudad de Villahermosa por sus peculiares condiciones, urbanas, topográficas e hidrológicas. El Instituto de



### **2.3 ESTADÍSTICA HIDROLÓGICA**

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos, por lo cual los modelos son un medio de representación simplificada.

Chow (1964) señala que los modelos hidrológicos son formulaciones matemáticas aplicadas para simular fenómenos hidrológicos naturales, los cuales son considerados como un proceso o sistema. Cualquier fenómeno que esté sometido a cambios, particularmente con respecto al tiempo, es llamado un proceso. Como prácticamente todos los fenómenos hidrológicos varían con el tiempo pueden ser llamados procesos hidrológicos.

Si la probabilidad de ocurrencia de las variables envueltas en tal proceso es ignorada y el modelo se considera que sigue una ley de certeza pero ninguna ley de probabilidad, el proceso y el modelo son descritos como determinísticos. De otra forma, si la probabilidad de ocurrencia de la variable es tomada en consideración y el concepto de probabilidad es introducido en el modelo, el proceso y el modelo son descritos como estocásticos o probabilísticos. El tratamiento probabilístico de la información hidrológica se describe con todo detalle en el Apéndice I.

### **2.4 ANÁLISIS DE FRECUENCIA DE GASTOS MÁXIMOS ANUALES PARA LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA, TABASCO.**

La zona de estudio se ubica en la cuenca Grijalva-Villahermosa, la cual es considerada la de mayor extensión e importancia en el estado de Tabasco y se divide en 18 subcuencas, específicamente Villahermosa forma parte de las subcuencas río Grijalva, río Mezcalapa y río Carrizal. Dentro de las subcuencas antes mencionadas se localizaron un total de 12 estaciones hidrométricas: El Dorado, El Marín, El Muelle, Gaviotas, González, La Pigua, Las Gaviota II, Las Mercedes, Pueblo Nuevo, Puente Majahua, Reforma y Samaria. De las cuales solo 5: González, Las Gaviotas II, Pueblo Nuevo, Reforma y Samaria, cumplen con un mínimo de 30 años de registro continuo, el cual se considera el periodo mínimo recomendado para llevar a cabo un análisis estadístico hidrológico.

**Tabla 2.1 Localización y datos disponibles de las estaciones hidrométricas en la zona de estudio.**

<b>Clave</b>	<b>Periodo registrados de datos</b>	<b>Nombre de la estación</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
30002	1944-1947	GAVIOTAS	17.966667	-92.91667
30003	1944-1947	LA PIGUA	18.020833	-92.90972
30004	1944-1949	EL DORADO	17.9	-93.35
30005	1944-1986,1993-2004,2006	SAMARIA	17.979167	-93.29167
30012	1948-1954	EL MARIN	17.983333	-93.25
30016	1947-2006	PUEBLO NUEVO	17.854167	-92.87917
30019	1948-2006	BOCA DEL CERRO	17.433333	-91.48333
30031	1950-1987,1992-1999,2003,2006	PUYACATENGO	17.566667	-92.9375
30032	1950-1989,1992-1995,1997-2006	TEAPA	17.566667	-92.96667
30051	1954-1973,1975-1985	REFORMA	17.958333	-93.18333
30055	1955-1986	MACUSPANA	17.766667	-92.6
30062	1957-1999,2001,2003-2006	GONZÁLEZ	17.975	-93
30065	1959-1960	LAS MERCEDES	17.866667	-93.18333
30083	1962-1999,2001-2005	LAS GAVIOTAS II	17.966667	-92.91667
30088	1952-1985,1987-1994,2001-2002,2006	SAN PEDRO TABASCO	17.791667	-91.15833
30093	1964-1999,2002-2006	TAPIJULAPA	17.466667	-92.81667
30111	1965-1999,2001-2006	OXOLOTAN	17.383333	-92.75
30118	1961-1962	PUENTE MAJAHUA	17.95	-92.91667
30198	1997-1999,2003-2005	EL PORVENIR	18.043611	-92.81472

Para el análisis se consideraron las estaciones: Gonzalez (30062) y Las Gaviotas II (30083), las cuales se encargan de registrar el gasto hidrométrico de los ríos que fluyen por la ciudad. La estación 30062 se ubica sobre el río Carrizal y la 30083 en el río Grijalva.

En la tabla 2.2 se muestra el registro de gastos máximos anuales de cada una de las estaciones seleccionadas.

**Tabla 2.2 Gastos máximo anuales registrados por las estaciones hidrométricas seleccionadas para el análisis.**

<i>Orden(m)</i>	<b>González</b>		<b>Las Gaviotas II</b>	
	<b>Año</b>	$Q(m^3 / s)$	<b>Año</b>	$Q(m^3 / s)$
1	1958	808	1963	1178
2	1959	890	1964	678.67
3	1960	719	1965	950.8
4	1961	851	1966	717.22
5	1962	938	1967	958.56
6	1963	966.9	1968	662.2
7	1964	905.5	1969	772
8	1965	990	1970	731.1
9	1966	676.08	1971	639.7
10	1967	1038.93	1972	613
11	1968	789.13	1973	870.77
12	1969	972	1974	1297

13	1970	970	1975	1032
14	1971	461.2	1976	1110
15	1972	725.1	1977	722.7
16	1973	985.5	1978	868
17	1974	610	1979	1009
18	1975	476.6	1980	1149
19	1976	473.8	1981	870.77
20	1977	601	1982	918
21	1978	493.5	1983	811.176
22	1979	524.5	1984	1037
23	1980	649.12	1985	628
24	1981	379	1986	670.5
25	1982	305	1987	874.1
26	1983	285.62		
27	1984	368		
28	1985	377.1		
29	1986	456.66		
30	1987	345.23		
31	1988	542.28		

#### 2.4.1 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD

El siguiente paso propuesto en la secuencia del análisis de frecuencia de gastos máximos anuales consiste en verificar la homogeneidad de la muestra, para ello hacemos uso de las pruebas estadísticas de Helmert, t de Student y Cramer. Los resultados se muestran a continuación:

Prueba estadística de Helmert - como resultado de aplicar dicha prueba se obtiene que la serie correspondiente a la estación González tiene una diferencia grande entre el número de secuencias  $S = 27$  y el número de cambios  $C = 3$ , de hecho el número de secuencias es mayor al número de cambios lo cual puede tener su origen en algún tipo de variación en la media, lo anterior nos lleva a concluir de esta prueba que la serie de la estación González no es homogénea, mientras que la serie correspondiente a Las Gaviotas II tiene homogeneidad.

**Tabla 2.3 Valores obtenidos para la prueba estadística de Helmert.**

<b>González (30062)</b>	
Tamaño de la muestra	$n = 31$
Media de la muestra	$\bar{x} = 663.67$
Número de secuencias	$S = 27$
Número de cambios	$C = 3$
Tolerancia	$\sqrt{n-1} = 5.5$
La serie es homogénea si	$ (S - C)  \leq \sqrt{n-1} \Rightarrow  24  \leq 5.5$ $\therefore$ La serie no es homogénea

<b>Las Gaviotas II (30083)</b>	
Tamaño de la muestra	$n = 25$
Media de la muestra	$\bar{x} = 870.77$
Número de secuencias	$S = 12$
Número de cambios	$C = 12$
Tolerancia	$\sqrt{n-1} = 4.9$
La serie es homogénea si	$ (S - C)  \leq \sqrt{n-1} \Rightarrow  0  \leq 4.9$ $\therefore$ La serie es homogénea

**Tabla 2.4 Valores obtenidos para la prueba estadística t de Student.**

<b>González (30062)</b>	
Tamaño de la muestra	$n = 31$
Media de la muestra	$\bar{x} = 663.67$
Media de la submuestra (1)	846.72
Desviación estándar de la submuestra (1)	153.57
Media de la submuestra (2)	459.16
Desviación estándar de la submuestra (2)	113.44
Estadístico de prueba	$t_d = 7.73$
La serie es homogénea si	$ t_d  < t_{v,1-\alpha/2} \Rightarrow  7.73  < 2.045$ $\therefore$ La serie no es homogénea

<b>Las Gaviotas II (30083)</b>	
Tamaño de la muestra	$n = 25$
Media de la muestra	$\bar{x} = 870.77$
Media de la submuestra (1)	839.08
Desviación estándar de la submuestra (1)	219.75
Media de la submuestra (2)	889.02
Desviación estándar de la submuestra (2)	166.28
Estadístico de prueba	$t_d = 0.61$

La serie es homogénea si	$ t_d  < t_{v,1-\alpha/2} \Rightarrow  0.61  < 2.069$ $\therefore$ La serie es homogénea
--------------------------	---

La prueba t de Student es una prueba estadística que se recomienda aplicar cuando al considerar una serie  $Q_i^j$  para  $i = 1, 2, \dots, n_j$  del sitio  $j$ , es posible dividirla en dos conjuntos del mismo tamaño.

En el caso de la estación González (30062), se obtiene para un nivel de significancia de 0.05 y  $\nu = 29$  grados de libertad, un valor de  $t_{29,97.5} = 2.045$  y como el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que  $t_{v,1-\alpha/2}$ , la serie es no homogénea. Lo cual confirma los resultados obtenidos en la prueba estadística de Helmert. Sin embargo, el resultado debe ser tomado con reserva pues los valores de las submuestras no son iguales. Para la estación Las Gaviotas II,  $\nu = 23$  grados de libertad y  $\alpha = 0.05$  se obtiene un valor de  $t_{23,97.5} = 2.069$ . De manera que el valor absoluto de  $t_d$  es menor que  $t_{v,1-\alpha/2}$ , por lo que la serie es homogénea.

**Tabla 2.5 Valores obtenidos para la prueba estadística de Cramer.**

<b>Gonzalez (30062)</b>	
Tamaño de la muestra	$n = 31$
Media de la muestra	$\bar{x} = 663.67$
Desviación estándar de la muestra	$S = 241.10$
Tamaño del bloque (1)	20
Media del bloque (1)	550.06
Desviación estándar del bloque (1)	216.02
Estadístico de prueba	$t_{60} = 4.43$
El bloque (1) es homogéneo si	$ t_{60}  < t_{v,1-\alpha/2} \Rightarrow  4.43  < 2.1449$ $\therefore$ El bloque (1) no es homogéneo
Tamaño del bloque (2)	11
Media del bloque (2)	423.25
Desviación estándar del bloque (2)	116.76
Estadístico de prueba	$t_{30} = 5.11$
El bloque (2) es homogéneo si	$ t_{30}  < t_{v,1-\alpha/2} \Rightarrow  5.11  < 2.1449$ $\therefore$ El bloque (2) no es homogéneo

<b>Las Gaviotas II (30083)</b>	
Tamaño de la muestra	$n = 25$
Media de la muestra	$\bar{x} = 870.77$
Desviación estándar de la muestra	$S = 191.20$
Tamaño del bloque (1)	16
Media del bloque (1)	905.06
Desviación estándar del bloque (1)	193.81
Estadístico de prueba	$t_{60} = 1.18$
El bloque (1) es homogéneo si	$ t_{60}  < t_{\nu, 1-\alpha/2} \Rightarrow  1.18  < 2.1449$ $\therefore$ El bloque (1) es homogéneo
Tamaño del bloque (2)	9
Media del bloque (2)	885.28
Desviación estándar del bloque (2)	168.48
Estadístico de prueba	$t_{30} = 0.27$
El bloque (2) es homogéneo si	$ t_{30}  < t_{\nu, 1-\alpha/2} \Rightarrow  0.27  < 2.1449$ $\therefore$ El bloque (2) es homogéneo

La muestra fue dividida en dos bloques, el primero de ellos con el 60% de los últimos valores, y el segundo con el 30% de los últimos valores. Y se compara el valor de la media del registro total con cada una de las medias de los bloques.

Para la estación González (30062), con un nivel de significancia de 0.05 y  $\nu = 29$  grados de libertad, se obtiene un valor de  $t_{29, 97.5} = 2.045$ . Al comparar el valor absoluto del primer bloque  $t_{60}$  con  $t_{29, 97.5}$ , se obtuvo que el bloque (1) no es homogéneo, situación que se repite con el bloque (2), por lo que se puede concluir que la serie es no homogénea. Resultados que concuerdan con los obtenidos en las pruebas estadística de Helmert y t de Student.

En el caso de la estación Las Gaviotas II,  $\nu = 23$  grados de libertad y  $\alpha = 0.05$  se obtiene un valor de  $t_{23, 97.5} = 2.069$ . El valor absoluto de  $t_{60}$  y el valor absoluto de  $t_{30}$  es menor que  $t_{23, 97.5}$ , por lo que la serie es homogénea.

Del análisis de homogeneidad realizado, se concluye que la serie correspondiente a la estación González es no homogénea mientras la serie de la estación Gaviotas II es homogénea. Sin embargo, a pesar de la no homogeneidad de la estación González, la serie correspondiente puede ser trabajada con funciones de distribución univariadas.

#### 2.4.2 ESTADÍSTICOS MUESTRALES

Los momentos muestrales también conocidos como estadísticos muestrales: media, varianza, coeficiente de asimetría, coeficiente de curtosis y desviación estándar para cada estación se muestran en la tabla 2.6.

En este análisis se emplearon estadísticos no sesgados, debido a que las muestras son pequeñas.

**Tabla 2.6 Valores obtenidos para los estadísticos muestrales.**

	(30062)	(30083)
$\bar{x}$	663.67	870.77
$S$	241.10	191.20
$g$	0.05	0.49
$k$	1.84	2.70
$CV$	0.36	0.22

#### 2.4.3 PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE EVENTOS

De acuerdo con la secuencia propuesta para llevar a cabo el análisis de frecuencia es necesario aplicar la prueba de independencia de Anderson, dicha prueba verifica que la muestra esta compuesta por variables aleatorias.

A partir de esta prueba se obtiene el correlograma para cada estación: Gonzales (30062) y Las Gaviotas II (30083), los cuales se muestran a continuación y en ellos se observa que todos los puntos están dentro de los límites de confianza, por lo que podemos decir que ambas series son independientes.

**Tabla 2.7 Prueba de independencia de Anderson.**

<b>(30062)</b>			
$k$	Límite Inferior	$r_k$	Límite Superior
1	-0.38516	0.66255	0.3185
2	-0.39212	0.5771	0.32315
3	-0.39944	0.62269	0.32802
4	-0.40719	0.53964	0.33311
5	-0.41538	0.46832	0.33846
6	-0.42408	0.37003	0.34408
7	-0.43333	0.25004	0.34999
8	-0.44318	0.17711	0.35623
9	-0.45372	0.050439	0.36281
10	-0.46502	0.043621	0.36978

<b>(30083)</b>			
$k$	Límite Inferior	$r_k$	Límite Superior
1	-0.44318	0.12878	0.34999
2	-0.45372	0.13689	0.35623
3	-0.46502	-0.25637	0.36281
4	-0.47717	0.081485	0.36978
5	-0.49029	-0.08277	0.37717
6	-0.50452	-0.041898	0.38503
7	-0.52	-0.1261	0.3934
8	-0.44318	-0.14139	0.40235

#### 2.4.4 PERIODO DE RETORNO $T$ Y PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA

En este paso, antes de aplicarle a la series la ley empírica de Weibull es necesario ordenarla de mayor a menor. Posteriormente se le asigna un periodo de retorno  $T$  empleando la distribución empírica de Weibull:

$$T = \frac{n+1}{m}$$

Donde:  $n$  tamaño de la muestra analizada en años

$m$  número de orden del registro

Una vez determinado el periodo de retorno se obtiene la probabilidad de no excedencia, la cual está determinada por la expresión:

$$P(X \leq x) = 1 - \frac{1}{T}$$

La muestra de gastos máximos anuales ordenada de mayor a menor para las estaciones González (30062) y Las Gaviotas II (30083) se muestran en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8 Valores de los gastos máximos anuales, ordenados de mayor a menor.**

<b>(30062)</b>			
<i>Orden(m)</i>	<i>Q(m<sup>3</sup> / s)</i>	<i>T(años)</i>	<i>P(1 - 1/T)</i>
1	1038.9	32	0.96875
2	990	16	0.9375
3	985.5	10.667	0.90625
4	972	8	0.875
5	970	6.4	0.84375
6	966.9	5.3333	0.8125
7	938	4.5714	0.78125
8	905.5	4	0.75
9	890	3.5556	0.71875
10	851	3.2	0.6875
11	808	2.9091	0.65625
12	789.13	2.6667	0.625
13	725.1	2.4615	0.59375
14	719	2.2857	0.5625
15	676.08	2.1333	0.53125
16	649.12	2	0.5
17	610	1.8824	0.46875
18	601	1.7778	0.4375
19	542.28	1.6842	0.40625
20	524.5	1.6	0.375
21	493.5	1.5238	0.34375
22	476.6	1.4545	0.3125
23	473.8	1.3913	0.28125
24	461.2	1.3333	0.25
25	456.66	1.28	0.21875
26	379	1.2308	0.1875
27	377.1	1.1852	0.15625
28	368	1.1429	0.125
29	345.23	1.1034	0.09375
30	305	1.0667	0.0625
31	285.62	1.0323	0.03125

<b>(30083)</b>			
<i>Orden(m)</i>	$Q(m^3 / s)$	$T(años)$	$P(1-1/T)$
1	1297	26	0.96154
2	1178	13	0.92308
3	1149	8.6667	0.88462
4	1110	6.5	0.84615
5	1037	5.2	0.80769
6	1032	4.3333	0.76923
7	1009	3.7143	0.73077
8	958.56	3.25	0.69231
9	950.8	2.8889	0.65385
10	918	2.6	0.61538
11	874.1	2.3636	0.57692
12	870.77	2.1667	0.53846
13	870.77	2	0.5
14	868	1.8571	0.46154
15	811.18	1.7333	0.42308
16	772	1.625	0.38462
17	731.1	1.5294	0.34615
18	722.7	1.4444	0.30769
19	717.22	1.3684	0.26923
20	678.67	1.3	0.23077
21	670.5	1.2381	0.19231
22	662.2	1.1818	0.15385
23	639.7	1.1304	0.11538
24	628	1.0833	0.076923
25	613	1.04	0.038462

#### 2.4.5 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD PARA EL ANÁLISIS DE MÁXIMOS

A cada una de las series (González y Las Gaviotas II) se le ajustaron las diferentes distribuciones de probabilidad para el análisis de máximo. Las distribuciones empleadas fueron: Normal, Log Normal con 2 parámetros, Log Normal con 3 parámetros, Gamma con 2 parámetros, Gamma con 3 parámetros, Log Pearson tipo III, Gumbel, General de Valores Extremos y Exponencial. En cada caso se obtuvo el error estándar de ajuste  $EE$ . El objetivo del análisis del error estándar de ajuste es seleccionar aquel que proporcione el mínimo error.

En este paso se aplicará la distribución General de Valores Extremos por momentos-L para ajustar la serie de datos correspondiente a la estación González. Esta distribución como se verá más adelante es la que proporciona el mínimo  $EE$ .

Distribución General de Valores Extremos por momentos-L.

Para poder obtener los estimadores por momentos-L se deben calcular los primeros 3 momentos de probabilidad pesada de la muestra.

$$\hat{M}_{(0)} = 663.66$$

$$\hat{M}_{(1)} = 402.14$$

$$\hat{M}_{(2)} = 294.83$$

Posteriormente se obtienen los estimadores empleando las ecuaciones siguientes:

$$E = \left\{ \frac{2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)}}{3\hat{M}_{(2)} - \hat{M}_{(0)}} \right\} - \left[ \frac{\ln(2)}{\ln(3)} \right] = 0.033$$

$$\hat{\beta} = 7.859E + 2.9554E^2 = 0.262$$

$$A = \Gamma(1 + \hat{\beta}) = 0.904$$

$$B = 1 - 2^{-\hat{\beta}} = 0.166$$

$$C = (2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)})\hat{\beta} = 36.862$$

$$D = (A - 1) / \hat{\beta} = -0.366$$

$$\hat{\alpha} = \frac{C}{AB} = 245.43$$

$$\hat{\nu} = \hat{M}_{(0)} + D\hat{\alpha} = 573.77$$

Como es menor que cero se tiene una distribución tipo II (Fréchet).

Una vez obtenidos los estimadores se deben estimar los eventos por momentos-L de la siguiente forma:

$$\hat{Q}_T = \hat{\nu} + \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} \{1 - [-\ln(1 - 1/T)]^{\hat{\beta}}\}$$

**Tabla 2.9 Distribución de Probabilidad para los valores de la estación González (30062).**

$i$	$T(\text{años})$	$P(1-1/T)$	$Q(m^3/s)$	$\hat{Q}_T(m^3/s)$
1	32	0.96875	1038.9	1531
2	16	0.9375	990	1353.6
3	10.667	0.90625	985.5	1200.2
4	8	0.875	972	1057.73
5	6.4	0.84375	970	1021.73
6	5.3333	0.8125	966.9	989.97
7	4.5714	0.78125	938	961.2
8	4	0.75	905.5	934.64
9	3.5556	0.71875	890	909.77
10	3.2	0.6875	851	886.2
11	2.9091	0.65625	808	863.65
12	2.6667	0.625	789.13	841.89
13	2.4615	0.59375	725.1	750.75
14	2.2857	0.5625	719	730.06
15	2.1333	0.53125	676.08	679.7
16	2	0.5	649.12	659.54
17	1.8824	0.46875	610	639.46
18	1.7778	0.4375	601	619.34
19	1.6842	0.40625	542.28	599.07
20	1.6	0.375	524.5	578.51
21	1.5238	0.34375	493.5	557.52
22	1.4545	0.3125	476.6	535.93
23	1.3913	0.28125	473.8	513.54
24	1.3333	0.25	461.2	490.07
25	1.28	0.21875	456.66	465.19
26	1.2308	0.1875	379	438.39
27	1.1852	0.15625	377.1	408.95
28	1.1429	0.125	368	375.69
29	1.1034	0.09375	345.23	336.5
30	1.0667	0.0625	305	286.84
31	1.0323	0.03125	285.62	213.16
			<b>EE</b>	<b>51.808</b>

Una vez obtenida la distribución de mejor ajuste del registro, que en el caso de la estación González (30062) corresponde a la distribución General de Valores Extremos, es posible calcular los eventos  $\hat{Q}_T(m^3/s)$  para los periodos de retorno  $T = 2,5,10,20,50,100,1000,5000$  y  $T = 10000$  años.

**Tabla 2.10 Cálculo de probabilidad de eventos para diferentes periodos de retorno T para los datos de la estación González (30062).**

$T(\text{años})$	$P(1-1/T)$	$\hat{Q}_T(m^3/s)$
2	0.5	659.54
5	0.8	978.15
10	0.9	1100.99
20	0.95	1326.3
50	0.98	2125.5
100	0.99	2329.7
500	0.998	2426.4
1000	0.999	2556.9
5000	0.9998	2609.6
10000	0.9999	2726.3

Para el caso de la estación Las Gaviotas II, la distribución que proporcionó el mínimo error de ajuste fue la distribución General de Valores Extremos por momentos-L. A continuación se muestran los estimadores y los eventos calculados.

$$\hat{M}_{(0)} = 870.77$$

$$\hat{M}_{(1)} = 490.65$$

$$\hat{M}_{(2)} = 347.83$$

$$E = \left\{ \frac{2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)}}{3\hat{M}_{(2)} - \hat{M}_{(0)}} \right\} - \left[ \frac{\ln(2)}{\ln(3)} \right] = 0.009$$

$$\hat{\beta} = 7.859E + 2.9554E^2 = 0.071$$

$$A = \Gamma(1 + \hat{\beta}) = 0.963$$

$$B = 1 - 2^{-\hat{\beta}} = 0.048$$

$$C = (2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)})\hat{\beta} = 7.849$$

$$D = (A - 1) / \hat{\beta} = -0.511$$

$$\hat{\alpha} = \frac{C}{AB} = 169.59$$

$$\hat{\nu} = \hat{M}_{(0)} + D\hat{\alpha} = 784.07$$

Estimación de eventos por momentos-L

$$\hat{Q}_T = \hat{\nu} + \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} \{1 - [-\ln(1 - 1/T)]^{\hat{\beta}}\}$$

**Tabla 2.11 Distribución de Probabilidad para los valores de la estación Las Gaviotas II (30083).**

<i>i</i>	<i>T(años)</i>	<i>P(1-1/T)</i>	<i>Q(m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>Q̂<sub>T</sub>(m<sup>3</sup>/s)</i>
1	26	0.96154	1297	1674.7
2	13	0.92308	1178	1426.1
3	8.6667	0.88462	1149	1314.8
4	6.5	0.84615	1110	1269.1
5	5.2	0.80769	1037	1132
6	4.3333	0.76923	1032	1100.5
7	3.7143	0.73077	1009	1097.83
8	3.25	0.69231	958.56	1047.85
9	2.8889	0.65385	950.8	1004.91
10	2.6	0.61538	918	983.52
11	2.3636	0.57692	874.1	901.32
12	2.1667	0.53846	870.77	895.43
13	2	0.5	870.77	895.43
14	1.8571	0.46154	868	897.3
15	1.7333	0.42308	811.18	839.47
16	1.625	0.38462	772	791.78
17	1.5294	0.34615	731.1	774.03
18	1.4444	0.30769	722.7	756.03
19	1.3684	0.26923	717.22	737.55
20	1.3	0.23077	678.67	718.27
21	1.2381	0.19231	670.5	707.76
22	1.1818	0.15385	662.2	695.35
23	1.1304	0.11538	639.7	689.88
24	1.0833	0.076923	628	678.87
25	1.04	0.038462	613	635.12
			<b>EE</b>	<b>27.769</b>

**Tabla 2.12 Cálculo de probabilidad de eventos para diferentes periodos de retorno T para los datos de la estación Las Gaviotas II (30083).**

$T(\text{años})$	$P(1-1/T)$	$\hat{Q}_T (m^3 / s)$
2	0.5	895.43
5	0.8	1125.4
10	0.9	1236.8
20	0.95	1698.2
50	0.98	2018
100	0.99	2149.6
500	0.998	2336.1
1000	0.999	2409.9
5000	0.9998	2451.2
10000	0.9999	2490.5

La tabla 2.13 muestra los errores estándar de ajuste obtenidos para cada estación al aplicarle diferentes distribuciones de probabilidad, en la tabla 2.13 se observa que para ambas estaciones el mínimo *EE* se obtuvo con la distribución General de Valores Extremos por momentos-L.

**Tabla 2.13 Error estándar de ajuste *EE*, para las estaciones González (30062) y Las Gaviotas II (30083).**

		(30062)	(30083)
<b>Distribución</b>	<b>Estimadores</b>	<b>EE</b>	<b>EE</b>
Normal	M y MV	54.79	39.05
	M-L	52.72	37.23
Log Normal con 2 parámetros	M y MV	76.79	34.34
Log Normal con 3 parámetros	M	55.93	32.76
	MV	60.15	35.95
Exponencial con parámetro $\beta$	M y MV	110.25	71.16
	M	98.99	54.29
Exponencial con parámetro $\beta$ y $x_0$	MV	119.50	62.28
	M	65.00	31.98
	MV	64.26	36.02
Gamma con 2 parámetros	M-L	64.00	28.77
	M	55.92	32.24
Gamma con 3 parámetros	MV	65.57	31.15

	PP	67.77	27.78
Log Pearson tipo III	M (Directo)	75.59	28.56
	M (Indirecto)	63.25	27.36
Valores Extremos I (Gumbel)	M	75.52	35.55
	MV	73.66	33.18
	M-L	73.63	29.09
General de Valores Extremos	M	70.42	38.02
	MV	78.95	40.39
	M-L	51.80	27.76

Al obtener la magnitud de un evento  $\hat{Q}_T$ , para diferentes periodos de retorno  $T$ , se concluye el análisis de frecuencia de gastos máximos anuales.

## 2.5 DETERMINACIÓN DE ÁREAS CON PROBABILIDAD DE DESBORDAMIENTO

A partir de los resultados obtenidos para el análisis de frecuencias de gastos máximos anuales, se procedió a determinar las características topográficas del cauce de los ríos Grijalva, Carrizal y Mezcalapa. Con el objetivo de ubicar áreas con probabilidad de inundación para la Ciudad de Villahermosa, Tabasco.

El análisis topográfico consideró el empleo de imágenes de satélite Landsat ETM + y el modelo digital de elevación HydroSHED obtenido a partir de la misión SRTM, así como trabajo de campo. Se identificaron un total de 75 puntos en los ríos Grijalva, Carrizal y Mezcalapa, donde existe cambio de pendiente, meandros, estrechamientos del cauce, etc., lo cual sugiere una mayor probabilidad de desbordamiento.

La propensión de desbordamiento en cada sección fue determinada tal y como se describe a continuación.

Para cualquier flujo, el gasto  $Q$  en una sección del canal se expresa por

$$Q = AV$$

Donde ( $A$ ) es el área hidráulica o área ocupada por el flujo en una sección del río y ( $V$ ) la velocidad del flujo.

De la ecuación de Manning

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

( $n$ ) Es el coeficiente de Manning, ( $S$ ) la pendiente y ( $R_h$ ) es el radio hidráulico.

Por lo que el gasto se puede expresar de la siguiente manera

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Donde el gasto depende de la geometría de las secciones transversales.

Chow define una sección transversal como la sección perpendicular a la dirección de flujo. En el caso de los ríos dichas secciones son generalmente irregulares, varían desde aproximadamente una parábola hasta aproximadamente un trapecio.

Cada sección tiene elementos geométricos que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad del flujo. Entre estos elementos se encuentra: el área hidráulica ( $A$ ), el perímetro mojado ( $P$ ), el radio hidráulico ( $R_h$ ), el ancho de la superficie libre ( $T$ ), el tirante ( $y$ ), el tirante medio ( $Y$ ) y el talud ( $z$ ) o el diámetro.

El perímetro mojado ( $P$ ), el cual es la longitud de la línea de contacto entre el agua y las paredes de la sección.

( $R_h$ ) es el radio hidráulico, el cual resulta del cociente del área hidráulica y el perímetro mojado ( $P$ )

$$R_h = \frac{A}{P}$$

El ancho superficial ( $T$ ), es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.

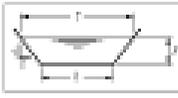
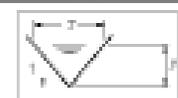
( $y$ ) es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección hasta la superficie libre.

( $Y$ ) es la relación entre el área hidráulica ( $A$ ) y el ancho de la superficie libre ( $T$ ), o  $Y = \frac{A}{T}$

El talud es la inclinación de las paredes de la sección y corresponde a la distancia ( $z$ ) recorrida horizontalmente desde un punto sobre la pared, para ascender la unidad de longitud a otro punto sobre la misma.

La tabla 2.14 presenta los elementos geométricos de las secciones más comunes, expresados en términos del tirante.

**Tabla 2.14 Elementos geométricos de las secciones transversales más comunes.**

SECCION	AREA $A$	PERIMETRO MOJADO $P$	RADIO HIDRAULICO $R$	ANCHO SUPERFICIAL $T$	TIRANTE HIDRAULICO $d$	FACTOR HIDRAULICO $Z$
 RECTANGULO	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$	$y$	$by^{\frac{5}{3}}$
 TRAPEZOIDO	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$	$\frac{(b+zy)y}{b+2zy}$	$\frac{[(b+zy)y]^{\frac{5}{3}}}{\sqrt{b+2zy}}$
 TRIANGULO	$\frac{T^2}{4}$	$T\sqrt{1+z^2}$	$\frac{T^2}{2\sqrt{1+z^2}}$	$T$	$\frac{T}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2} T^{\frac{5}{3}}$
 CIRCULO	$\frac{1}{8}(\theta - \text{sen}\theta)D^2$	$\frac{1}{2}\theta D$	$\frac{1}{4}\left(\frac{1 - \text{sen}\theta}{\theta}\right)D$	$\left(\frac{\text{sen}\theta}{2}\right)D, \hat{b}$ $2\sqrt{y(D-y)}$	$\frac{1}{8}\left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen}\frac{\theta}{2}}\right)D$	$\frac{\sqrt{2}(\theta - \text{sen}\theta)^{\frac{5}{3}} \hat{b}^{\frac{2}{3}} D^{\frac{5}{2}}}{32\left(\frac{\text{sen}\theta}{2}\right)^{\frac{5}{3}}}$
 PARABOLA	$\frac{2}{3}Ty$	$T + \frac{8}{3}\frac{y^2}{T}$	$\frac{2T^2y}{3T^2+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$	$\frac{2}{3y}$	$\frac{2}{9}\sqrt{6}Ty^{1.5}$
 RECTANGULO CON ESQUINAS SEMICIRCULO	$\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2+(b+2r)y$	$(\pi-2)r+b+2y$	$\frac{\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2+(b+2r)y}{(\pi-2)r+b+2y}$	$b+2r$	$\frac{\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2}{b+2r}+y$	$\frac{\left[\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2+(b+2r)y\right]^{1.5}}{\sqrt{b+2r}}$
 TRAPEZOIDO CON FONDO SEMICIRCULO	$\frac{T^2}{4z} - \frac{r^2}{z}(1-z\cot^{-1}z)$	$\frac{T}{z}\sqrt{1+z^2} - \frac{2r}{z}(1-z\cot^{-1}z)$	$\frac{A}{P}$	$2\left[z(y-r)+r\sqrt{1+z^2}\right]$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{\frac{A}{T}}$

A partir del perfil topográfico proporcionado por la Comisión Nacional del Agua del estado de Tabasco, el cual corresponde a los ríos Grijalva y Carrizal, se observó que las secciones de los ríos antes mencionados tienen forma irregular. Sin embargo, estas pueden ser representadas por un trapecio.

Para determinar las secciones que desbordan a fin de ubicar las áreas con probabilidad de inundación fue necesario obtener la diferencia entre la altura de cada sección y el tirante correspondiente, considerando periodos de retorno de 50, 100 y 500 años. Si el tirante calculado para cada periodo de retorno es mayor que la altura de la sección, la sección desborda. El alcance del desborde será igual a la diferencia entre la altura y el tirante.

Considerando que se conoce  $b$ ,  $k$ ,  $n$ ,  $S$  y  $Q$  es la magnitud de un evento  $\hat{Q}_T$ , para diferentes periodos de retorno  $T$ , se debe determinar el tirante.

$$\hat{Q} = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \rightarrow AR_h^{2/3} = \frac{\hat{Q}n}{S^{1/2}}$$

El valor  $AR_h^{2/3}$  generalmente crece al aumentar el tirante. Para un valor del gasto y una rugosidad y pendiente dadas hay un valor de  $AR_h^{2/3}$  que corresponde al tirante normal.

En este caso se puede hacer uso del gráfico de Ven Te Chow (1994) el cual a partir de los valores de  $\frac{AR_h^{2/3}}{b^{8/3}}$  proporciona el valor de  $\frac{y}{b}$ , para cada talud.

Para el cálculo de  $\frac{AR_h^{2/3}}{b^{8/3}}$  basta con recordar que  $AR_h^{2/3} = \frac{\hat{Q}n}{S^{1/2}}$

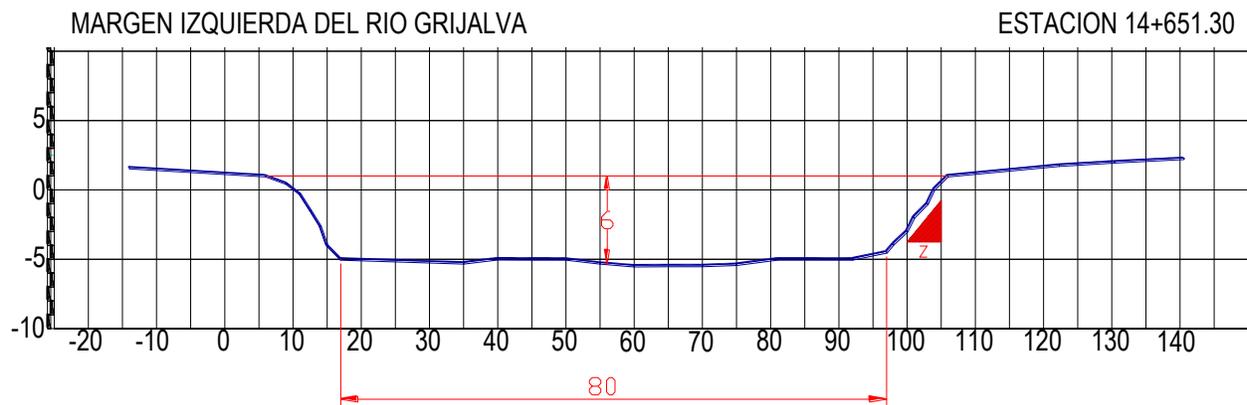
Otra solución resulta de emplear las ecuaciones de las secciones trapeciales para obtener los parámetros geométricos.

$$\text{De manera que } Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} = \frac{A}{n} \left( \frac{A}{P} \right)^{2/3} S^{1/2} = (b + zy)y \frac{\left[ \frac{(b + zy)y}{b + 2\sqrt{1 + z^2}y} \right]^{2/3}}{n} S^{1/2}$$

Por lo que se tiene una ecuación con una incógnita la cual puede ser resuelta por el método de tanteo, dando valores al tirante ( $y$ ).

A continuación se determina el tirante de la sección 14+651.30 que corresponde al río Carrizal. Los tirantes de las secciones restantes se obtuvieron de manera similar.

**Figura 2.2 Sección transversal 14+651.30 del río Grijalva.**



De la sección 14 + 651.30 se obtienen los siguientes datos:

$$b = 80m$$

$$S = 0.0004$$

$$z = 1$$

$$n = 0.030$$

Para un periodo de retorno de 50 años

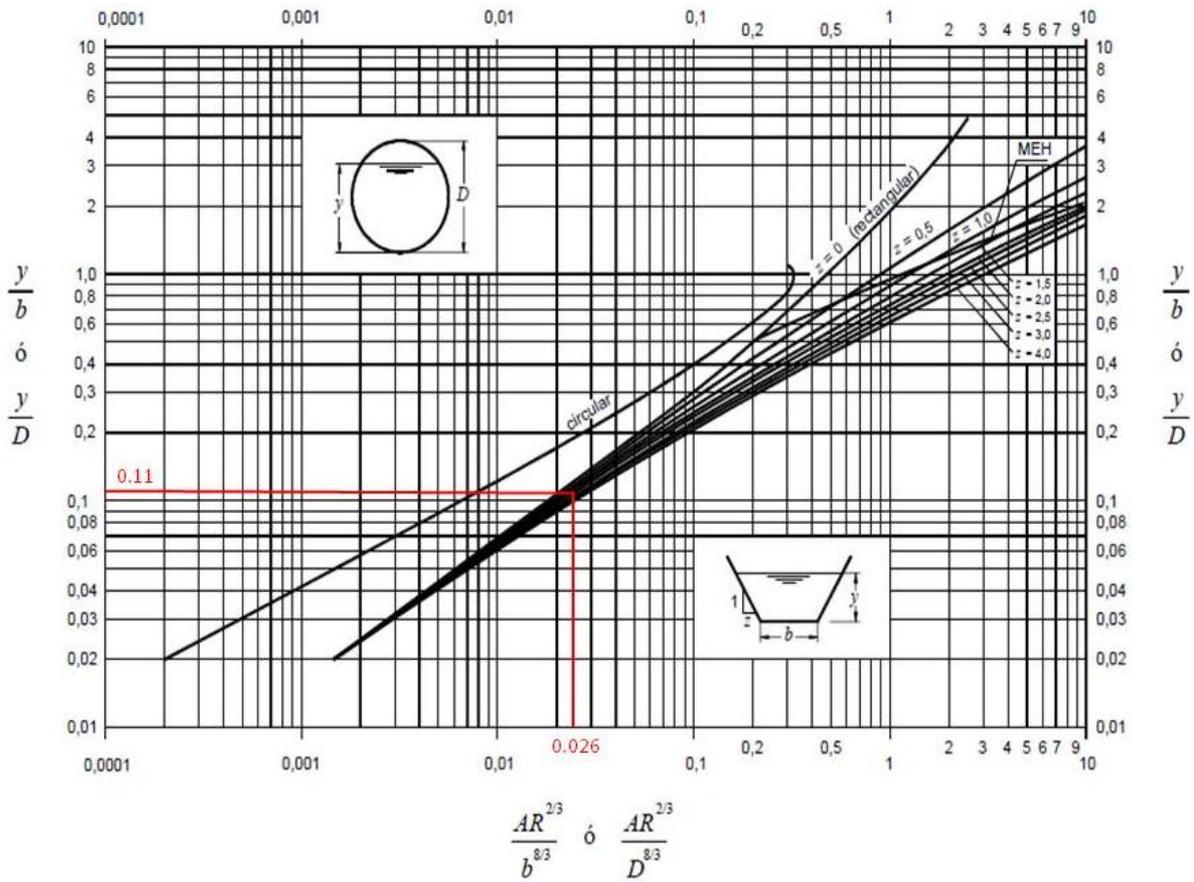
$$\hat{Q}_T = 2125.5m^3 / s$$

$$AR_h^{2/3} = \frac{\hat{Q}n}{S^{1/2}} = 3098.70$$

$$\frac{AR_h^{2/3}}{b^{8/3}} = 0.026$$

Del gráfico de Ven Te Chow, el cual a partir de los valores de  $\frac{AR_h^{2/3}}{b^{8/3}}$  proporciona el valor de  $\frac{y}{b}$

Figura 2.3 Curvas para determinar el tirante normal (Ven Te Chow).



$$\frac{y}{b} = 0.11$$

$$y = 8.9m$$

El tirante obtenido a partir del gráfico de Ven Te Chow nos da una primera aproximación del valor real del tirante. De manera que para obtener una solución más exacta nos basamos en el resultado obtenido y empleamos el método de tanteo.

$$\hat{Q}_T = (b + zy)y \frac{\left[ \frac{(b + zy)y}{b + 2\sqrt{1 + z^2}y} \right]^{2/3}}{n} S^{1/2}$$

Para  $\hat{Q}_T = 2125.5m^3 / s$

$$y = 9m$$

La altura de la sección 14 + 651.30 es  $h = 6m$ . Por lo tanto, la distancia del tirante es igual a  $3m$ .

Se obtuvo del análisis de las 25 secciones ubicadas en el río Carrizal para un periodo de retorno de 50 años, una distancia promedio de  $3m$  de tirante. Para las 25 secciones del río Grijalva, la distancia promedio es de  $3m$  para 50 años.

Para periodo de retorno de 100 años, la distancia del tirante es de  $4m$  para ambos ríos. Y para 500 años  $5m$ .

Para los tres periodos considerados la distancia promedio de los tirantes es igual para los ríos Grijalva y Carrizal.

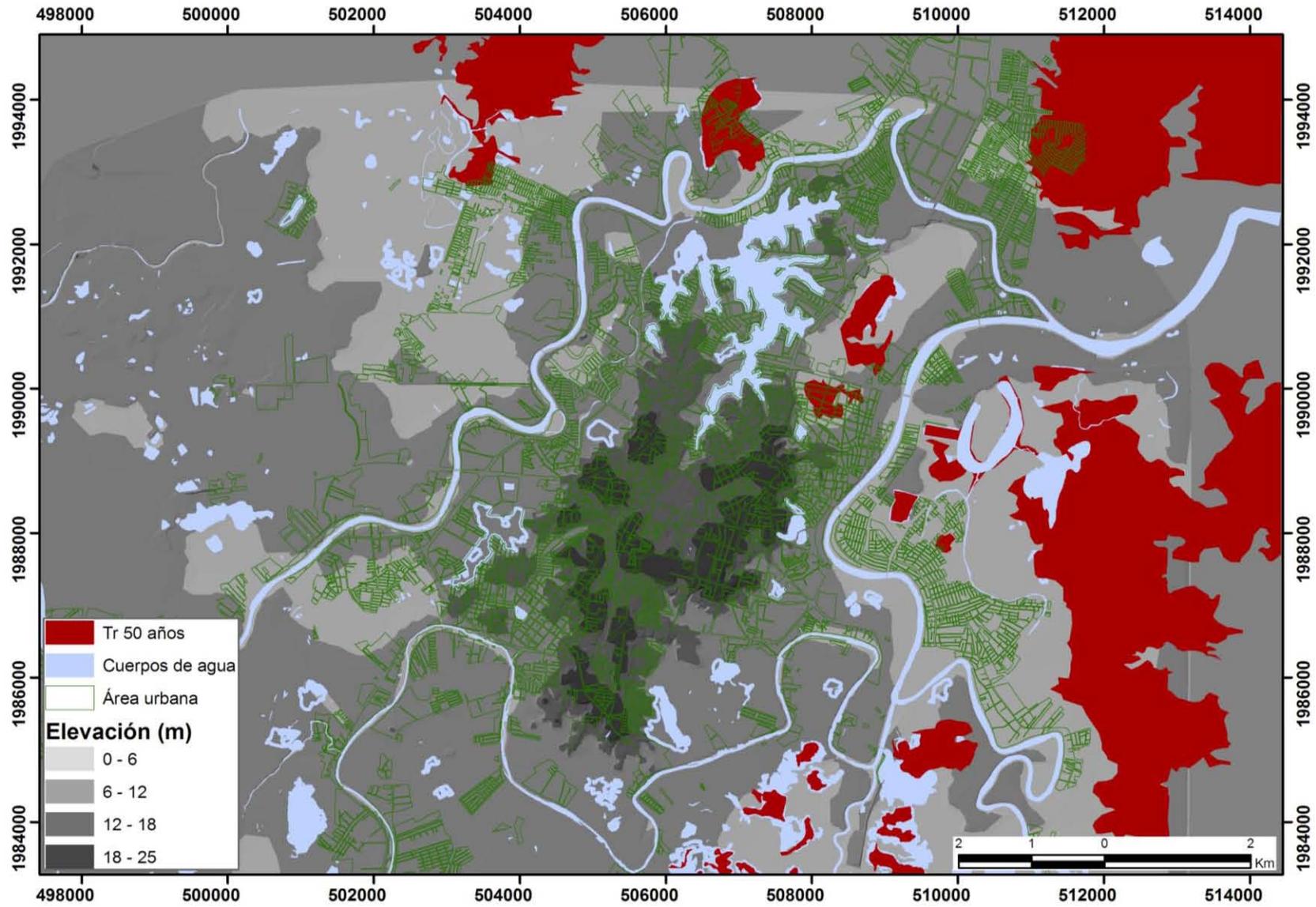
El río Viejo Mezcalapa, el cual se ubica al sur de la Ciudad de Villahermosa, no cuenta con ningún tipo de trabajo relacionado con la topografía del río. Sin embargo, no existen reportes de afectaciones causadas por este río en los registros de inundaciones. Por lo que el análisis para determinar áreas con posibilidad de inundación cercanas a dicho río se hizo tomando en cuenta solo las características físicas del terreno.

Los tirantes calculados para cada periodo de retorno fueron empleados para determinar las áreas con probabilidad de inundarse, para ello se consideró además de los tirantes, la topografía del lugar, ya que la distancia alcanzada por los tirantes, es decir, el alcance del desbordamiento de cada uno de los ríos no es igual a ambos lados de los ríos, ni a lo largo de estos.

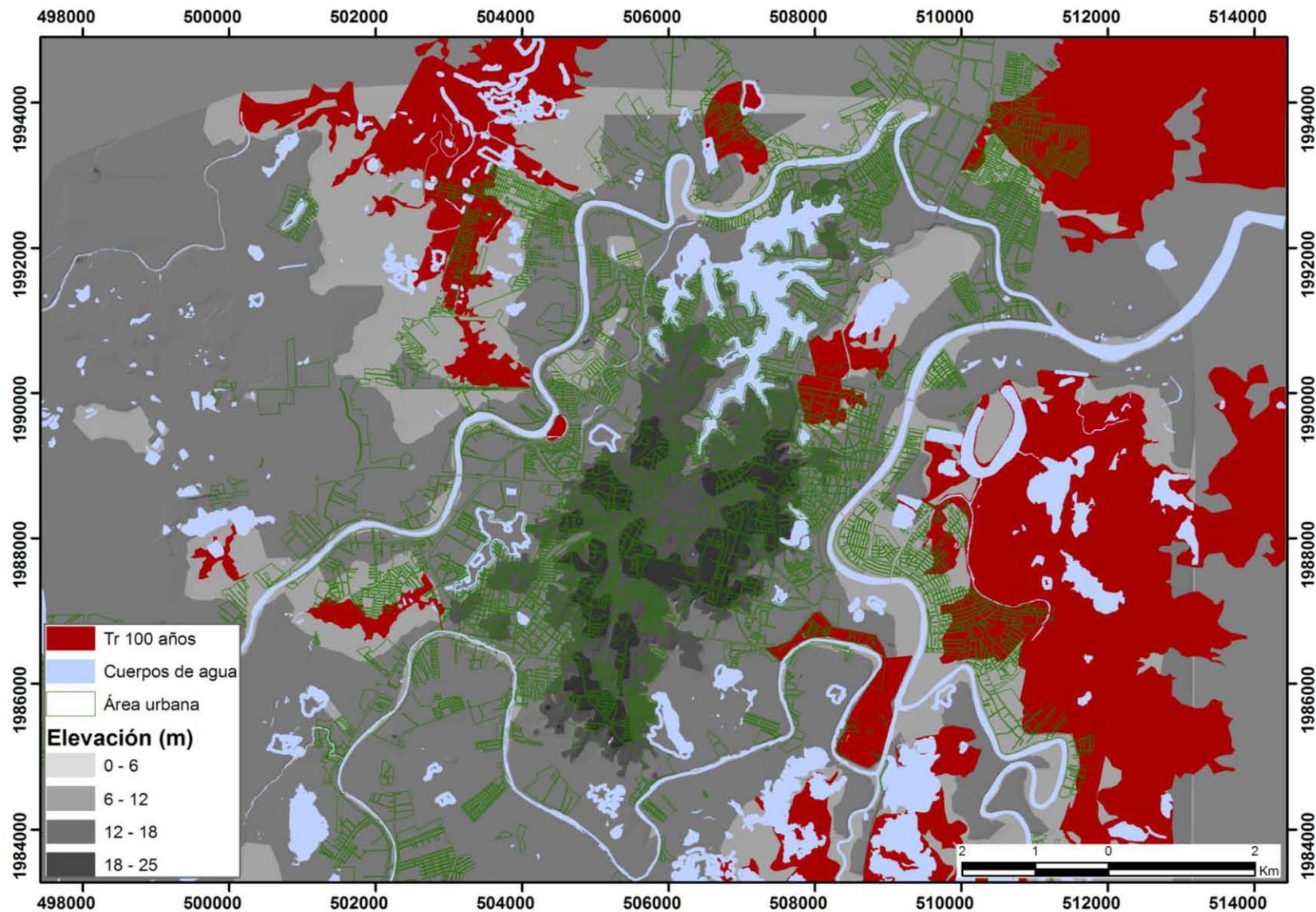
De manera que tomando en cuenta la topografía se estableció que para un periodo de retorno de 50 años, con un tirante promedio de  $3m$ , las zonas con probabilidad de ser afectadas son aquellas que se localizan a las orillas de los ríos y que tienen una elevación  $\leq 3m$ . La misma consideración fue válida para los periodos de retorno de 100 y 500 años.

Los resultados obtenidos se integraron en un Sistema de Información Geográfica (SIG), de esta manera se generó el mapa de peligro de inundación de la Ciudad de Villahermosa, Tabasco para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años.

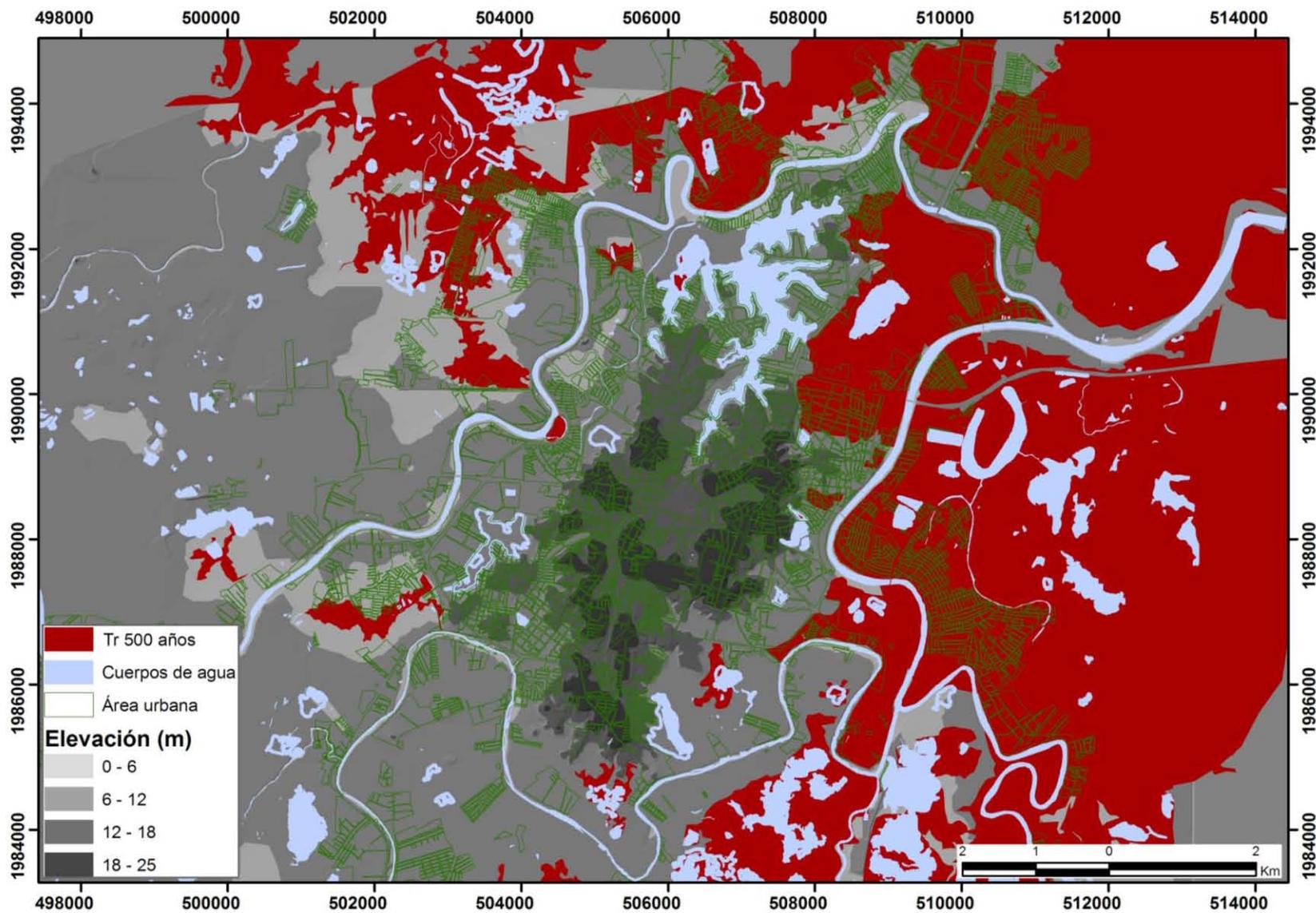
### 2.5.1 MAPA DE PELIGRO POR INUNDACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS



### 2.5.2 MAPA DE PELIGRO POR INUNDACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS



### 2.5.3 MAPA DE PELIGRO POR INUNDACIÓN PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 500 AÑOS



## 2.6 CÁLCULO DE LA PROBABILIDAD DE PELIGRO

Finalmente, a fin de obtener la probabilidad de peligro, fue necesario determinar la probabilidad de ocurrencia de inundación para cada periodo de retorno. Para ello se obtuvo la tasa de excedencia, la cual es definida como el número medio de veces, en que por unidad de tiempo, ocurre un evento que excede cierta intensidad.

Para obtener la tasa de excedencia partimos de los periodos de retorno para diferentes intensidades, la idea consistió en realizar una proyección del número de eventos que ocurrirán en promedio durante un intervalo de tiempo.

Se consideraron los periodos de retorno de 50, 100 y 500 años, para tres intensidades de gasto.

$i$	$T(i)$
1	50
2	100
3	500

La tasa de excedencia se obtuvo de la siguiente expresión

$$v(i) = \frac{t}{T(i)}$$

donde

$i$  es la intensidad

$t$  número de años proyectado

$T$  periodo de retorno

En la tabla 2.15 se muestran las proyecciones del número de eventos que excederán las tres intensidades consideradas.

**Tabla 2.15 Número de eventos que exceden las intensidades 1, 2 y 3 para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años.**

Intensidad	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Años/ $T(i)$	50	100	500
50	1	0	0
100	2	1	0
500	10	5	1

Tomando  $t = 500$  años de proyección, se trasladan los valores para cada una de las intensidades en la tabla 2.16.

**Tabla 2.16 Número de eventos con intensidades 1, 2, 3 y 4 para un periodo de proyección de 500 años.**

Intensidad	$v(i)$
1	10
2	5
3	1
4	0

En la tabla 2.16 se observa el número de eventos por intensidad en 500 años. El evento en que se excede una intensidad de 4 tiene una probabilidad igual a cero, este valor se agrega para calcular la función peligro más adelante.

La probabilidad de peligro se obtuvo como  $-\frac{1}{v(1)}[v(i+1) - v(i)]$

Intensidad	$P(i)$
1	0.5
2	0.4
3	0.1
4	0

Para los periodos  $T = 50$  y  $T = 100$  años de proyección la probabilidad de peligro se obtuvo de manera similar a  $T = 500$  años. Los resultados de la medida de peligro se muestran en la tabla 2.17.

**Tabla 2.17 Probabilidad de peligro estimada para un periodo de 50, 100 y 500 años.**

	<i>T50</i>	<i>T100</i>	<i>T500</i>
Intensidad <i>i</i>	<i>P(i)</i>	<i>P(i)</i>	<i>P(i)</i>
1	1	0.5	0.5
2	0	0.5	0.4
3	0	0	0.1

Podemos concluir que, entre menor sea la intensidad de un evento mayor será la probabilidad de ocurrencia de inundación y que la probabilidad de que ocurran eventos de mayor intensidad aumenta a su vez al aumentar el tiempo de proyección.

### **CAPÍTULO III. DIAGNOSTICO DE LA VULNERABILIDAD**

Los asentamientos humanos se construyen y se configuran modificando o transformando la naturaleza: la tierra, el aire, el agua, la flora y la fauna, sirven de soporte a estas transformaciones y son, en sí, transformados por ellas. El producto de las mismas es un nuevo entorno construido, un ambiente "natural" nuevo que combina lo social con lo natural, Lavell (1996). De manera que, acciones humanas inadecuadas contribuyen a aumentar el número de personas vulnerables, lo cual representa un déficit en el desarrollo.

El proceso de urbanización ocasiona cambios en las regiones que rodean a las poblaciones, de manera que modifica y transforma los elementos físico-naturales existentes, lo cual también contribuye a crear nuevas amenazas o amplificar en intensidad y recurrencia las ya existentes y de esta forma incrementan el grado de vulnerabilidad.

#### **3.1 CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA**

La Ciudad de Villahermosa se encuentra circundada por los ríos Grijalva, Carrizal y Viejo Mezcalapa, además cuenta con varias lagunas interiores. Estas características, así como factores de tipo antrópico han provocado que a lo largo de su historia haya sufrido inundaciones principalmente por el desbordamiento de los ríos que atraviesan la Ciudad.

Y es aquí donde cabe hacer un paréntesis para explicar los antecedentes por los que la ciudad fue establecida en dicha zona.

Hasta el momento no se conoce a ciencia cierta la fecha de la fundación de la Ciudad de Villahermosa, solamente se tiene entendido que su desarrollo responde a la necesidad que se tuvo de reubicar la ciudad principal de la región, cuya función era la de puerto, debido a que estaba en continuo asedio por los piratas ingleses asentados en la Isla del Carmen.

El cabildo del pueblo tomo la decisión de inmigrar a una región río adentro del Grijalva, hacia una pequeña aldea asentada sobre tres lomas: la Eminencia, Esquipulas y de la Encarnación, la cual se dedicaba básicamente a la agricultura y pesca. Esto a fin de estar protegidos y tener vías de comunicación para comerciar y trasladarse a otras ciudades.

En un principio la Ciudad de Villahermosa no se conocía como una unidad, sino como un conjunto de barrios, ya que debido a la naturaleza de la zona, llena de selvas y cuerpos de agua, era muy difícil establecer una ciudad con la traza típica de las colonias. Con el tiempo estos barrios se fueron expandiendo y agrupando entre sí, y debido a la necesidad de ganarle tierra a los pantanos, lagunas y riachuelos, se fueron dando cambios en la topografía y al mismo tiempo se modificaba continuamente la traza de la ciudad, tendiendo como base una calle principal cercana al río Grijalva donde se establecían los comercios, edificios importantes y la plaza. El crecimiento demográfico de la ciudad fue muy lento en un principio, aún cuando ya tenía la categoría de puerto fluvial, pero siempre tuvo la constante de ganar terrenos a los cuerpos de agua y selva, tanto para el desarrollo de la ciudad como para establecer pastizales para la ganadería.

El río Carrizal en esta etapa y hasta principios del siglo XIX fue una fuente de comida por la pesca y una vía de comunicación secundaria, después del Grijalva. Solo sufrió algunos cambios en sus riveras a fin de evitar las excesivas inundaciones hacia el interior de la ciudad, pero su cauce se mantuvo.

Desde mediados del siglo pasado, debido al crecimiento y desarrollo de la ciudad se incrementó el índice poblacional y por consecuencia hubo una expansión territorial de la ciudad. Para finales de la década de los 70's el desarrollo urbano de Villahermosa comenzó a darse hacia todas direcciones. A partir de ese momento el río ya no se consideró como una fuente de alimento, sino como, una opción para captación de agua y desalojo de desechos, e inclusive como un posible problema en caso de inundaciones, por lo que se encasilló poco a poco y en algunos lugares se modificó su cauce (Pérez 2008).

### **3.2 DESARROLLO URBANO DE LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA**

El diagnóstico de vulnerabilidad realizado en este trabajo tiene como objetivo identificar y ubicar la población más vulnerable ante el impacto de un fenómeno hidrometeorológico como las inundaciones.

Para llevar a cabo el diagnóstico de vulnerabilidad fue necesario como primer paso analizar la configuración espacial de la Ciudad de Villahermosa. Para ello se realizó una evaluación espacio-temporal, la cual consistió en determinar el crecimiento del área urbana, así como la dirección en la que se dio.

La primera parte de este análisis se llevó a cabo empleando fuentes históricas que van desde el croquis planta de San Juan Bautista (hoy Villahermosa), capital del estado de Tabasco en la República Mexicana, publicado en 1884 por el cartógrafo Juan N. Reyna, el cual muestra las demarcaciones del centro y los barrios de la ciudad, hasta el mapa de la Ciudad de Villahermosa publicado en 1972, Pérez 2008. En los cuales se observa la evolución de la zona urbana y con ello el posible incremento de la vulnerabilidad en la población ante inundaciones.

Según se registra en 1884 en la carta urbana de J. N. Reyna, San Juan Bautista constituía una ciudad pequeña y compacta, limitada por el río Grijalva y las lagunas de la Pólvara, Mayito y Macayal.

Se observa que las características más sobresalientes de la ciudad, a partir de su morfología eran las siguientes:

- a) Trazado en forma dispersa hasta conformar una “Retícula irregular”
- b) La plaza mayor se localiza cerca del margen del río Grijalva
- c) Alrededor de la plaza se edifican los principales edificios del Gobierno y viviendas de los grandes comerciantes.
- d) Del vértice norte–este, perpendicular al río se forman las principales vialidades, dividiendo a la ciudad desde la parte baja a lomerío.

- e) Por el lado este, conforma la barranca natural sobre el margen del río, tiene la función de puerto comercial y de comunicación con la región y al Golfo de México.

**Figura 3.1 Croquis planta de San Juan Bautista, capital del estado de Tabasco en la República Mexicana 1884.**

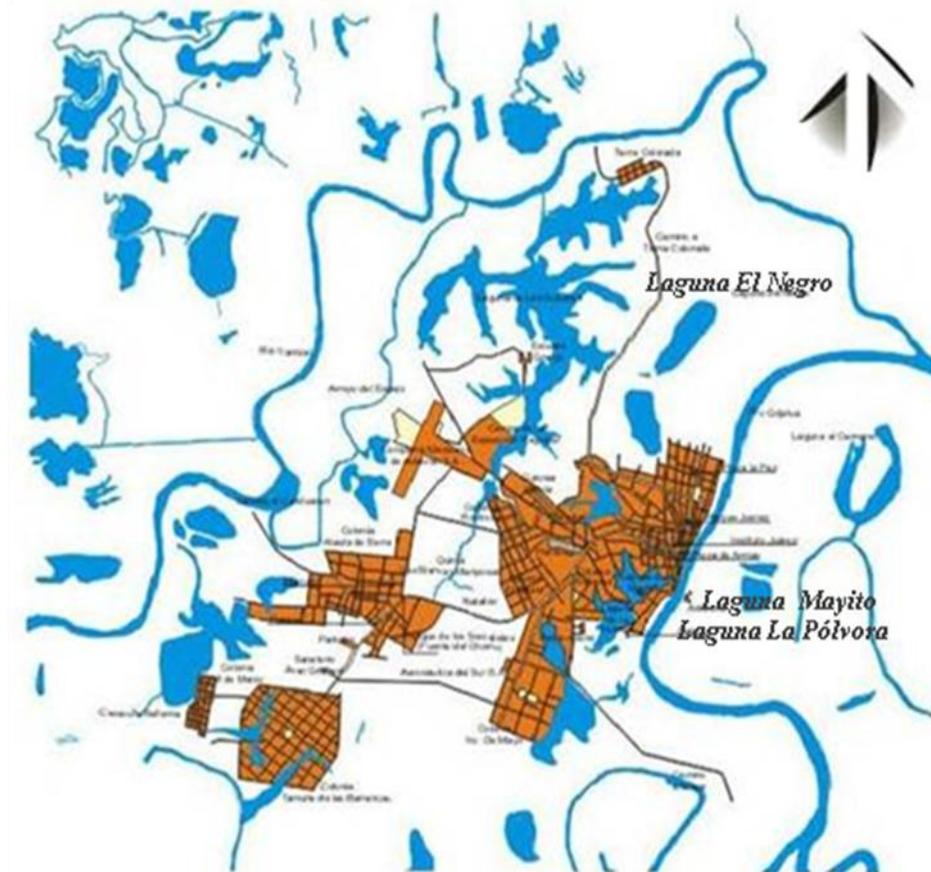


Lo relevante de este croquis, es la ubicación de los pantanos (lagunas), que rodean a la ciudad, dichos pantanos tienen una gran extensión territorial y se interconectan entre sí a través de arroyos, que se vierten al río Grijalva.

Para 1946 la ciudad contaba con 33,758 habitantes, ocupando 632 ha. El lento crecimiento del área urbana se realizó en forma de anillos alrededor del centro de la ciudad y siguiendo la línea de las vialidades, el crecimiento se dio de manera preferencial en dos vertientes, hacia el oeste, rumbo a las zonas altas y lomeríos y a lo largo del río Grijalva, en dirección

sur. Sin embargo, la ciudad se encontraba rodeada por dos grandes pantanos formados al norte por la laguna del Negro y al Sur por las de la Pólvara y Mayito.

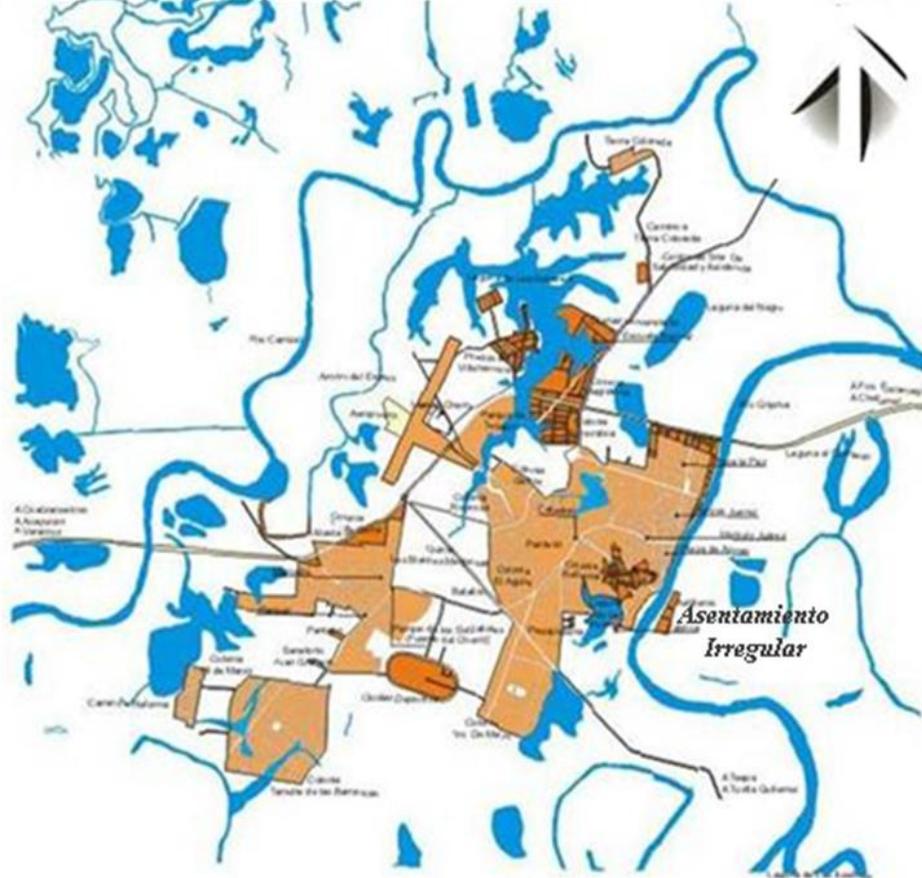
**Figura 3.2 Área urbana de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1946.**



A fin de extender la ciudad hacia la parte sur, por medio de un fraccionamiento habitacional y por otro de granjas suburbanas hacia la parte norte, en 1953 el gobierno del estado de Tabasco se da a la tarea de elaborar un proyecto urbano. La ejecución de dicho proyecto contempla tres fases: el relleno de las lagunas de la Pólvara, Mayito y la del Negro, así como la supresión de sus pantanos. La elevación del terreno para las dos primeras y la construcción de un bordo de defensa que evite que las aguas del río entren a la laguna del Negro, mientras esta es drenada. Finalmente se contempla la urbanización de las lagunas. Este proceso nos da una idea de cómo se fue consolidando la estructura urbana, lo cual nos lleva a deducir que no se tenía una visión de respetar el entorno natural del territorio, ni considerar los riesgos que se pudieran manifestar en el futuro.

En 1964, los primeros asentamientos irregulares se establecen hacia la margen derecha del río Grijalva (hoy las colonias las Gaviotas y la Manga), esta zona ha sido afectada de forma recurrente por inundaciones hasta la actualidad.

**Figura 3.3 Área urbana de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1964.**



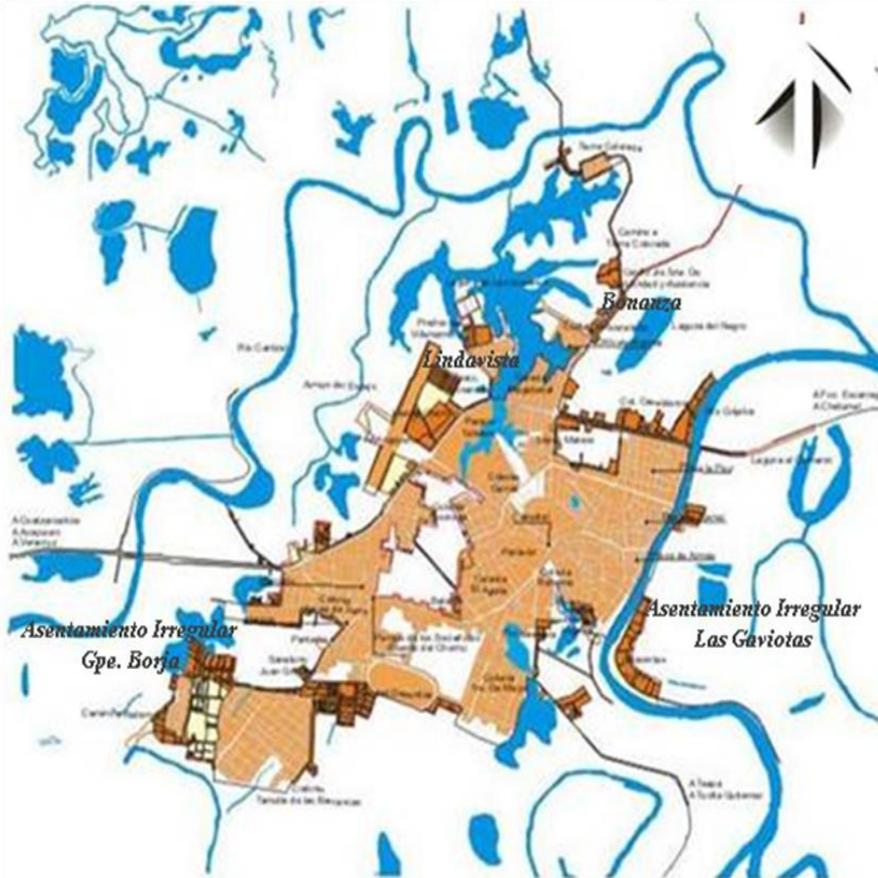
El incremento del área urbana en el período de 1964 a 1972 fue del orden de las 250 hectáreas, lo que representó un incremento del 30%, teniendo una dirección preponderante hacia el sur con el 43% de la expansión y en segundo lugar hacia el poniente con el 29%.

A principios de los 70's, el crecimiento territorial se da en cuatro puntos de la ciudad, según se aprecia en la figura 3.4, el primero hacia el suroeste de la ciudad, con los asentamientos irregulares de la colonia Guadalupe Borja y con los inicios de urbanización de la colonia Pensiones, estos crecimientos van consolidando a la estructura urbana de las colonias

Atasta y Tamulté. El segundo punto de crecimiento se da hacia el noroeste de la ciudad, con el inicio de urbanización de la colonia Linda Vista. El tercer punto de crecimiento es al norte de la ciudad con la urbanización de la colonia Bonanza; y el último punto al este de la ciudad, con el acelerado crecimiento de asentamientos irregulares en la ranchería Las Gaviotas, sobre todo al sur del margen derecho del río Grijalva. Los puntos de crecimiento antes mencionado son para dar paso a los nuevos asentamientos humanos a partir del crecimiento de la industria petrolera en Tabasco.

Concluyendo, la configuración de la ciudad de Villahermosa, en el periodo 1884–1970 tuvo un proceso de desarrollo rural a urbano, en gran medida debido a la presencia de la industria petrolera. Este proceso se puede resumir en tres etapas: una etapa de formación, una de crecimiento del núcleo central urbano y finalmente la última etapa corresponde a la expansión periférica.

**Figura 3.4 Área urbana de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1972.**



Para el análisis del periodo comprendido entre 1980 hasta la fecha, se emplearon un total de 7 imágenes Landsat con un espaciamiento temporal de 5 años en promedio, las cuales corresponden a los años de 1980, 1984, 1988, 1993, 1998, 2003 y 2009. Las imágenes requirieron un procesamiento previo que incluyó: recorte del área de estudio y corrección atmosférica. En el caso de las imágenes de 1980 y 2009 además del proceso antes mencionado fue necesario realizar una corrección geométrica y corrección de bandeo respectivamente. Una vez realizada la restauración y mejoramiento de cada una de las imágenes, se llevó a cabo una clasificación no supervisada y supervisada, empleando para ello composiciones a color. Se determinaron un total de 4 clases, las cuales resultaron suficientes para nuestros fines: área urbana, cuerpos de agua, vegetación y pastizales. Sin embargo, cabe destacar que la clase de área urbana es la que se analizará para determinar el crecimiento espacial de la zona habitada.

Para la clasificación correspondiente al 2009 fueron seleccionados 248 puntos para su verificación en campo y determinar así la veracidad de la clasificación, obteniéndose finalmente un 87% de exactitud.

Las áreas que representan la extensión de la zona urbana de la Ciudad de Villahermosa para el periodo 1980-2009, las cuales se obtuvieron a partir del análisis de las imágenes antes mencionadas, se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Extensión del área urbana para el periodo 1980-2009.**

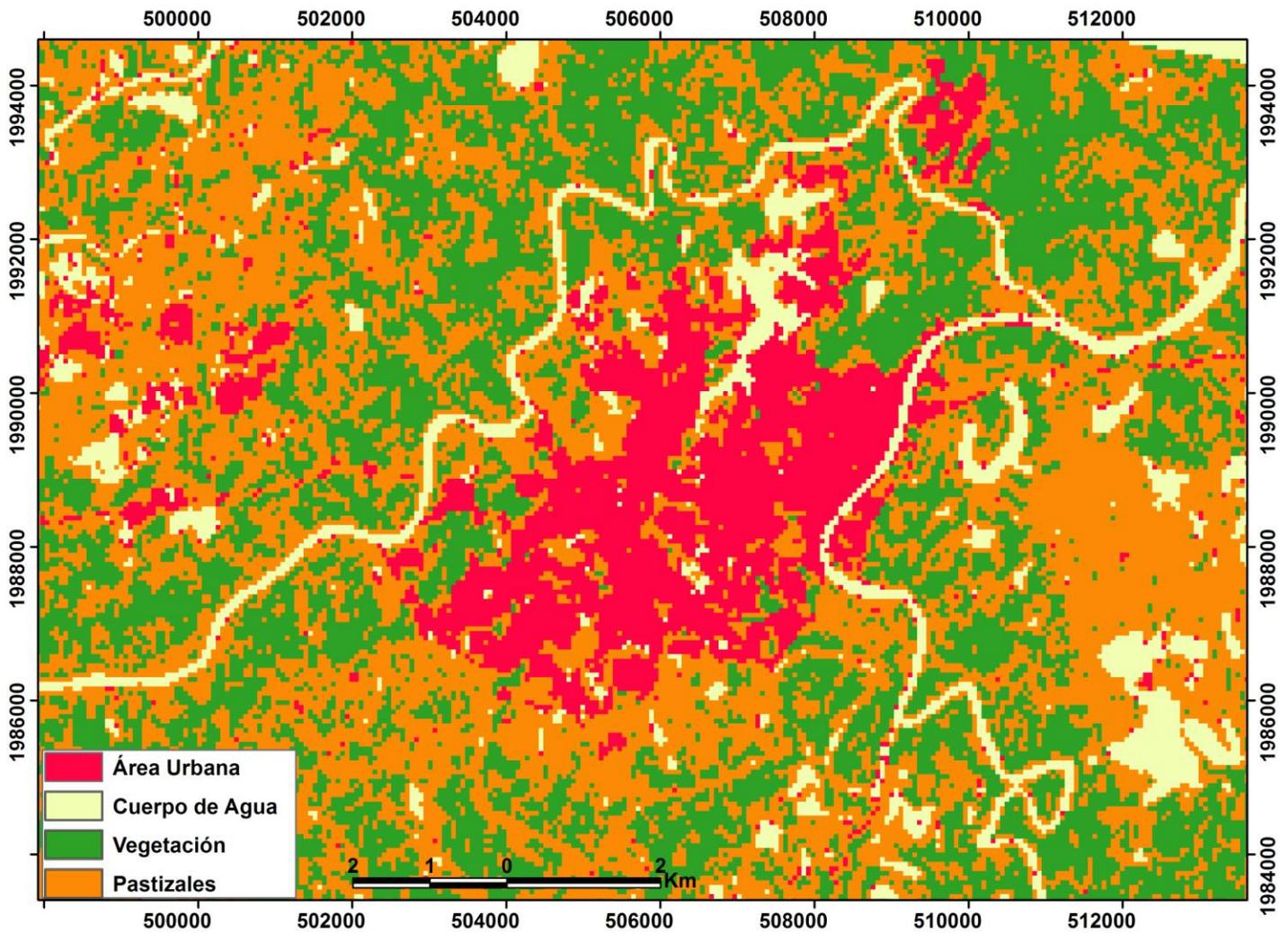
Año	Área (ha)
1980	2,245.32
1984	2,881.80
1988	3,199.95
1993	3,611.61
1998	4,446.27
2003	5,846.67
2009	6,951.15

Como se observa en la tabla 3.1 el área urbana para 1980 era de 2,245.32 ha, para el mismo año Pérez (2008) reporta un área urbana de 2,236 ha. En 2009 el área urbana alcanza una extensión de 6,951 ha, el programa de desarrollo urbano municipal de Centro, Tabasco reporta un área urbana con una superficie de 7,067 ha para el mismo año.

Como se puede observar el crecimiento del espacio urbano se incrementó de 2,245 ha., en 1980 a 6,951 ha., en el 2009, lo que indica que el crecimiento se ha triplicado en casi tres décadas. Esto supone una tasa de incremento de aproximadamente 162 ha/año. Cabe aclarar que este crecimiento no es homogéneo en espacio ni tiempo, pues depende de factores que van desde la política pública, aspectos socio-económicos hasta los desastres, los cuales facilitan o limitan la construcción de viviendas e infraestructuras, y de esta forma tienen efecto en el crecimiento del espacio urbano.

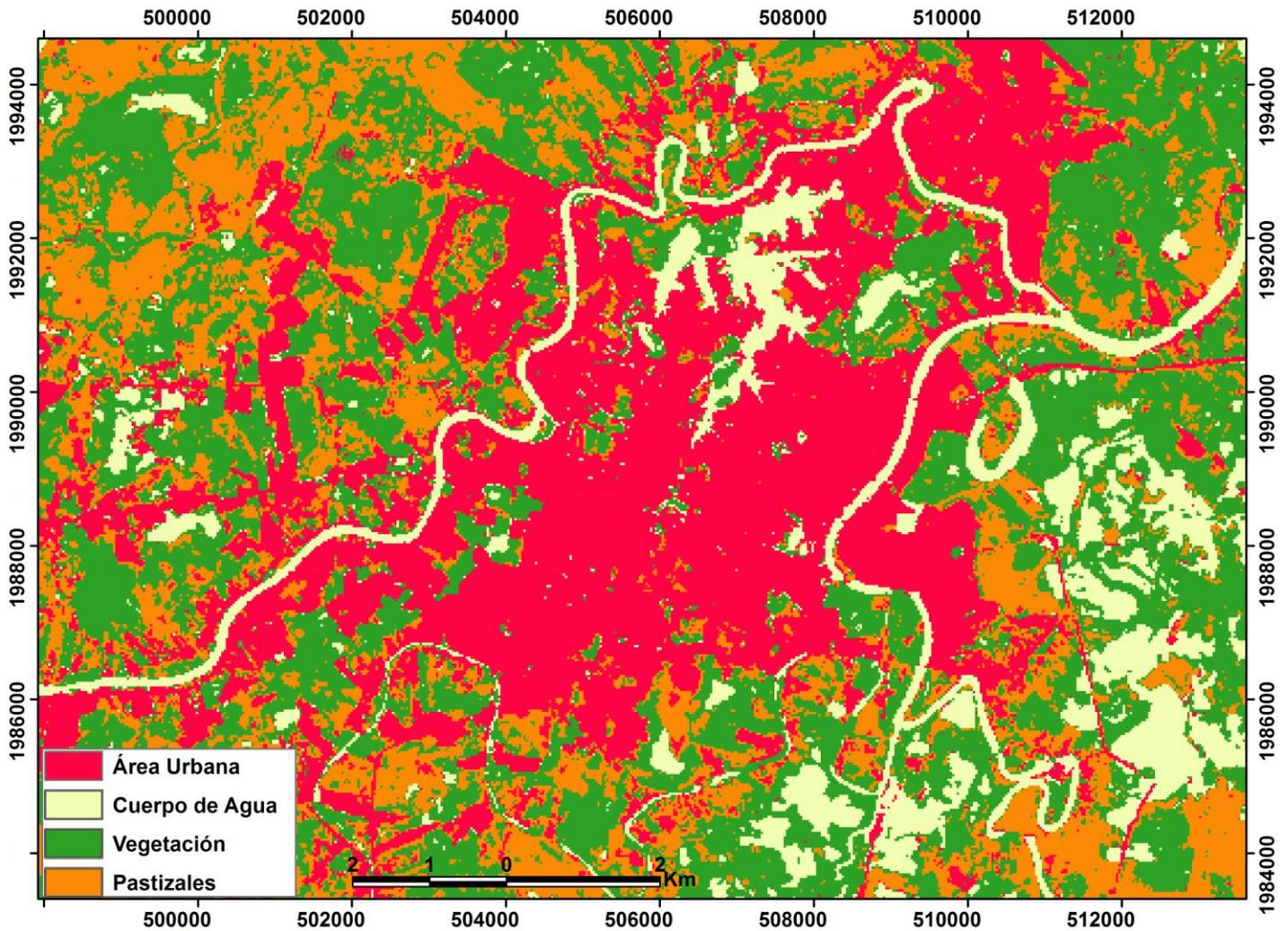
El crecimiento del área urbana en la ciudad de Villahermosa para el año 1980 se aprecia en la imagen 3.5, al noroeste de la ciudad se aprecia un crecimiento que corresponde a zonas habitacionales de tipo residencial y a zona de servicios múltiples (comercios y servicios); al norte de la ciudad, se observa un incremento del área urbana, la cual se debe a conjuntos habitacionales, así como infraestructuras pertenecientes al sector salud (Hospital Roviroso), además se observan asentamientos humanos irregulares en zonas bajas y pantanosas. Al este de la ciudad, se registran asentamientos irregulares en zonas bajas, algunas al margen derecho del río Grijalva.

**Figura 3.5 Mapa de coberturas de la Ciudad de Villahermosa para el año de 1980.**



De 1980 a 2009, la Ciudad de Villahermosa creció un 209.5% en superficie. Es notable la absoluta falta de planeación en el crecimiento urbano, ya que en los últimos años se ha dado un incremento desordenado de asentamientos en las márgenes de los cuerpos de agua, lo que representa un problema ante el peligro de inundación. Un claro ejemplo es el distrito las Gaviotas.

**Figura 3.6 Mapa de coberturas de la Ciudad de Villahermosa para el año de 2009.**



### 3.3 DIAGNOSTICO DE VULNERABILIDAD PARA LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA

La Secretaría de Comunicaciones Asentamientos y Obras Públicas del Estado de Tabasco (SCAOP) en el documento “Zonificación Distrital de Villahermosa” publicado en 1987, establece la distribución de la estructura urbana de la Ciudad de Villahermosa. En dicha zonificación la ciudad se estructura a través de importantes vías que cruzan el área urbana de norte a sur y de oriente a poniente, así como por vías que enlazan a la ciudad con el sistema carretero del sureste. Todas estas vías articulaban los distritos en los que se encontraba dividida la ciudad.

De acuerdo con el Programa de Desarrollo Urbano Municipal Centro, en 1992 la ciudad se dividía en 11 distritos:

I Centro

II La Venta

III Ciudad Deportiva - CICOM

IV Atasta - Tamulté

V Tabasco 2000

VI Laguna de las Ilusiones

VII Casablanca

VIII Ciudad Industrial

IX Zona habitacional Ciudad Industrial

X Las Gaviotas - La Manga

XI Reserva Sur

En la actualidad la Ciudad de Villahermosa se encuentra dividida en 13 distritos según el Atlas de Riesgo del municipio de Centro, 2009, incluyéndose en la lista anterior el distrito XII Loma de caballo y XIII Zona Conurbada (Fracción Nacajuca).

A fin de llevar a cabo el diagnóstico de vulnerabilidad, se empleó el mapa “uso de suelo Ciudad de Villahermosa, Tabasco” publicado en 2008 por el H. Ayuntamiento de Centro. El cual divide los usos de suelo en: habitacional de alta, media y baja densidad, uso mixto (comercial), centro urbano, corredor turístico-hoteler, equipamiento, industria, agroindustria, corredor industrial, uso comercial, espacios abiertos y áreas de valor ambiental. Para este estudio se consideró únicamente el uso habitacional de alta, media y baja densidad a fin de determinar el grado de vulnerabilidad de la población asentada en Villahermosa.

El uso habitacional de alta densidad corresponde a viviendas populares unifamiliares, viviendas de interés social y plurifamiliares con un promedio de 40 a 80 viviendas por

hectárea. El salario mínimo que percibe la población asentada en estas viviendas es de 1 a 3 salarios. El uso de suelo correspondiente a densidad media engloba las viviendas residenciales con/sin departamental, con lotes de 8x20 m y 25 a 60 viviendas por hectárea; con un salario mínimo del orden de 3 a 5. Finalmente el uso habitacional de baja densidad comprende viviendas residenciales con/sin departamental, cuyo lote mínimo es del orden de 10x20 m y un promedio de 25 a 40 viviendas por hectárea. Y cuyos habitantes perciben más de 5 salarios mínimos.

Se ubicaron en el mapa por distritos los polígonos pertenecientes a los usos habitacionales arriba descritos, y se obtuvo el área de cada uno de ellos. Considerando la traza urbana de la Ciudad de Villahermosa, la cual fue proporcionada por la Subdirección de Catastro (2009), se determinó el número de viviendas que existen en cada polígono. Los resultados por distrito se muestran en la tabla 3.2

**Tabla 3.2 Área y número de viviendas por distritos.**

<b>DISTRITO 1</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)			138.6
Viviendas			3495
<b>DISTRITO 2</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)		362.97	33.87
Viviendas		5383	260
<b>DISTRITO 3</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	25.29	420.84	7.33
Viviendas	646	5081	193
<b>DISTRITO 4</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	447.08	199.67	
Viviendas	11590	3565	
<b>DISTRITO 5</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	58.7	179.93	59.05
Viviendas	1284	2091	468
<b>DISTRITO 6</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	95.05	183.71	10.29
Viviendas	1880	2300	126
<b>DISTRITO 7</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	53.9		45.92
Viviendas	96		674

<b>DISTRITO 8</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)			230.58
Viviendas			339
<b>DISTRITO 9</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	99.08	136.93	93.82
Viviendas	2170	3338	1560
<b>DISTRITO 10</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	172.43		
Viviendas	3276		
<b>DISTRITO 11</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	1198.13	976.06	407.39
Viviendas	4987	4435	218
<b>DISTRITO 12</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	274.96	835.31	725.96
Viviendas	4669	411	710
<b>DISTRITO 13</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Área (ha)	89.27		802.89
Viviendas	92		1524

Según el II Censo Nacional de Población (INEGI, 2005), Villahermosa cuenta con un promedio de 3.73 habitantes por vivienda. De manera que, si conocemos el número de viviendas podemos obtener el número de habitantes por distrito. Y conocida el área que ocupa cada polígono podemos determinar la densidad poblacional y la densidad de viviendas.

Según el CENAPRED (2006) para determinar la densidad poblacional, es necesario tener el número total de habitantes y una superficie total, información que se integra en la siguiente ecuación:

$$DP = \frac{PT}{ST}$$

Donde

*DP* Representa la densidad de población (*hab / ha*)

*PT* Indica la población total

*ST* Es la superficie total en *ha*.

En el caso de viviendas, la densidad es determinada de la siguiente manera:

$$DV = \frac{VT}{ST}$$

Donde

*DV* Representa la densidad de viviendas (*Viviendas / ha*)

*VT* Indica el total de viviendas

*ST* Es la superficie total en *ha*.

Resulta importante ubicar las zonas con mayor densidad poblacional, ello debido a que son consideradas como zonas vulnerables por su número de habitantes. El número de viviendas y su distribución nos da una idea de la probabilidad de afectación en pérdidas económicas ante la presencia de una amenaza.

Los resultados por distrito se muestran en la tabla 3.3

**Tabla 3.3 Densidad poblacional y de viviendas por distritos.**

<b>DISTRITO 1</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional			94.06
Densidad de Viviendas			25.22
<b>DISTRITO 2</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional		55.32	28.63
Densidad de Viviendas		14.83	7.68
<b>DISTRITO 3</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	95.28	45.03	98.21
Densidad de Viviendas	25.54	12.07	26.33
<b>DISTRITO 4</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	96.69	66.60	
Densidad de Viviendas	25.92	17.85	
<b>DISTRITO 5</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	81.60	43.35	29.56
Densidad de Viviendas	21.87	11.62	7.93
<b>DISTRITO 6</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	73.78	46.70	45.67
Densidad de Viviendas	19.80	12.52	12.24

<b>DISTRITO 7</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	6.64		54.75
Densidad de Viviendas	1.78		14.68
<b>DISTRITO 8</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional			5.48
Densidad de Viviendas			1.47
<b>DISTRITO 9</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	81.69	90.93	62.02
Densidad de Viviendas	21.90	24.38	16.63
<b>DISTRITO 10</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	70.87		
Densidad de Viviendas	18.99		
<b>DISTRITO 11</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	15.53	16.95	2.00
Densidad de Viviendas	4.162	4.54	0.54
<b>DISTRITO 12</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	63.34	1.84	3.65
Densidad de Viviendas	16.98	0.49	0.98
<b>DISTRITO 13</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	3.84		7.08
Densidad de Viviendas	1.03		1.90

En la tabla 3.3 se observa que en el caso de los distritos I y III, la densidad poblacional correspondiente a uso de suelo de baja densidad es elevada. Sin embargo, esto puede tomarse como distritos con un gran número de habitantes y viviendas, pero con un nivel de ingresos más estable.

La densidad, más que un problema de sobrepoblación, refleja un problema de mala distribución de la población. Cuando la gente se encuentra concentrada en un área limitada, una amenaza puede tener un mayor impacto. De la misma forma el número de viviendas puede ser considerado una medida del grado de vulnerabilidad, ya que en algunos casos, los daños a las viviendas resultan ser uno de los principales parámetros para medir la magnitud de los desastres.

### 3.3.1 PONDERACIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenida la densidad poblacional y de viviendas se procedió a ponderar los resultados. La forma de hacerlo consistió en ubicar por nivel de intensidad el mínimo y máximo valor y realizar la diferencia entre ellos, el resultado se dividió en 5 clases y se asignó un valor para cada una de ella. Los valores establecidos en cada rango se ubican entre 0 y 1.

**Tabla 3.4 Valores mínimos y máximos correspondientes a Densidad poblacional.**

Densidad Poblacional	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
Mínimo	3.84	1.84	2.00
Máximo	96.70	90.93	98.21
Diferencia	92.86	89.09	96.21

**Tabla 3.5 Ponderación de los valores de Densidad poblacional.**

Rango	Valor
0-20	0.2
21-40	0.4
41-60	0.6
61-80	0.8
81-100	1

**Tabla 3.6 Valores mínimos y máximos correspondientes a Densidad de viviendas.**

Densidad de Vivienda	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
Mínimo	1.03	0.49	0.54
Máximo	25.92	24.38	26.33
Diferencia	24.89	23.89	25.79

**Tabla 3.7 Ponderación de los valores de Densidad de vivienda.**

Rango	Valor
0 - 5	0.2
6 - 10	0.4
11- 15	0.6
16 - 20	0.8
21 - 25	1

Sustituyendo los valores de la ponderación se obtiene la tabla 3.8

**Tabla 3.8 Resultado de la ponderación de los valores de Densidad poblacional y de vivienda.**

<b>DISTRITO 1</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional			1
Densidad de Viviendas			1
<b>DISTRITO 2</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional		0.6	0.4
Densidad de Viviendas		0.6	0.4
<b>DISTRITO 3</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	1	0.6	1
Densidad de Viviendas	1	0.6	1
<b>DISTRITO 4</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	1	0.8	
Densidad de Viviendas	1	0.8	
<b>DISTRITO 5</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	1	0.6	0.4
Densidad de Viviendas	1	0.6	0.4
<b>DISTRITO 6</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	0.8	0.6	0.6
Densidad de Viviendas	0.8	0.6	0.6
<b>DISTRITO 7</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	0.2		0.6
Densidad de Viviendas	0.2		0.6
<b>DISTRITO 8</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional			0.2
Densidad de Viviendas			0.2
<b>DISTRITO 9</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	1	1	0.8
Densidad de Viviendas	1	1	0.8
<b>DISTRITO 10</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	0.8		
Densidad de Viviendas	0.8		
<b>DISTRITO 11</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	0.2	0.2	0.2
Densidad de Viviendas	0.2	0.2	0.2
<b>DISTRITO 12</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	0.8	0.2	0.2
Densidad de Viviendas	0.8	0.2	0.2

<b>DISTRITO 13</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
Densidad Poblacional	0.2		0.2
Densidad de Viviendas	0.2		0.2

Según el mapa “uso de suelo Ciudad de Villahermosa, Tabasco”, el nivel de ingresos de la población está dividido de acuerdo a su nivel de densidad habitacional de la siguiente manera: el uso de suelo correspondiente a alta densidad percibe de 1 a 3 salarios mínimos, el de media densidad de 3 a 5 y el de baja densidad percibe más de 5 salarios mínimos. De manera que en la ponderación a el uso de suelo de alta densidad le corresponde un valor mayor puesto que la población con dicho salario es más probable de ser afectada ante el impacto de un evento, mientras que la de baja densidad con una ponderación menor es menos probable de ser dañada.

**Tabla 3.9 Ponderación del nivel de ingresos.**

<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
1 - 3	3 - 5	más de 5
0.99	0.66	0.33

El grado de vulnerabilidad es obtenido multiplicando la densidad poblacional, por el nivel de vivienda por el nivel de ingresos. El resultado es nuevamente ponderado. Se asignaron cinco valores a través de los cuales se establecieron diferentes grados de vulnerabilidad. Los valores que se establecen para cada rango se ubican entre 0 y 1, donde 1 corresponde al nivel más alto de vulnerabilidad y 0 al nivel más bajo. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 3.10 y 3.11.

**Tabla 3.10 Ponderación del grado de vulnerabilidad.**

<b>Intervalos</b>	<b>Grado de Vulnerabilidad</b>
0 - 0.20	Muy baja
0.21 – 0.40	Baja
0.41 – 0.60	Media
0.61 – 0.80	Alta
0.81 – 1.00	Muy alta

**Tabla 3.11 Vulnerabilidad para la Ciudad de Villahermosa**

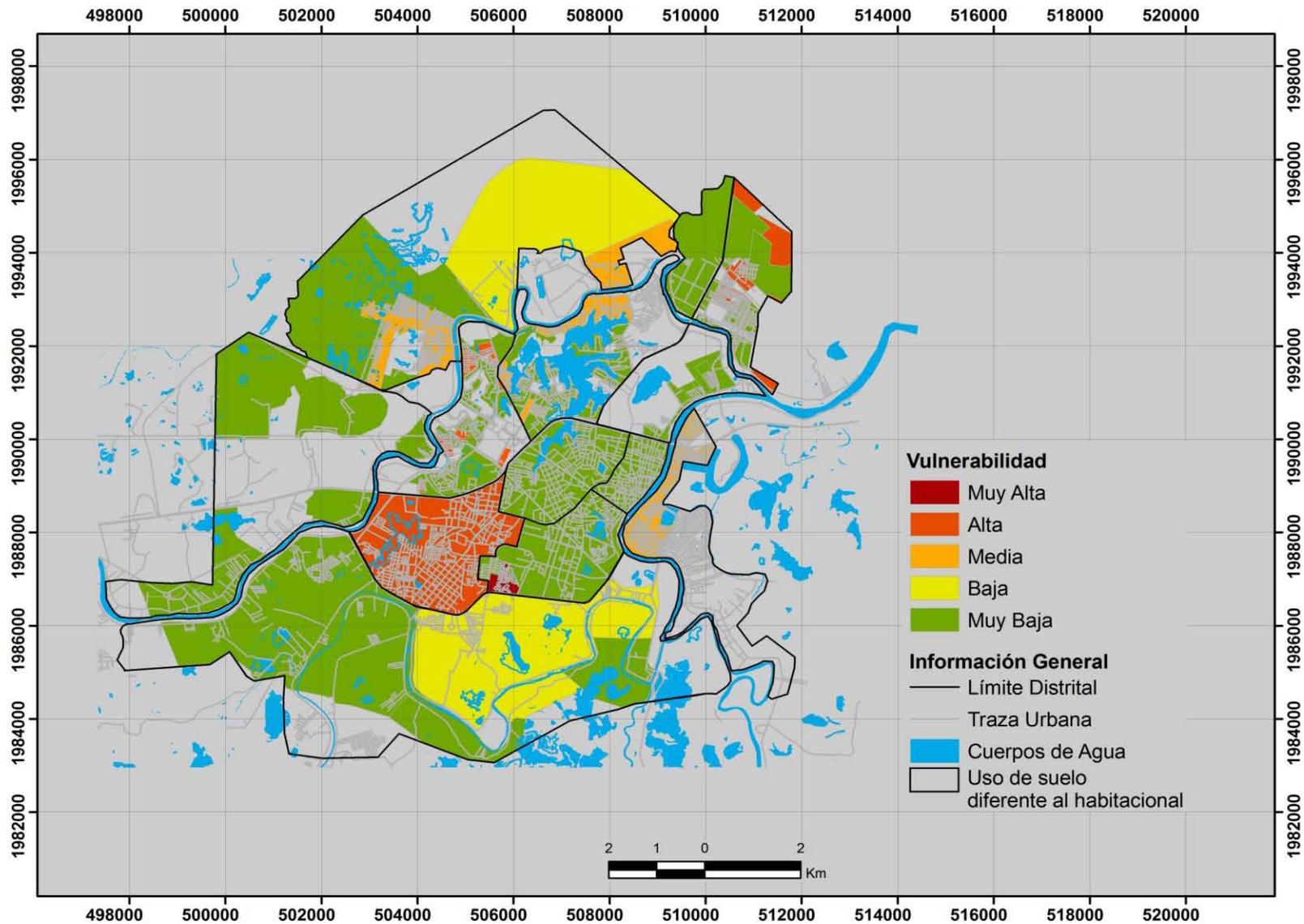
<b>DISTRITO 1</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
			Muy Baja
<b>DISTRITO 2</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
		Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 3</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Alta	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 4</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Alta	Media	
<b>DISTRITO 5</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Alta	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 6</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Media	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 7</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Baja		Muy Baja
<b>DISTRITO 8</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
			Muy Baja
<b>DISTRITO 9</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Alta	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 10</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Media		
<b>DISTRITO 11</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 12</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Media	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 13</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Baja		Muy Baja

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 3.11 se observa que las áreas correspondientes a uso habitacional de baja y media densidad cuentan con una vulnerabilidad muy baja, en el caso del uso habitacional de alta densidad su nivel de vulnerabilidad se ubica entre media y muy alta. Cabe destacar que, la densidad poblacional y el nivel de ingresos son dos de los elementos que mejor diagnostican la vulnerabilidad en una población (Wilches, 1993). La densidad poblacional en este trabajo permitió reconocer la predisposición (distribución en el espacio geográfico) a ser afectados por un fenómeno natural. Por otro lado el nivel de ingresos permite determinar la capacidad de resiliencia

(status social) de la población para afrontar y recuperarse del impacto de un desastre. Sin embargo, el nivel de ingresos empleado para calcular el nivel de vulnerabilidad consideró cifras generalizadas, debido a la escasa información proporcionada por las instancias encargadas del manejo de la información.

Los resultados obtenidos para población y viviendas fueron representados mediante un sistema de información geográfica (SIG), el cual muestra espacialmente las zonas con mayor grado de exposición, predisposición y capacidad de resiliencia. Finalmente se elaboró una cartografía de vulnerabilidad a partir de los datos obtenidos.

### 3.3.2 MAPA DE VULNERABILIDAD PARA LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA



## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DEL RIESGO**

El análisis de riesgo es resultado de la relación que existe entre la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el objetivo de identificar las características de los eventos que pueden presentarse en una región y determinar la forma en la que estos eventos inciden en la población y su entorno.

El riesgo de inundación es resultado de la combinación del peligro y la vulnerabilidad humana. El grado de peligro refleja el tipo de inundación que puede ocurrir, y su modelo estadístico, en un sitio particular, mientras que la vulnerabilidad humana refleja los principales factores socio-económicos de la población, el alcance de las obras hidráulicas para prevenir inundaciones y la capacidad de la población a anticipar y gestionar los riesgos. Es el equilibrio entre estos dos elementos, más que el hecho físico en sí, que define el riesgo de inundación y determina el resultado de un desastre natural, (Smith et al., 1998).

En la Ciudad de Villahermosa, la principal fuente de peligro está representada por fenómenos de tipo hidrometeorológico, como las inundaciones. La ciudad ha sido recurrentemente afectada por inundaciones principalmente pluviales. Sin embargo, las inundaciones que han ocasionado mayores daños han sido resultado de la conjunción de fenómenos como precipitaciones extremas, grandes escurrimientos y fallas en la operación de infraestructura hidráulica, un claro ejemplo son las inundaciones ocurridas en octubre de 1999 y octubre-noviembre de 2007. En lo que respecta a la vulnerabilidad, debido a sus condiciones topográficas naturales y la falta de ordenamiento y planeación urbana existen comunidades que se ha ubicado en zonas propensas a inundarse, lo cual trae consigo un alto grado de vulnerabilidad.

### **4.1 CÁLCULO DEL RIESGO**

El riesgo puede ser considerado como el resultado de la combinación de tres factores: peligro, vulnerabilidad y exposición (sección 1.2). Este último está determinado por la cantidad de personas y bienes ubicados en el espacio propenso a ser dañado y generalmente

se expresa como el resultado del valor económico de las pérdidas directas, indirectas y costos de recuperación que puede dejar un fenómeno.

Otra manera de determinar el grado de exposición ante un fenómeno es considerar la cantidad de personas y servicios que son afectados ante una condición de peligro.

$$\text{Riesgo} = (\text{Peligro} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Exposición}) \quad (4.1)$$

Con el objetivo de estimar el nivel de riesgo existente en la Ciudad de Villahermosa, en los capítulos II y III se determinaron las áreas propensas a inundarse y la probabilidad de peligro, así como el grado de la vulnerabilidad global de la población, la integración de estas variables previamente obtenidas nos dará como resultado la cartografía de las áreas en riesgo de inundación.

La escala considerada para determinar el nivel de riesgo de acuerdo a las características del peligro y grado de vulnerabilidad se muestra en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Ponderación del nivel de riesgo para un periodo de 50, 100 y 500 años.**

<b>Riesgo</b>	<b>Probabilidad</b>
Muy alto	0.81-1.00
Alto	0.61-0.80
Medio	0.41-0.60
Bajo	0.21-0.40
Muy bajo	0.0-0.20

#### **4.2 PROBABILIDAD DE PELIGRO**

En el capítulo II, se obtuvo la cartografía de peligro, en la que se ubicaron las áreas con probabilidad de inundarse. Para determinar la probabilidad de peligro fue necesario estimar su posible ocurrencia en un lapso de tiempo dado, con un cierto nivel de intensidad (Tabla 4.2).

**Tabla 4.2 Probabilidad de peligro para 50, 100 y 500 años**

<b>Intensidad</b> <i>i</i>	<b>Probabilidad</b> <i>T50</i>	<b>Probabilidad</b> <i>T100</i>	<b>Probabilidad</b> <i>T500</i>
1	1	0.5	0.5
2	0	0.5	0.4
3	0	0	0.1

De esta manera, para el caso de la probabilidad calculada para el periodo de retorno de 50 años, se muestra que para una intensidad 1, su probabilidad de ocurrencia sería muy alta. Sin embargo, para las intensidades 2 y 3 su probabilidad de ocurrencia sería muy baja.

Para el periodo de retorno de 100 años y para una intensidad 1, su probabilidad de ocurrencia sería media, de igual forma para la intensidad 2 y para una intensidad 3 la probabilidad de ocurrencia sería muy baja.

Finalmente para un periodo de retorno de 500 años y una intensidad 1, su probabilidad de ocurrencia sería media, para la intensidad 2 sería baja y para una intensidad 3 la probabilidad de ocurrencia sería muy baja.

De los resultados antes mostrados se desprende que, la probabilidad de ocurrencia de un evento de cierta intensidad para un periodo de retorno dado dependerá de la intensidad del evento.

#### **4.3 DIAGNOSTICO DE VULNERABILIDAD**

El grado de vulnerabilidad de la población asentada en la ciudad de Villahermosa, se obtuvo en el capítulo III, el diagnóstico se llevó a cabo dividiendo la ciudad por distritos y considerando el uso de suelo habitacional.

Del cálculo de vulnerabilidad global en la zona de estudio se obtuvo la vulnerabilidad empleada para determinar el nivel de riesgo por inundaciones para los tres periodos de retorno, los resultados mostraron que, las áreas correspondientes a uso habitacional de baja y media densidad cuentan con una vulnerabilidad muy baja, en el caso del uso habitacional de alta densidad su nivel de vulnerabilidad se ubica entre media y muy alta.

**Tabla 4.3 Vulnerabilidad para el factor población de la Ciudad de Villahermosa**

<b>DISTRITO 1</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
			Muy Baja
<b>DISTRITO 2</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
		Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 3</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Alta	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 4</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Alta	Media	
<b>DISTRITO 5</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Alta	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 6</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Media	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 7</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Baja		Muy Baja
<b>DISTRITO 8</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
			Muy Baja
<b>DISTRITO 9</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Alta	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 10</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Media		
<b>DISTRITO 11</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 12</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Media	Muy Baja	Muy Baja
<b>DISTRITO 13</b>	<b>Densidad Alta</b>	<b>Densidad Media</b>	<b>Densidad Baja</b>
	Muy Baja		Muy Baja

#### **4.4 CÁLCULO DEL RIESGO PARA LOS PERIODOS DE RETORNO T = 50, T =100 y T =500 AÑOS**

Haciendo uso de la ecuación (4.2), se sustituyeron los resultados obtenidos correspondientes a peligro y vulnerabilidad a fin de determinar el nivel de riesgo existente por distrito. Los resultados de este análisis para cada periodo de retorno se muestran en las tablas.

Cabe destacar que la variable exposición fue incluida y calculada dentro de la variable de vulnerabilidad.

Tabla 4.4 Cálculo del riesgo para un periodo de retorno de 50 años

DISTRITO	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Vulnerabilidad			Riesgo		
				Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
DISTRITO 1	1	50	1			0.2			0.2
DISTRITO 2	1	50	1		0.2	0.2		0.2	0.2
DISTRITO 3	1	50	1	1	0.2	0.2	1	0.2	0.2
DISTRITO 4	1	50	1	1	0.6		1	0.6	
DISTRITO 5	1	50	1	0.8	0.2	0.2	0.8	0.2	0.2
DISTRITO 6	1	50	1	0.6	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2
DISTRITO 7	1	50	1	0.2		0.2	0.2		0.2
DISTRITO 8	1	50	1			0.2			0.2

DISTRITO 9	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	1	50	1	0.8	0.2	0.2	0.8	0.2	0.2
DISTRITO 10	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	1	50	1	0.6			0.6		
DISTRITO 11	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	1	50	1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
DISTRITO 12	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	1	50	1	0.8	0.2	0.2	0.8	0.2	0.2
DISTRITO 13	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	1	50	1	0.2		0.2	0.2		0.2

Tabla 4.5 Cálculo del riesgo para un periodo de retorno de 100 años

DISTRITO	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Vulnerabilidad			Riesgo		
				Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
DISTRITO 1	2	100	0.5			0.2			0.1
DISTRITO 2	2	100	0.5		0.2	0.2		0.1	0.1
DISTRITO 3	2	100	0.5	1	0.2	0.2	0.5	0.1	0.1
DISTRITO 4	2	100	0.5	1	0.6		0.5	0.3	
DISTRITO 5	2	100	0.5	0.8	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1
DISTRITO 6	2	100	0.5	0.6	0.2	0.2	0.3	0.1	0.1
DISTRITO 7	2	100	0.5	0.2		0.2	0.1		0.1
DISTRITO 8	2	100	0.5			0.2			0.1

DISTRITO 9	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	2	100	0.5	0.8	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1
DISTRITO 10	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	2	100	0.5	0.6			0.3		
DISTRITO 11	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	2	100	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
DISTRITO 12	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	2	100	0.5	0.8	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1
DISTRITO 13	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	2	100	0.5	0.2		0.2	0.1		0.1

**Tabla 4.6 Cálculo del riesgo para un periodo de retorno de 500 años**

DISTRITO	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Vulnerabilidad			Riesgo		
				Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
DISTRITO 1	3	500	0.1			0.2			0.02
DISTRITO 2	3	500	0.1		0.2	0.2		0.02	0.02
DISTRITO 3	3	500	0.1	1	0.2	0.2	0.1	0.02	0.02
DISTRITO 4	3	500	0.1	1	0.6		0.1	0.06	
DISTRITO 5	3	500	0.1	0.8	0.2	0.2	0.08	0.02	0.02
DISTRITO 6	3	500	0.1	0.6	0.2	0.2	0.06	0.02	0.02
DISTRITO 7	3	500	0.1	0.2		0.2	0.02		0.02
DISTRITO 8	3	500	0.1			0.2			0.02

DISTRITO 9	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	3	500	0.1	0.8	0.2	0.2	0.08	0.02	0.02
DISTRITO 10	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	3	500	0.1	0.6			0.06		
DISTRITO 11	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	3	500	0.1	0.2	0.2	0.2	0.02	0.02	0.02
DISTRITO 12	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	3	500	0.1	0.8	0.2	0.2	0.08	0.02	0.02
DISTRITO 13	Intensidad (i)	Periodo de Retorno	Peligro	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja
	3	500	0.1	0.2		0.2	0.02		0.02

Los resultados muestran una disminución en el nivel del riesgo conforme aumenta el periodo de retorno y la intensidad, aun cuando en cada caso el nivel de vulnerabilidad empleado fue el mismo (Tablas 4.4, 4.5 y 4.6).

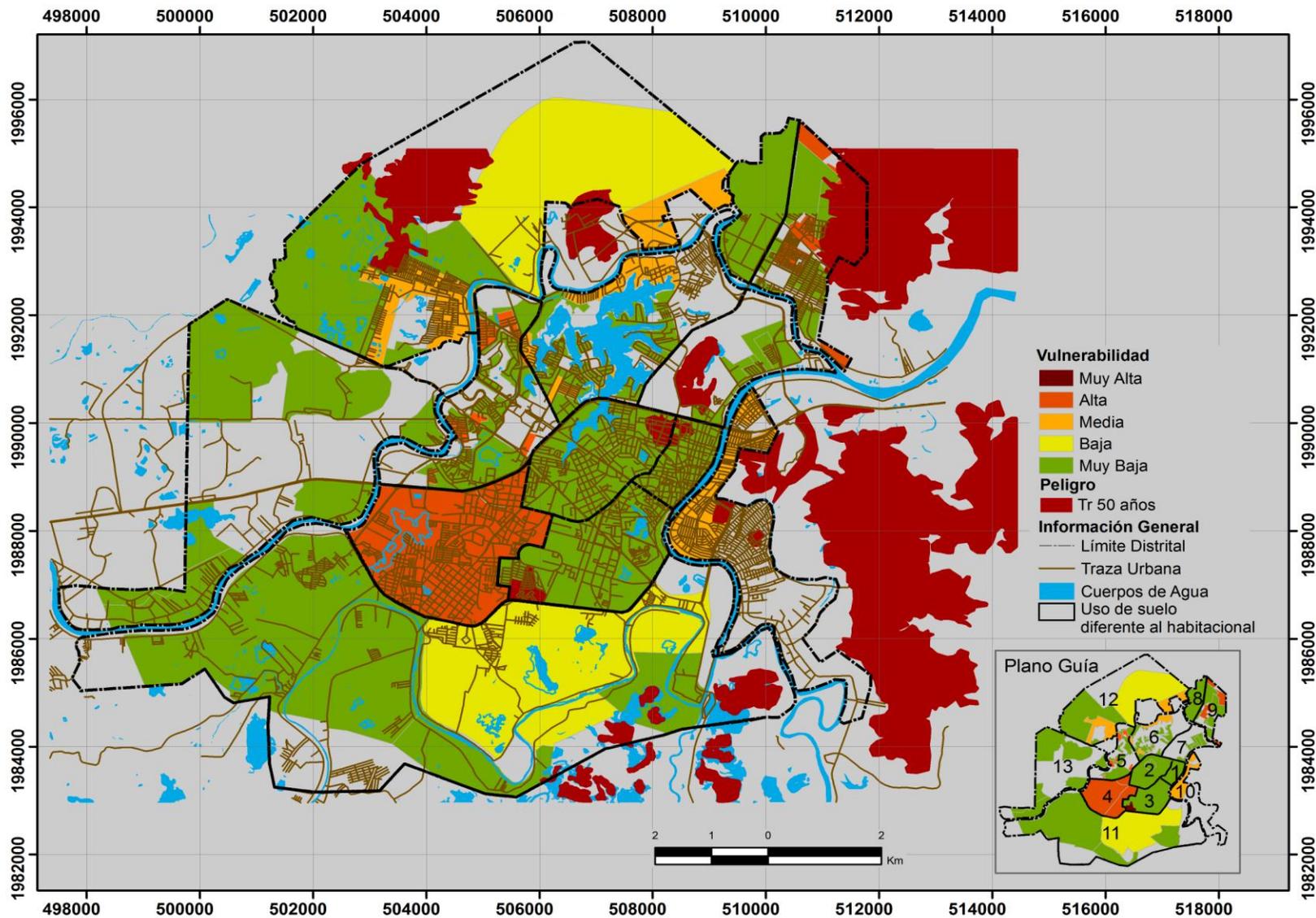
Para un periodo de retorno de 50 años, el riesgo calculado fue de un nivel muy bajo para un uso de suelo habitacional de baja densidad, para densidad media, un riesgo muy bajo, a excepción del distrito 4 que alcanzó un riesgo medio. Para alta densidad el nivel de riesgo en general varía de medio a alto.

Para un periodo de retorno de 100 años, el riesgo calculado fue de un nivel muy bajo para un uso de suelo habitacional de baja densidad, para densidad media, un riesgo muy bajo, a excepción del distrito 4 que alcanzo un riesgo bajo. Para alta densidad el nivel de riesgo en general varía de bajo a medio.

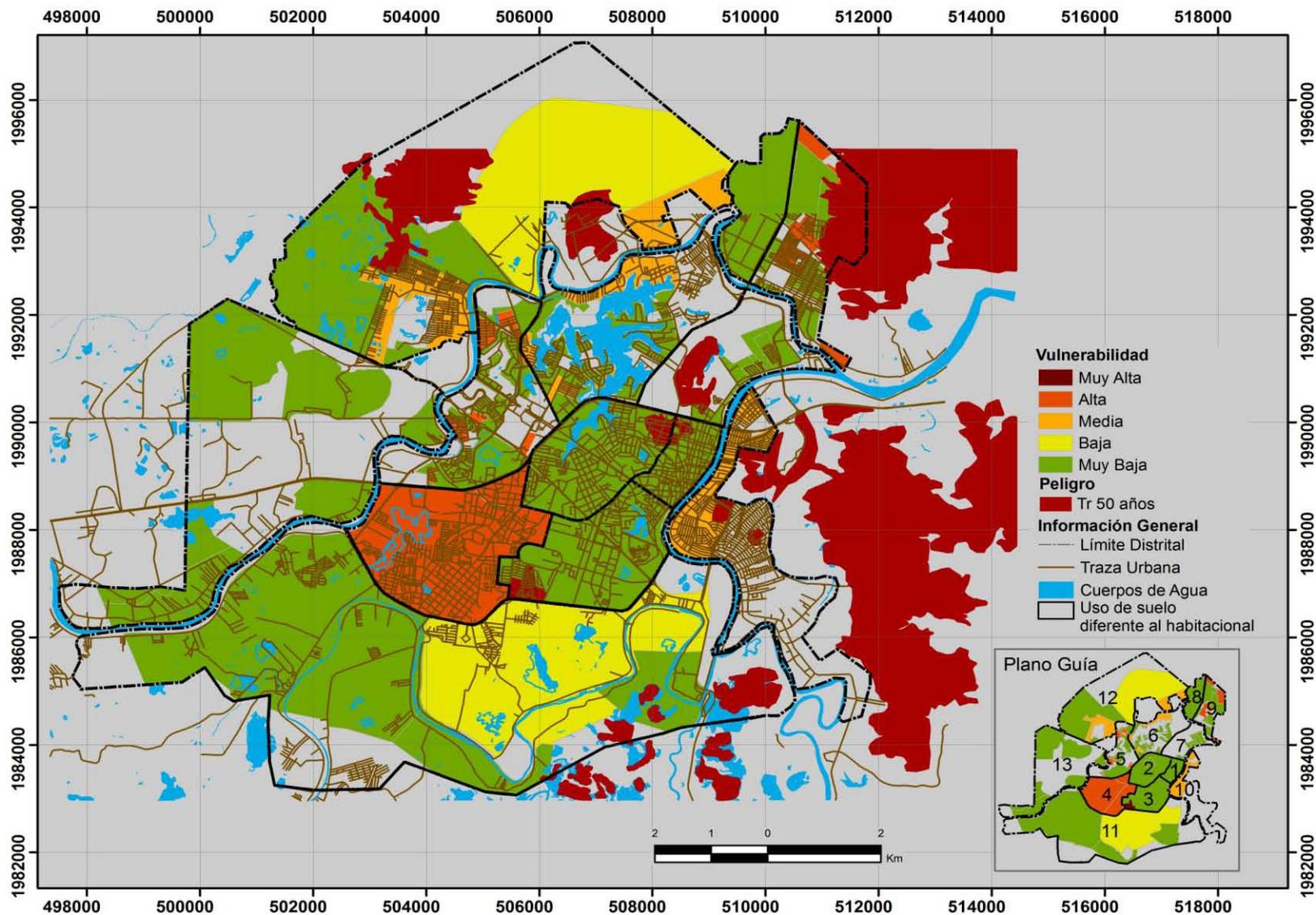
Finalmente para un periodo de retorno de 500 años, el riesgo calculado fue de un nivel muy bajo para los tres usos de suelo habitacional considerados.

Los resultados obtenidos fueron representados mediante un sistema de información geográfica (SIG), los mapas de riesgo por inundación se generaron de la superposición de las capas correspondientes a peligro y vulnerabilidad. La cartografía de riesgo por inundación para cada uno de los tres periodos de retorno se muestra en la figura 4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3.

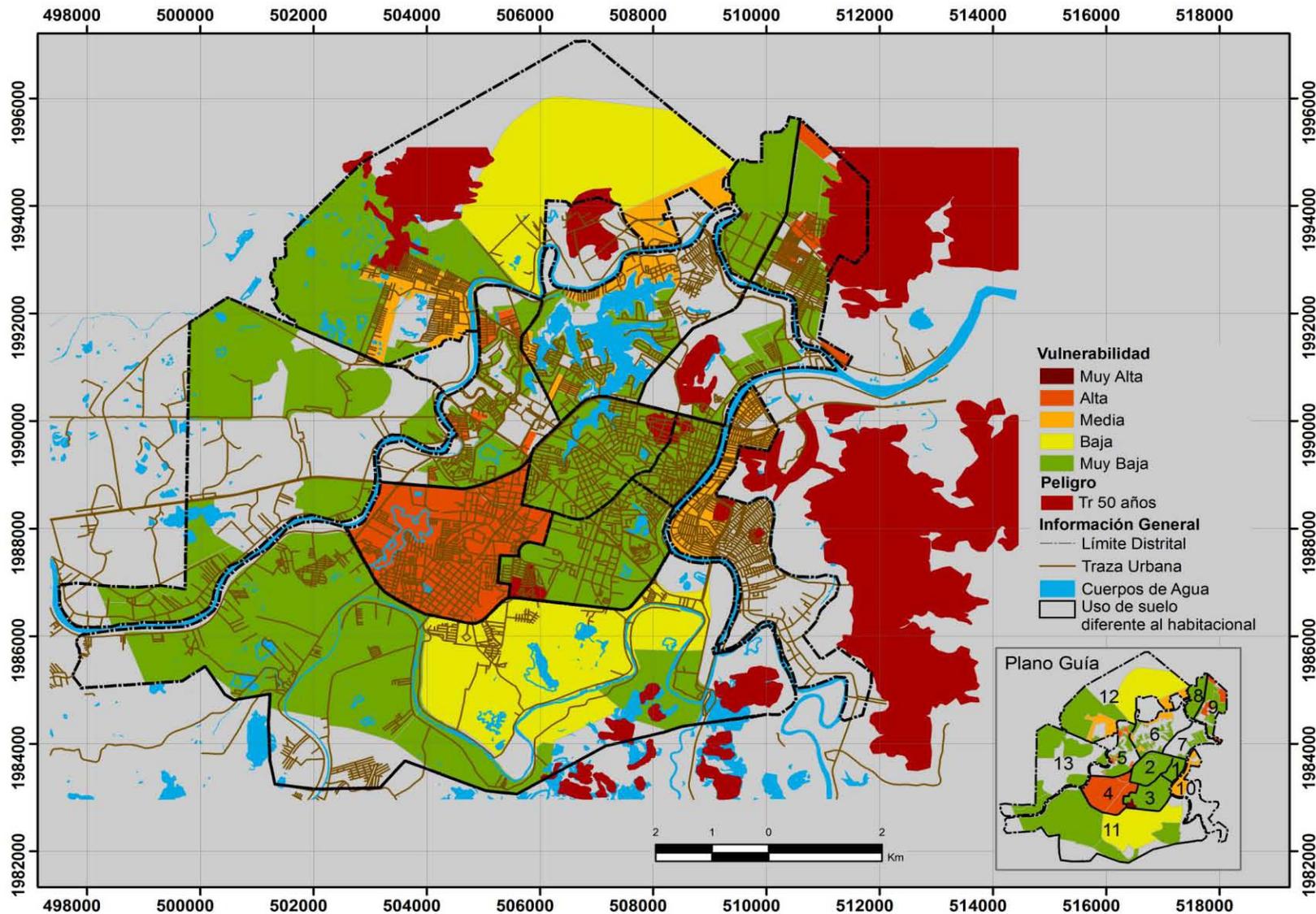
### 4.4.1 MAPA DE RIESGO POR INUNDACION PARA LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA T50 AÑOS



### 4.4.2 MAPA DE RIESGO POR INUNDACION PARA LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA T100 AÑOS



4.4.3 MAPA DE RIESGO POR INUNDACION PARA LA CIUDAD DE VILLAHERMOSA T500 AÑOS



#### 4.5 IMPACTO SOCIAL Y EN VIVIENDAS

El número de habitantes y viviendas con probabilidad de afectación ante el impacto de una inundación dependerá de la intensidad del fenómeno, la cual está representada por los periodos de retorno.

En las tablas se observan los resultados que indican el número área de afectación por distrito para cada periodo de retorno, así como el número de viviendas y la población que sería afectada en cada caso.

**Tabla 4.7 Afectación ante el impacto de un evento para un periodo de retorno de 50 años**

	Área Afectada			Viviendas Afectadas	Habitantes Afectados
<b>DISTRITO 1</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	5.8	201	749.73
<b>DISTRITO 2</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	17.25	0	150	559.5
<b>DISTRITO 3</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 4</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 5</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 6</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 7</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0.93	22	82.06
<b>DISTRITO 8</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 9</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	58.63	0	40.65	113	421.49
<b>DISTRITO 10</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	8.8	0	0	100	373
<b>DISTRITO 11</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	9.73	5.9	22.007
<b>DISTRITO 12</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	10.15	49.26	260	969.8

<b>DISTRITO 13</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0

**Tabla 4.8 Afectación ante el impacto de un evento para un periodo de retorno de 100 años**

	Área Afectada			Viviendas Afectadas	Habitantes Afectados
<b>DISTRITO 1</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	7.87	280	1044.4
<b>DISTRITO 2</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	34.45	0	300	1119
<b>DISTRITO 3</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 4</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 5</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 6</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 7</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	2.2	59	220.07
<b>DISTRITO 8</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 9</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	65.34	12.49	50.15	290	1081.7
<b>DISTRITO 10</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	15.16	0	0	150	559.5
<b>DISTRITO 11</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	52.25	0	20.81	210	783.3
<b>DISTRITO 12</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	57.51	15.18	360.33	353	1316.69
<b>DISTRITO 13</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0

**Tabla 4.9 Afectación ante el impacto de un evento para un periodo de retorno de 500 años**

	Área Afectada			Viviendas Afectadas	Habitantes afectados
<b>DISTRITO 1</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	57.86	922	3439.06
<b>DISTRITO 2</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	43.5	0	719	2681.87
<b>DISTRITO 3</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	7.5	0	100	373
<b>DISTRITO 4</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 5</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	7.8	0	0	198	738.54
<b>DISTRITO 6</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	0	0	0
<b>DISTRITO 7</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	4.1	67	249.91
<b>DISTRITO 8</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	0	0	169.5	242	902.66
<b>DISTRITO 9</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	65.34	50.3	61.4	3500	13055
<b>DISTRITO 10</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	65	0	0	1213	4524.49
<b>DISTRITO 11</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	79.3	30.12	44.8	492	1835.16
<b>DISTRITO 12</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	115.5	99.8	624	2691	10037.43
<b>DISTRITO 13</b>	Densidad Alta	Densidad Media	Densidad Baja		
	79	0	15.5	112	417.76

De los resultados mostrados en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9, es posible observar que entre mayor sea el periodo de retorno, la intensidad aumenta y por tanto la probabilidad de afectación por una inundación es mayor, así como el número de viviendas y habitantes afectados. Sin embargo, entre mayor sea el periodo de retorno y la intensidad, su probabilidad de ocurrencia es muy baja. De tal forma que aún cuando para un periodo de retorno de 50 años, las afectaciones son menores, este tiempo representa un mayor riesgo de inundación por su alta probabilidad de presentarse.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los resultados encontrados en el presente estudio se concluye que:

1. La Ciudad de Villahermosa debido a su ubicación geográfica y características topográficas tiene alta probabilidad de ser afectada por inundaciones. Por otra parte, la falta de ordenamiento y planeación urbana ha propiciado que la población se sitúe en zonas propensas a inundarse. Y ha sido la conjunción de estos elementos lo que ha permitido la existencia de una mayor probabilidad de riesgo por inundación para la ciudad.
2. Se estableció que para un periodo de retorno de 50 años, con un tirante promedio de  $3m$ , las zonas con probabilidad de ser afectadas son aquellas que se localizan a las orillas de los ríos y que tienen una elevación  $\leq 3m$ . Para un periodo de retorno de 100 años, zonas con elevaciones  $\leq 4m$  tienen mayor posibilidad de inundarse y finalmente para 500 años, las áreas sujetas a inundación serían aquellas con elevaciones  $\leq 5m$ .
3. Se determinó la probabilidad de peligro de inundación para los tres periodos de retorno. La probabilidad calculada para el periodo de retorno de 50 años, muestra que para una intensidad 1 la probabilidad de ocurrencia sería muy alta. Sin embargo, para las intensidades 2 y 3 la probabilidad de ocurrencia sería muy baja.  
Para el tiempo de retorno de 100 años, para una intensidad 1, su probabilidad de ocurrencia sería media, de igual forma para la intensidad 2 y para una intensidad 3 la probabilidad de ocurrencia sería muy baja.  
Y en el caso del tiempo de retorno de 500 años, para una intensidad 1, su probabilidad de ocurrencia sería media, para la intensidad 2 sería baja y para una intensidad 3 la probabilidad de ocurrencia sería muy baja.  
De lo anterior se puede deducir que entre menor sea la intensidad de un evento mayor será la probabilidad de ocurrencia de inundación y que la probabilidad de que ocurran eventos de mayor intensidad aumenta a su vez al aumentar el tiempo de proyección.
4. En el periodo comprendido entre 1980 – 2009 el área urbana de Villahermosa se incrementó un 209.5 %, y el incremento se dio en muchos casos de forma desordenada hacia los márgenes de los cuerpos de agua, lo cual evidencia la absoluta falta de planeación en la expansión del área urbana.

5. El nivel de vulnerabilidad considerando el uso de suelo habitacional de alta, media y baja densidad correspondió a una vulnerabilidad muy baja para uso habitacional de baja y media densidad. En el caso del uso habitacional de alta densidad, el nivel de vulnerabilidad se ubica entre media y muy alta, lo cual es resultado de una alta densidad de población y viviendas ubicadas en un área pequeña, además de un pobre nivel de ingresos.
6. El nivel de riesgo calculado para un tiempo de retorno de 50 años, fue de un nivel muy bajo para un uso de suelo habitacional de baja y media densidad, para alta densidad el nivel de riesgo en general varía de medio a alto.  
Para un tiempo de retorno de 100 años, el riesgo calculado fue de un nivel muy bajo para un uso de suelo habitacional de baja y media densidad, y para alta densidad el nivel de riesgo varía de bajo a medio.  
Finalmente para un tiempo de retorno de 500 años, el riesgo calculado fue de un nivel muy bajo para los tres usos de suelo habitacional considerados.  
De donde se puede deducir que existe disminución en el nivel del riesgo conforme aumenta el tiempo de retorno y la intensidad, aun cuando el nivel de vulnerabilidad empleado sea el mismo

Como resultado del análisis realizado se recomienda

1. La implementación de una red de estaciones climatológicas e hidrométricas que realicen un monitoreo continuo y preciso.
2. Acciones encausadas a la prevención del riesgo por inundaciones, donde trabajen de manera conjunta población y autoridades.
3. Diseño e implementación de un sistema de alerta temprana, el cual contribuya a disminuir el riesgo de inundación.
4. Desazolve continuo de los ríos, mantenimiento a las obras de protección y el fortalecimiento del sistema de cárcamos.
5. Reubicación de asentamientos irregulares ubicados en las márgenes de los ríos.

**BIBLIOGRAFÍA**

- CAMPOS A. D.**, 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Ed. Universitaria potosina. S.L.P, México, 1502 p.
- CAMPOS A.**, 2000. Educación y prevención de desastres. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED. Lima. 80 p.
- CENAPRED.**, 2004. Inundaciones. Serie fascículos. SEGOB, 51 p.
- CENAPRED.**, 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México – Atlas nacional de riesgos de la república mexicana. SEGOB - SINAPROC-CENAPRED, 2006, pp. 1-26.
- CENAPRED.**, 2006. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos - conceptos básicos sobre peligros, riesgos y su representación geográfica. SINAPROC-SEGOB – CENAPRED, 75 p.
- CHOW V. T.**, 1964. Handbook of applied hydrology: a compendium of water-resource technology. Ed. McGraw-Hill. New York, p.
- CHOW V. T.**, 1994. Hidráulica de canales abiertos. Ed. McGraw-Hill. Santa Fe de Bogota, Colombia, 667 p.
- CHOW V. T., MAIDMENT D. R., MAYS L.**, 1994. Hidrología Aplicada. Ed. McGraw-Hill. New York, 584 p.
- ESCALANTE, C., REYES L.**, 2005. Técnicas estadísticas en hidrología. Facultad de ingeniería, UNAM. México D.F., 298 p.
- FERNANDEZ M.**, 1996. ¿Cuál es el problema? Introducción a la temática. En Fernández M. A. Ciudades en riesgo: degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Lima. 142 p.
- GALINDO-ALCÁNTARA, A., RUIZ-ACOSTA S., MORALES HERNÁNDEZ A., GÓMEZ CORDERO C., SALCEDO MEZA, AGUILAR M., VALENCIA, MARTÍNEZ J. Y RODRÍGUEZ CÓRDOVA M.** (2009). Atlas de Riesgos del Municipio de Centro, Tabasco 2009. (1ª ed.). México: Ayuntamiento Municipal de Centro, Tabasco y Secretaría de Desarrollo Social.
- GREENWOOD J. et. al.**, 1979. Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expresable in inverse form. Ed. Water Resources Research 15(5):1049-1054.
- HANN C. T.**, 2002. Statistical methods in hydrology. Ed. Iowa State University Press. Ames, Iowa. 378 p.

- IMPLAN (Instituto de Planeación y Desarrollo Urbano),** 2007. Actualización del programa de desarrollo urbano sustentable del centro de población de Villahermosa, Centro, Tabasco 2007. Villahermosa, México, IMPLAN, reporte técnico.
- KITE G. W.,** 1988. Frequency and risk analyses in hydrology. Ed. Water Resources Publications. USA, 257 p.
- KOTTEGODA N. T. et. Al.,** 2008. Applied statistics for civil and environmental engineers. Ed. Blackwell Publishing. New York, 707 p.
- LAVELL, A.,** 1994. Al Norte del Río Grande, Ciencias Sociales, Desastres: una perspectiva Norteamericana. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Lima. 122 p.
- LAVELL A.,** 1996. Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. En Fernández M. A. Ciudades en riesgo: degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED. Lima. 80 p.
- LAVELL, A.,** 2004. Antecedentes, Formación y Contribución al Desarrollo de los Conceptos, Estudios y la Práctica en el Tema de los Riesgos y Desastres en América Latina: 1980-2004, La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED. Lima. 80 p.
- LAVELL, A.,** 2004. Glosario de términos y nociones relevantes para la gestión del riesgo.
- MANSILLA, E.,** 2000. Riesgo y ciudad. México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral. 181 p.
- OBREGON I.,** 1977. Teoría de la probabilidad. Ed. Limusa. México, D. F. 448 p.
- OLCINA, J., AYALA F.,** 2002. Riesgos naturales. Ed. Ariel. Barcelona, España, 1502 p.
- PÉREZ L.,** 2008. Configuración espacial de la zona metropolitana de la ciudad de Villahermosa (Tabasco, México). Análisis y perspectivas 1980-2005. Barcelona, España. Universidad de Barcelona, tesis doctoral.
- POBLETE A., AGUIAR L.,** 2002. Estructuras estadísticas de los derrames del río San Juan y el Jáchal y sus relaciones. Revista geográfica N°6 del Instituto y departamento de Geografía de la Universidad Nacional de san Juan. Argentina.
- H. AYUNTAMIENTO DE CENTRO.,** 2000. Programa de desarrollo urbano municipal centro, tabasco, versión abreviada. Periódico Oficial del Gobierno del Estado. Centro, Tabasco. 76 p.
- RAO A., HAMED K.,** 2000. Flood frequency analysis. Ed. CRC Press. Boca Raton, Florida, 350 p.
- SCHANZE J., ZEMAN E., MARSALEK J.,** 2006. Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures. Ed. Springer. Dordrecht, The Netherlands, 319 p.

- SMITH, K., WARD R.,** 1998. Floods: physical processes and human impacts. Ed. John Wiley & Sons. New York, 382 p.
- SMITH, K.,** 2004. Environmental hazards. Assessing risk and reducing disaster. Ed. Routledge. Londres. 306 p.
- STEDINGER J. et. Al.,** 1993. Frequency analysis of extreme events. Ed. McGraw-Hill. New York, p.
- VARAS E. et. Al.,** 1998. Hidrología probabilística. Ed. Universidad católica de Chile. Santiago. 156 p.
- WILCHES-CHAUX G.,** 1993. “La vulnerabilidad Global”. En Maskrey Andrew. Los desastres no son naturales. La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, La RED. Lima. 80 p.
- YEVJEVICH V. M.,** 1972. Probability and statistics in hydrology. Ed. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado. 302 p.

#### **PÁGINAS WEB CONSULTADAS**

<http://www.inegi.org.mx/inegi/default.aspx>

<http://www.desenredando.org/publicaciones/varios>

<http://villahermosa.gob.mx/portal/>

### ***Apéndice I – Tratamiento probabilístico de la información hidrológica***

Según Chow et al (1994), una variable aleatoria  $X$  es una variable descrita por una distribución de probabilidad. La distribución determina la posibilidad de que una observación  $x$  de la variable caiga en un rango especificado de  $X$ .

Las variables aleatorias son clasificadas como: variables discretas y variables continuas.

Si el conjunto de valores de una variable aleatoria puede asumirse como finito (o infinito numerable), la variable aleatoria se dice que es una variable aleatoria discreta. Por otra parte, si el conjunto de valores de la variable aleatoria se asume como infinito, la variable aleatoria se dice que es una variable aleatoria continua.

La distribución de probabilidad de una variable aleatoria describe la asignación de cierta probabilidad de ocurrencia para cada valor de una variable aleatoria discreta, o la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria continua en un cierto intervalo de valores posibles.

Un conjunto de observaciones  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  de la variable aleatoria se denomina una muestra. Se supone que las muestras son un subconjunto obtenido a partir de una hipotética población infinita que posee propiedades estadísticas constantes, mientras las muestras sólo contienen una pequeña fracción de la información de la población, por lo que diferentes muestras tomadas de la misma población pueden tener propiedades estadísticas distintas. El conjunto de todas las muestras posibles que pueden extraerse de una población se conoce como espacio muestral, y un evento es un subconjunto del espacio muestral.

Cuando se trabaja con muestras las propiedades estadísticas de esta pueden obtenerse fácilmente, pero si se desea obtener las características de la población a partir de una sola muestra el proceso se vuelve complicado debido a que no se tiene información del total de muestras que integran la población. Si se ajusta una distribución de probabilidad a una muestra se pueden estimar las propiedades estadísticas de la población.

Si tenemos un conjunto de observaciones de la variable aleatoria, y el número de observaciones  $n_i$  en el intervalo  $i$ , dentro de un determinado rango  $[x_i - \Delta x, x_i]$ , se divide por el número total de observaciones  $n$ , el resultado es conocido como frecuencia relativa.

$$f_s(x_i) = \frac{n_i}{n}$$

La suma de los valores de la frecuencia relativa hasta un punto dado, es la función de frecuencia acumulada.

$$F_s(x_i) = \sum_{j=1}^i f_s(x_j)$$

Las funciones de frecuencia relativa y acumulada están definidas para una muestra; en los límites de estas funciones, cuando  $n \rightarrow \infty$  y  $\Delta x \rightarrow 0$  se obtienen las funciones correspondientes para la población. En los límites antes mencionados si la función de frecuencia relativa es dividida por el intervalo de longitud  $\Delta x$  se denomina función de densidad de probabilidad.

$$f(x) = \lim_{\substack{n \rightarrow \infty \\ \Delta x \rightarrow 0}} \frac{f_s(x)}{\Delta x}$$

Y la frecuencia acumulada se convierte en la función de distribución de probabilidad.

$$F(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} F_s(x)$$

La distribución de probabilidad de una variable aleatoria puede ser descrita por la función de densidad de probabilidad o por la función de distribución acumulada.

### *Parámetros estadísticos*

El objetivo de la estadística es extraer la información esencial de un conjunto de datos, reduciendo un conjunto grande de números a un conjunto pequeño. Rara vez se tiene disponible una población de observaciones sobre una variable hidrológica. Generalmente se cuenta con una

muestra (de observaciones) de la población. Las cantidades que describen una población son llamadas parámetros. En la mayoría de las situaciones estos parámetros deben ser estimados a partir de muestras de datos. Las estadísticas son números calculados de una muestra los cuales resumen sus principales características.

El ajuste de una distribución se lleva a cabo calculando los parámetros de la distribución con base en las características de la muestra. El propósito de la estimación estadística de los parámetros de distribución de probabilidad es proporcionar información relacionada con fenómenos reproducibles y sus procesos, a partir de muestras de datos tanto observados como medidos. Considerando que la muestra está sujeta a errores, el método para estimar los parámetros debe garantizar un mínimo error.

Las funciones de distribución de probabilidad pueden ser escritas cómo:  $p_x(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_3)$  o  $f_x(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_3)$  para el caso continuo y discreto respectivamente, lo cual indica que en general las distribuciones son una función de un conjunto de parámetros así como de variables aleatorias. El procedimiento usual para estimar los parámetros es obtener una muestra  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  de la población X. Así  $\hat{\theta}_i$ , una estimación del parámetro  $\theta_i$ , es una función de las observaciones de variables aleatorias. Puesto que  $\hat{\theta}_i$  es una función de variables aleatorias,  $\hat{\theta}_i$  es por tanto una variable aleatoria que tiene una media, varianza y distribución de probabilidad, (Hann C., 2002).

Según Obregon (1977) y Yevjevich (1978), un estimador es un estadígrafo cuyo valor observado intentamos usar para estimar el valor de un parámetro desconocido de una función de distribución de probabilidades. De este modo, pueden ser clasificados en términos de sesgo, eficiencia, consistencia, suficiencia y eficiencia asintótica.

Se dice que un estimador  $\hat{\theta}$  de un parámetro poblacional  $\theta$  tiene sesgo nulo si su valor esperado es igual al parámetro que se intenta estimar, sea cual fuere el tamaño de la muestra.

$$E(\hat{\theta}) = \theta$$

El que un estimador tenga sesgo nulo no garantiza que  $\hat{\theta}$  sea igual a  $\theta$  o incluso cercano, simplemente significa que la media de muchas estimaciones independientes para  $\theta$  será igual a  $\theta$ .

Un estimador  $\hat{\theta}$  es más eficiente que otro si, teniendo ambos el mismo valor esperado (en particular si ambos son no sesgados), la varianza del primero es menor que la del segundo.

Se dice que el estimador  $\hat{\theta}$  de un parámetro  $\theta$  es consistente si, cuando el tamaño de la muestra tiende a infinito, su media tiende al parámetro que intenta estimar y su varianza tiende a cero (en otras palabras si converge en probabilidad al parámetro que intenta estimar).

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P(|\hat{\theta} - \theta| > \varepsilon) = 0$$

donde  $n$  es el tamaño de la muestra.

Se dice que un estimador  $\hat{\theta}$  es suficiente, si hace uso de toda la información que está contenida en la muestra.

A continuación se presentan algunas de las técnicas de estimación de parámetros más comunes en hidrología.

### *Método de los momentos*

Uno de los métodos más comúnmente usado para estimar los parámetros de una distribución de probabilidad es el método de momentos. Este método fue desarrollado por Karl Pearson en 1902 y expresa que los momentos de la muestra son buenos estimadores de los momentos de la población (Chow et al., 1994).

Para una distribución con  $m$  parámetros, el procedimiento es igualar los primeros  $m$  momentos de la distribución de probabilidad al primer momento  $m$  de la muestra. Esto se traduce en  $m$  ecuaciones que pueden ser resueltas para los  $m$  parámetros desconocidos.

Pueden ser utilizado momentos alrededor del origen, la media, o cualquier otro punto. En general, para distribuciones de 1 parámetro se utiliza el primer momento sobre el origen, la media. Para distribuciones de 2 parámetros son empleadas la media y la varianza. Si se requiere un tercer parámetro, puede ser utilizado el coeficiente de asimetría.

Los momentos de la población de una variable  $X$ , pueden considerarse respecto al origen o respecto de su valor medio. La ecuación de los momentos de orden  $r$  respecto al origen es:

$$M_r = E[X^r] = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx$$

Donde  $f(x)$  es la función de densidad de probabilidades de la población.

La ecuación de los momentos de orden  $r$  de una variable aleatoria  $X$  alrededor de la media  $\mu$ , también conocidos como momentos centrales están dados por:

$$M_r^\mu = E[(X - \mu)^r]$$

Los momentos de la muestra o estadísticos muestrales también pueden considerarse respecto al origen o respecto de su valor medio. La ecuación de los momentos de orden  $r$  respecto al origen es:

$$M'_r = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^r$$

Donde  $n$  es el número total de elementos de la muestra.

La ecuación de los momentos centrales de orden  $r$  se expresa de la siguiente forma:

$$M_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - M'_r)^r$$

En la siguiente tabla se resumen las ecuaciones para algunos momentos poblacionales y muestrales.

Parámetro de la población	Estadística de la muestra
Medida de tendencia central Media $\mu = E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Medida de dispersión Varianza $\sigma^2 = E[(x - \mu)^2]$	$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$
Coeficiente de variación $CV = \frac{\sigma}{\mu}$	$CV = \frac{s}{\bar{x}}$
Medida de simetría Coeficiente de asimetría	$g = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(n-1)(n-2)s^3}$
Medida de peakedness Coeficiente de curtosis	$k = \frac{E[(x - \mu)^4]}{(\sigma^2)^2} \quad k = \frac{n^3}{(n-1)(n-2)(n-3)} \left( \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(s^2)^2} \right)$

Yevjevich (1978), indica que el número de momentos estimados, teóricamente, puede ser infinito. En la práctica, sin embargo, sólo los primeros cuatro momentos son usados dado que la

precisión de las estimaciones (de los momentos de la muestra) decrece a medida que el orden del momento aumenta.

Según Chow (1964), la principal ventaja de este método es que conduce a ecuaciones relativamente simples que permiten el cálculo sencillo de los parámetros.

#### *Método de la máxima verosimilitud*

El otro método que se utilizará es el método de máxima verosimilitud el cual maximiza la probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada. Hacer esto, equivale a maximizar la función de verosimilitud. Este método es, teóricamente, el más correcto para calcular los parámetros de las distribuciones, pero para algunas distribuciones de probabilidad no tienen solución analítica para todos los parámetros por lo que se debe maximizar numéricamente, lo cual puede resultar bastante difícil.

Según Chow et al. (1994), este método fue desarrollado en 1922 por Ronald Fisher. Fisher propone que el mejor valor de un parámetro de una distribución de probabilidad debería ser el valor que maximizara la verosimilitud o probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada. En principio establece que si  $f(x; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$  es la función de densidad de probabilidades de una distribución con  $\theta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  parámetros que deben ser estimados. Si existe una muestra aleatoria  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  de esta función de densidad, entonces, su función de densidad conjunta es  $f(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$ . Debido a que la muestra es aleatoria, la función de densidad conjunta se puede escribir como

$$f(x_1; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) f(x_2; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) \dots f(x_n; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$$

Ahora bien, esta última expresión es proporcional a la probabilidad de una muestra aleatoria individual, que se obtendría de la población. Esta función conjunta es conocida como la función de verosimilitud, la cual puede ser escrita como:

$$L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) = \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$$

Donde los  $m$  parámetros son desconocidos.

Los valores de estos  $m$  parámetros que maximizan la probabilidad de una muestra en particular son los que se obtendría si  $n$  observaciones fueran seleccionadas al azar, estos son conocidos como estimadores de máxima verosimilitud.

Según Yevjevich (1978), el procedimiento de estimación de parámetros tiene el objetivo de encontrar el valor que maximiza la función de verosimilitud. Esto se obtiene mediante la derivada parcial de  $L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$  con respecto a cada uno de los  $\theta_i$  y las expresiones resultantes igualarlas a cero. Se obtienen, de esta forma, tantas ecuaciones como parámetros tenga la distribución de probabilidades

Frecuentemente se utiliza el logaritmo de la función de verosimilitud para simplificar el cálculo:

$$\ln L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m) = \ln \prod_{i=1}^n f(x_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)$$

Los estimadores por máxima verosimilitud presentan muy buenas propiedades estadísticas en muestras grandes y la experiencia ha mostrado que generalmente funcionan bien en los registros hidrológicos usualmente disponibles. Sin embargo, producen malas estimaciones en muestras pequeñas.

Kite (1977), indica que muchas veces estimadores por máxima verosimilitud no pueden ser reducidos a fórmulas simples, por lo que las estimaciones deben ser calculadas usando métodos numéricos.

#### *Método de momentos de probabilidad pesada*

Grenwood et al. (1979) introdujeron el método de momentos de probabilidad pesada. Señalan que una función de distribución de probabilidades  $F \equiv F(x) = P(X \leq x)$  puede ser caracterizada por momentos de probabilidad pesada, los cuales son definidos como

$$M_{i,j,k} = E[x^i F^j (1-F)^k] = \int_0^1 [x(F)]^i F^j (1-F)^k dF$$

Donde  $M_{i,j,k}$  es el momento de probabilidad pesada de orden  $(i, j, k)$ ,  $E[\bullet]$  es el operador de esperanza, e  $i, j, k$  son número reales. Si  $j = k = 0$  e  $i$  es un entero no negativo, entonces

$M_{i,0,0}$  representa el momento convencional de orden  $i$  con respecto al origen. Si  $M_{i,0,0}$  existe y  $x$  es una función continua de  $F$ , entonces  $M_{i,j,k}$  existe para todo  $j$  y  $k$  números reales no negativos. Si  $j$  y  $k$  son enteros no negativos, entonces:

$$M_r = \int_{-\infty}^{\infty} x^r f(x) dx = E(x^r)$$

$$M_{i,0,k} = \sum_{j=0}^k \binom{k}{j} (-1)^j M_{i,j,0}$$

$$M_{i,j,0} = \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} (-1)^k M_{i,0,k}$$

Si  $M_{i,0,k}$  existe y  $x$  es una función continua de  $F$ , entonces  $M_{i,j,0}$  también existe. En general, aún cuando  $M_{i,j,k}$  existe, puede ser difícil derivar su forma analítica particularmente si el inverso de la distribución,  $x = x(F)$ , no puede ser definido analíticamente. De esta forma, las expresiones más simples son obtenidas en términos de  $M_{i,0,k}$  ó  $M_{i,j,0}$  adoptando la siguiente convención para su expresión:

$$\hat{M}_{(k)} = M_{1,0,k} \text{ y } \hat{M}_{(j)} = M_{1,j,0}$$

Según Stedinger et al. (1993), para estimar  $M(k) = E[x(1-F)^k]$  y  $M_{(j)} = E[xF_j]$ , desde una muestra de tamaño  $n$  (donde  $j$  y  $k$  son números enteros no negativos), se utilizan  $\hat{M}_{\leftarrow}$  y  $\hat{M}_{(j)}$ , que son estimadores insesgados de  $M_{(k)}$  y  $M_{(j)}$ :

$$\hat{M}_{(k)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} x_i \frac{\binom{n-i}{k}}{\binom{n-1}{k}} \text{ y } \hat{M}_{(j)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-j} x_i \frac{\binom{n-i}{j}}{\binom{n-1}{j}}$$

$\hat{M}_{\leftarrow}$  y  $\hat{M}_{(j)}$  son idénticos en su expresión matemática, pero difieren en la forma de ordenar los datos. El cálculo de  $\hat{M}_{\leftarrow}$  considera los elementos  $x_i$  de la muestra ordenados en forma creciente

$(x_1 < x_2 < \dots < x_n)$ , mientras que para  $\hat{M}_{(j)}$  los elementos son ordenados en forma decreciente  $(x_1 > x_2 > \dots > x_n)$ .

A continuación se muestran las expresiones para obtener los primeros cuatro momentos:

$$\hat{M}_{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\hat{M}_{(1)} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} x_i (n-i)$$

$$\hat{M}_{(2)} = \frac{1}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-2} x_i (n-i)(n-i-1)$$

$$\hat{M}_{(3)} = \frac{1}{n(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^{n-3} x_i (n-i)(n-i-1)(n-i-2)$$

### *Método de mínimos cuadrados*

Este método consiste en ajustar una función teórica a una distribución empírica.  $f(x; a_1, a_2, \dots, a_m)$  donde  $i = 1, 2, \dots, m$  son los parámetros a estimar. El método de mínimos cuadrados obtiene los parámetros al minimizar la suma de los cuadrados de todas las desviaciones entre los valores observados y calculados, Escalante et. al (2005). Lo cual puede expresarse como:

$$S = \sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_0(i) - y_c(i)]^2$$

$$S = \sum_{i=1}^n [y_0(i) - f(x_i; a_1, a_2, \dots, a_m)]^2$$

Donde  $y_0(i)$  y  $y_c(i)$  son los valores observados y calculados de  $y$ . Y  $n > m$  es el número de observaciones. El mínimo de  $S$  se obtiene diferenciando parcialmente con respecto a cada parámetro e igualando a cero.

Y por último se plantea un sistema de ecuaciones normales las cuales al ser resueltas nos proporcionan los estimadores

$$na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 + \dots + a_m \sum x_m = \sum y_0$$

$$a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + a_3 \sum x_1 x_3 + \dots + a_m \sum x_1 x_m = \sum x_1 y_0$$

$$a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_3 \sum x_2 x_3 + \dots + a_m \sum x_2 x_m = \sum x_2 y_0$$

$$a_0 \sum x_m + a_1 \sum x_1 x_m + a_2 \sum x_2 x_m + a_3 \sum x_3 x_m + \dots + a_m \sum x_m^2 = \sum x_m y_0$$

### *Método de los momentos L*

Los L momentos son análogos a los momentos convencionales, su ventaja es que pueden caracterizar a un mayor número de distribuciones y son no sesgados aun cuando las muestras sean pequeñas. Son combinaciones lineales de momentos ponderados por probabilidad que tienen interpretaciones simples como medidas de localización, dispersión y forma, de los datos de la muestra o de la población.

Los primeros cuatro momentos son:

$$\lambda_1 = \beta_0$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$$

$$\lambda_4 = 2 + 0\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0$$

Donde  $\beta_r = M_{i,r,0} = \int_0^1 x F^r dF$

El primer L momento es la media. El segundo L momento es una medida de dispersión respecto a la media.

Las relaciones entre los momentos L se obtiene de  $\tau_m = \frac{\lambda_i}{\lambda_j}$  donde  $j = i - 1$ .

Estas son cantidades adimensionales e independientes de la unidad de medida de los datos. Así,  $\tau_2$  es una medida de variación,  $\tau_3$  es una medida de sesgo y  $\tau_4$  es una medida de la curtosis, y por ello, son denominadas coeficiente de variación L, coeficiente de sesgo l y coeficiente de curtosis l, respectivamente.

*Método del principio de máxima entropía*

La entropía es una medida numérica de la incertidumbre o contenido de información asociada con una función de densidad de probabilidad  $f(x)$ , la cual describe el comportamiento de la variable  $X$  (Shannon, 1948 en Escalante et. al (2005)).

$$I[f] = I[x] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx$$

Donde  $I[f]$  puede considerarse como la media de  $\ln f(x)$ .

*Distribuciones de probabilidad para las variables hidrológicas*

El comportamiento de las variables aleatorias discretas o continuas se describe con la ayuda de distribuciones de probabilidad. Las distribuciones de probabilidad utilizadas en hidrología son numerosas, pero una revisión somera permitirá la observación de algunas tendencias. A continuación se describen las principales distribuciones de probabilidad utilizadas en hidrología, la forma de estimar sus parámetros, el factor de frecuencia y los límites de confianza; estos últimos son indicadores de que tanta incertidumbre se tiene con las extrapolaciones, puesto que determinan el rango de valores donde realmente estaría la variable, si el rango es muy grande la incertidumbre es muy alta y si es pequeño, por el contrario, habrá mucha confianza en el valor estimado. Finalmente se obtiene para cada distribución el error estándar o desviación estándar, el cual es una medida de la variabilidad de las magnitudes resultantes del evento.

A continuación se dan las expresiones para calcular algunas distribuciones, Escalante et al. (2005).

*Distribuciones discretas*

Una distribución discreta se utiliza para modelar una variable aleatoria  $X$  que tiene, a lo sumo, un espacio muestral contables sobre un rango de valores, (Kottegoda et al., 2008).

En ocasiones el interés se centra en un experimento que consiste en un único ensayo y el resultado se considera que pertenecen a una de dos categorías (éxito o fracaso). En estos casos el modelo de probabilidad que describe el evento está asociado con un simple ensayo discreto tal

como ocurre en la distribución Bernoulli. Distribuciones derivadas del proceso de Bernoulli asociadas a este tipo de ensayos discretos son las distribuciones binomial, geométrica, la distribución de Poisson y la distribución hipergeométrica.

### Distribución Bernoulli

La distribución Bernoulli es el modelo discreto más simple y útil, en el cuál la variable aleatoria tiene solo dos estados posibles: uno de ocurrencia del suceso o éxito y uno de no ocurrencia o fracaso.

Sea  $x$  la variable aleatoria, si ocurre un éxito en la realización del experimento, se acostumbra asignarle un valor unitario a la variable aleatoria y un valor nulo si ocurre un fracaso. La distribución de las probabilidades de los dos resultados se llama una distribución de Bernoulli. Por otra parte, una serie de estos ensayos se dice que constituyen un proceso de Bernoulli, donde un proceso es caracterizado por el comportamiento del sistema en el tiempo o el espacio. Los criterios que rigen son las siguientes:

1. Solo existen dos resultados posibles: éxito o fracaso;
2. La probabilidad de ocurrencia de éxito (o fracaso) es constante;
3. Los ensayos son independientes (es decir, el resultado de un ensayo no depende del resultado de otro).

La función probabilidad de masa de la distribución es

$$f(x) = P_X(x) \equiv \Pr[X = x|p] = p^x(1-p)^{1-x}$$

$$\text{para } x = 0,1 \text{ y } 0 \leq p \leq 1$$

$$= 0 \text{ en otro caso.}$$

Donde  $p$  es la probabilidad de tener éxito en una sola prueba y  $1-p$  la probabilidad de un fracaso.

Las propiedades de esta distribución como la media, varianza y función generadora de momentos se muestran a continuación.

$$\mu = p$$

$$\sigma^2 = 1-p$$

$$M(t) = (1 - p) + pe^t$$

### *Distribución Binomial*

Este modelo surge al representar la realización de  $n$  ensayos independientes tipo Bernoulli. La variable aleatoria  $K$  se define como el número de éxitos que ocurren en los  $n$  ensayos. Entonces, se dice que la variable  $K$  tiene una distribución binomial, cuya función de probabilidad queda dada por la expresión:

$$f(x) = P(X = x) = \binom{n}{x} p^x q^{n-x} = \frac{n!}{x!(n-x)!}$$

Las propiedades de esta distribución como la media, varianza, sesgo, curtosis, función generadora de momentos y función característica se listan a continuación.

$$\mu = np$$

$$\sigma^2 = npq$$

$$\gamma = \frac{q - p}{\sqrt{npq}}$$

$$k = 3 + \frac{1 - 6pq}{\sqrt{npq}}$$

$$M(t) = (q + pe^t)^n$$

$$C(\theta) = (q + pe^{i\theta})^n$$

En resumen, para que una variable aleatoria tenga una distribución binomial, son necesarias las siguientes consideraciones

1. Debe llevarse a cabo una serie de ensayos Bernoulli, cada uno de los cuales solo tiene uno de los dos resultados posibles, éxito o fracaso.
2. Los ensayos son llevados a cabo bajo las mismas condiciones y la probabilidad  $p$  de éxito es constante.
3. El número de ensayos  $n$  es fijo.
4. Los resultados de los ensayos son independientes.

5. La variable aleatoria  $K$  es el número de éxitos que ocurren en  $n$  ensayos y el orden en el cual ocurren los eventos en los ensayos es irrelevante.

### *Distribución de Poisson*

Esta distribución se basa también en la ocurrencia de un éxito en una serie de ensayos idénticos e independientes.

Se considera la distribución de Poisson como el límite de la distribución binomial, donde si  $p$  es pequeño y  $n$  tiende a infinito, tal que  $p \cdot n = \lambda$  donde  $\lambda$  es un número positivo, entonces la función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = P(X = x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}$$

Donde

$$\lambda = np$$

$$\mu = \lambda$$

$$\sigma^2 = \lambda$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$$

$$k = 3 + \frac{1}{\lambda}$$

$$M(t) = e^{\lambda(e^t - 1)}$$

$$C(\theta) = e^{\lambda(e^{i\theta} - 1)}$$

La distribución de Poisson permite en general representar situaciones en las cuales hay una enumeración, ya que la variable toma valores positivos. Un posible ejemplo de utilización de esta distribución son el número de intervalos de lluvia en un temporal.

### *Distribución geométrica*

Esta distribución está basada en la realización de pruebas de Bernoulli. La distribución geométrica es la distribución de la variable aleatoria  $X$ , donde  $X$  es el número de pruebas o número de fracasos hasta que aparece el primer éxito.

La función se representa por

$$f(x) = pq^{x-1} \quad 0 < p < 1 \text{ y } x = 1, 2, \dots$$

y

$$\mu = \frac{1}{p}, \quad \sigma^2 = \frac{q}{p^2}$$

### *Distribución hipergeométrica*

Supongamos que una muestra de tamaño  $n$  se extrae sin reemplazo, como parte de un experimento aleatorio, de una población que contiene  $N$  elementos.

Dentro del espacio de la muestra de  $N$  elementos, consideramos que hay un total de  $r$  elementos de un tipo y  $a = N - r$  elementos de un segundo tipo. La distribución hipergeométrica es la distribución de la variable aleatoria  $X$  de interés, donde  $X$  es el número de elementos del primer tipo (o éxitos obtenidos en las  $n$  observaciones al azar de la población sin reemplazo).

$$f(x) = P(X = x) = \frac{\binom{r}{x} \binom{N-r}{n-x}}{\binom{N}{n}}$$

Donde  $x = 0, 1, 2, \dots, n$  sujeto a  $x \leq r$ ,  $n - x \leq N - r$

$$\mu = \frac{nr}{N}$$

$$\sigma^2 = \frac{nr(N-r)(N-n)}{N^2(N-1)}$$

*Distribuciones continuas*

Estas distribuciones son aplicables cuando la variable aleatoria  $X$  puede tomar cualquier valor dentro de cierto rango, (Kottegoda N. T. et. Al., 2008). El flujo en un río es un ejemplo de este tipo de variable aleatoria. Las distribuciones continuas más importantes son la uniforme, exponencial, normal, log normal y valores extremos por mencionar algunas.

*Distribución Uniforme*

El tipo más simple de distribución continua es la uniforme. Como su nombre lo indica, la función de densidad de probabilidad es constante en un intervalo dado, por ejemplo: de  $\alpha$  a  $\beta$ , donde  $\alpha < \beta$  y toma la forma

$$f_x(x) = \frac{1}{|\beta - \alpha|} \text{ para } \alpha \leq x \leq \beta$$

$$= 0 \text{ en otro caso.}$$

$$\mu = \frac{\alpha + \beta}{2}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{12}(\beta - \alpha)^2$$

Estimadores por momentos

$$\hat{\alpha} = \bar{x} - \sqrt{3}S$$

$$\hat{\beta} = \bar{x} + \sqrt{3}S$$

Estimadores por momentos

$$\hat{\alpha} = \text{mín}\{x\}$$

$$\hat{\beta} = \text{máx}\{x\}$$

### *Distribución normal*

La distribución Normal es el modelo más utilizado y con mayor importancia en el campo de la estadística (Varas y Bois, 1998). Sin embargo, su uso es muy limitado en hidrología, dado que las variables raramente se comportan de esta forma.

Una aplicación inicial de la distribución normal a variables hidrológicas fue realizada por Hazen (1914), que presentó el artículo de probabilidad normal para el análisis de datos hidrológicos. Markovi (1965) encontró que la distribución normal podría ser utilizada para ajustar la distribución de las precipitaciones anuales y los datos de escorrentía. Slack et al. (1975) demostró que, en ausencia de información sobre la distribución de las inundaciones y las pérdidas económicas asociadas con el diseño de medidas de reducción de inundaciones, la utilización de la distribución normal es mejor que otras distribuciones como valor extremo, log-normal o Weibull.

La distribución normal es una distribución simétrica, que se define como:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$

Donde la función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

$\sigma$  es un parámetro de escala y  $\mu$  es un parámetro de ubicación.

La distribución normal es el caso límite de muchas distribuciones. Esta distribución surge del teorema del límite central, el cual establece que la distribución de la suma de  $n$  variables aleatorias, con media y varianza definidas, se aproxima a una distribución normal a medida que  $n$  crece. Para variables aleatorias provenientes de distribuciones cualesquiera.

Las variables hidrológicas, como la precipitación anual, calculadas como la suma de los efectos de muchos eventos independientes tienden a seguir esta distribución. Una de sus principales limitaciones en la descripción de variables hidrológicas se debe a que ésta varía dentro de un rango continuo  $[-\infty, \infty]$  y es simétrica, mientras que la mayor parte de las variables hidrológicas son no negativas y tienen un comportamiento asimétrico.

Las propiedades de esta distribución como la media, varianza, sesgo, curtosis, función generadora de momento y función característica se presentan a continuación:

$$\mu = E(x)$$

$$\sigma^2 = E[(x - \mu)^2]$$

$$\gamma = 0$$

$$k = 3$$

$$M(t) = e^{\mu t + \frac{\sigma^2 t^2}{2}}$$

$$C(\theta) = e^{i\mu\theta - \frac{\sigma^2 \theta^2}{2}}$$

Los estimadores por momentos y máxima verosimilitud

$$\hat{\mu} = \bar{x}$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

Los estimadores por momentos-L

$$\hat{\mu} = \lambda_1$$

$$\hat{\sigma}^2 = 1.772\lambda_2$$

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T = \hat{\mu} + \hat{\sigma}U_T$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos y máxima verosimilitud

$$S_T = \left[ 1 + \frac{U_T^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}}$$

Donde  $n$  es el tamaño de la muestra analizada

Para una probabilidad acumulada  $0 < \frac{1}{T} \leq 0.5$

$$U_T \approx v - \frac{b_0 + b_1v + b_2v^2}{1 + b_3v + b_4v^2 + b_5v^3}$$

Donde

$$b_0 = 2.515517$$

$$b_1 = 0.802853$$

$$b_2 = 0.010328$$

$$b_3 = 1.432788$$

$$b_4 = 0.189269$$

$$b_5 = 0.001308$$

$$v = \sqrt{\ln \left\{ \frac{1}{[F(x)]^2} \right\}}$$

Para una probabilidad acumulada  $0.5 < \frac{1}{T} \leq 1$  se cambia  $F(x)$  por  $[1 - F(x)]$  y el signo al valor

de  $U_T$ ,  $F(x) = \frac{1}{T}$  y  $T$  es el periodo de retorno en años.

### *Distribución Log Normal*

Las variables físicas de interés en hidrología (precipitación, caudal, evaporación entre otras) son generalmente positivas, por lo cual es usual que presenten distribuciones asimétricas. Así, se ha propuesto aplicar una transformación logarítmica (Varas y Bois, 1998), donde si la variable aleatoria  $Y = \log X$  esta normalmente distribuida, entonces se dice que  $X$  está distribuida en forma log-normal y se define por

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2} dx$$

Donde la función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2}, x > 0$$

Donde

$\mu_y$  es el parámetro de ubicación

$\sigma_y$  es el parámetro de escala

$\gamma > 0$

Chow (1964) proporcionó una justificación teórica para el uso de esta distribución señalando que los factores causantes de muchas variables hidrológicas actúan de forma multiplicativa más que de forma aditiva. La variable hidrológica será, en consecuencia, el producto de estos factores causantes. Estudios realizados por Poblete *et al.*, (2002), identifican a la función Log-Normal, entre otras funciones, como la que presenta mejor bondad de ajuste a series de caudales anuales.

Los estimadores por momentos y máxima verosimilitud

$$\hat{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i$$

$$\hat{\sigma}_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \hat{\mu}_y)^2}{n}$$

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T = \exp(\hat{\mu}_y + \hat{\sigma}_y U_T)$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos

$$S_T = \left[ 1 + \frac{U_T^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{\hat{\sigma}_y}{\sqrt{n}}$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por máxima verosimilitud

$$S_T = \hat{\sigma}_y \hat{X}_T \left[ \frac{1 + \frac{U_T^2}{2}}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

### *Distribución Log Normal con 3 parámetros*

Según Kite (1977), si la distribución log-normal representa la distribución normal de los logaritmos de la variable  $X$ , entonces, la distribución log normal de 3 parámetros representa la distribución normal del logaritmo de la variable reducida  $\ln(x - x_0)$ , donde  $x_0$  es un límite inferior.

La función de densidad de probabilidades es:

$$f(x) = \frac{1}{(x - x_0)\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(x - x_0) - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2}, x > x_0$$

Donde

$x_0$  es el parámetro de ubicación

$\mu_y$  es el parámetro de forma

$\sigma_y$  es el parámetro de escala

Si el límite inferior es conocido, entonces la variable reducida puede ser determinada y es posible usar los mismos procedimientos de estimación de parámetros descritos para la distribución log normal. Si el límite inferior es desconocido, entonces la estimación de este parámetro precede la estimación de los parámetros  $\mu_y$  y  $\sigma_y$  (Yevjevich, 1978).

Estimadores por momentos

$$\hat{x}_0 = \bar{x} \left( 1 - \frac{\hat{n}_x}{\hat{n}_z} \right)$$

Donde

$$\hat{n}_x = \frac{S}{\bar{x}}$$

$$\hat{n}_z = \frac{1 - w^{2/3}}{w^{1/3}}$$

$$w = \frac{(g^2 + 4)^{1/2} - g}{2}$$

$$\hat{\mu}_y = \ln\left(\frac{S}{\hat{n}_z}\right) - \frac{1}{2} \ln(\hat{n}_z^2 + 1)$$

$$\hat{\sigma}_y = [\ln(\hat{n}_z^2 + 1)]^{1/2}$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\hat{\mu}_y = \sum_{i=1}^n \frac{\ln(x_i - \hat{x}_0)}{n}$$

$$\hat{\sigma}_y = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} [\ln(x_i - x_0) - \hat{\mu}_y]^2$$

El parámetro  $\hat{x}_0$  puede ser obtenido por métodos iterativos desarrollando la ecuación:

$$F(\hat{x}_0) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)} (\hat{\mu}_y - \hat{\sigma}_y^2) - \sum_{i=1}^n \left\{ \left[ \frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)} \right] \ln(x_i - \hat{x}_0) \right\} = 0$$

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T = \hat{x}_0 + \exp(\hat{\mu}_y + \hat{\sigma}_y U_T)$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos

$$S_T = \frac{\hat{\sigma}_y}{\sqrt{n}} \left[ 1 + \frac{U_T^2}{2} \right]^{1/2}$$

*Distribución Exponencial con parámetros  $\beta$  y  $x_0$* 

Esta distribución es un caso especial de las distribuciones de la familia Gamma la cual incluye: la distribución Pearson III, Gamma de 1 y 2 parámetros, Log Pearson y las distribuciones generalizadas de Gamma.

En hidrología y en la gestión del agua ha sido exitosamente aplicada en el tratamiento estadístico de los caudales máximos en un período determinado (Votruba and Broga, 1966).

La función de densidad de probabilidad de la distribución Pearson III es dada por

$$f(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} (x - x_0)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \quad \text{donde, la distribución exponencial es obtenida considerando}$$

$$\beta = 1.$$

$\Gamma(\cdot)$  es la función gamma definida por  $\Gamma(y+1) = \int_0^\infty t^y e^{-t} dt$ ,  $y+1 > 0$

La variable  $x$  puede tomar cualquier valor entre  $x_0 < x < \infty$ , donde  $x_0$  es el límite inferior. La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)}$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)}$$

Donde

$x_0$  es el parámetro de ubicación

$\alpha$  es el parámetro de escala

$$\mu = x_0 + \alpha$$

$$\sigma^2 = \alpha^2$$

$$\gamma = 2$$

Estimadores por momentos

$$\hat{\alpha} = S$$

$$\hat{x}_0 = \bar{x} - S$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{(1)})}{n-1}$$

$$\hat{x}_0 = x_{(1)} - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{(1)})}{n-1} \left( \frac{1}{n} \right) = x_{(1)} - \frac{\hat{\alpha}}{n}$$

Donde  $x_{(1)}$  es el primer valor de la muestra ordenada de menor a mayor.

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T = \hat{x}_0 + \hat{\beta} \log(T)$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos

$$S_T^2 = \frac{\hat{\alpha}^2 \hat{\beta}}{n} [1 + 2k_T + 2k_T^2]$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por máxima verosimilitud

$$S_T^2 = \frac{\hat{\beta}^2}{n} [1 + 2k_T + \frac{2nk_T^2}{n-1}]$$

Donde

$$k_T = \log(T) - 1$$

### *Distribución Gamma con 2 parámetros*

La distribución Gamma es la distribución de una suma de  $\beta$  variables aleatorias independientes e idénticas, distribuidas exponencialmente. Es muy útil en la descripción de variables hidrológicas asimétricas sin el uso de la transformación log.

Tiene límite inferior igual a 0, lo cual es una desventaja cuando se usa para analizar variables que tiene un límite superior mayor a 0.

La distribución Gamma (o más precisamente la distribución Gamma incompleta) fue utilizado por Barger y Thom en el procesamiento de series de tiempo de precipitación (Kendal, 1970). Además, se han previsto aplicaciones en la gestión del agua debido a la posibilidad de realizar muchas combinaciones a partir de sus dos parámetros lo cual tendría un efecto pronunciado en la forma de la función de distribución de probabilidad.

Esta distribución es un caso especial de la distribución Pearson III.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} (x - x_0)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \quad \text{donde, la distribución es obtenida considerando } x_0 = 0.$$

La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} dx$$

$$f(x) = \frac{x^{\beta-1} e^{-x/\alpha}}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} \quad \begin{array}{l} 0 \leq x < \infty \\ \text{si } \alpha > 0 \rightarrow \gamma > 0 \\ \gamma > 0 \end{array}$$

Donde

$\alpha$  es el parámetro de escala

$\beta$  es el parámetro de forma

$\Gamma(\beta)$  Función Gamma completa

Además

$$\mu = \beta\alpha$$

$$\sigma^2 = \alpha^2 \beta$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$$

Estimadores por momentos

$$\hat{\alpha} = \frac{S^2}{\bar{x}}$$

$$\hat{\beta} = \left( \frac{\bar{x}}{S} \right)^2$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\hat{\alpha} = \frac{\bar{x}}{\hat{\beta}}$$

El estimador  $\hat{\beta}$  se obtiene al resolver

$$F(\hat{\beta}) = \hat{\mu}_y - \ln(\hat{\mu}_x) + \ln(\hat{\beta}) - \psi(\hat{\beta}) = 0$$

Empleando como valor inicial del parámetro  $\hat{\beta}$

$$\hat{\beta} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3}c}}{4c}$$

$$c = \ln(\bar{x}) - \bar{y}$$

La aproximación Thom de la función digamma de  $\hat{\beta}$  es

$$\psi(\hat{\beta}) \approx \ln(\hat{\beta}) - \frac{1}{2\hat{\beta}} - \frac{1}{12(\hat{\beta})^2}$$

Estimadores por momentos -L

$$\tau_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

Para  $0 \leq \tau_2 < 0.5$

$$\hat{\beta} = (1 - 0.308z) / (z - 0.05812z^2 + 0.01765z^3)$$

$$z = \pi \tau_2^2$$

Para  $0.5 \leq \tau_2 < 1$

$$\hat{\beta} = (0.7213z - 0.5947z^2) / (1 - 2.1817z + 1.2113z^2)$$

$$z = 1 - \tau_2$$

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T = \hat{\alpha}\hat{\beta} + k_T \sqrt{\hat{\alpha}^2 \hat{\beta}}$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos

$$S_T^2 = \frac{\hat{\alpha}^2 \hat{\beta}}{n} \left[ (1 + k_T + C_v)^2 + \frac{1}{2} \left( k_T + 2C_v \frac{\partial k_T}{\partial \gamma} \right)^2 (1 + C_v^2) \right]$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por máxima verosimilitud

$$S_T^2 = \frac{\hat{\alpha}^2 \hat{\beta}}{n} \delta_T$$

Donde

$$\delta_T = \frac{1}{\beta \eta} \left[ (\beta \psi - 1) \left( \frac{1 + \varepsilon k_T}{\sqrt{\beta}} \right)^2 + \frac{k_T^2}{4\beta} + \frac{1}{\beta^2} \left( \frac{\partial k_T}{\partial \gamma} \right)^2 + \frac{\varepsilon k_T}{\beta \sqrt{\beta}} \frac{\partial k_T}{\partial \gamma} \right]$$

### *Distribución Pearson tipo III*

Esta distribución también llamada distribución Gamma con 3 parámetros, introduce un límite inferior  $x_0$ , de manera que se tiene un total de tres parámetros  $\beta, \alpha, x_0$ .

La distribución Pearson tipo III se aplico por primera vez en la hidrología por Foster en 1924, para describir la distribución de probabilidad de picos de crecientes máximos anuales. Es una distribución muy flexible, que puede asumir diferentes formas a medida que los parámetros varían, de gran utilidad para describir la probabilidad de avenidas máximas anuales, Chow *et al.*, (1994).

Cuando la información es muy asimétrica positivamente, se utiliza una transformación log para reducir la asimetría.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left( \frac{x-x_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)} \quad \begin{array}{l} \alpha > 0 \\ x_0 \leq x < \infty \\ \gamma > 0 \end{array}$$

Donde

$x_0$  es el parámetro de ubicación

$\beta$  es el parámetro de forma

$\alpha$  es el parámetro de escala

$$\mu = x_0 + \beta\alpha$$

$$\sigma^2 = \alpha^2\beta$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta}}$$

$$k = 3 \left( 1 + \frac{\gamma^2}{2} \right)$$

Estimadores por momentos

$$\hat{\beta} = \frac{4}{g^2}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{S}{\sqrt{\hat{\beta}}}$$

$$\hat{x}_0 = \bar{x} - S\sqrt{\hat{\beta}}$$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\hat{\beta} = \frac{1}{n^2 \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_0) \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)} \right]}{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_0)} \right]}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_0) - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{(x_i - \hat{x}_0)} \right]}$$

El estimador  $\hat{x}_0$  se obtiene al resolver

$$\frac{\partial L_n L}{\partial \beta} = F(\hat{x}_0) = \sum_{i=1}^n \ln(x_i - \hat{x}_0) - n \ln(\hat{\alpha}) - n \psi(\hat{\beta}) = 0$$

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T \approx \hat{x}_0 + \hat{\alpha} \hat{\beta} \left\{ 1 - \frac{1}{9\hat{\beta}} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\hat{\beta}}} \right\}^3$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos

$$S_T = \left\{ \frac{\hat{\mu}_2}{n} \left[ 1 + k_T \hat{\gamma} + \frac{k_T^2}{2} \left( \frac{3\hat{\gamma}^2}{4} + 1 \right) + 3k_T \frac{\partial k_T}{\partial \hat{\gamma}} \left( \hat{\gamma} + \frac{\hat{\gamma}^3}{4} \right) + 3 \left( \frac{\partial k_T}{\partial \hat{\gamma}} \right)^2 \left( 2 + 3\hat{\gamma}^2 + \frac{5\hat{\gamma}^4}{8} \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$k_T = U_T + (U_T^2 - 1) \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right) + \frac{1}{3} (U_T^3 - 6U_T) \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right)^2 - (U_T^2 - 1) \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right)^3 + U_T \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right)^4 + \frac{1}{3} \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right)^5$$

$$\frac{\partial k_T}{\partial \hat{\gamma}} = \frac{1}{6} \left\{ (U_T^2 - 1) \left[ 1 - 3 \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right)^2 \right] + 4U_T \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right)^3 \right\} + \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right) \left( \frac{1}{6} \right) \left\{ 4(U_T^3 - 6U_T) - 10 \left( \frac{\hat{\gamma}}{6} \right)^3 \right\}$$

Donde  $\hat{\mu}_2$  y  $\hat{\gamma}$  son la varianza y el coeficiente de asimetría estimados de la muestra analizada.

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por máxima verosimilitud

$$S_T = \left\{ \begin{aligned} & \left( \frac{\partial x}{\partial \hat{\alpha}} \right)^2 \text{var } \hat{\alpha} + \left( \frac{\partial x}{\partial \hat{\beta}} \right)^2 \text{var } \hat{\beta} + \left( \frac{\partial x}{\partial \hat{x}_0} \right)^2 \text{var } \hat{x}_0 + 2 \frac{\partial x}{\partial \hat{\alpha}} \frac{\partial x}{\partial \hat{\beta}} \text{Cov}(\hat{\alpha}, \hat{\beta}) \\ & + 2 \frac{\partial x}{\partial \hat{\alpha}} \frac{\partial x}{\partial \hat{x}_0} \text{Cov}(\hat{\alpha}, \hat{x}_0) + 2 \frac{\partial x}{\partial \hat{\beta}} \frac{\partial x}{\partial \hat{x}_0} \text{Cov}(\hat{\beta}, \hat{x}_0) \end{aligned} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

## Distribución Log Pearson tipo III

Chow *et al.*, (1994), señalan que esta distribución posee una gran flexibilidad y diversidad de forma, dependiendo de los valores de sus parámetros, asimilando su utilización para precipitaciones o caudales máximos anuales.

Si  $\log X$  sigue una distribución Pearson tipo III se dice que  $X$  sigue una distribución log Pearson tipo III. Esta es la distribución estándar para el análisis de frecuencia de crecientes máximas anuales en los Estados Unidos.

La localización del límite  $y_0$  en la distribución log Pearson tipo III depende de la asimetría de la información. Si esta tiene asimetría positiva, entonces  $\log X \geq y_0$  y  $y_0$  es un límite inferior, mientras que la información tiene asimetría negativa,  $\log X \leq y_0$  y  $y_0$  es un límite superior.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta) x} \left( \frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{\ln x - y_0}{\alpha} \right)} \quad \begin{array}{l} 0 < x < \infty \\ \gamma > 0 \end{array}$$

Donde

$y_0$  es el parámetro de ubicación

$\beta$  es el parámetro de forma

$\alpha$  es el parámetro de escala

Para  $\beta > 1$  entonces  $\frac{1}{\alpha} > 0$

Estimadores por momentos (método directo)

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{A + 3}$$

$$\mu_r = \sum_{i=1}^n \frac{x_i^r}{n} \quad r = 1, 2, 3$$

$$B = \frac{\ln(\hat{\mu}_3) - 3 \ln(\hat{\mu}_1)}{\ln(\hat{\mu}_2) - 3 \ln(\hat{\mu}_1)}$$

$$c = \frac{1}{B - 3}$$

Si  $3.5 < B \leq 6$

$$A = -0.23019 + 1.65262c + 0.20911c^2 - 0.04557c^3$$

Si  $3 < B \leq 3.5$

$$A = -0.45157 + 1.99955c$$

$$\hat{\beta} = \frac{\ln(\hat{\mu}_2) - 2\ln(\hat{\mu}_1)}{\ln(1-\hat{\alpha})^2 - \ln(1-2\hat{\alpha})}$$

$$\hat{y}_0 = \ln(\hat{\mu}_1) - \hat{\beta} \ln(1-\hat{\alpha})$$

Estimadores por momentos (método indirecto)

$$\hat{\beta} = \frac{4}{g_y^2}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{S_y}{\sqrt{\hat{\beta}}}$$

$$\hat{y}_0 = \bar{y} - S_y \sqrt{\hat{\beta}}$$

Donde  $\bar{y}, S_y, g_y$  son los estadísticos de la serie  $y_i = \ln(x_i)$

Estimadores por máxima verosimilitud

$$\hat{\beta} = \frac{1}{1 - \frac{n^2}{\sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - \hat{y}_0] \sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\ln(x_i) - \hat{y}_0} \right]}}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - \hat{y}_0] - \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{1}{\ln(x_i) - \hat{y}_0} \right]}$$

El estimador  $\hat{y}_0$  se obtiene al resolver

$$F(\hat{y}_0) = \sum_{i=1}^n [\ln(x_i) - \hat{y}_0] - n \ln(\hat{\alpha}) - n \psi(\hat{\beta}) = 0$$

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T = \exp \left( \hat{x}_0 + \hat{\alpha} \hat{\beta} \left\{ 1 - \frac{1}{9\hat{\beta}} + U_T \sqrt{\frac{1}{9\hat{\beta}}} \right\}^3 \right)$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos

$$S_{T,x} = \frac{\hat{X}_T (e^{S_{T,y}} - e^{-S_{T,y}})}{2}$$

*Distribución de valores extremos tipo I (Gumbel)*

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\nu}{\alpha}}}$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left(\frac{x-\nu}{\alpha}\right)} e^{-e^{-\left(\frac{x-\nu}{\alpha}\right)}} \quad -\infty < x < \infty, \alpha > 0$$

Donde

$\nu$  es el parámetro de ubicación

$\alpha$  es el parámetro de escala

$$E(x) = \nu + 0.5772\hat{\alpha}$$

$$\sigma^2 = \frac{\pi^2 \hat{\alpha}^2}{6}$$

$$\gamma = 1.1396$$

$$k = 5.4002$$

La variable reducida Gumbel es

$$y_i = \frac{x_i - \nu}{\alpha}$$

Estimadores por momentos

$$\hat{\nu} = \bar{x} - 0.45S$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S = 0.78S$$

Estimadores por máxima verosimilitud

Considerando la variable reducida Gumbel se tiene el siguiente proceso iterativo

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i}$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i}$$

El criterio de convergencia es

$$\frac{P}{\hat{\alpha}} \approx 0 \quad \text{y} \quad \frac{-R}{\hat{\alpha}} \approx 0$$

Incrementos

$$\delta_{\nu_j} = (1.11P_j - 0.26R_j) \frac{\alpha_j}{n}$$

$$\delta_{\alpha_j} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_j}{n}$$

Nuevos valores

$$\hat{\nu}_{j+1} = \hat{\nu}_j + \delta_{\nu_j}$$

$$\hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j + \delta_{\alpha_j}$$

Estimadores por momentos L

$$\hat{\nu} = \lambda_1 - 0.577216\hat{\alpha}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\lambda_2}{\ln(2)}$$

Estimadores por máxima entropía

Considerando la variable reducida de Gumbel se tiene en siguiente proceso iterativo

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{-y_i}$$

El criterio de convergencia es

$$|0.577216 - P| \approx 0 \text{ y } |1 - R| \approx 0$$

Incrementos

$$\delta_{\alpha_j} = 0.4228 + P_j + \ln(R_j)$$

$$\delta_{\nu_j} = (0.26P_j - 0.61R_j) \frac{\alpha_i}{n}$$

Nuevos valores

$$\nu_{j+1} = \nu_j + \delta \nu_j$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \delta \alpha_j$$

Estimación de eventos para la distribución de valores extremos tipo I

$$\hat{X}_T = \hat{\mu} - \hat{\sigma} \ln[-\ln(1 - 1/T)]$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por momentos

$$S_T = \left[ \frac{\hat{\sigma}^2}{n} (1 + 1.1396k_T + 1.10k_T^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde

$$k_T = - \left\{ 0.45 + 0.7797 \ln \left[ - \ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \text{ Donde } T = \frac{n+1}{m}$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por máxima verosimilitud

$$S_T = \left[ \frac{\hat{\sigma}^2}{n} (1.1086 + 0.514y_T + 0.6079y_T^2) \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde

$$y_T = - \ln \left[ - \ln \left( \frac{T-1}{T} \right) \right]$$

### *Distribución General de Valores Extremos (GVE)*

Los valores extremos son valores máximos o mínimos seleccionados de un conjunto de datos. Fisher y Tippett (1928) demostraron que las distribuciones de valores extremos seleccionados de conjuntos de muestras de cualquier distribución de probabilidad convergen en una de las tres formas de distribución de valores extremos, llamadas tipo I, II y III respectivamente, cuando el número de valores extremos seleccionados es grande. Las propiedades de las tres formas limitantes fueron desarrolladas en mayor detalle por Gumbel en 1941 para la distribución de valor extremo tipo I, por Fréchet en 1927 para la distribución de valor extremo tipo II y por Weibull en 1939 para la distribución de valor extremo tipo III.

En 1955 Jenkinson demostró que estas tres formas limitantes eran casos especiales de una distribución única llamada la distribución de valor extremo general.

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-\nu}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}}$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[1 - \left(\frac{x-\nu}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \left(1 - \left(\frac{x-\nu}{\alpha}\right)^\beta\right)^{1/\beta - 1}$$

Si  $\beta = 0$      $-\infty < x < \infty$     La distribución es tipo I (Gumbel)

$\beta < 0$      $\nu + \frac{\alpha}{\beta} \leq x < \infty$     La distribución es tipo II (Fréchet)

$\beta > 0$      $-\infty < x \leq \nu + \frac{\alpha}{\beta}$     La distribución es tipo III (Weibull)

Donde

$\nu$  es el parámetro de ubicación

$\beta$  es el parámetro de forma

$\alpha$  es el parámetro de escala  $\alpha > 0$

La distribución de probabilidad de Gumbel es un tipo de distribución de probabilidad extrema, que es adecuado para los valores máximos de las muestras. En hidrología ha sido utilizada para procesar los flujos de inundación (Coutagne, 1951).

La variable reducida GVE

$$y = -\frac{1}{\beta} \ln \left( 1 - \left( \frac{x - \nu}{\alpha} \right) \beta \right)^{1/\beta}$$

Para la distribución tipo I,  $x$  no tiene límites, mientras que para la distribución tipo II,  $x$  esta acotada por abajo, y para la distribución tipo III,  $x$  esta acotada por arriba.

Estimadores por momentos

Para  $-11.35 < g < 1.1396$

$$\hat{\beta} = 0.279434 - 0.333535g + 0.048306g^2 - 0.023314g^3 + 0.00376g^4 - 0.000263g^5$$

Para  $1.14 < g < 18.95$

$$\hat{\beta} = 0.25031 - 0.29219g + 0.075357g^2 - 0.010883g^3 + 0.000904g^4 - 0.000043g^5$$

$$\hat{A} = \mu_x - \hat{B}E[y] = \bar{x} - \hat{B}E[y]$$

$$\hat{B} = \left[ \frac{\text{Var}(x)}{\text{Var}(y)} \right]^{(1/2)}$$

$$\text{Var}(x) = \sigma_x^2 = S_x^2$$

$$E[y] = \Gamma(1 + \hat{\beta})$$

$$\text{Var}(y) = \Gamma(1 + 2\hat{\beta}) - \Gamma^2(1 + \hat{\beta})$$

Para  $\hat{\beta} < 0$  distribución tipo II

$$\hat{\alpha} = -\hat{\beta}\hat{B}$$

$$\hat{\nu} = \hat{A} + \hat{B}$$

Para  $\hat{\beta} > 0$  distribución tipo III

$$\hat{\alpha} = \hat{\beta}\hat{B}$$

$$\hat{\nu} = \hat{A} - \hat{B}$$

Para  $\hat{\beta} = 0$  distribución tipo I

$$\hat{\nu} = \bar{x} - 0.45S$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\sqrt{6}}{\pi}S = 0.78S$$

Estimadores por máxima verosimilitud

Considerando la variable reducida GVE se tiene el siguiente proceso iterativo

$$P = n - \sum_{i=1}^n e^{-y_i}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n e^{(1-\beta)y_i} - (1-\beta) \sum_{i=1}^n e^{\beta y_i}$$

$$R = n - \sum_{i=1}^n y_i + \sum_{i=1}^n y_i e^{-y_i}$$

El criterio de convergencia es

$$-\frac{\partial LL}{\partial \nu} = \frac{Q}{\hat{\alpha}} \approx 0$$

$$-\frac{\partial LL}{\partial \alpha} = \frac{1}{\hat{\alpha}} \left( \frac{P+Q}{\hat{\beta}} \right) \approx 0$$

$$-\frac{\partial LL}{\partial \hat{\beta}} = \frac{1}{\hat{\beta}} \left[ R - \left( \frac{P+Q}{\hat{\beta}} \right) \right] \approx 0$$

Incrementos

$$\delta_{\hat{\nu}_j} = -\frac{\hat{\alpha}_j}{n} \left\{ bQ_j + \frac{h(P_j+Q_j)}{\hat{\beta}_j} + \frac{f}{\hat{\beta}_j} \left[ R_j - \frac{(P_j+Q_j)}{\hat{\beta}_j} \right] \right\}$$

$$\delta_{\hat{\alpha}_j} = -\frac{\hat{\alpha}_j}{n} \left\{ hQ_j + a \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} + \frac{gs}{\hat{\beta}_j} \left[ R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} \right] \right\}$$

$$\delta_{\hat{\beta}_j} = -\frac{1}{n} \left\{ fQ_j + gs \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} + \frac{c}{\hat{\beta}_j} \left[ R_j - \frac{(P_j + Q_j)}{\hat{\beta}_j} \right] \right\}$$

Donde  $a, b, c, f, gs$  y  $h$  son los elementos de la matriz de varianza-covarianza de los parámetros de la distribución GVE para  $-1.5 < \hat{\beta} < 1.0$

$$a = 0.661437 - 0.562798\hat{\beta} + 0.985803\hat{\beta}^2 - 0.059011\hat{\beta}^3$$

$$b = 1.235356 - 0.162161\hat{\beta} - 0.115137\hat{\beta}^2 + 0.009577\hat{\beta}^3$$

$$c = 0.4711 - 0.77627\hat{\beta} + 0.295825\hat{\beta}^2 - 0.009645\hat{\beta}^3$$

$$f = 0.244435 - 0.10287\hat{\beta} - 0.19583\hat{\beta}^2 - 0.016837\hat{\beta}^3$$

$$gs = 0.15373 - 0.411923\hat{\beta} - 0.479209\hat{\beta}^2 - 0.075004\hat{\beta}^3$$

$$h = 0.338937 - 1.209555\hat{\beta} - 0.109822\hat{\beta}^2 - 0.019801\hat{\beta}^3$$

Nuevos valores

$$\hat{\nu}_{j+1} = \hat{\nu}_j + \delta\hat{\nu}_j$$

$$\hat{\alpha}_{j+1} = \hat{\alpha}_j + \delta\hat{\alpha}_j$$

$$\hat{\beta}_{j+1} = \hat{\beta}_j + \delta\hat{\beta}_j$$

Estimadores por momentos L

$$E = \left\{ \frac{2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)}}{3\hat{M}_{(2)} - \hat{M}_{(0)}} \right\} - \left[ \frac{\ln(2)}{\ln(3)} \right]$$

$$\hat{\beta} = 7.859E + 2.9554E^2$$

$$A = \Gamma(1 + \hat{\beta})$$

$$B = 1 - 2^{-\hat{\beta}}$$

$$C = (2\hat{M}_{(1)} - \hat{M}_{(0)})\hat{\beta}$$

$$D = (A-1) / \hat{\beta}$$

$$\hat{\alpha} = \frac{C}{AB}$$

$$\hat{\nu} = \hat{M}_{(0)} + D\hat{\alpha}$$

$$\hat{M}_{(r)}, r = 0, 1, 2, 3$$

Estimación de eventos

$$\hat{X}_T = \hat{\nu} + \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\beta}} \{1 - [-\ln F(x)]^{\hat{\beta}}\}$$

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}_T$  por momentos

$$S_T = \frac{\hat{M}_2^{\mu}}{n} \left\{ \begin{aligned} & \left[ 1 + K_T \gamma_1 + \frac{K_T^2}{4} (\gamma_2 - 1) + \frac{\partial K_T}{\partial \gamma_1} \left[ 2\gamma_2 - 3\gamma_1^2 - 6 + K_T \left( \gamma_3 - \frac{6}{4} \gamma_1 \gamma_2 - \frac{10}{4} \gamma_1 \right) \right] \right]^2 + \\ & \left[ \left( \frac{\partial K_T}{\partial \gamma_1} \right)^2 \left[ \gamma_4 - 3\gamma_3 \gamma_1 - 6\gamma_2 + \frac{9}{4} \gamma_1^2 \gamma_2 + \frac{35}{4} \gamma_1^2 + 9 \right] \right] \end{aligned} \right\}$$

Donde

$\gamma_1$  y  $\gamma_2$  son los coeficientes de asimetría y curtosis de la muestral.

Desviación estándar de los eventos  $\hat{X}$  por máxima verosimilitud

$$S_T = \left\{ \text{Var} \hat{\nu} + 2w \text{Cov}(\hat{\nu}, \hat{\alpha}) + w \text{Var} \hat{\alpha} + \left( \frac{dw}{d\hat{\beta}} \right)^2 \text{Var} \hat{\beta} + 2 \frac{dw}{d\hat{\beta}} [\text{Cov}(\hat{\nu}, \hat{\alpha}) + w \text{Cov}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

### *Análisis de Frecuencia*

Los registros de eventos hidrológicos pueden ser interpretados empleando un conjunto de procedimientos que permitan inferir probabilidad y recurrencia de variables hidrológicas, uno de los procedimientos más conocido es el análisis de frecuencia. El objetivo primordial del análisis

de frecuencias de información hidrológica es relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad, Chow et al, (1994).

El análisis de frecuencias de eventos tales como las precipitaciones máximas de una región o los caudales extremos de un río son fundamentales para cualquier estudio de planeación y administración de los recursos hídricos.

El análisis de frecuencias de eventos extremos se basa en tres suposiciones:

- a) Los eventos hidrológicos extremos son una variable aleatoria que puede ser expresada mediante una distribución de probabilidad.
- b) La serie de eventos extremos es homogénea e independiente; la restricción de homogeneidad asegura que todas las observaciones son de la misma población, es decir, debe verificarse que la estación de la que provienen los datos no ha sido cambiada de lugar y/o que el área en la que se encuentra no ha sido modificada. Y la restricción de independencia garantiza que un evento hidrológico no aparece en el conjunto de datos más de una vez.
- c) La distribución de probabilidad que explica el proceso extremo no varía en el espacio-tiempo, ni tampoco cambia en función de la magnitud de la variable.

La magnitud de un evento está inversamente relacionada con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos severos ocurren con menor frecuencia que eventos más moderados. La frecuencia de ocurrencia de un evento extremo es a menudo expresada en términos de un periodo de retorno o recurrencia. El periodo de retorno de un evento de determinada magnitud puede definirse como el promedio del lapso de tiempo que ha de transcurrir entre eventos que igualan o exceden una magnitud específica.

Por definición un evento extremo ocurre si una variable aleatoria  $X$  es mayor o igual que un cierto nivel  $x$ . El intervalo de recurrencia  $\tau$  es el tiempo entre ocurrencias de  $X \geq x$ . El periodo de retorno  $T$  puede definirse como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada.

Existe una estrecha relación entre la probabilidad  $p = P(X \geq x)$  de ocurrencia del evento  $X \geq x$  y el periodo de retorno, como muestra a continuación: si consideramos que para cada observación existen dos resultados posibles:  $X \geq x$  o  $X < x$  los cuales corresponden en cada caso a una probabilidad  $p$  y  $(1 - p)$  respectivamente.

Considerando la condición de independencia, la probabilidad de un intervalo de recurrencia de duración  $\tau$  es igual al producto de las probabilidades de  $\tau - 1$  fallas por un éxito, es decir,  $(1 - p)^{\tau-1} p$ . El valor esperado de T esta dado por:

$$E(\tau) = \sum_{\tau=1}^{\infty} \tau (1-p)^{\tau-1} p$$

$$E(\tau) = p + 2(1-p)p + 3(1-p)^2 p + 4(1-p)^3 p + \dots$$

$$E(\tau) = p[1 + 2(1-p) + 3(1-p)^2 + 4(1-p)^3 + \dots]$$

Si consideramos  $x = -(1-p)$  y  $n = 2$ . La expresión adquiere la forma de una serie de potencia:

$$(1+x)^n = 1 + nx + [n(n-1)/2]x^2 + [n(n-1)(n-2)/6]x^3 + \dots$$

Por lo que el valor esperado de T puede ser reescrito como:

$$E(\tau) = \frac{p}{[1-(1-p)]^2} = \frac{1}{p}$$

Como el periodo de retorno T de un evento  $X \geq x$  es el valor esperado de t, por lo tanto:

$$E(\tau) = T = \frac{1}{p}$$

De donde

$$T = \frac{1}{P(X \geq X)} = \frac{1}{1 - P(X \leq X)}$$

Según Chow (1964), a pesar de que estadísticamente hablando  $P(X \geq x)$  no es exactamente igual a  $1 - P(X \leq x)$  sino a  $1 - P(X < x)$ , el valor de  $P(X = x)$  es tan pequeño para variables aleatorias continuas que  $P(X \geq x)$  se puede tomar igual a  $1 - P(X \leq x)$ .

Es decir, la probabilidad de ocurrencia de un evento en cualquier observación es el inverso de su periodo de retorno.

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T}$$

Para efectos de análisis hidrológico muchas veces es necesario estimar caudales cuyo período de retorno  $T$  es superior al período de registro.

En el análisis de frecuencia de inundación, se busca una relación única entre la magnitud de las inundaciones y su correspondiente intervalo de recurrencia  $\tau$ . La tarea consiste en extraer información de una serie de datos hidrológicos que permita calcular la relación entre la magnitud de un evento  $\widehat{Q}_T$  y el periodo de retorno  $T$ , (Rao A. R. et. Al., 2000).

La información hidrológica según sus características se puede organizar en series. Se entiende por serie hidrológica al conjunto de datos de una determinada variable (caudales, precipitaciones) observadas a intervalos de tiempo regulares (años, meses, semanas).

Tres tipos de series pueden ser consideradas para este propósito: series de duración completa, series de duración parcial y series de valores extremos.

Según Chow et al. (1994), una serie de duración completa está compuesta por toda la información disponible. Sin embargo, un gran porcentaje de los datos originales no tienen significancia práctica, debido a que los proyectos de análisis hidrológicos como el riesgo de inundación se basan en el análisis de condiciones críticas.

Una serie de duración parcial es una serie de datos seleccionados de tal manera que su magnitud es mayor que un valor base predefinido. Si el valor base se selecciona de tal manera que el número de valores en la serie sea igual al número de años de registro, la serie se conoce como

una serie de excedencia anual. Las series de excedencias, se construyen extrayendo de la serie original todos aquellos valores superiores al valor base fijado previamente, por lo que el tamaño de la muestra es variable. La selección del valor base nos permite “definir” lo que se considera un evento extremo y controlar el tamaño final de la muestra. En este sentido, las series de excedencias consideran una mayor cantidad de información ya que pueden incluir más de un evento por año si éste cumple el requisito para ser considerado extremo. Sin embargo, es este uno de los mayores problemas, pues es difícil asegurar la independencia de los eventos.

Una serie de valor extremo incluye el valor máximo o mínimo que ocurre en cada uno de los intervalos de tiempo de igual longitud del registro. La longitud del intervalo de tiempo usualmente se toma como un año, y una serie seleccionada de esta manera se conoce como una serie anual. Si se utilizan los valores máximos anuales es una serie anual máxima y si se utilizan los valores mínimos es una serie anual mínima. Una serie anual máxima o anual mínima tienen un tamaño final de muestra igual al número de años de registro, de manera que una desventaja es el hecho de que se pierden muchos eventos secundarios que pueden ser inclusive mayores que los máximos de otros años, y por tanto proporcionarían información valiosa. Sin embargo, una de sus ventajas es que estas series asegura el espaciado temporal de los sucesos muestreados, al contrario de lo que sucede con las series de excedencias.

Considerando lo anterior, Chow (1994) señala que, aunque las series de duración parcial son útiles para algunos propósitos, usualmente es recomendable utilizar series anuales máximas. Cunnane desarrolló un método para comparar la eficacia estadística de las inundaciones durante  $T$  años empleando dos métodos diferentes y encontró que en las estimaciones basadas en la serie de excedencia anual existe una mayor varianza con respecto a las estimaciones basadas en la serie de máximos anuales para períodos de retorno de más de 10 años.

### *Pruebas de homogeneidad*

Una serie de datos es llamada homogénea si es una muestra de una única población. Según Escalante et.al (2005) las características estadísticas de las series hidrológicas se afectan cuando la serie presenta tendencias en la media o en la varianza, o cuando ocurren saltos negativos o

positivos; dichas anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad. Si la serie no es homogénea, es necesario realizar ajustes o correcciones para volverla homogénea, de manera que las estimaciones estadísticas muestrales sean estimaciones válidas de los parámetros poblacionales.

Las causas por las que una serie puede perder la homogeneidad se deben principalmente a: cambios físicos en la estación y modificaciones en el medio.

Las pruebas estadísticas de homogeneidad presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla en base a su probabilidad de ocurrencia.

Las pruebas estadísticas se pueden clasificar en función de la información que requieren para ser aplicadas: pruebas estadísticas que se aplican a los datos de la serie con el objetivo de determinar si son o no homogéneas, entre ellas se encuentran la prueba de Helmert, t de Student y Cramer, y pruebas estadísticas que requieren de la información de una estación cercana para poder ser aplicadas, (Campos A. D., 1998).

#### *Prueba estadística de Helmert*

Es una prueba sencilla que consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, se considera una secuencia ( $S$ ), en caso contrario se registra un cambio ( $C$ ).

Si la serie es homogénea, la diferencia entre el número de secuencias ( $S$ ) y el número de cambios ( $C$ ) en el registro deberá ser cero, dentro de los límites de un error probable, el cual de hecho, depende de la longitud del registro ( $n$ ).

La serie es considerada homogénea si  $-\sqrt{n-1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n-1}$ .

#### *Prueba estadística t de Student*

Esta prueba resulta útil cuando es probable que la causa de la pérdida de homogeneidad se deba a un cambio abrupto en la media.

Se recomienda aplicar la prueba cuando los valores de  $n_1 = n_2 = \frac{n}{2}$ , donde  $n$  es la longitud del registro.

El estadístico de prueba se define como:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ \frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}}$$

Donde  $\bar{x}_1, S_1^2$  son la media y varianza de  $n_1$  y  $\bar{x}_2, S_2^2$  son la media y varianza de  $n_2$ .

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas, con  $\nu = n_1 + n_2 - 2$  y con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto se considera la serie como no homogénea.

#### *Prueba estadística de Cramer*

La prueba de Cramer nos permite verificar la homogeneidad en el registro  $Q_i^j$  de la serie  $j$  para  $i = 1, 2, \dots, n_j$  y determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Se considera para ello tres bloques, uno del tamaño total de la muestra o registro, el segundo considera el 60% de los últimos valores del total de la muestra  $n_{60}$ , y el tercer bloque se integra con el 30% de los últimos valores del total de la muestra  $n_{30}$ .

La prueba compara el valor de la media del registro total con la media de cada uno de los bloques.

$$\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}$$

$$S_Q^j = \left[ \frac{1}{(n_j - 1)} \sum (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2 \right]^{1/2}$$

$$\bar{Q}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Q_k^j}{n_{60}}$$

$$\bar{Q}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{Q_k^j}{n_{30}}$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{Q}_{60}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j}$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{Q}_{30}^j - \bar{Q}^j}{S_Q^j}$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w[1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^{1/2} |\tau_w^j| \text{ para } w = 60 \text{ y } w = 30$$

El estadístico  $t_w$  tiene una distribución t de Student de dos colas, con  $\nu = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_w$  para  $w = 60$  y  $w = 30$ , es mayor que la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie se considera no homogénea.

### *Prueba de independencia de eventos*

Esta prueba hace uso coeficiente de autocorrelación serial  $r_k^j$  para diferentes tiempos de retraso  $k$ . El coeficiente se obtiene de la expresión:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)(Q_{i+k}^j - \bar{Q}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j-k} (Q_i^j - \bar{Q}^j)^2} \text{ para } r_0^j = 1 \text{ y } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3}$$

Donde  $\bar{Q}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Q_i^j}{n_j}$

La grafica de los valores estimados para  $r_k^j$  (ordenadas) contra los tiempos de retraso  $k$  (abscisas) se llama correlograma de la muestra. Cuando el correlograma es igual a cero para  $k \neq 0$ , se considera que la serie es independiente. Sin embargo, las muestras de series independientes, debido a la variabilidad de la muestras, tienen un  $r_k^j$  que fluctúa alrededor de cero pero que no necesariamente es igual a cero. En tales casos, es útil determinar los límites probables para el correlograma. Anderson propone los límites como:

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k}$$

Si y solo si, el 10% de los valores sobrepasan los límites de confianza se dice que la serie es independiente.

#### *Prueba de bondad de ajuste*

El error estándar de ajuste es un estadístico que permite seleccionar la mejor opción, entre diferentes modelos, para el ajuste de una muestra de datos.

$$EE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (Q_T^j - Q_T^j)^2}{n_j - mp} \right]$$

Donde

$Q_T^j$  son los eventos  $Q_i^j$  ordenados de mayor a menor con un periodo de retorno asignado

$T = \frac{n_j + 1}{m}$  y una probabilidad de no excedencia  $P = 1 - \frac{1}{T}$ .

$n_j$  longitud en años del registro analizado.

$m$  número de orden de registro.

$\hat{Q}_T^j$  eventos estimados por cierta distribución de probabilidad para cada periodo de retorno  $T$  asignado a la muestra ordenada  $Q_i^j$ .

$mp$  número de parámetros de la distribución ajustada.

La distribución de menor ajuste será aquella que proporcione el mínimo valor del estadístico  $EE$ .

El análisis de frecuencia de los gastos máximos anuales se emplea para determinar la magnitud de un evento  $\hat{Q}_T$ , de un cierto periodo de retorno  $T$ , lo cual es de utilidad en el manejo de cuencas hidrológicas.

Escalante et. al (2005) describen la secuencia del análisis de frecuencia de los gastos máximos anuales de una muestra  $Q_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ , de la siguiente forma:

1. Recabar la información de los eventos  $Q_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$ . En este punto se debe verificar la calidad y cantidad de la información.
2. Verificar la homogeneidad de la serie.
3. Obtener los estadísticos muestrales de la serie  $Q_i: \bar{x}, S^2, S, g, k$  y  $CV$
4. Verificar la independencia de eventos de la serie  $Q_i$ .
5. Asignarle a la serie  $Q_i$  un periodo de retorno  $T$  y una probabilidad de no excedencia.
6. Ajustarle a la serie  $Q_i$  las diferentes funciones de distribución de probabilidad para el análisis de máximos y seleccionar aquella que proporcione el mínimo error estándar de ajuste  $EE$ .
7. Una vez seleccionada la distribución de mejor ajuste de registro  $Q_i$ , calcular los eventos  $\hat{Q}_T$  y sus límites de confianza para diferentes periodos de retorno  $T$ .