



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**ANÁLISIS INTEGRAL DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO
TONALÁ**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MIGUEL ANGEL LAVERDE BARAJAS

TUTOR:
DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, INVESTIGADOR

MÉXICO, D. F. JUNIO DE 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón
Secretario: Dr. Escalante Sandoval Carlos A.
Vocal: Dr. Pedrozo Acuña Adrián
1^{er.} Suplente: Dr. Fuentes Mariles Oscar
2^{do.} Suplente: Dr. Silva Casarín Rodolfo

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

FIRMA

*A mis padres. Todo lo que soy y todo lo que seré se los debo a
ustedes. Son mi luz, mi vida y mi motivación más grande*

A Mis hermanos y mi sobrino. Sus sueños son mis sueños, mis logros son para ustedes

A Dios, porque sin el nada de esto hubiera sido posible

Agradecimientos

A lo largo de la realización de esta tesis, son muchas las personas a las que les debo mi profundo agradecimiento por su apoyo incondicional en todo momento. En especial quiero agradecer a:

Al Dr. Adrián Pedrozo, no sólo por su ayuda como asesor de esta tesis, sino por ser el bastión principal de este proyecto en México. Gracias por su confianza y amistad incondicional durante todo este tiempo.

Al instituto de Ingeniería de la UNAM, por ser una segunda casa en México y por ofrecerme su apoyo tanto como físico como humano para la realización de esta tesis.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo económico brindado.

Gracias a mis asesores Dr. Rodolfo Silva Casarín, Dr. Ramón Domínguez Mora, Dr. Oscar Fuentes Mariles, Dr. Carlos Escalante por sus valiosos aportes para la realización de este trabajo. De igual forma gracias al Dr. Edgar Mendoza Baldwin por su valiosas enseñanzas y su amistad.

A mis padres, Juan Manuel y Esperanza que son las personas que más amo y las que hacen que todo esto tenga sentido.

A mis hermanos, John, Andres y Maria Angélica. Con ustedes comprendí que soy la persona más afortunada al tenerlos como una parte de mí. Manitos lo logramos

A mi sobrino hermoso Juan José. El no verte crecer es uno de los sacrificios más grandes que he realizado por conseguir este sueño. Lo siento mucho por no estar cerca de ti en esta, tu etapa más bonita

Gracias a mis tías: Myriancita, Fanicita, La Negris y Carito. A mis primos: Juank, Pao, Dianita, Camilo, Julián y Lau. Mis grandes consejeros y algunas veces alcabuetas en muchas de mis necesidades. No importa que tan lejos este o cuánto tiempo este por fuera, todo mi amor y afecto siempre estará intacto para ustedes. Los quiero y los extraño un montón.

Gracias a mis compañeros de aventura: Raulillo, el Parce, Gerard, “El cuau”, El Pariente, Irving, Pedrinchi, Diana Resendiz, Diana Fernández, Alejita, Jairciño, Toño, Miguelon, Mirellita.... en fin, gracias a todos por cada uno de los momentos vividos.

Gracias a Brayan, Juan y Caro, mi familia acá en México. A ellos les debo más que un agradecimiento.

Gracias a los grandes amigos en Colombia, que no solo han compartido grandes momentos de mi vida, sino que a pesar de la distancia siguen presentes.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y en general a México por acogerme en su seno y poder sentir la calidez de su gente.

“no soy solo yo, soy la suma de todos aquellos que han tocado mi vida de tantas maneras”

RESUMEN

El riesgo de inundación, producto de la interacción entre la amenaza y la vulnerabilidad, se concibe como un gran instrumento de gestión en las estrategias de control y mitigación de desastres ocasionados por fenómenos hidrometeorológicos. Dentro del riesgo, su análisis encierra numerosas incertidumbres como resultado de la complejidad de los procesos que se manejan. Estas incertidumbres pueden ocasionar errores en los mecanismos de planeación y operación ante la inundación. En la tesis *“Análisis integral del riesgo de inundación en la cuenca baja del río Tonalá”*, la estimación del riesgo demanda un análisis exhaustivo de las variables que lo componen. Con el propósito de reducir las incertidumbres que se generan en dicho proceso, la investigación considera un modelado integral de la amenaza, caracterizado por el análisis de lluvia, hidrológico e hidráulico en la cuenca ante condiciones extremas. La segunda parte de la investigación analiza la vulnerabilidad desde un enfoque holístico. En este enfoque, la vulnerabilidad se evalúa con base en la fragilidad de las dimensiones física, social, económica, ecológica y cultural ante la inundación y su relación en cuanto al grado de exposición al que se encuentran sujetos. Finalmente, las variables se integran como parte de un modelo presión, estado y respuesta, que permite describir el riesgo de inundación en la cuenca baja del río Tonalá. Como principal conclusión se observa que la cuenca presenta un riesgo natural ante la inundación. Este nivel de riesgo es incrementado por las alteraciones antropogénicas que han ocurrido durante las últimas décadas en la cuenca, en especial por la explotación petrolera. Este trabajo pone de manifiesto los nuevos retos y oportunidades para los diferentes actores que intervienen en el riesgo, partiendo desde los tomadores de decisiones, la academia y la sociedad.

SUMMARY

Flood risk, given by the relationship between hazard and vulnerability, is considered an important flood management tool in the generation of improved strategies for a better adaptation and mitigation due to hydrometeorological events. It is acknowledged that within the risk analysis, there are many uncertainties resulting from the complexity of the hydrological processes involved. These uncertainties may cause significant errors in the planning and operation stages in the face of a flood event. In the thesis “Flood risk analysis in lower Tonalá River”, the risk analysis requires an exhaustive analysis of all variables involved. With the reduction of uncertainties in mind, the investigation considers the integrated modelling of the hazard, characterised by the hydrologic and hydraulic modelling of the basin during the incidence of extreme events. The second part of the investigation comprises the vulnerability analysis using a holistic approach. In this view, the vulnerability of the system is addressed in terms of both the degree of exposure and the fragility to flood in several dimensions: physical, social, economic, ecologic and cultural. Finally, the variables are integrated as part of a Pressure-State-Response model to describe the flood risk in the lower Tonalá River. As a main conclusion, it is observed that the basin has a natural flood risk. The level of flood risk in the basin is increased due the anthropogenic pressures that have occurred in recent decades, especially by the oil extraction activity. This research paves the road towards the new challenges and opportunities for the different stakeholders involved in the flood risk management, from the decision makers to academy and society.

CONTENIDO

Contenido.....	vii
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas.....	xiii
Capítulo 1.	
Introducción general.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estructura.....	3
Capítulo 2	
Área de estudio y datos disponibles.....	6
2.1 Zona De Estudio.....	6
2.1.1 Vegetación y suelos.....	7
2.1.2 Socioeconómico.....	9
2.1.3 Inundaciones en Río Tonalá.....	12
2.2 Datos.....	17
2.2.1 Físicos.....	17
2.2.2 Caudales.....	20
2.2.3 Climáticos.....	20
2.2.4 Sociales, económicos, ecológicos y culturales.....	22
Capítulo 3	
Estado del arte.....	24
3.1 Introducción.....	24
3.2 Inundaciones.....	24
3.2.1 Características de las inundaciones.....	26
3.2.2 Estudios sobre inundaciones en la cuenca del Tonalá.....	28
3.3 Gestión del riesgo.....	29
3.3.1 Gestión integral del riesgo de inundación.....	31
3.3.2 El cambio en la gestión del riesgo de inundaciones y sus niveles de respuesta.....	35
3.3.3 análisis del riesgo y sus enfoques.....	36

CAPITULO 4

Estimación de los valores de precipitación asociados a diferentes periodos de retorno	40
4.1 introducción	40
4.2 Análisis de los registros climáticos de la cuenca	41
4.2.1 Metodología	41
4.2.2 <i>RESULTADOS</i>	49
4.3 Análisis Probabilístico De Las Series	53
4.3.1 Metodología	53
4.3.2 Resultados	57
4.4 Conclusiones.....	60

Capitulo 5

Modelado hidrológico de avenidas de diseño	61
5.1 Introducción	61
5.2 Metodología	63
5.2.1 Descripción del Modelo hidrológico SWAT	63
5.2.2 Modelado hidrológico del modelo SWAT	64
5.2.3 Datos de entrada.....	68
5.2.3 Análisis de sensibilidad.....	71
5.3 Resultados	73
5.3.1 Análisis de sensibilidad de los parámetros	73
5.3.2 Calibración del modelo	74
5.3.3 Validación	76
5.3.4 Simulación de las avenidas de diseño	77
5.4 Conclusiones del modelado hidrológico de avenidas de diseño.....	78

Capitulo 6

Modelado hidrodinámico: Identificación de la amenaza en la cuenca baja del Río Tonalá	80
6.1 Introducción	80
6.2 Metodología	81
6.2.1 Descripción del modelo	81
6.2.2 Procesamiento y puesta a punto del modelo.....	84
6.2.3 Análisis de la amenaza	87
6.3 Resultados	88
6.3.1 Análisis de sensibilidad en la malla	88
6.3.2 Escenarios de inundación asociados a avenidas extremas de $Tr= 50, 100, 500$ y 1000 años	90
6.3.3 Identificación de la amenaza	94
6.4 Conclusiones.....	96

Capitulo 7

Vulnerabilidad	97
7.1 Introducción	97
7.2 Metodología	99
7.2.1 Estimación del nivel exposición ante la inundación	99
7.2.2 Evaluación de la fragilidad de los sistemas en la cuenca baja del río Tonalá	101

7.2.3 Evaluación de la vulnerabilidad	106
7.3 Resultados	106
7.3.1 Nivel de exposición de la cuenca ante la inundación.....	106
7.3.2 vulnerabilidad del medio social.....	108
7.3.3 Vulnerabilidad del medio físico y económico	109
7.3.4 Vulnerabilidad del medio ecológico y cultural.....	111
7.4 Conclusiones.....	113
Capítulo 8.	
Análisis del riesgo por inundación en la cuenca baja del río Tonalá.....	114
8.1 Introducción	114
8.2 Metodología para la estimación del riesgo por inundación en la cuenca baja del río Tonalá	114
8.3 Resultados	116
8.3.1 Riesgo de inundación para un escenario de 50 años periodo de retorno.....	116
8.3.2 Riesgo de inundación para un escenario de 100 años periodo de retorno.....	118
8.3.3 Riesgo de inundación para un escenario de 500 años periodo de retorno.....	120
8.3.4 Riesgo de inundación para un escenario de 1000 años periodo de retorno	122
8.4 Conclusiones.....	124
Capítulo 9	
Conclusiones y recomendaciones.....	125
Recomendaciones.....	126
Futuras líneas de investigación.....	127
BIBLIOGRAFÍA	129
ANEXO A	
Pruebas de homogeneidad e independencia de las series	138
A1 Metodología	138
A1.1 Prueba estadística de Helmert:.....	138
A1.2 Prueba estadística t de student:	138
A1.3 Prueba estadística de Cramer	139
A.1.4 Prueba de Independencia de Eventos	140
A.2 Resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia de las series.	141
A.2.1 Pruebas de Homogeneidad	141
A.2.2 Pruebas de independencia de las series.....	146
Anexo B	
Mapas de susceptibilidad de los sistemas sociales, físicos económicos y ecológicos.....	149
B.1 Susceptibilidad social	150
B.1.1 Rangos de susceptibilidad social por sector.....	150
B.1.2 Mapa de susceptibilidad social.....	151
B.1.3 Distribución de la susceptibilidad social	151
B.2 Susceptibilidad Física y económica.....	152
B.2.1 Puntaje de evaluación de la susceptibilidad física y económica	152

B.2.3 Mapa de susceptibilidad física y económica.....	152
B.3. Mapa de susceptibilidad Ecológica y cultural.....	153
B.3.1 Puntaje de evaluación de la susceptibilidad ecológica y cultural.....	153
B.3.2 Mapa de susceptibilidad ecológica y cultural	153

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación de la cuenca del río Tonalá.....	6
Figura 2.2 Geomorfología.....	7
Figura 2.3 Usos del suelo.....	8
Figura 2.4 División municipal de la cuenca baja del Río Tonalá.....	9
Figura 2.5 Características demográficas de la población.....	10
Figura 2.6 Distribución de la población económicamente activa.....	12
Figura 2.7 Desarrollo del frente frío No. 9 y láminas de lluvias reportadas entre el 31 de octubre y el 3 de noviembre.....	14
Figura 2.8 Declaratoria de desastre e imágenes de zonas afectadas.....	15
Figura 2.9 Desarrollo de la mancha de inundación 30 oct. al 20 nov.....	16
Figura 2.10 Trayectoria de recopilación de datos topográficos y equipos utilizados.....	18
Figura 2.11 Modelos Digitales de Elevación (DEM) obtenidos a partir de información LiDAR.....	19
Figura 2.12 Estimación de las descargas de la desembocadura del río a partir de mediciones ADCP.....	20
Figura 2.13 Ubicación de las estaciones hidrométricas.....	21
Figura 3.1 Número de inundaciones reportadas 1950-2010.....	25
Figura 3.2 Estadísticas de las inundaciones a) Pérdidas económicas globales.....	25
Figura 3.3 Eventos de inundación con declaratoria de emergencia y recursos asignados del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN).....	25
Figura 3.4 Etapas de la gestión del riesgo.....	32
Figura 3.5 Niveles de responsabilidad de cambio en la gestión de riesgo de inundación.....	36
Figura 3.6 Procedimiento esquemático para el análisis del riesgo.....	37
Figura 3.7 Modelamiento del riesgo en el enfoque determinístico.....	38
Figura 3.8 Modelamiento del riesgo en el enfoque estocástico.....	39
Figura 4.1 Interpolación de los datos faltante en las series de tiempo.....	51
Figura 4.2 Tendencias de los registros acumulados anuales en las estaciones climáticas.....	52
Figura 4.3 Tendencias de los registros máximos anuales en las estaciones climáticas.....	53
Figura 4.4 Método bloques alternos.....	57
Figura 4.5 Frecuencia de lluvia anual.....	57
Figura 4.6 Curvas Intensidad duración y periodo retorno de precipitación promedio en días consecutivos de lluvias para las estaciones evaluadas.....	58
Figura 4.7 Hietogramas de diseño para las estaciones seleccionadas.....	59
Figura 5.1 Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo con el proceso de descripción.....	62
Figura 5.2 Movimientos del agua en el ciclo hidrológicos considerados en el SWAT.....	65
Figura 5.3 cuña y el prisma de almacenamiento en un canal.....	68
Figura 5.4. Procesamiento de entradas y salidas del modelo SWAT.....	69
Figura 5.3 a) Mapa de uso de suelo b) Mapa de tipo de suelo.....	70
Figura 5.6 Temperatura promedio mensual (1969-2010).....	71
Figura 5.7 Ubicación de la subcuenca de calibración.....	75
Figura 5.8 Hidrogramas observados y modelados en la etapa de calibración del modelo.....	76
Figura 5.9 Correlación entre los gastos medidos y calculados en la fase de calibración del modelo.....	76

Figura 5. 10	Hidrogramas observados y modelados en la etapa de validación del modelo	77
Figura 5. 11	Correlación entre los gastos medidos y calculados en la fase de validación del modelo	77
Figura 5. 12	Hidrogramas de avenidas asociadas a periodos de retorno de 50, 100,500 y 1000 años	78
Figura 6. 1	Esquema del procedimiento de modelado hidrodinámico	84
Figura 6. 2	Tipos de enmallado utilizados en el modelo	85
Figura 6. 3	Variación de la rugosidad en la cuenca en función al coeficiente de Manning	85
Figura 6. 4	Condiciones de frontera	86
Figura 6. 5	Tipos de MESH utilizados para el análisis de sensibilidad	89
Figura 6. 6.	Áreas inundadas en relación con el tipo de definición del terreno	90
Figura 6. 7	Escenario de inundación ante avenida de $Tr=50$ años.....	91
Figura 6. 8	Escenario de inundación ante avenida de $Tr=100$ años	92
Figura 6. 9	Escenario de inundación ante avenida de $Tr=500$ años	93
Figura 6. 10	Escenario de inundación ante avenida de $Tr=1000$ años.....	94
Figura 6. 11	Mapas de Amenaza asociados a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años.....	95
Figura 7. 1	Diagrama conceptual de los cuatro componentes claves en la definición de la vulnerabilidad (Hebb and Mortsch., 2007, modificado de Füssel, 2007)	98
Figura 7. 2	Niveles de exposición en relación con índices de coste de distancia de ruta	101
Figura 7. 3	Mapa de exposición ante la inundación.....	107
Figura 7. 4	Distribución del nivel de vulnerabilidad de la población.....	108
Figura 7. 5	Mapa de vulnerabilidad social de la cuenca baja del río Tonalá.....	109
Figura 7. 6	Mapa de vulnerabilidad físico y económico de la cuenca baja del río Tonalá.....	110
Figura 7. 8	Mapa de vulnerabilidad del medio ecológico y cultural para la cuenca baja del río Tonalá	112
Figura 8. 1	Esquema de integración de las variables para la estimación del riesgo	115
Figura 8. 2	Relación entre riesgo y vulnerabilidad para la determinación del riesgo	116
Figura 8. 3	Mapa de riesgo de inundación de $TR= 50$ años para la cuenca baja del río Tonalá	117
Figura 8. 4	Mapa de riesgo de inundación de $TR= 100$ años para la cuenca baja del río Tonalá	119
Figura 8. 5	Mapa de riesgo de inundación de $TR= 500$ años para la cuenca baja del río Tonalá	121
Figura 8. 6	Mapa de riesgo de inundación de $TR= 1000$ años para la cuenca baja del río Tonalá	123

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Habitantes en las principales localidades del municipio de Agua Dulce	10
Tabla 2.2 Habitantes en las principales localidades del municipio de Huimanguillo	11
Tabla 2.3 Resumen de daños ocasionados por las inundaciones en el Estados de Tabasco y Veracruz en octubre y noviembre del 2009	17
Tabla 2.4 Estado de las estaciones con influencia en la zona	21
Tabla 2.5 Estaciones pluviométricas a analizar en la cuenca del río Tonalá	22
Tabla 2.6 Características de los datos sociales, económicos, ecológicos y culturales.....	22
Tabla 4.1 Valores de los monomios para la función polinomial	44
Tabla 4.2 Cuadro resumen de la prueba de homogeneidad	50
Tabla 4.3 Errores mínimos en las técnicas de interpolación geoespacial	50
Tabla 4.4 Ejemplo de desfase de los registros diarios de precipitación máximo.....	54
Tabla 4.5 Desfase de los registros diarios de precipitación máximo	54
Tabla 5.1 Parámetros y rango de parámetros usados en el análisis de sensibilidad.....	73
Tabla 5.2 Ranking de los parámetros del flujo del modelo.....	74
Tabla 5.3 Parámetros de calibración del modelo	75
Tabla 6.1 Rangos de amenaza ante inundación	87
Tabla 6.2 Clasificación del los parámetros de amenaza ante diferentes velocidades de flujo.....	88
Tabla 6.3 Gastos seleccionados en la evaluación de definición del terreno.....	89
Tabla 7.1 Calculo de los costes de viaje entre nodos	100
Tabla 7.2 Niveles de fragilidad por tamaño de la población.....	103
Tabla 7.3 Niveles de vulnerabilidad.....	104
Tabla 7.4 Distribución del grado de exposición en la cuenca.....	107
Tabla 7.5 Cuadro resumen de las vulnerabilidades en los sistemas físicos y económicos ..	111
Tabla 8.1 Distribución del riesgo de inundación para $Tr=50$ años	118
Tabla 8.2. Distribución del riesgo de inundación para $Tr=100$ años	119
Tabla 8.3. Distribución del riesgo de inundación para $Tr=500$ años	121
Tabla 8.4. Distribución del riesgo de inundación para $Tr=1000$ años.....	123

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el desarrollo de la humanidad ha estado estrechamente ligado con el riesgo ante inundación. Una característica de la dinámica social post-industrial, es sin duda, el haber creado condiciones de vida en regiones propensas a la inundación, esto como resultado del aumento y concentración de la población y el incremento en la prosperidad económica (Easterling *et al.* 2000). En este sentido, la falta de planeación y control de los espacios urbanos se ha convertido en un gran desafío para la gestión del riesgo por inundaciones, en la medida que se deben manejar y comprender mejor y más efectivamente los riesgos actuales y futuros (Jha A. *et al* 2012).

En las últimas décadas, los trastornos e intensificación del ciclo hidrológico de la tierra ocasionado por el cambio climático (White House 2000), han provocado que el número de inundaciones reportadas hayan crecido significativamente, en especial en los últimos 20 años (Jha A. *et al* 2012). Solo en el año 2010,-, los daños por inundaciones afectaron a 178 millones de personas alrededor del mundo y ocasionaron pérdidas superiores a 40 mil millones de dólares. Esta situación ha estimulado el cambio de políticas para la gestión del riesgo (Johnson *et al.*, 2005; Penning-Rowsell 2006).

De acuerdo a lo propuesto por Plate (2002), la gestión del riesgo puede interpretarse como un proceso que involucra tres diferentes conjuntos de acciones, dependiendo de los actores que se encuentran involucrados. El primero de ellos incluye las acciones necesarias para operar un sistema existente. Por otro lado, cuando el sistema no es lo suficientemente adecuado para satisfacer las necesidades de la gente, por ejemplo debido al cambio del uso del suelo, el incremento en la población o el cambio climático, se tiene un segundo conjunto de acciones encaminadas a la revisión del sistema o la planeación de uno nuevo, el cual buscará adaptarse a las nuevas condiciones de forzamiento sobre el mismo. Como resultado del

proceso de planeación se puede determinar la creación de un nuevo sistema. De ahí surge el tercer conjunto de acciones, abocado a un proceso que tiene como propósito un diseño óptimo para la construcción de un proyecto.

Dentro de la ingeniería hidráulica la evaluación del riesgo solo se encuentra enfocada en el tercer conjunto de actividades (Plate 2002; Hall et al., 2011). Dentro de este enfoque, la solución consta en la evaluación de parámetros físicos (ej. climáticos, hidrológicos, geográficos) con el fin de tomar una solución sobre un sistema estructural (ej. bordos de protección). Sin embargo, en todo el mundo se ha reconocido la necesidad de modificar las estrategias para hacer frente a las inundaciones (Pedrozo-Acuña, 2012). La nueva estrategia para el manejo del riesgo generado por estos eventos extremos, recae no solamente en la construcción de obras de defensa como bordos, compuertas de derivación y dragado de los ríos; sino también en la incorporación de otras medidas de mitigación, que permiten reducir la severidad de los daños asociados a estos fenómenos (ej. cambios en el uso de suelo por medio de un ordenamiento territorial o la reducción de la exposición o vulnerabilidad).

Así, dentro de este marco de trabajo, es necesario visualizar a la gestión del riesgo desde una perspectiva holística (Schumann 2011) en la que no solo se vea la afectación económica (Penning-Rowell et al 2005; Johnson 2007a), sino que también involucre la seguridad pública (Jonkman y Penning-Rowell 2008), la equidad (Johnson 2007b) y el medio ambiente (Green 2004)

Por años, el uso de métodos probabilísticos ha sido característico en el análisis del riesgo ante inundaciones (Hall et al., 2011). Las probabilidades son derivadas del análisis estadístico de años de descarga máxima o descargas que sobrepasan un determinado umbral (Schumann 2011). La estimación de las descargas máximas surge entre las interrelaciones existentes entre los diferentes parámetros físicos que intervienen en un evento de inundación, sin embargo, asociada al proceso de estimación y caracterización de los parámetros existe una gran cantidad de incertidumbre que no es cuantificada a la hora de estimar del riesgo. El proceso de análisis del riesgo está compuesto de forma típica por modelos matemáticos que tienen su base en el conocimiento de los procesos dominantes, los cuales se definen por medio de parámetros que determinan el balance de los mismos al interior del sistema. Por lo tanto, dentro del proceso de modelado es posible pensar la clasificación de la incertidumbre en dos ramas. Por un lado, los residuales de la predicción para un modelo y parámetros determinado, la cual es de naturaleza aleatoria y por otro, la incertidumbre asociada a la selección de estos parámetros que es de naturaleza epistémica (del conocimiento) (Pedrozo-Acuña, 2012). Por otro lado, Schumann (2011), identifica la incertidumbre bajo tres tipos: (1) La incertidumbre inherente o aleatoria, la cual surge a través de la variabilidad (natural) o aleatoriedad en los estados del sistema. (2) La incertidumbre del conocimiento o epistémica, atribuible a la falta de conocimiento acerca de un fenómeno y los efectos de nuestra forma de caracterizarlo. (3) La incertidumbre imprevista, que resulta de factores que son totalmente inesperadas como por ejemplo el comportamiento humano. Dentro del proceso de estimación de la amenaza, gran parte de las incertidumbres se deben a la falta de conocimiento de los parámetros físicos que intervienen en la generación de la inundación y su aleatoriedad en el tiempo. Esto repercute en una falsa estimación de la amenaza y por ende un análisis erróneo del riesgo.

Como consecuencia a esto, recientes esfuerzos se han dedicado a la generación de una nueva estrategia de gestión del riesgo, señalando como un punto importante de mejora, la reducción de la incertidumbre asociada con el sistema de predicción (Demeritt et al., 2007; Bao et al. 2011), y la inclusión de todos los sistemas involucrados en el riesgo (Schumann 2011).

El presente trabajo de tesis, presenta un análisis integral del riesgo por inundación, para la cuenca del río Tonalá en el Estado de Tabasco, México. Para ello se utiliza un encadenamiento de modelos, que representan las mejores descripciones matemáticas de los procesos involucrados, esto es un modelo hidrológico de parámetros distribuidos y un modelo hidrodinámico de dos dimensiones, los cuales se utilizan a fin de determinar los escenarios de inundación para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años . Adicionalmente, se incorpora a la metodología un enfoque holístico de la vulnerabilidad, en la que se busca la integración de las variables naturales, tecnológicas y sociales, a fin de evaluar los sistemas vulnerables ante un evento de inundación. Por último, la integración metodológica permite el establecimiento de un índice de riesgo por inundación para el caso de estudio.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consiste en analizar el riesgo por inundación en la cuenca baja del río Tonalá en el Estado de Tabasco. A partir de esto se desprenden los siguientes objetivos particulares:

- a) Determinar los niveles de lluvia para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años periodo de retorno.
- b) Estimar los hidrogramas asociados a diferentes avenidas de diseño para el río Tonalá.
- c) Establecer los niveles de vulnerabilidad social, ambiental y económica para la cuenca bajas del río
- d) Evaluar los niveles de riesgo de la cuenca asociados a avenidas de diseño.

1.3. ESTRUCTURA

El trabajo está integrado por nueve capítulos estructurados cómo que se describe a continuación:

Capítulo 1. Introducción

Provee una breve introducción del estudio, donde se describe de forma sucinta la problemática y motivación detrás de la investigación, además de los objetivos a alcanzar.

Capítulo 2. Área de estudio y datos disponibles

En este capítulo se describe de manera general el área de estudio, su ubicación, características físicas sociales y económicas. Adicionalmente, se describe la base de datos utilizada en el estudio dividiéndola en tres grupos: Datos físicos, Datos climáticos, y Datos sociales, económicos, ecológicos y culturales.

Capítulo 3. Estado del arte

En este capítulo se expone una revisión del estado del arte, a través del análisis de dos componentes, por un lado se integra la amenaza, la cual es descrita por medio de sus características, componentes y sus principales afectaciones en la zona de estudio. Por otro lado, se incorpora una revisión de los diferentes enfoques metodológicos que se utilizan para el análisis y gestión del riesgo por inundación.

Capítulo 4. Estimación de los valores de precipitación asociados a diferentes periodos de retorno

Como punto de partida, y para la caracterización de la amenaza, este capítulo presenta la estimación de los valores de precipitación de diseño para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. El análisis descrito, toma como base la estimación de datos de lluvia faltante a través de diferentes técnicas de interpolación. Finalmente, se incorpora un análisis extremal de los valores de intensidad de lluvia diaria consecutiva.

Capítulo 5. Modelado hidrológico de avenidas de diseño

Tomando como base los resultados de las lluvias de diseño obtenidas en el capítulo anterior, esta sección introduce el proceso de modelado hidrológico de avenidas de diseño. Para este propósito, se utiliza el modelo hidrológico de parámetros semidistribuidos conocido como (Soil and Water Assessment Tool) SWAT desarrollado por la Universidad de Texas, Estados Unidos.

Capítulo 6. Modelado hidrodinámico: Identificación de la amenaza en la cuenca baja del río Tonalá

Este capítulo presenta el desarrollo final de la estimación del nivel de amenaza para diferentes periodos de retorno, que consiste en el tránsito hidráulico de las avenidas de diseño, por medio del modelo hidrodinámico en dos dimensiones MIKE21. De esta forma, los resultados principales en este capítulo son los mapas de amenaza ante la inundación.

Capítulo 7. Vulnerabilidad

Este capítulo presenta la vulnerabilidad de la zona de estudio, por medio de la relación entre el nivel de fragilidad de los sistemas físicos, sociales, económicos y ecológicos y su rango de exposición ante la inundación.

Capítulo 8. Análisis de riesgo por inundación en la cuenca baja del río Tonalá

En este capítulo se muestran los resultados finales del estudio. Partiendo de los resultados de la identificación de la amenaza presentados en el capítulo 6, y la estimación de los sistemas vulnerables a la inundación presentados en el capítulo 7, se integran los mapas de riesgo a fin de establecer las áreas de mayor riesgo de inundación en la zona de estudio.

Capítulo 9. Conclusiones y recomendaciones

Por último, en esta sección se exponen las conclusiones generables, recomendaciones y líneas futuras de investigación para este trabajo de tesis.

Anexo A. Pruebas de homogeneidad e independencia de las series

Como parte del análisis de lluvia en la cuenca, en este anexo se muestra las pruebas de homogeneidad e independencia de las series para el análisis extremal de la precipitación diaria en la cuenca del río Tonalá.

Anexo B. Mapas de susceptibilidad de los sistemas sociales, físicos, económicos y ecológicos

Este anexo presenta la evaluación de fragilidad y los mapas de susceptibilidad para los sistemas sociales, físico-económicos y ecológico-culturales.

CAPÍTULO 2.

ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS DISPONIBLES

2.1 ZONA DE ESTUDIO

Localizado al sureste de México (Figura 2.1), el río Tonalá cuenta con una extensión de 139 km siendo el límite natural entre los estados de Veracruz y Tabasco. La corriente principal de la cuenca nace en la Sierra Madre de Chiapas, a unos 1.000 m de altitud, y en su trayecto atraviesa la más antigua e importante zona petrolera del sureste de México, donde finalmente descarga sus aguas al Golfo de México.

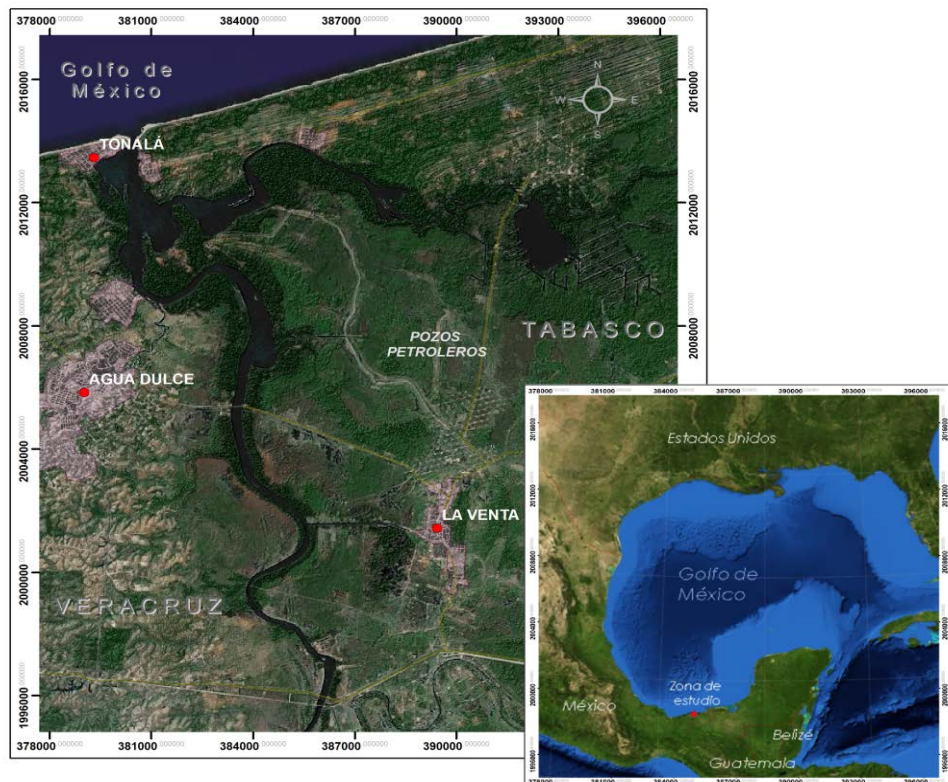


Figura 2.1 Ubicación de la cuenca del río Tonalá

El Río Tonalá se encuentra formado por la confluencia de los ríos Tancochapa y Zanapa y cubre un área total de 1684.57 km² (418.4 km² en su cuenca baja). Su volumen de descarga es de 11.389 hm³/s (CONAGUA. 2010). En gran parte de su trayecto, alrededor de 110 km, el río se encuentra por debajo de los 200 m de altitud, lo que da lugar a un tramo sinuoso y con algunas lagunas, sobre todo cerca de su desembocadura al mar.

En general, el clima de la cuenca es cálido húmedo, fuertemente influenciado por una temporada intensa de lluvias (septiembre-diciembre) en combinación con la incidencia de tormentas y huracanes provenientes del norte (Pedrozo-Acuña et al., 2012). La temperatura media anual oscila entre los 24 y los 28 °C y una precipitación total anual entre 2000-3000 mm/año con un rango de 80-86% de humedad relativa durante la mayor parte del año (CONAGUA. 2010).

2.1.1 VEGETACIÓN Y SUELOS

El Río Tonalá comprende zonas planas bajas y muy bajas, con pendientes no superiores a 0.5°, tal y como se presenta en el mapa de relieve en la Figura 2.2a. Esta zona se caracteriza por estar compuesta en su mayor parte por depósitos cuaternarios recientes de origen fluvial. En la zona de la desembocadura afloran los sedimentos recientes de origen eólico, que consisten de sedimentos de playa y cordones litorales de playas antiguas (Ortiz Pérez, 2010). En la Figura 2.2b se muestra el mapa edafológico de la zona de estudio.

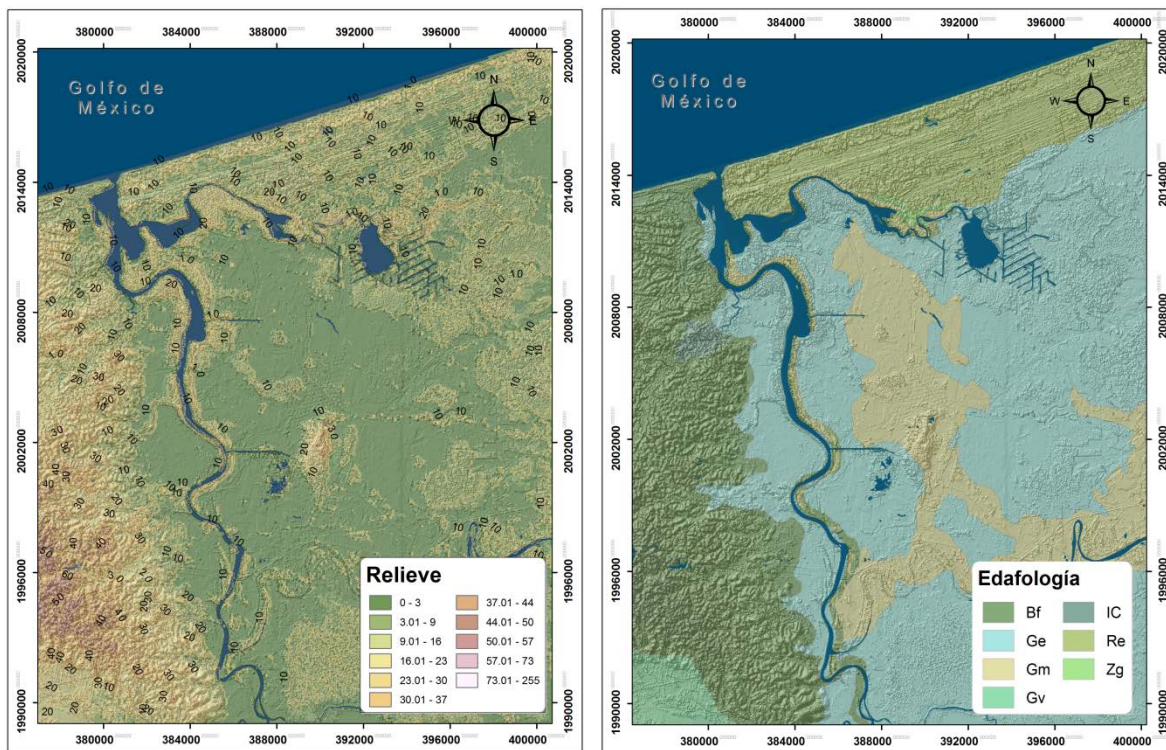


Figura 2.2 Geomorfología a) Mapa de Relieve; b) Mapa edafológico

CAPITULO 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS DISPONIBLES

Dentro de los usos del suelo que existen en la región, se pueden identificar cinco diferentes tipos: agrícola, urbana, pastizal, selva y áreas con otros tipos de vegetación. Los tipos de suelo agrícola se encuentran en la región costera de la cuenca, cubriendo gran parte de la desembocadura del río. Los suelos urbanos están asociados a las zonas urbanas de La Venta, Tonalá y Agua Dulce. Las zonas de Selva Alta Perennifolia, cubren extensas regiones petroleras, lo que a su vez produce una fuerte presión sobre estos sistemas, resultado de dicha actividad. Las zonas agrícolas de pastizales, representan regiones definidas intencionalmente que abarcan la mayor parte de las zonas elevadas de la cuenca y algunas regiones de planicie. Existen además áreas con otro tipo de vegetación, como son el manglar y las comunidades de vegetación herbácea de tipo Tular y Palmar. La [Figura 2.3](#) ilustra de forma gráfica la distribución espacial del tipo de suelo para la zona de estudio.

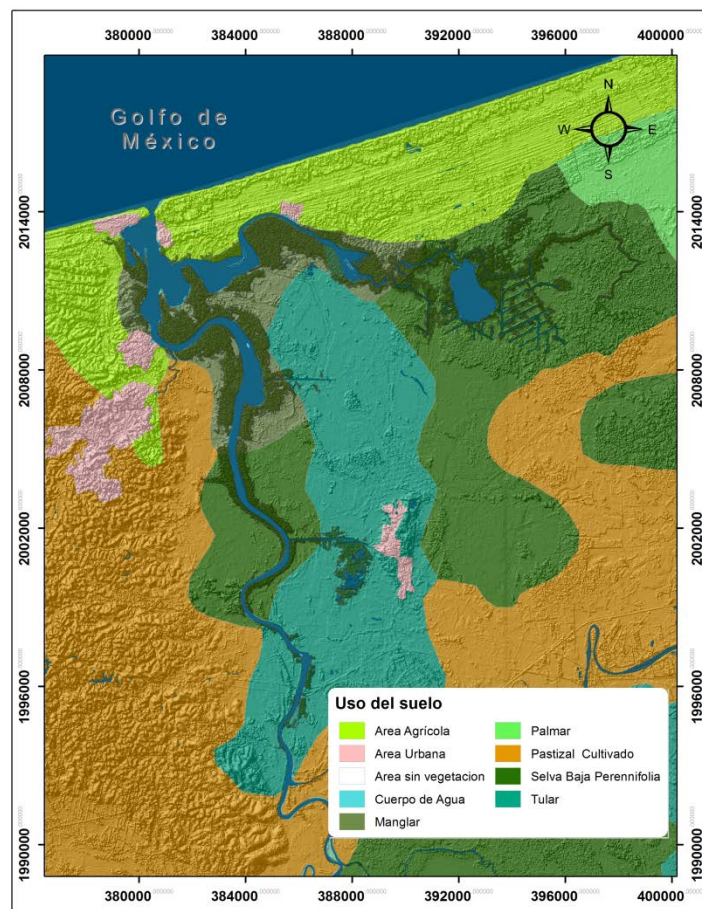


Figura 2.3 Usos del suelo

Respecto a la vegetación, la cuenca del Río Tonalá cuenta con importantes zonas de manglares. Estos ecosistemas se encuentran agrupados en la categoría de humedales, lo que indica que en alguna época del año están sometidos a inundaciones parciales o totales ([Castillo-Campos et al., 2005](#)).

Dada la fuerte influencia de los cambios hidrológicos sobre la flora, la vegetación de la cuenca baja del río Tonalá tiene un papel importante en la regulación del balance hídrico y el régimen de gastos que se produce por las lluvias de gran intensidad. Esto se debe a la importancia de

la vegetación en la retención y almacenamiento de agua a nivel de cuenca. Por otro lado, la vegetación también juega un rol primordial en lo que se refiere al control de inundaciones. Es de conocimiento común que el manglar ubicado en las márgenes del río, provee un mecanismo natural de protección contra la sobre elevación del nivel en el río, comportándose como bordos naturales del mismo. Sin embargo, cabe señalar que las construcciones de canales para la actividad petrolera, en especial en la zona de La Venta, han deforestado una parte importante de la zona arbórea en las márgenes del río.

2.1.2 SOCIOECONÓMICO

El ambiente socioeconómico de la cuenca baja del río Tonalá es producto de un crecimiento económico importante de la región, como resultado de a la explotación petrolera. La accesibilidad a las mayores fuentes de hidrocarburos del país ha propiciado una fuerte presión demográfica debido a movimientos migratorios de población en búsqueda de mejores oportunidades. Para el análisis socioeconómico de la zona de estudio, se describe a continuación el ambiente social y económico de los centros urbanos más representativos (Figura 2.4). Por el lado del Estado de Veracruz, el municipio de Agua Dulce donde concentra los poblados de Agua Dulce y Tonalá, y en el lado del estado de Tabasco el municipio de Huimanguillo que concentra al poblado de La Venta.

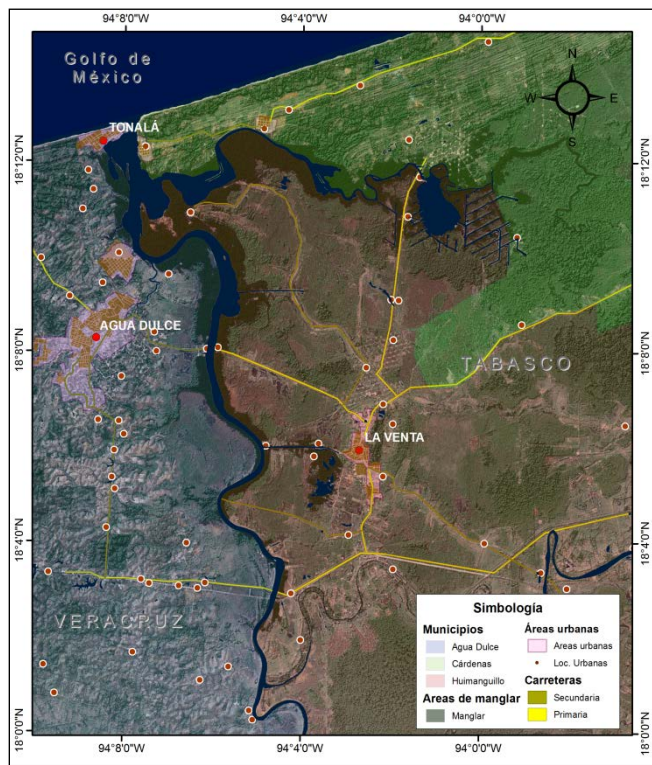


Figura 2.4 División municipal de la cuenca baja del Río Tonalá

Agua Dulce:

Es un municipio semiurbano con una extensión de 372 km², correspondientes a 0.5% del total del Estado de Veracruz. Conforme al último censo realizado por el INEGI en el 2010, la

CAPITULO 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS DISPONIBLES

población total de Agua Dulce es de 46.010 habitantes distribuidos en 66 localidades (2 urbanas y 64 rurales) siendo su cabecera, y teniendo la mayor población, la localidad de Agua Dulce (Tabla 2.1). La distribución de la población es en su mayoría femenil y la edad promedio se encuentra alrededor de los 27 años (Figura 2.5). La densidad poblacional a 2010 es de 123.7 hab/km².

Tabla 2.1 Habitantes en las principales localidades del municipio de Agua Dulce

Localidad	Habitantes
Agua Dulce	36 079
El Muelle(Gavilán Norte)	3 370
Tonalá	2 005
El Encanto (Ejido el Encanto Pesquero)	754
Los Manantiales	651
Resto de las Localidades	3 151

FUENTE: INEGI, Censo de población y Vivienda 2010

En general el municipio de Agua Dulce presenta un índice de crecimiento medio. Durante el último quinquenio evaluado, la tasa media de crecimiento ha aumentado considerablemente en relación periodo anterior (0.81 en el periodo 2005-2010 en relación a 0.09 en 2000-2005). En relación con los índices básicos de bienestar, el índice de desarrollo humano para el año 2005 es alto ocupando el puesto 23 a nivel estatal. El grado de marginación es bajo con un índice a 2005 de -0.89.

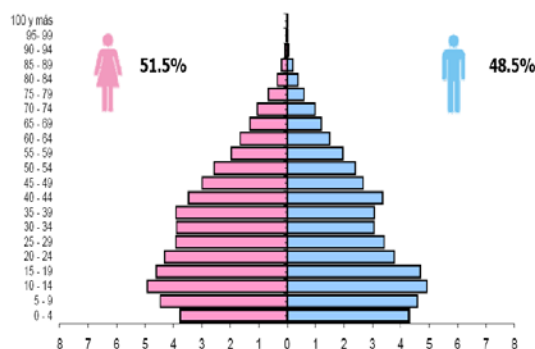


Figura 2.5 Características demográficas de la población (INEGI, 2010)

Desde principios del siglo XX, la economía de Agua Dulce tiene su base en la extracción petrolera (Sánchez,2010). La explotación de importantes yacimientos como los de Balsillo, 5 presidentes, las Choapas y Campo Rabasa, y la consolidación de la industria petroquímica como principal contribuyente en la industria química nacional (PEMEX, 2007), han ocasionado una gran dependencia de la población sobre esta actividad . Tal y como se verifica en la concentración del 37.4% de la población económicamente activa, sobre actividades relacionadas con dicho sector.

En cuanto al sector primario, este ocupa al 8.6% de la población económicamente activa. El sector agrícola del municipio ocupa el 20% de la superficie municipal. El principal producto es el grano de maíz, seguido de la copra y el frijol. A 2009 la producción total agrícola tuvo un

valor cercano a los 10 millones de pesos. En el caso de la industria ganadera, Tiene una superficie de 19.476 hectáreas dedicadas a la ganadería y avicultura. Dentro de esta actividad se destaca la cría de aves con un valor de producción a 2009 de 1042 millones de pesos aproximadamente, seguido de la cría bovina con un valor de producción de 33 millones.

Huimanguillo:

Con una extensión de 3.757.59 km², Huimanguillo es el municipio más grande del Estado de Tabasco. Se encuentra conformado por 3 villas, 18 poblados, 26 colonias agrícolas, 42 rancherías y 106 ejidos, de los cuales el poblado Villa La Venta es la segunda población más importante del municipio de Huimanguillo, después de la ciudad homónima de Huimanguillo que es la cabecera municipal (Tabla 2.2). La población total es de 179,285 Habitantes distribuidos en 50.5% para la población femenil y un 49.5% para la varonil. La densidad de la población es de 48.07 Habitantes/Km².

Tabla 2.2 Habitantes en las principales localidades del municipio de Huimanguillo

Localidad	Habitantes
Huimanguillo	27 344
La Venta	8 821
Chontalpa (Estación Chontalpa)	7 336
Río Seco y Montaña 2da. Sección	4 154
Resto de las Localidades	131 630

FUENTE: INEGI, Censo de población y Vivienda 2010

La dinámica poblacional presenta un acelerado crecimiento en las localidades urbanas del Estado. Conforme a los datos presentados por el INEGI, la tasa de crecimiento estatal tuvo un incremento considerable durante el periodo 2005-2010, ubicándose en 2.4% en relación a un 0.9% presentado entre 2000-2005. El nivel de crecimiento registrado, ubica al Estado muy por encima de la media nacional (1.8%). Estos valores de crecimiento, inciden de manera directa en las zonas urbanas y de importancia económica. Dado que en búsqueda de mejores ingresos, existe una mayor migración de la población rural hacia las ciudades, tal y como se observa en el caso del municipio de Huimanguillo.

De acuerdo a los índices básicos de desarrollo, el municipio de Huimanguillo presenta un grado de marginación medio, ocupando la posición nueve del total estatal. Por otro lado, para la localidad de La Venta el grado de marginación es igual que el valor municipal. En cuanto al índice de desarrollo humano, a 2005 el municipio ocupa el puesto 15 del total estatal con una puntuación de 0.7509. Este valor presenta un incremento de 0.05% en relación con el nivel registrado en el año 2000.

La economía del municipio, y en especial en la localidad de La Venta, gira principalmente en torno a las actividades petroleras, al igual que al sector comercial y de servicios. En la industria petrolera sobresalen el complejo Procesador de Gas "La Venta", diversas instalaciones petroleras, como la Batería y estación de Compresión "Paredón" varios campos petroleros con cientos de pozos en producción. En el área de servicios y comercio, a nivel estatal es una de las seis ciudades con mayor cantidad de establecimientos comerciales, concentrando a un alto porcentaje de la población económicamente activa (Figura 2.6)

En la actividad primaria, la agricultura en el municipio está destinada a la producción de cítricos y granos básicos, siendo el principal productor de cítricos en el Estado. Respecto a la industria ganadera, el municipio cuenta con una de las principales zonas ganaderas del Estado, situándose en el segundo lugar de importancia en la producción de ganado bovino de carne y leche. Adicionalmente, la producción avícola de Huimanguillo es líder en del Estado y a la vez, es un importante productor de porcinos, ovinos y equinos

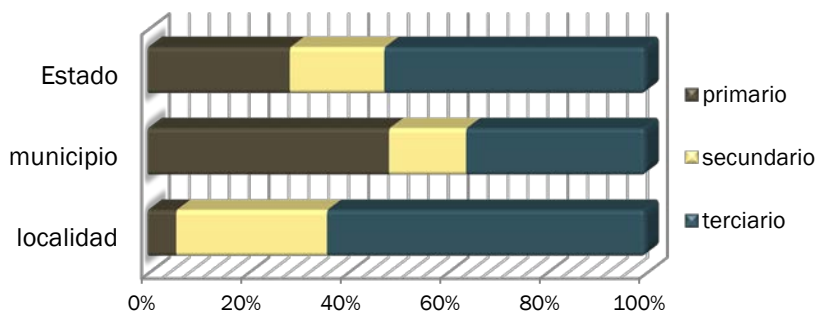


Figura 2.6 Distribución de la población económicamente activa Fuente: Foro-Mexico.com

Otro factor relevante en la economía de Huimanguillo se encuentra relacionado con la actividad turística. El municipio cuenta con una importante región arqueológica en donde se exhiben piezas de la antigua ciudad de la cultura Olmeca. La zona arqueológica de La Venta que a la vez cuenta con un museo de sitio, es considerado un gran atractivo turístico, el cual atrae a un gran número de viajeros a la región y proporciona una buena fuente de ingresos para la población del municipio.

2.1.3 INUNDACIONES EN RÍO TONALÁ

La región del río Tonalá se encuentra ubicada en la entidad federativa que ha sido más afectada por inundaciones severas. La vulnerabilidad que caracteriza al estado de Tabasco, es atribuida a la dinámica social, el bajo nivel topográfico de la zona (menor a 30 msnm), la diversidad de los sistemas hídricos que presenta y las particularidades climáticas que lo afectan, como son los ciclones tropicales y frentes fríos provenientes del Golfo de México. Durante los últimos años, la región ha sido testigo de los eventos más intensos en los últimos 50 años. En el año de 2007, el desbordamiento de los ríos de La Sierra Carrizal, Chilapa y Grijalva, causó que cerca del 80% del estado se encontrara bajo el agua (Senado Rep. /CAH, 2008). El saldo total fue de más de un millón de personas damnificadas y pérdidas económicas superiores a los 3 mil millones de dólares (CENAPRED, 2008). En el 2008 las lluvias atípicas registradas en la cuenca Grijalva-Usumacinta causaron daños y pérdidas de alrededor de 411 millones de dólares (CEPAL, 2011). En el 2009, el frente frío No. 9 proveniente del Golfo de México durante los primeros días de noviembre, causaron precipitaciones intensas que terminaron en el desbordamiento de los ríos Tonalá y Coatzacoalcos en Veracruz. En el 2010 las inundaciones afectaron de nuevo a la Ciudad de Villahermosa, en donde la construcción de los bordos de protección y las obras hídricas en el río Carrizal no lograron proteger la ciudad de las inundaciones. Finalmente, en 2011 las precipitaciones intensas impactaron la cuenca del río Grijalva-Usumacinta afectado 16

municipios y las localidades urbanas de Jonuta, Emiliano Zapata. De esta manera, las pérdidas inducidas por eventos de inundación entre los años 2007 y 2011 en el estado de Tabasco, ascienden a más de 60 mil millones de pesos.

En este sentido el gobierno federal ha buscado la generación de alternativas que disminuyan el riesgo de la población del estado a través de la creación de estrategias de control de inundaciones. Los últimos esquemas que se han propuesto, corresponden al Programa Integral de Inundaciones (PICI), que fue desechado después del evento de 2007 dado que faltaban estructuras por construir (avance del 70%), además que las obras de defensa construidas no pudieron contener la magnitud del evento de inundación presentado. En nuestro país la mayor parte de los esfuerzos incluidos el PICI, se reducen a la construcción de infraestructura hidráulica de control de avenidas, sin considerar medidas adicionales para el manejo de estos desastres, como pueden ser el ordenamiento territorial y un programa de investigación aplicada para expandir el conocimiento necesario para hacer frente a este problema.

Posteriormente, se ha generado el Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), que tiene el propósito de generar un conjunto de soluciones que garanticen la seguridad a la población, al desempeño de las actividades económicas, y a mantener el equilibrio en los ecosistemas ante la incidencia de eventos meteorológicos extremos. De tal suerte que se reduzcan las condiciones de riesgo que percibe con frecuencia la población tabasqueña ante los efectos de dichos eventos (CONAGUA, 2012). En este estudio, se promueve por primera vez en México, el reordenamiento ecológico y territorial evitando que continúen los asentamientos humanos en zonas de alto riesgo. La visión del PHIT es integral dado que estudia a un nivel de cuenca, todas las variables involucradas en la generación de eventos extremos (ej. precipitaciones de gran intensidad y su interacción con grandes caudales en los ríos). Esta visión se lleva a cabo mediante el planteamiento de estrategias a corto, mediano y largo plazo. Las acciones a corto plazo se incluyen en el Plan de Acciones Urgentes (PAU), este plan se creó con la finalidad de llevar a cabo medidas urgentes en el periodo en el que estaban sucediendo las lluvias en el 2007. La asignación de recursos al programa asciende a 9377 millones de pesos, considerando estudios y ejecución de obras.

En particular, el evento ocurrido en el río Tonalá durante noviembre de 2009, fue estudiado ampliamente en el PHIT durante su tercera fase. Esta investigación incluyó la revisión hidráulica de los ríos Tonalá, Zanapa, Blasillo y Naranjeño, considerando un análisis de lluvias de la cuenca y la simulación numérica del tránsito de esta avenida en los ríos.

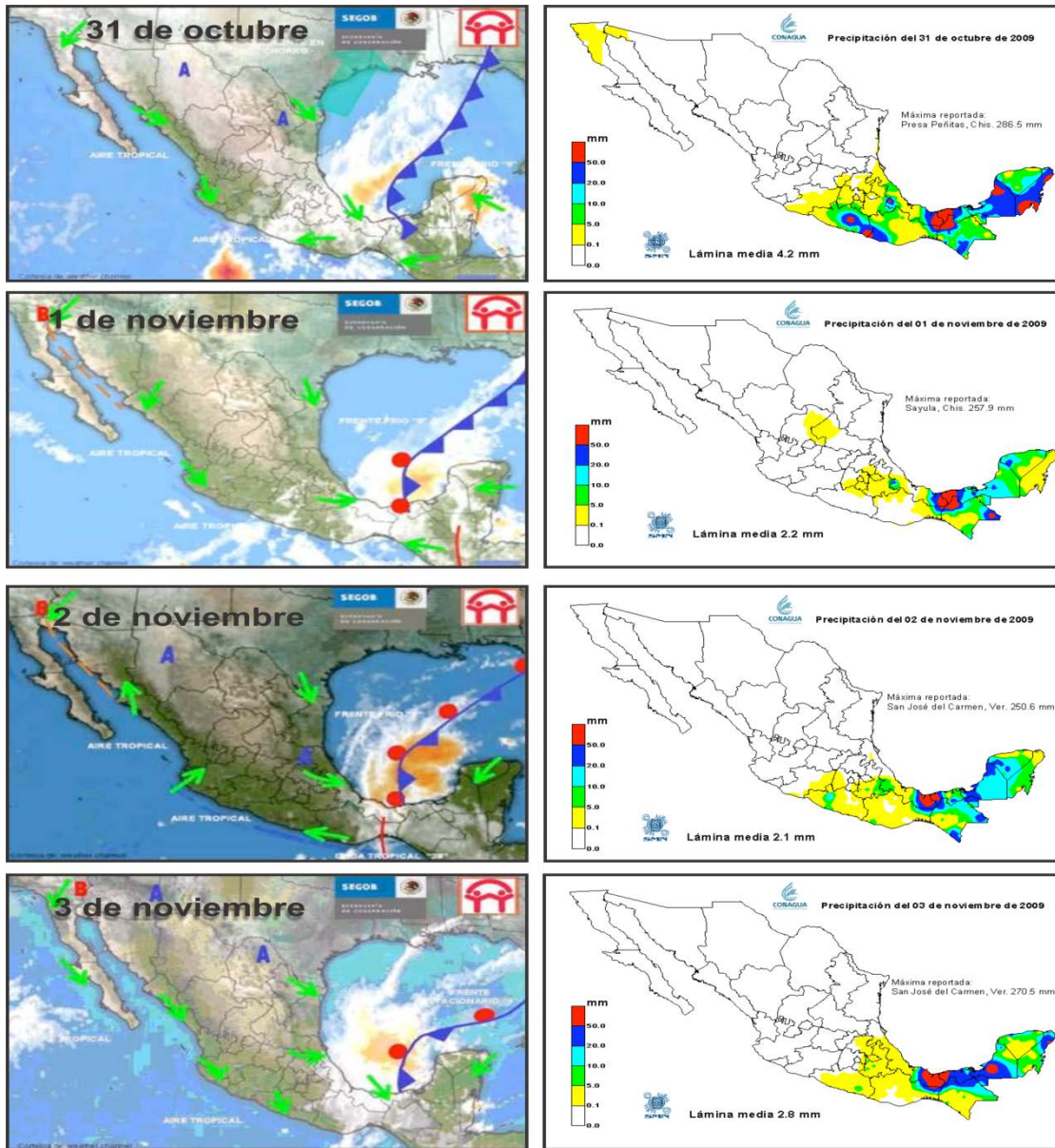
Debido a la magnitud e intensidad del evento del 2009, a continuación se describe el fenómeno hidrometeorológico que afectó la cuenca y las principales afectaciones que tuvieron lugar sobre los sistemas sociales y económicos en la región.

2.1.3.1 Inundación del 2009, una fecha para recordar

En noviembre de 2009 la región limítrofe entre los Estados de Veracruz y Tabasco, sufrió severas inundaciones debido a la presencia del frente frío No. 9. Este fenómeno ingreso al país a finales del mes de octubre y principios del mes de noviembre, donde al encontrarse con un sistema de baja presión en el Mar Caribe quedó estacionario en el sistema por casi cuatro

CAPITULO 2. ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS DISPONIBLES

días sobre el sur del Golfo de México descargando grandes cantidades de agua (Figura 2.7). Esta condición provoco lluvias de característica extraordinaria (máxima diaria >270mm) por 72 horas consecutivas en la región, entre los días 31 de octubre y 3 de noviembre, afectando principalmente la zona oeste del estado de Tabasco y sur de Veracruz, dentro de la cuenca del



río Tonalá y la laguna del Carmen.

Figura 2.7 Desarrollo del frente frío No. 9 y láminas de lluvias reportadas entre el 31 de octubre y el 3 de noviembre

La Secretaría de Gobernación (SeGob) emitió la declaratoria de emergencia para 10 municipios de Veracruz y tres de Tabasco. Entre los que se incluyeron por Veracruz, los municipios de Acayucan, Coatzacoalcos, Cosoleacaque, Ixhuatlán del Sureste, Minatitlán, Moloacán, Nanchital de Lázaro Cárdenas del Río, Texistepec, Uxpanapa y Zaragoza, y por

Tabasco los Municipios de Cardenas y Huimalguillo. Las fuertes precipitaciones ocasionaron el desbordamiento de seis ríos y arroyos afectaron a 18 mil habitantes de 84 comunidades rurales en el lado de Veracruz. Por el lado de Tabasco, en los municipios de Cardenas y Huimanguillo afectaron a unos 20 mil pobladores, causando daños en la agricultura, ganadería y en los sistemas viales y urbanos al interior de los municipios. En la **Figura 2.8** se muestra la declaratoria de desastre en el Estado de Tabasco y las imágenes de las zonas inundadas y actividades de salvamento después del siniestro.



Figura 2. 8 Declaratoria de desastre e imágenes de zonas afectadas Fuente: Imágenes NOTIMEX

Un diagnostico inicial del problema fue formulado en el reporte de inundaciones del **CENAPRED (2010)**, Según este reporte, el problema real de las inundaciones presentadas en la cuenca del río Tonalá se debió a que el río no cuenta con una infraestructura hidráulica para la regulación de las avenidas, por lo que los escurrimientos concentrados en el río debido al frente frío, fluyeron libremente hacia la zona baja de las cuencas provocando inundaciones. Por su parte, el análisis del evento emitido por la Comisión Nacional de Agua Estatal en sus fichas de solicitud de recursos del FONDEN para la atención de la emergencia, hace mención que los daños ocasionados en el evento del 2009 fueron producto del cambio de uso del suelo de zonas destinadas a la amortiguación y la expansión de las zonas urbanas vulnerables.

La evolución de la mancha de inundación y su distribución sobre la planicie de la cuenca es mostrada en la **Figura 2.9**. En el panel izquierdo de la imagen se muestra las imágenes de

satélite Terra de la evolución de la inundación extraídas de la base Rapid Response de la NASA/GSFC. En la franja izquierda se muestra la imagen de satélite Spot 4 de la inundación el 15 de noviembre de 2009.

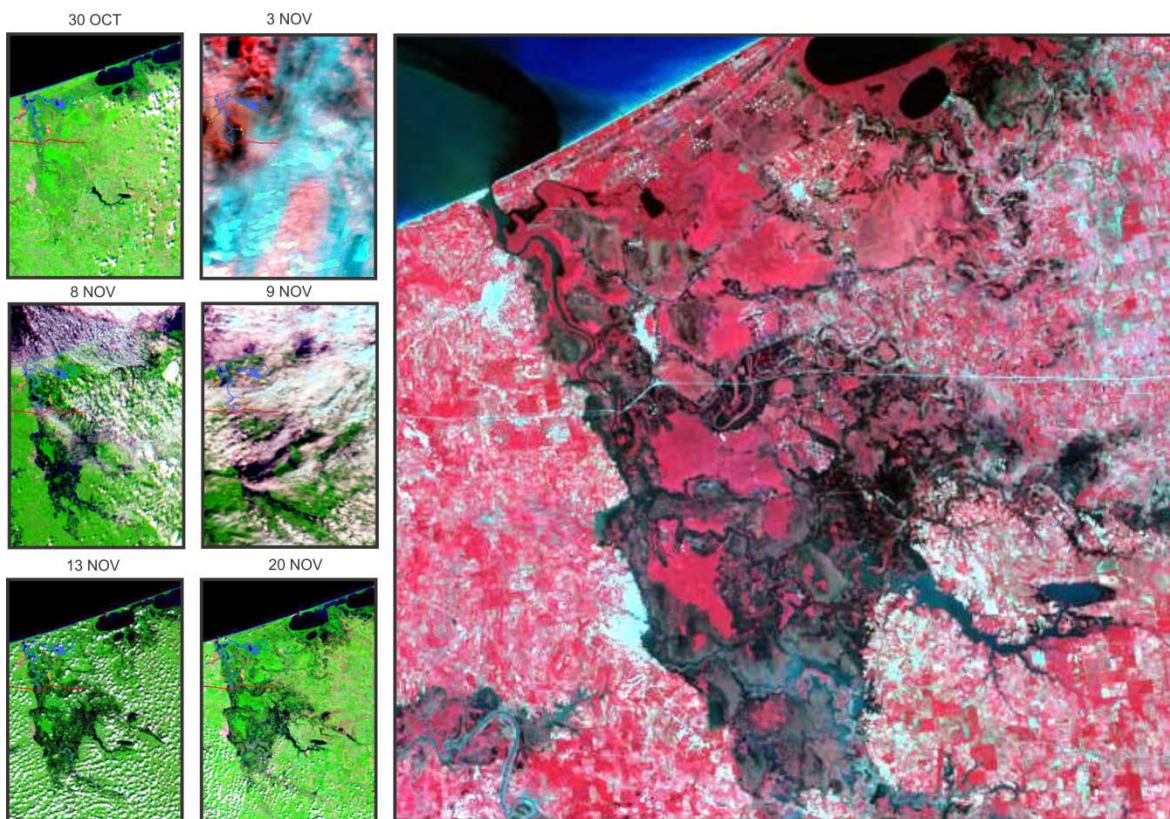


Figura 2. 9 Desarrollo de la mancha de inundación 30 oct. al 20 nov. (Izquierda) Cronología de las manchas de inundación, del 30 de octubre al 20 de noviembre. Imágenes NASA/GSFC, Rapid Response Res 250 m. (derecha) imagen Spot 4 de la zona inundada del río Tonalá del 15 de noviembre de 2009

Un análisis de las principales repercusiones de las inundaciones ocurridas en 2009, indicó que los daños y pérdidas en los Estados de Tabasco y Veracruz ascendieron a más de 4 mil millones de pesos. En el caso del Tabasco, el sector que se vio más afectado fue el de la infraestructura económica, siendo la infraestructura carretera la más dañada por la inundación. El monto total de daños y pérdidas en este sector fue de 1.797.4 millones de pesos que equivale al 72.9% de los efectos totales. Así mismo, el sector productivo reportó también una fuerte afectación económica producto de las inundaciones, el monto total por daños y pérdidas en este sector fue de 390 millones de pesos (15.9%), siendo la actividad ganadera la que registró la mayor afectación con el 9.17%.

En cuanto a los daños y pérdidas en el Estado de Veracruz, la infraestructura vial también reportó las mayores afectaciones producto de la inundación de 2009. El monto total por daños y perdidas en este sector fue de 1.414.8 millones de pesos, que representa el 74.1% del total de los costos. En segundo término los sectores productivo y social también reportaron daños por un 16.7% y un 4.4%, respectivamente. En la [Tabla 2.3](#) se muestra el resumen de daños y pérdidas estatales por sector económico.

Tabla 2.3 Resumen de daños ocasionados por las inundaciones en el Estados de Tabasco y Veracruz en octubre y noviembre del 2009

CONCEPTO	MILES DE PESOS						PORCENTAJE (%)	
	DAÑOS		PERDIDAS		TOTAL		TAB	VER
	TABASCO	VERACRUZ	TABASCO	VERACRUZ	TABASCO	VERACRUZ		
Sectores sociales	\$66,421.4	\$54,403.2	\$110,006.0	\$28,871.2	\$176,427.4	\$83,274.4	7.16%	4.4
<i>Vivienda</i>	\$21,974.2	\$18,065.2	\$58,167.2	\$27,463.8	\$80,141.4	\$45,529.0	3.25	2.4
<i>Salud</i>	\$1,721.6	\$36,338.0	\$46,395.0	\$1,090.2	\$48,116.6	\$37,428.2	1.95	2
<i>Educativo</i>	\$41,619.4	\$ -	\$5,361.9	\$317.2	\$46,981.3	\$317.2	1.91	0
<i>Cultura</i>	\$1,106.2	\$ -	\$81.9	\$ -	\$1,188.1	\$ -	0.05	0
Infraestructura económica	\$1,345,714.9	\$1,258,570.4	\$451,705.8	\$156,324.4	\$1,797,420.7	\$1,414,894.8	72.91%	74.1%
<i>Infra. hidráulica</i>	\$154,513.3	\$770.0	\$405,447.6	\$120,691.1	\$559,960.9	\$121,461.1	22.71	6.4
<i>Infra. carretera</i>	\$1,185,756.7	\$1,187,706.4	\$41,258.2	\$35,631.2	\$1,227,014.9	\$1,223,337.6	49.77	64
<i>Infra. eléctrica</i>	\$1,733.2	\$ -	\$5,000.0	\$ -	\$6,733.2	\$ -	0.27	0
<i>Infra. naval</i>	\$3,711.7	\$ -	\$ -	\$ -	\$3,711.7	\$ -	0.15	0
<i>Infra. urbana</i>	\$ -	\$70,094.0	\$ -	\$2.1	\$ -	\$70,096.1	0	3.7
Sectores productivos	\$229,358.5	\$11,123.6	\$160,723.8	\$307,699.0	\$390,082.3	\$318,822.6	15.82%	16.7%
<i>Agrícola</i>	\$49,243.0	\$ -	\$98,208.9	\$ -	\$147,451.9	\$ -	5.98	0
<i>Ganadería</i>	\$170,146.7	\$ -	\$56,007.1	\$ -	\$226,153.8	\$ -	9.17	0
<i>Pesca y acuicultura</i>	\$9,968.8	\$11,123.6	\$6,507.8	\$307,699.0	\$16,476.6	\$318,822.6	0.67	16.7
Sectores productivos no agrícolas	\$40,237.2	\$ -	\$27,423.7	\$95,328.5	\$67,660.9	\$95,328.5	2.74%	0%
<i>Comercio</i>	\$26,699.9	\$ -	\$18,506.3	\$ -	\$45,206.2	\$ -	1.83	0
<i>Industria</i>	\$2,003.5	\$ -	\$1,714.3	\$ -	\$3,717.7	\$ -	0.15	0
<i>Servicios</i>	\$8,584.0	\$ -	\$684.9	\$ -	\$9,269.0	\$ -	0.38	0
<i>Turismo y restaurantes</i>	\$2,949.8	\$ -	\$6,518.2	\$ -	\$9,468.0	\$ -	0.38	0
Otros sectores	\$160.9	\$ -	\$33,483.1	\$ -	\$33,644.0	\$ -	1.36%	5%
<i>Atención de la emergencia</i>	\$ -	\$ -	\$33,250.5	\$47,700.4	\$33,250.5	\$47,700.4	1.35	2.5
<i>Medio ambiente</i>	\$160.9	\$ -	\$232.6	\$47,628.1	\$393.5	\$47,628.1	0.02	2.5
SUBTOTAL	\$1,681,892.9	\$1,324,097.2	\$783,342.4	\$588,223.1	\$2,465,235.3	\$1,912,320.3		
TOTAL	\$3,005,990.1		\$1,371,565.5		\$4,377,555.6		100%	

FUENTE: (CENAPRED, 2012)

2.2 DATOS

En esta sección se presentan las principales fuentes de información utilizadas para el análisis de riesgo, en la cuenca baja del Río Tonalá. Con el fin de reducir la incertidumbre epistémica que se tiene en los procesos de evaluación de la amenaza y de acuerdo a lo propuesto por Schumann (2011), este trabajo involucró la recopilación de la mejor y más completa información que se tiene disponible hasta el momento. Los principales datos utilizados son: Información de los aspectos físicos de la cuenca, condiciones climáticas y aspectos socioeconómicos y ecológicos de la cuenca

2.2.1 Físicos

Con el propósito de definir con mayor precisión los aspectos físicos de la cuenca, se requirió la combinación de diversas fuentes de información, entre las que destacan una campaña de campo intensa y el uso de datos de percepción remota, como son las imágenes de satélite y los datos de altimetría láser (LiDAR, por sus siglas en inglés).

En el caso de la información de campo, el estudio obtuvo datos de la campaña realizada por el Instituto de Ingeniería en septiembre de 2010 para la tercera fase del Plan Hídrico Integral de Tabasco. Dentro de la campaña de campo fueron caracterizados los flujos, las mareas y la salinidad del río, además de las condiciones batimétricas del cauce. Los datos de percepción remota fueron utilizados para la caracterización del terreno, definiendo la topografía con la mayor precisión posible. A continuación se describen los datos utilizados.

Batimetría

Los datos batimétricos fueron colectados a lo largo del Río Tonalá usando una eco sonda de doble frecuencia (SyQuest Bathy 500 DF) sincronizada a un GPS diferencial Leica 1200 (dGPS) puestos sobre una embarcación. La metodología para captación de datos estuvo realizada de la siguiente manera: en el extremo superior de la embarcación fue colocado el GPS móvil fijado a 2m de longitud. En el extremo inferior, fue inmersa la ecosonda a unos pocos centímetros de profundidad (Figura 2.10b). La ecosonda aporta datos de profundidad relativos a la posición del transductor (distancia entre el transductor y el lecho del río/laguna), y el GPS diferencial nos aporta datos de la posición geográfica del transductor respecto al elipsoide (Álvarez, 2011). En la Figura 2.10a se muestra el barrido realizado por la embarcación a todo el cauce para la toma de datos de profundidad del cauce

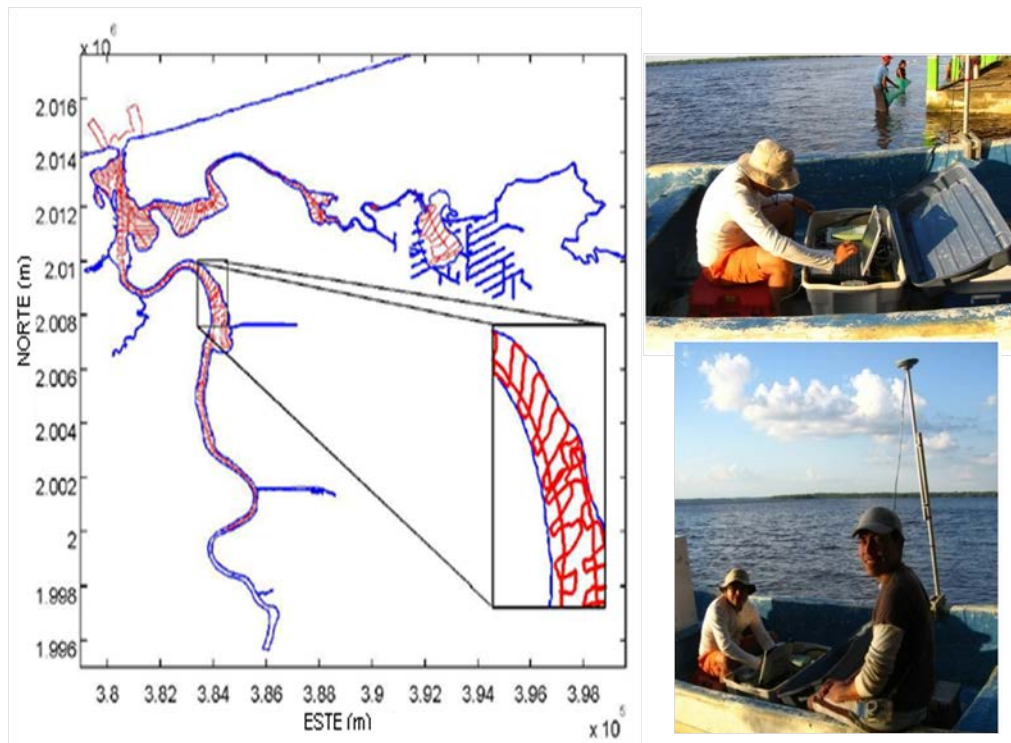


Figura 2. 10 Trayectoria de recopilación de datos topográficos y equipos utilizados a) Panel izquierdo: Línea de costa digitalizada (en azul) indicando las trayectorias de la embarcación registradas con el GPS diferencial (en rojo). b) Panel derecho: Sistema de medición de batimetría. (Álvarez, 2011).

Topografía

La topografía de la cuenca se caracterizó a través de la utilización de datos de percepción remota, construyendo modelos digitales de elevaciones (DEM) a partir de los levantamientos topográficos de tipo LiDAR y las imágenes de satélite. Entre los primeros trabajos que incorporaron datos LiDAR en el modelado de flujos de inundación se encuentra el de [Mason et al. \(2003\)](#) quienes además utilizaron esta información para caracterizar la altura de la vegetación en una llanura. Posteriormente y en virtud de la calidad de esta información, el [Committee on Floodplain Mapping Technologies \(2007\)](#) recomienda su utilización para la generación de mapas de inundación más certeros. Los DEM generados a partir de información LiDAR (Light Detection and Ranging) definen mallas de alta resolución, captadas por medio de un láser aerotransportado que provee información sobre la elevación del terreno con un mínimo control geodésico en tierra y datos con alta densidad y precisión. La nube de puntos LiDAR puede obtener mediciones de intervalos de 3 metros en la horizontal con una precisión en la vertical de $\pm 5\text{cm}$ y una exactitud relativa mínima en la vertical de $\pm 10\text{-}15\text{ cm}$ ([Environment Agency, 1997](#)).

Por otro lado, se ha reconocido también que la comprensión de los efectos de la resolución de la malla en los resultados del modelo es de gran importancia para la representación exacta de los sistemas físicos ([Hardy et al., 1999](#); [Reeve et al., 2010](#)), en este sentido se construyeron tres diferentes DEMs a resoluciones de 10, 20 y 50 metros ([Figura 2.11](#)). La utilización de diferente resolución en la generación del DEM permitió analizar la sensibilidad del modelo hidrodinámico a esta información con el fin de obtener la resolución óptima del terreno.

A partir de los datos de elevación también fue posible establecer un mapa de rugosidad de la región, el cual fue definido en función de la elevación registrada. Para ello también se contó con la ayuda de imágenes de satélite para definición de rugosidad en puntos de interés como son los centros urbanos e infraestructura vial. En caso de las imágenes de satélite, el estudio contó con dos tipos, las imágenes Quickbird de tipo multiespectral y que cuenta con una resolución 0.6 metros, y las imágenes Worldview 1 las cuales son de tipo pancromática y cuentan con una resolución 0.5 metros.

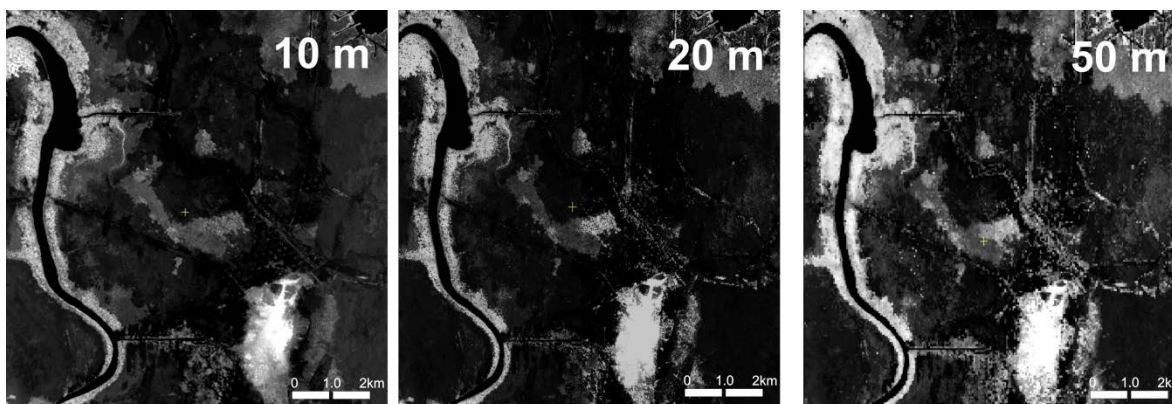


Figura 2. 11 Modelos Digitales de Elevación (DEM) obtenidos a partir de información LiDAR

Uso y tipo del suelo

Los mapas de uso y tipo del suelo fueron suministrados por la base de datos edafológica y tipo del suelo a escala 1:250000 de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1999). Esta base de datos contiene toda la geoinformación referente al acervo nacional sobre biodiversidad, además de otras capas de información de interés, como son la información social, política y económica. La información se encuentra disponible en el portal de la CONABIO en la dirección <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

2.2.2 CAUDALES

Los registros de caudales son una herramienta importante en los procesos de calibración del modelo. Para calibrar cada modelo utilizado, el trabajo obtuvo valores de caudal de dos tipos de fuentes. En el modelo hidrológico, los valores de caudal promedio diario fueron obtenidos a partir de los registros diarios de la estación hidrométrica San José del Carmen localizado en el municipio de Las Choapas en el Estado de Veracruz. Esta estación hidrométrica cuenta con registros de caudal medio diarios de 1980 a 1985 y de 1988 a 2006 Para el modelo hidrodinámico, los valores de calibración del modelo parten de gastos instantáneos de la desembocadura del río obtenidos en la campaña de campo por medio un correntímetro acústico Doppler Sontek (ADP), el cual proporciona el perfil de velocidades a lo largo de la columna de agua (Figura 2.12). Estos valores proporcionan el rango de confiabilidad permitido a los modelos para recrear cada proceso estudiado (Pedrozo et al 2011).

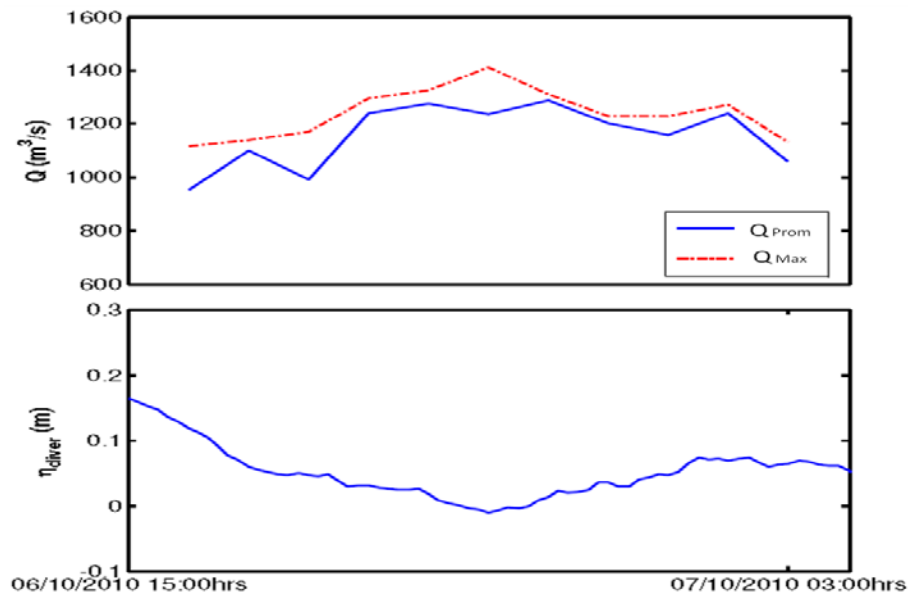


Figura 2. 12 Estimación de las descargas de la desembocadura del río a partir de mediciones ADCP. Panel superior: Valores mínimo y máximo; panel inferior: superficie libre del agua

2.2.3 CLIMÁTICOS

Los datos climáticos representan la base para el análisis hidrológico de la cuenca del río Tonalá. El análisis tiene como punto de partida, la selección e identificación de las estaciones climatológicas que tengan influencia en la zona (Figura 2.13). Durante este proceso, se mostró que en la mayor parte de las estaciones pluviométricas, la información de precipitación

máxima en 24 horas es muy limitada, debido a que en gran parte de las estaciones, los registros son muy porosos (incompletos) o cuentan con estaciones inoperantes (Tabla 2.4).

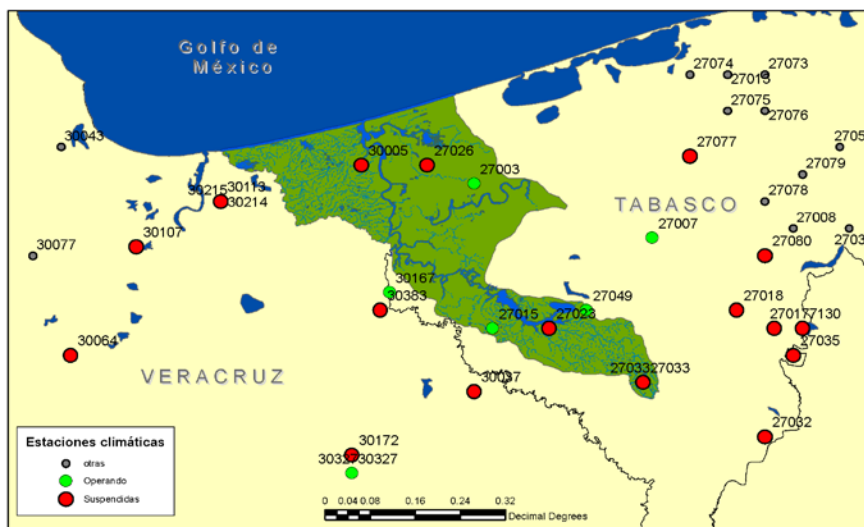


Figura 2.13 Ubicación de las estaciones climatológicas

De esta forma, el proceso de búsqueda y selección de las series de los registros diarios de las estaciones pluviométricas, fue realizado por medio de una priorización de las estaciones que de acuerdo a su ubicación, tuvieran influencia en la cuenca, y a partir de estos se seleccionaron los registros de estaciones que se encontraban operando, y que contaran con un número de registros considerables para realizar el análisis. En la Tabla 2.5 se muestran las 6 estaciones elegidas para el análisis de homogeneidad de los registros.

Tabla 2. 4 Estado de las estaciones con influencia en la zona

	CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ESTADO	INICIO	FIN	FALTAN
1	30167	Tancochapa	Las Choapas	17°52'25"	94°05'20"	OPERANDO	01-oct-48	31-dic-08	1979, 1980, 1986
2	30327	Tierra Morada	Las Choapas	17°34'19"	94°09'48"	OPERANDO	01-sep-77	27-nov-08	2006, 2007
3	27015	Francisco Rueda	Huimanguillo	17°50'12"	93°56'30"	OPERANDO	01-jul-65	31-ago-10	1 DIC 2001 - 31-DIC 2005
4	27003	Blasillo	Huimanguillo	18°02'43"	93°58'00"	OPERANDO	01-jul-67	29-sep-10	1 OCT 2000 - 31 DIC 2005
5	27033	Mosquitero	Huimanguillo	17°44'00"	93°38'00"	SUSPENDIDA	01-sep-48	31-ago-79	
6	30005	Agua Dulce	Agua Dulce	18°08'30"	94°08'40"	SUSPENDIDA	01-jun-68	31-jul-85	
7	30037	Cuitlahuac	Las Choapas	17°44'00"	94°06'00"	OPERANDO	25-sep-64	31-dic-08	01/01/1990 - 31/13/2003, 2006
8	30172	Tecuanapa	Las Choapas	17°47'15"	94°11'45"	SUSPENDIDA	01-jun-54	30-jun-93	1991, 1992
9	30214	Nanchital (DGE)	Ixhuatlán del Sureste	18°04'20"	94°24'35"	SUSPENDIDA	01-ene-60	29-feb-84	
10	27026	La Venta	Huimanguillo	18°05'52"	94°02'44"	SUSPENDIDA	01-jun-63	31-may-82	1968, 1979
11	27049	Tequila	Jalapa	17°52'02"	93°44'02"	OPERANDO	01-may-70	30-nov-08	1990, 1991, 1992, 01/12/1999-31/12/2005
12	30383	San Jose del Carmen		17°52'02"	93°44'02"	SUSPENDIDA	25-jul-81	31-dic-92	1982, 1985-1990
13	27007	Campor E. W 75	Cardenas	17°59'59"	93°37'08"	OPERANDO	10-jun-61	30-sep-10	1979, 1 DIC 1999 -31 DIC 2005
14	27018	Huimanguillo		17°52'16"	93°28'15"	SUSPENDIDA	01-nov-48	28-feb-76	
15	27060	González	Centro	17°58'26"	93°46'06"	OPERANDO	01/06/1997	31/10/2010	2000
16	27037	Pueblo Nuevo	Centro	17°51'15"	93°52'45"	OPERANDO	01/10/1948	30/11/2010	

Tabla 2. 5 Estaciones pluviométricas a analizar en la cuenca del río Tonalá

CLAVE	NOMBRE	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD
27015	Francisco Rueda	Huimanguillo	17°50'12"	93°56'30"
30167	Tancochapa	Las Choapas	17°52'25"	94°05'20"
27003	Blasillo	Huimanguillo	18°02'43"	93°58'00"
27007	Campo E. W 75	Cardenas	17°59'59"	93°37'08"
27037	Pueblo Nuevo	Centro	17°51'15"	93°52'45"
27049	Tequila	Jalapa	17°52'02"	93°44'02"

Temperatura

Los valores de temperatura máxima y mínima en la cuenca fueron obtenidos en 4 de las cinco estaciones pluviométricas de la CONAGUA identificadas, debido a que la estación de Blasillo no cuenta con medición de estos parámetros. El periodo de registro obtenido fue desde 1969 a 2010.

2.2.4 SOCIALES, ECONÓMICOS, ECOLÓGICOS Y CULTURALES

Los datos correspondientes a las condiciones de la sociedad, estructura económica, ecológica y cultural del área de estudio, fueron obtenidos de diferentes fuentes. En la [Tabla 2.6](#) se presenta un cuadro resumen de los tipos de datos utilizados, así como su fuente de procedencia.

Tabla 2. 6 Características de los datos sociales, económicos, ecológicos y culturales

DATO	AÑO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
SOCIAL	2010	Número de personas por localidad urbana (PLU)	Censo Población INEGI (2011)
		Población de 0-2 años (PLU)	
		Población de mayor a 60 años (PLU)	
		Total de viviendas particulares(PLU)	
		Número de personas empleadas (PLU)	
		Población económicamente activa (PLU)	
Viviendas sin ningún tipo de bien (PLU)			
SALUD	2010	Población con algún tipo de limitación física (PLU)	Censo Población INEGI (2011)
ECOLÓGICO	2005	Distribución y extensión reciente de la cobertura de los manglares de México	Imagen de satélite Spot5 CONABIO (2008)
	2007	Sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad	CONABIO, CONANP, PRONATURA, TNC

DATO	AÑO	DESCRIPCIÓN	FUENTE
ECONOMICA	2000	Zonas de extracción petrolera. Ubicación de pozos petroleros	delimitación a partir de imágenes Fuentes, actualizados con imágenes QuickBird 15m resolución
	1998	Zonas agrícolas	Uso de suelo y vegetación (CONABIO), (1998)
INFRAESTRUCTURA	2000	Sistema de carreteras.	Delimitación de sistema de carretera: Carta cartográfica Agua Dulce E15A86-76 escala 1:50000. INEGI (1996) actualizada con imágenes QuickBird 15m resolución año 2000
CULTURAL	1998	Rasgos Arqueológicos	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), (1998)

CAPÍTULO 3.

ESTADO DEL ARTE

3.1 INTRODUCCIÓN

Con el propósito de introducir el tema de gestión de riesgo por inundaciones fluviales en la cuenca baja del río Tonalá, este capítulo presenta una revisión del estado del arte en dos partes. En primer lugar, se analiza de manera general a las inundaciones, a través de la descripción la problemática global y nacional, sus principales clasificaciones, tipología y los estudios realizados en el área de estudio.. En segunda instancia, se hace una descripción de los diferentes enfoques metodológicos utilizados para el análisis del riesgo y como estos son incorporados a la gestión integral del riesgo.

3.2 INUNDACIONES

Las inundaciones son consideradas como el desastre más frecuente y devastador de todos los peligros naturales ([Jha et al., 2012](#)). De acuerdo con la base de datos de eventos de emergencia EM-DAT del centro de Investigación sobre Epidemiología de Desastres (CRED), solo en el 2011, las pérdidas económicas globales debido a inundaciones y tormentas fueron alrededor de 121.6 millones de dólares. Este número de inundaciones reportadas han sufrido una tendencia creciente, especialmente durante los últimos 20 años, en donde los eventos de inundación han crecido de manera exponencial ([Figura 3.1](#)). El crecimiento en el número de eventos de inundación trae consigo un efecto directo sobre la sociedad, y si bien las muertes asociadas a inundaciones presentan un descenso en los últimos años como consecuencia del éxito en los planes de atención de desastres ([Figura 3.2a](#)), las pérdidas económicas asociadas a eventos de inundación son excepcionales ([Figura 3.2b](#)). Tan sólo en el periodo de tiempo entre 1998 y 2010 estas fueron estimadas a nivel global en más de los 40mil millones de dólares ([Jha et al., 2012](#)).

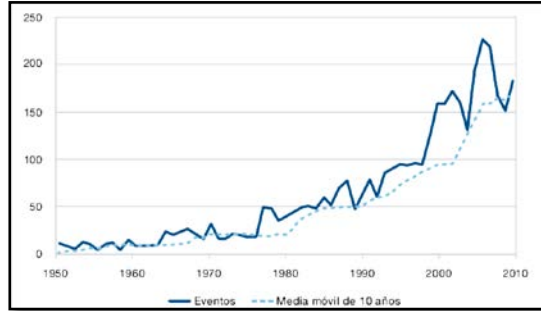


Figura 3. 1 Número de inundaciones reportadas 1950-2010, datos EM-DAT/CRED (Jha et al., 2012)

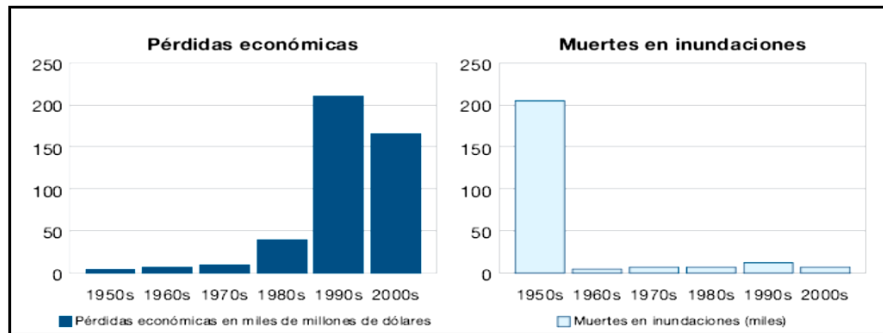


Figura 3. 2 Estadísticas de las inundaciones a) Pérdidas económicas globales; b) Muertes reportada., datos EM-DAT/CRED (Jha et al., 2012)

México es fuertemente afectado por fenómenos hidrometeorológicos extremos. Dada su naturaleza e ubicación geográfica, el país experimenta una gran variedad de fenómenos naturales, tales como lluvias convectivas, ciclones tropicales, frentes fríos y entradas de aire frío, que pueden generar lluvias torrenciales e intensas precipitaciones. Estas lluvias, a su vez, ocasionan graves inundaciones fluviales y costeras, e incluso deslaves u otros efectos de esta naturaleza. Durante la última década el país ha sufrido grandes eventos de inundación. Estos eventos han causado cuantiosos daños económicos, los cuales suman cerca del 98% de las erogaciones realizadas a través del Fondo Nacional de Desastres Naturales (FONDEN, 2011).

En la Figura 3.3 se muestra una descripción de algunos de los eventos de inundación más severos ocurridos en México y los daños ocasionados entre 2005-2011.



Figura 3. 3 Eventos de inundación con declaratoria de emergencia y recursos asignados del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) (Pedrozo-Acuña, 2012)

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS INUNDACIONES

Un aspecto fundamental en la caracterización de la inundación radica en la definición de su concepto. De acuerdo con el Centro Nacional de Atención y Prevención de Desastres (CENAPRED 2007), la inundación es aquel evento que debido a la precipitación, oleaje, marea de tormenta, efectos de ondas largas como tsunamis, o falla de alguna estructura hidráulica provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o el mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños en la población, agricultura, ganadería e infraestructura. La inundación es el resultado de la excedencia de agua dentro de un sistema. El nivel de inundación puede ser incrementado por factores sociales, climáticos y ambientales como son, la variabilidad climática, los cambios de uso de suelo, el incremento en la población y la subsidencia natural del sistema.

Los factores más importantes que determinan las características de las inundaciones son los rasgos de la precipitación, la profundidad de la inundación, la velocidad del flujo y la duración del evento (Smith, 2012). Existen diversos tipos de inundación, la clasificación más común obedece a su origen o por el tiempo de respuesta del evento.

La severidad de una inundación es con frecuencia resultado de una combinación de factores, por ejemplo, en sistemas ribereños complejos, el tiempo entre la máxima precipitación y el volumen de escurrimiento en el río, determina la magnitud del gasto pico de la avenida. La dificultad para estimar la ocurrencia de las inundaciones, radica en que hay un número limitado de eventos en el pasado reciente y éstas son difíciles de predecir. Por lo tanto, hay una carencia de datos cuantitativos para la caracterización de eventos extremos, por lo que la calibración y validación de los modelos resulta complicada y está limitada. Adicionalmente, la variabilidad en las escalas espacio-temporales de los procesos hidrológicos, aunada a la falta de conocimiento de estos procesos complica su correcta caracterización y estudio (Beven, 2006; Reeve et al., 2010).

3.2.1.1 Clasificación de acuerdo a su origen

Esta clasificación responde a la identificación de la causa que genera la inundación. En este sentido, las inundaciones pueden ser de tres tipos. Pluviales, fluviales, costeras y debidas a fallas hidráulicas y subterráneas.

- **Inundaciones pluviales:** Son originadas como consecuencia de la precipitación intensa en un sistema. Una inundación pluvial se presenta, debido a que el terreno no puede retener el volumen de agua precipitado por la saturación del suelo, y por lo tanto el volumen de agua se excede. Los periodos de excedencia pueden durar horas o días.

La característica principal de este tipo de inundación radica en que la precipitación recae sobre la zona y no de otra región que afecte al sistema. Esta precipitación puede ser generada por ciclones tropicales, lluvias orográficas, lluvias invernales o lluvias convectivas.

- **Inundaciones fluviales:** Las inundaciones fluviales son generadas cuando el agua que se desborda de los ríos queda sobre la superficie del terreno o cercano a ellos. En estas inundaciones, a diferencia de las inundaciones pluviales, las precipitaciones son originarias de cuencas que ocasionan una afectación al sistema. Este volumen es escurrido sobre el terreno por medio de los canales, el cual va incrementando el área de aportación de la cuenca.
- **Inundaciones costeras:** Son originadas por la dinámica marina y su interacción con la costa. Las inundaciones costeras presentan cuando el nivel medio del mar asciende penetrando tierra adentro en la zona costera. En general, la inundación se produce en respuesta a diversos forzamientos de origen atmosférico, marino, tectónico y planetario, siendo los que determinan la magnitud máxima de la inundación en la costa.
- **Inundación por falla hidráulica:** Las inundaciones producto de la falla hidráulica de una estructura responden a la ineficacia de una obra de proveer protección a un sistema. Estas ineficiencias pueden ser producto de un diseño escaso, la mala operación o la falta de mantenimiento de una obra. Las inundaciones de este tipo generalmente son atribuidas a fallas en presas de abastecimiento de agua y generación de energía.
- **Inundación por flujo subterráneo:** Las inundaciones por flujo subterráneo ocurren como resultado del sobre-elevación del nivel freático. Generalmente se dan en cuencas con pendientes muy suaves y en donde el nivel freático está muy cercano al nivel de superficie del terreno.

3.2.1.2 Clasificación de acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca

El tiempo de respuesta de una cuenca está determinado por sus características fisiográficas. Estas características pueden acelerar o reducir el proceso de flujo superficial que se presenta a través de la relación lluvia-escurrimiento. Conforme a esta clasificación se tienen dos grupos, las inundaciones lentas y las inundaciones súbitas.

- **Inundaciones lentas:** Son presentadas en cuencas con pendientes bajas y tiempos de concentración prolongados (del orden de horas o días). Las inundaciones lentas ocurren cuando el cauce del río excede su capacidad de almacenamiento debido al escurrimiento por sobresaturación del suelo durante una tormenta. Este volumen de agua es desbordado sobre la margen del río, permaneciendo horas e incluso días en el terreno afectado. Los daños en este tipo de inundaciones son principalmente materiales.
- **Inundaciones súbitas** conocidas también como Flash Flood, son el resultado de lluvias repentinas e intensas en cuencas pequeñas y con pendientes muy pronunciadas. Este tipo de inundaciones pueden ocasionar que pequeñas corrientes se conviertan en fuertes torrentes en cuestión de minutos. Las principales pérdidas debido a las inundaciones súbitas, además de los innumerables daños materiales, son las pérdidas de vidas humanas en zonas pobladas (ej. inundación de Boscastle 2004 en el Reino Unido).

3.2.2 ESTUDIOS SOBRE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL TONALÁ

El estudio de la cuenca baja del río Tonalá ha sido abordado desde diferentes perspectivas que consideran desde análisis geológicos (Ortega *et al.*, 1990; Ramos *et al.* 1990a, b), florísticos (Márquez, 1986; Mateos *et al.*, 1987; León, 1990), faunísticos como los estudios de Bentos (Bozada *et al.*, 1983; Villegas-Banderas *et al.*, 1983; Barradas *et al.*, 1987; Barradas, 1988) y los estudios de Necton (Bozada y Paez, 1986; Guillaumin, 1986; Vidal, 1985; Vidal y Bozada, 1987) hasta los estudios de contaminación y calidad de agua en la cuenca (Cerrat, 1986; Gallegos, 1991; Rodríguez y Botello, 1987; Riós, 1993; Solis, 1988). En el caso de los estudios correspondientes a inundaciones, las investigaciones han sido enfocadas principalmente a la modelación numérica del río Tonalá, esto con el fin de describir el comportamiento hidráulico de la cuenca ante eventos extremos. A continuación se describen los estudios más relevantes en este campo.

Como parte de los proyectos del Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT), Fuentes *et al.* (2010), realizó una revisión hidráulica de los ríos Tonalá Zanapa, Blasillo y Naranjeño. La primera parte del estudio la comprendió un análisis de lluvias en las cuencas de los ríos Zanapa, Blasillo y parte de la de río Tonalá con el fin de obtener hietogramas de láminas de lluvia asociados a diferentes periodos de retorno. Para el análisis del río Tonalá contó con el registro de lluvias máximas diarias de 13 estaciones climáticas entre 1969 a 2006. La segunda instancia del trabajo correspondió a la simulación numérica de flujos de avenidas bajo periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años de los ríos Tonalá y Naranjeño mediante un modelo bidimensional desarrollado por el propio autor. Estas simulaciones fueron utilizadas en la estimación de los escenarios de peligro de inundación en las cuencas bajo avenidas extremas. Como resultado de investigación se propuso serie de acciones estructurales con el fin de disminuir la mancha de inundación presente en la zona.

Adicionalmente, también como parte de los estudios realizados durante la tercera fase del PHIT, Pedrozo-Acuña *et al.* (2010, 2012), evaluó de forma numérica con un modelo hidrodinámico bidimensional, la eficiencia hidráulica de la desembocadura del río Tonalá bajo diferentes condiciones de forzamiento. Estos estudios sirvieron a su vez para evaluar diferentes escenarios de operación bajo la hipótesis de constricción de medidas de mitigación aguas arriba de los ríos tributarios. Como principales conclusiones del estudio se señalan que la desembocadura del río Tonalá funciona bien hidráulicamente al descargar eficientemente el total del gasto transitado por el río, sin embargo, la presencia de efectos de marea de tormenta altera de forma clara su desempeño hidráulico. Respecto a los escenarios de avenidas extremas, los resultados mostraron fuertes inundaciones en la zona sur de la cuenca demostrando la baja capacidad hidráulica del río en esta región. Naturalmente, la presencia de una marea de tormenta en la desembocadura del río, agrava los efectos de inundación en toda la zona.

Por otro lado, Álvarez (2011), evaluó la hidrodinámica de la cuenca considerando por primera vez en México el estudio de la incertidumbre numérica del modelo utilizado, considerando diferentes mallas de modelación y condiciones de rugosidad en la cuenca. En este estudio se reportan diversas simulaciones numéricas con un modelo bidimensional en elemento finito.

Dentro de las conclusiones principales del estudio, se rescata que ambos, los valores de rugosidad en la planicie y su discretización numérica son determinantes en la estimación adecuada de la zona de afectación con este tipo de herramientas.

Por último, recientemente [Rodríguez-Rincón et al. \(2012\)](#), incorporó la metodología de sistemas de predicción de ensambles EPS en el modelo hidrológico distribuido MPE del Instituto de Ingeniería, a fin de construir mapas probabilísticos de inundación del río Tonalá para el evento del 2009. Los parámetros de entrada del modelo fueron los registros de lluvias de estaciones meteorológicas automáticas EMAS cercanas a la cuenca y datos topobatemétricos de campo y de información LiDAR. Como principales resultados se comprobó la alta sensibilidad de la región para la caracterización lluvia-escorrentía con base de datos de lluvia reales.

3.3 GESTIÓN DEL RIESGO

El concepto de gestión de riesgo, definido a través de un enfoque sistémico, ha sufrido diferentes transformaciones a lo largo de la historia, que se deben al incremento en ambos número e intensidad de los fenómenos naturales y los diferentes cambios políticos y culturales que ha sufrido la sociedad ([UNESCO, 2010](#)).

Durante la época de los setenta, la comunidad internacional concebía un desastre de magnitud excepcional, cuando los sistemas de contención local no eran suficientes para dar respuesta al daño, y era necesario contar con ayuda externa para poder contenerlo. En este sentido la gestión de riesgo era un mecanismo reactivo a los desastres y solo le competía exclusivamente a organizaciones, tales como la Cruz Roja o la Defensa Civil ([PNUMA, 2002](#)).

Durante la época de los ochenta, la sociedad reconoció que los mecanismos reactivos no eran suficientes para enfrentar un desastre. Fue entonces que se hizo necesario reformular la metodología para la gestión del riesgo, en la medida que no solo se incluyeran actividades de atención y control del desastre sino que también se enfocara los esfuerzos a la prevención. Es así, que la denominada Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios (UNOCHA), creada en 1971, comenzó a movilizar y coordinar una serie de actividades multisectoriales a favor de la inclusión del concepto de prevención en los planes de atención de emergencias, esto con el fin de aumentar la capacidad de rescate, socorro y rehabilitación durante y después de un desastre.

En la década de los noventa, los esfuerzos de la UNOCHA y de diversas organizaciones gubernamentales y no gubernamentales en pro de la gestión integrada del riesgo, dieron fruto al Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRN). Este marco permitió ubicar a la reducción del riesgo en las principales prioridades de los gobiernos y organizaciones locales. Como uno de los principales objetivos del DIRN consintió en fomentar la cultura de prevención ante el desastre. La prevención no sólo es más humana que el remedio, sino más económica ([IDNDR, 1999](#)). Los resultados más relevantes del DIRN fueron

CAPITULO 3. ESTADO DEL ARTE

el fortalecimiento y ampliación de los programas encaminados a la reducción del número y el costo de los desastres.

La experiencia derivada del DIRN y la concepción de los mecanismos de gestión plasmados en importantes documentos, tales como la Estrategia y plan de acción de Yokohama para un mundo más seguro adoptada en 1994, y la Estrategia «Un mundo más seguro en el siglo XXI: Reducción de riesgos y desastres» de 1999, fueron contextualizados para la creación de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISRDR, 2004a). Esta estrategia refleja un enfoque intersectorial y multidisciplinario en pro de la reducción de los desastres. La ISRDR se encuentra basada en el establecimiento de colaboración entre organismos gubernamentales y no gubernamentales, la comunidad científica y demás actores involucrados en la gestión del riesgo con el propósito de ayudar a todas las comunidades a resistir los efectos de los desastres naturales y pasar de la protección en contra de los riesgos a la gestión de los mismos mediante la integración de la prevención de los riesgos al desarrollo sostenible (PNUMA, 2002).

Dentro del ISRDR, el instrumento de ejecución se encuentra establecido por el Marco de Acción Hyogo (MAH 2005-2015) (UNISDR, 2005). Este lineamiento, como su nombre lo indica, es un marco de acción que establece las directrices de los gobiernos a tomar medidas, en pro de la reducción de las vulnerabilidades de las naciones y comunidades frente a las amenazas naturales. El objetivo del MAH se concentra establecer compromisos a 2015 de los Estados miembros de las Naciones Unidas, en torno a la reducción de pérdidas producto de los desastres, tanto en términos de vidas humanas como en pérdidas económicas y ambientales.

El marco de acción de Hyogo señala cinco prioridades de acción en el diseño de estrategias de reducción del riesgo ante desastres. Estos principios, inmersos en el contexto del desarrollo sostenible son:

- 1) Velar por que la reducción del riesgo de desastres constituya una prioridad nacional y local dotada de una sólida base institucional para su aplicación.
- 2) Identificar, evaluar y vigilar los riesgos de desastre y desarrollar los sistemas de alerta temprana.
- 3) Utilizar el conocimiento, la innovación y la educación para establecer una cultura de seguridad y de resiliencia a todo nivel.
- 4) Reducir los factores subyacentes del riesgo.
- 5) Fortalecer la preparación en casos de desastres, a fin de asegurar una respuesta eficaz a todo nivel.

Desde la adopción del MAH, el cual culminó un proceso que inicio en 1990, numerosos esfuerzos se han realizado en el ámbito mundial, regional y local, en el cual los gobiernos han dispuesto recursos financieros y humanos para abordar el riesgo de desastre desde un contexto multidisciplinario. Por ejemplo en el 2007, debido a las severas inundaciones que han azotado a Europa durante el último siglo, la Unión Europea EU emitió la European Flood Directive con el propósito de reducir y gestionar los riesgos que suponen las inundaciones para la salud humana el medio ambiente, el patrimonio cultural y la actividad económica (Comisión Europea, 2009).

Otras estrategias para la reducción del riesgo se encuentran la Estrategia Regional de África para la Reducción del Riesgo de Desastres (ISRDR, 2004b), el Marco de Acción para la Gestión de Desastres y la Reducción del Riesgo de Desastres en el Pacífico: 2005-2010 (el Marco de Madang SOPAC/SPC (2005)), la Estrategia Árabe para la Reducción de Riesgos de Desastres 2010-2020 (UNISDR ROAS, 2011), finalmente, la entrada en vigor en el 2009 del Acuerdo de la ASEAN sobre la Gestión de Desastres y Respuestas en Caso de Emergencias (AADMER) (ASEAN, 2009).

La nueva estrategia para el manejo del riesgo generado por inundaciones, recae no solamente en la construcción de obras de defensa como bordos, compuertas de derivación y dragado de los ríos; sino también en la incorporación de otras medidas de mitigación, que permiten reducir la severidad de los daños asociados a estos fenómenos (ej. cambios en el uso de suelo por medio de un ordenamiento territorial). Lo anterior, ha generado un cambio en el paradigma de estrategias para hacer frente a estos fenómenos, evolucionando de una perspectiva de control y defensa contra inundaciones, hacia una de manejo y mitigación de daños (DEFRA, 2005). Esta nueva visión, se apoya en las bases que dan pie al desarrollo sostenible, enfocándose tanto en la reducción de las consecuencias nocivas de las inundaciones (ej. morbilidad de la población, las pérdidas económicas y ecológicas), como en el aprovechamiento de los beneficios sociales, económicos y ecológicos que éstas producen (ver UNESCO-IFI: International Flood Initiative – Baldassarre y Unlenbrook, 2011).

La historia demuestra que la generación y aplicación de técnicas de análisis de riesgo han sido motivadas por las consecuencias catastróficas de diferentes eventos. A raíz de la ocurrencia de accidentes la sociedad a menudo exige nuevos y mejores sistemas de defensa, así como una regulación estricta del riesgo (Reeve, 2011). En estas actividades es natural la relevancia de la ingeniería y el conocimiento científico para la generación de mejores técnicas para la caracterización y manejo de los peligros, lo que contribuye a la generación de un enfoque más preventivo que reactivo ante los desastres, sin importar su naturaleza.

3.3.1 GESTIÓN INTEGRAL DEL RIESGO DE INUNDACIÓN

La gestión del riesgo ante la amenaza de inundación es concebida como un proceso de análisis social, continuo y holístico, que incluye la evaluación y mitigación del riesgo de inundación (Schanze, 2006). Cuando se habla de la gestión integral del riesgo ante inundaciones desde el punto de vista de la sociedad moderna, es necesario incluir aspectos como la seguridad, la equidad, la salud ambiental y la gobernabilidad como parte de un sistema integrado a favor de la sostenibilidad. Este proceso, debe ser un mecanismo dinámico que incluya la variación temporal y espacial de todos los componentes.

Para Plate (2002), el proceso de gestión del riesgo se encuentra dividido en dos etapas, una etapa de planeación, en donde evalúa el riesgo, y una etapa de operación, donde se realizan las acciones de atención y control de la inundación. En la Figura 3.4 se muestra el esquema de las etapas de la gestión del riesgo de inundación

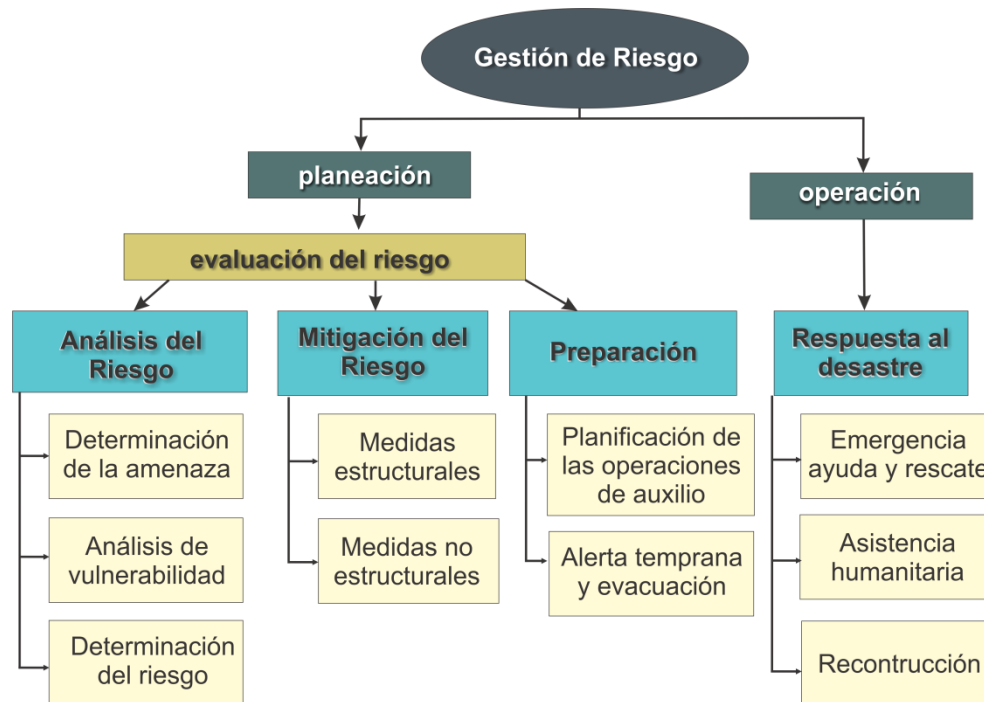


Figura 3. 4 Etapas de la gestión del riesgo (Modificado de Plate, 2002)

3.1.1 Fase de Planeación

La evaluación del riesgo es definida como la principal herramienta de planificación para la gestión del riesgo. Esta evaluación requiere la comprensión de las posibles causas de evento y de la vulnerabilidad de los elementos en riesgo. Además de esto, es necesario conocer las medidas de mitigación y las acciones de preparación ante la probabilidad de ocurrencia de una inundación. La fase de planeación se encuentra integrada por tres componentes: El análisis del riesgo, las medidas de mitigación del riesgo, y los planes de preparación. A continuación se describen cada uno de ellos

3.1.1.1 Análisis de riesgo

Comprende las bases de las decisiones sobre el mantenimiento y mejora de un sistema (Plate, 2002). El análisis del riesgo considera el estudio de las causas posibles de la amenaza, los probables eventos no deseados y los daños y consecuencias que estos pueden ocurrir. Está integrado por tres objetivos: la identificación del peligro, el análisis de vulnerabilidad, y la determinación del riesgo.

La *identificación de la amenaza*, se define como el proceso para determinar la posible inundación que puede ocasionar pérdidas sobre un elemento de riesgo de interés. Este potencial de inundación puede involucrar el riesgo a la vida, la salud, la propiedad y el ambiente. La amenaza se establece a través de tres elementos: la severidad (magnitud, duración y extensión de la inundación), la probabilidad de ocurrencia, y la velocidad de desplazamiento de la inundación.

El **análisis de vulnerabilidad** consiste en determinar las características y circunstancias de una comunidad o sistema que lo hace susceptible a los efectos dañinos de una amenaza (UNISDR, 2009). Se plantea a partir de la exposición E, la susceptibilidad S y resiliencia R. La exposición, describe la relación temporal y espacial de los elementos en riesgo para la ocurrencia de un evento (Faber, 2006), por ejemplo el periodo de permanencia de la inundación en un hogar. La susceptibilidad es el grado de en el cual un sistema es dañado por un determinado evento de inundación. Por último, la resiliencia es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas. (UNISDR, 2009).

El concepto de vulnerabilidad involucra varios aspectos, que van desde el ámbito social (edad, nivel de educación, arraigo social), económico (grado de desarrollo económico), político (nivel de marginación del estado y capacidad de reacción ante un desastre) y natural (áreas naturales protegidas y sistemas ecológicos prioritarios para la conservación). Cada uno de estos aspectos contribuye, en cierta medida, a la determinación de la vulnerabilidad en un sistema.

La **determinación del riesgo** es definida como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas (UNISDR, 2009). Las consecuencias pueden surgir desde dimensiones sociales económicas o ambientales y pueden afectar a un individuo o a una sociedad (Faber, 2006). El riesgo según BUWAL (1999), Plate (2002), Merz and Thieken (2004) y Faber(2006) se encuentra determinado por una posible amenaza natural X, una probabilidad de ocurrencia $p(x)$ y las consecuencias o daños en los sistemas expuestos.

3.1.1.2 Mitigación del riesgo

Las medidas de mitigación del riesgo son definidas como las actividades de mejoramiento y mantenimiento de los sistemas expuestos con el fin reducir el riesgo. Las actividades de mitigación pueden ser de dos tipos estructurales y no estructurales.

Medidas estructurales: comprenden la construcción física para reducir o evitar los posibles impactos de las amenazas, o la aplicación de técnicas de ingeniería para lograr la resistencia y la resiliencia de las estructuras o de los sistemas frente a las amenazas.

Medidas no estructurales: contrario a las estructurales, se basa en soluciones basadas en el conocimiento, las practicas o los para reducir el riesgo y sus impactos, especialmente a través de políticas y leyes, una mayor concientización pública, la capacitación y la educación. (UNISDR, 2009).

3.1.1.3 Preparación

El tercer componente dentro del proceso de planeación en la gestión integral del riesgo, se encuentra determinado por los mecanismos de preparación ante la inundación. Estas acciones son ejecutadas cuando las medidas estructurales no son suficientes para controlar el riesgo.

Las medidas de preparación se agrupan en dos, la planificación de las medidas de auxilio y los sistemas de alerta temprana.

La **planeación de las operaciones de auxilio** concentra todo el manejo logístico del desastre. En este plan se definen los mecanismos de prevención, auxilio y recuperación de los sistemas afectables por el siniestro. Un ejemplo de esto en la República Mexicana, consiste en el Plan DN-III-E, el cual es un programa de respuesta ante una situación de desastre que afecte o que pueda afectar a un grupo amplio de la población civil en México. (SEDENA, 2012).

Los **sistemas de alerta temprana** comprenden un conjunto de capacidades necesarias para alertar a una población, comunidad y organización sobre la inminencia de un evento con potencial destructivo. La alerta temprana como su nombre lo dice radica su operatividad en la difusión de la información de manera oportuna y precisa de forma que las poblaciones activen los planes preparación para la reducción del riesgo.

3.1.2 Fase de Operación

La fase de operación está compuesta por las actividades reactivas frente a un evento de inundación. En operación, los mecanismos de preparación son puestos a prueba, en cuanto a la capacidad y eficiencia para la atención de un desastre. Las actividades dentro de esta fase son: la emergencia, ayuda y rescate, la asistencia humanitaria y las labores de reconstrucción. A continuación se describen cada una de ellas.

Emergencia ayuda y rescate, Son las acciones destinadas primordialmente a salvaguardar la vida de las personas, sus bienes, servicios y el medio ambiente, ante la presencia de un agente destructivo (SEDENA, 2004). Dentro de estas acciones se encuentran la evacuación, búsqueda y rescate de la población hacia áreas seguras, el establecimiento de albergues temporales para las familias, la ubicación de centros de acopio y puntos de distribución de víveres, el trabajo de ingenieros, las campañas profilácticas y el levantamiento de padrones de damnificados. Además de esto se establecen patrullajes de control para la protección de la población afectada.

La **asistencia humanitaria** hace parte del conjunto de actividades realizadas por la cruz roja y demás organizaciones gubernamentales y no gubernamentales para ayudar a la población damnificada a satisfacer las necesidades básicas de alimentación, agua, refugio y salud. Estas acciones son realizadas en el corto plazo pero su duración puede extenderse al mediano plazo dependiendo de la magnitud del desastre y de la complejidad de los sistemas sociales y económicos.

La **Reconstrucción** es el proceso orientado al restablecimiento y mejoramiento del sistema afectado (Población y Entorno), así como, a la reducción del riesgo de ocurrencia y la magnitud de los desastres futuros (SEDENA, 2004). Su alcance va desde el mediano plazo, como es el caso de construcción de viviendas, hasta el largo plazo como la reconstrucción puentes o sistemas complejos. Dentro de las acciones de reconstrucción, también hacen parte las labores de reubicación de sistemas en riesgo, como por ejemplo la reubicación de las comunidades ubicadas en las márgenes de los ríos.

3.3.2 EL CAMBIO EN LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES Y SUS NIVELES DE RESPUESTA

La evolución en la gestión del riesgo por inundaciones, responde al dinamismo de los procesos que se estudian, en donde se reconoce la no estacionariedad de los procesos climáticos y del aumento en las presiones sociales hacia los sistemas. Sin embargo, la velocidad de esta evolución se encuentra muy reducida, si se le compara con la rapidez con que se presentan los cambios observados en la naturaleza. Este aspecto asume un gran reto para todos los tomadores de decisiones, y en general a todos los actores que integran la gestión del riesgo. En resumen, los procesos de cambio de la gestión del riesgo se encuentran derivados de las siguientes condiciones (Merz, 2010):

- *El riesgo por inundación es una entidad dinámica:* la cual va cambiando en magnitud y frecuencia conforme al aumento en la complejidad de los elementos que la componen.
- *La contribución de los diferentes actores involucrados en el riesgo es desconocida:* No se sabe a ciencia cierta la contribución individual de los sistemas económicos, sociales, ambientales, políticos y tecnológicos en la construcción del riesgo, y como estos pueden ser modificados por los efectos del cambio climático.
- *Los sistemas de predicción del riesgo son inciertos:* Los sistemas de predicción aun presentan incertidumbres estocásticas, producto del desconocimiento de los procesos físicos que representan. Además de ello, estos modelos se encuentran basados en parámetros estacionarios y no permiten recrear el dinamismo de los sistemas afectables.

Dentro de los procesos de cambio, Merz et al. (2010) define cinco niveles de respuesta al cambio en la gestión del riesgo de inundación, con el fin de estructurar la representación de la incertidumbre en el corazón de la toma de decisiones. En la Figura 3.5 se muestra la representación de los niveles de cambio en la gestión de riesgo de inundación y algunos ejemplos de las aproximaciones en cada uno de los niveles.

Basados en los criterios del nivel 2, en el nivel 3 define el proceso de selección del método de gestión del riesgo. Los conceptos de robustez y flexibilidad pueden ser usados para establecer los métodos que presentan un mejor comportamiento para el análisis del cambio. La selección del método de gestión del riesgo de inundación, debe contener principios de pluralismo, diversificación y descentralización dentro de sus políticas. Además de esto, deben evaluarse los posibles errores que se presenten producto su aplicación.

El nivel 4 corresponde al problema del dominio. Los problemas que hacen a una sociedad vulnerable no solo son propios de la amenaza estudiada, como en las inundaciones, sino que su problema puede extenderse a otras presiones o factores, que producen que se incremente el nivel de vulnerabilidad. En este nivel, se analiza el alcance del problema en la gestión del riesgo de inundación, incrustándolo en un contexto más amplio como producto de las complejidades de los sistemas estudiados. Los mecanismos de repuesta al cambio pueden ser

los planes multi-propósito y multi-objetivo, que son formulados con el fin de establecer medidas de reducción del riesgo con diversos fines.



Figura 3. 5 Niveles de responsabilidad de cambio en la gestión de riesgo de inundación (modificado de [Merz, et al., 2010](#) FRM/IWRM)

Por último, el *nivel 5* de respuesta corresponde a la cultura organizacional. Este nivel abarca todos los otros niveles y se encarga de las características sociales y organizativas que promuevan la reducción de riesgos y las capacidades de adaptación. En la cultura organizacional se considera a la gestión del riesgo de inundación como una labor cíclica, que permite su constante retroalimentación a través del aprendizaje continuo de los nuevos factores que intervienen en el riesgo. Para llevar a cabo esta labor, es necesario establecer unos canales de comunicación claros y efectivos entre todos los actores que intervienen en el proceso, con el fin de tomar decisiones integradas y objetivas.

3.3.3 ANÁLISIS DEL RIESGO Y SUS ENFOQUES

La generación de mejores estrategias para el manejo del riesgo, pasa de manera forzosa por una mejor comunicación entre la academia, el gobierno y la sociedad. Para ello, la honestidad resalta como la mejor política, pues favorece el incremento en los niveles de confianza de la sociedad hacia las opciones de protección que se propongan desde el gobierno ([Pedrozo-Acuña, 2012](#)).

Una vía natural para hacer frente a los eventos extremos que se avecinan, es a través de la aplicación del principio de precaución, en el que la acción preventiva se realiza sin esperar los resultados concretos de la evidencia científica ([Stirling, 2007](#)). Es decir, la prevención toma un rol decisivo durante ambos la evaluación y el manejo del riesgo de inundaciones.

En países en vías de desarrollo, la predicción adecuada de eventos extremos (ej. inundaciones) es trascendental para permitir una mejor gestión de los recursos disponibles, que por otro lado están limitados debido la alta vulnerabilidad de la sociedad durante su

incidencia. La exposición continua a eventos extremos no anticipados, es un factor determinante en la persistencia de la pobreza y la desigualdad social. Es posible prever que la diseminación de pronósticos probabilísticos a una comunidad informada, reducirán el crecimiento de la pobreza producida por la exposición de las poblaciones a eventos no anticipados (ej. Webster y Hoyos, 2004). Además, permitirán una mejor adaptación de la sociedad ante estos fenómenos en el corto y largo plazos.

En un futuro cada vez más próximo, tal y como lo señalan Obersteiner et al. (2001), la sociedad tendrá que hacer frente a las interacciones no lineales que se presentan entre los ecosistemas y un clima que está cambiando. Aunado a lo anterior, se suma la complejidad del crecimiento poblacional. En caso de no ser atendidas, estas interacciones darán lugar a malestares sociales aún mayores; sobre todo, en aquellas regiones del mundo en donde las sociedades no hayan fomentado su capacidad para afrontar riesgos climáticos adicionales.

Tal y como se ha señalado, el análisis del riesgo conlleva a la descomposición de los elementos que componen el riesgo, estudiando su estructura, propiedades y funciones con el fin de conocer su contribución en la construcción del riesgo. El procedimiento de análisis del riesgo de inundación dentro del marco de la gestión integral del riesgo se describe en la Figura 3.6, en donde se muestran los principales pasos para el análisis del riesgo dentro del proceso de evaluación del riesgo.

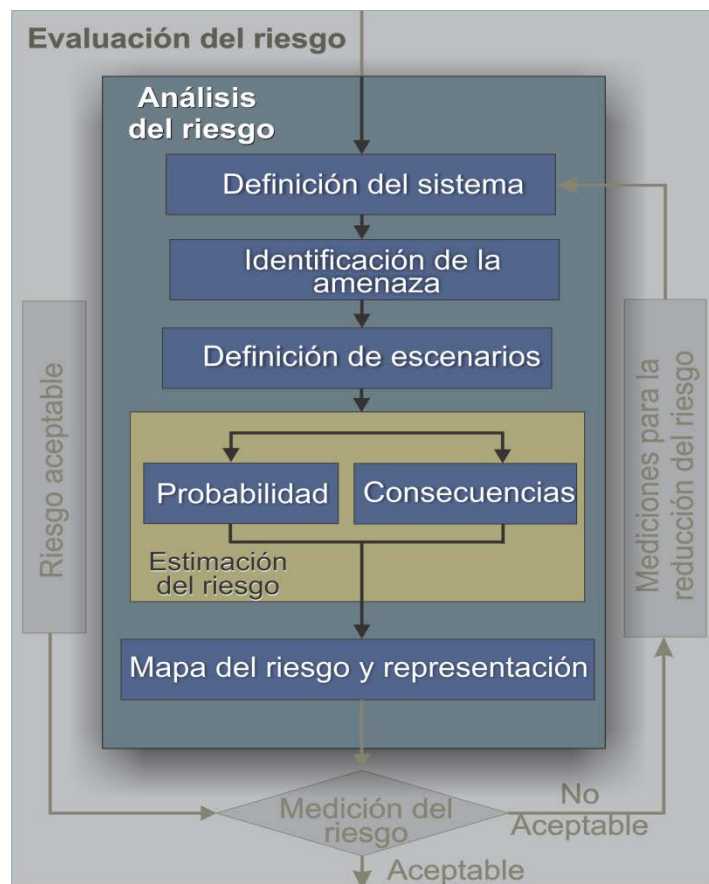


Figura 3. 6 Procedimiento esquemático para el análisis del riesgo (Faber, 2006)

Dadas las incertidumbres del proceso de análisis del riesgo, el análisis del riesgo de inundación puede ser establecido a partir dos enfoques: un enfoque determinista, el cual maneja las incertidumbres en la ocurrencia y magnitud de los eventos extremos, y un enfoque estocástico o probabilista, que analiza la incertidumbre debido a la imperfección en la descripción del sistema (Faber, 2006).

3.3.3.1 Aproximación determinista

El enfoque determinístico es considerado por varios autores como el modelo tradicional para el análisis del riesgo de inundación (Plate, 2002, Merz, 2010; Hall et al., 2011, Schumann, 2011). En este tipo de modelación, la incertidumbre es considera en torno a la dimensión de la base de datos estudiados, es decir, que una modelación se considera incierta a razón del periodo de tiempo utilizado para el análisis.

La aproximación determinista consiste en el análisis del comportamiento de la lluvia con el fin de establecer valores extremales asociados a periodos de retorno. Estos valores luego son recreados por los modelos hidrológicos e hidráulicos y finalmente analizados con la vulnerabilidad de la zona para determinar su riesgo. En la Figura 3.7 se muestra la definición y modelado de los escenarios en el enfoque determinístico.

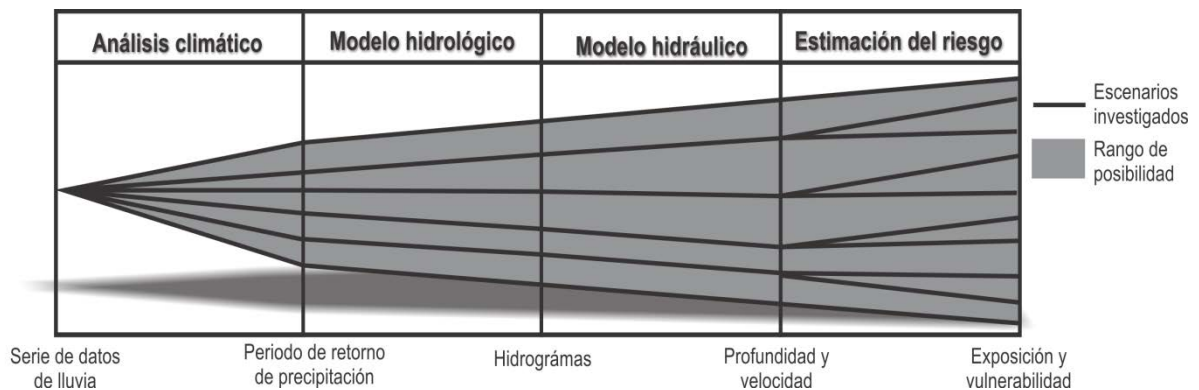


Figura 3. 7 Modelado del riesgo en el enfoque determinístico (modificado de Faber, 2006)

3.3.3.2 Aproximación estocástica

En el enfoque estocástico, la incertidumbre es manejada en torno a la aleatoriedad de los procesos físicos en la construcción del riesgo. La modelación en este tipo de enfoque, es realizada a partir de la recreación de todos los posibles escenarios que puedan darse en la construcción de un evento. Los valores son simulados como funciones de densidad de probabilidad a través de modelos hidrológicos e hidráulicos, que luego son analizados para la determinación del riesgo. En la Figura 3.8 se muestra la definición y modelado de los escenarios en este enfoque.

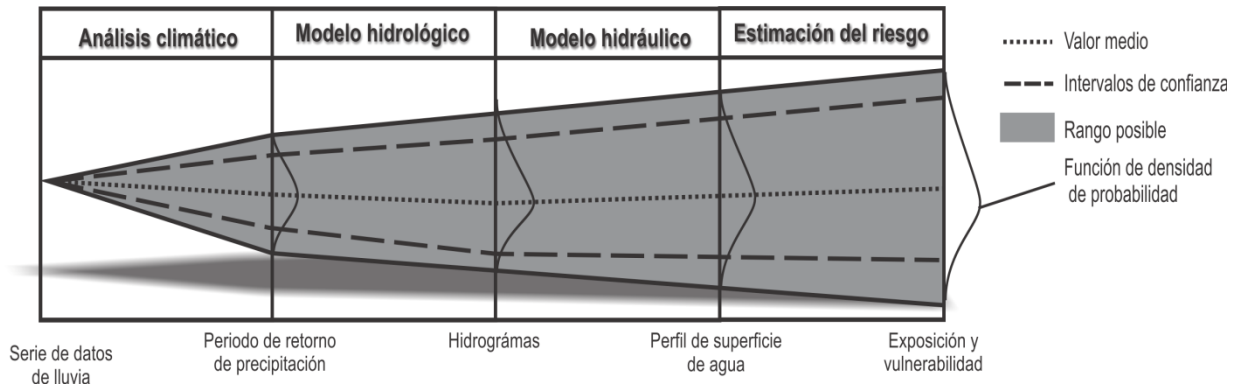


Figura 3. 8 Modelado del riesgo en el enfoque estocástico (modificado de Faber, 2006)

CAPÍTULO 4.

ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

4.1 INTRODUCCIÓN

La precipitación representa una variable de gran relevancia dentro del proceso de modelado de las inundaciones, La información de lluvia a una resolución espacial y temporal apropiadas, representa la base de un correcto modelado hidrológico, y es clave para la estimación adecuada de los valores extremos para una cuenca ([Haberlandt, 2011](#)). Esta condición, sin embargo, raramente se cumple en varias regiones del país, en donde la falta de medición de las variables climáticas de las cuencas, o en casos como en el área de estudio, la gran porosidad de los registros, se convierte en un obstáculo para poder hacer inferencias probabilísticas en relación con alguna variable hidrológica de interés.

A raíz de lo anterior, se han desarrollado diversas técnicas de interpolación geoespacial de valores de precipitación, partiendo desde enfoques geoestadísticos como son el Kriging ordinario y la interpolación óptima ([Carrera-Hernández y Gaskin, 2007](#)), técnicas basadas en curvas ([Huctchinson, 1998a, b](#)) hasta algoritmos genéticos ([Demyanov et al., 1998](#); [Huang et al., 1998](#)). Estas metodologías permiten estimar en el espacio, los valores de lluvia en toda la cuenca a través de datos conocidos. A partir de esto, es posible realizar un análisis extremal de las variables, obteniendo registros de lluvia asociados a diferentes periodos de retorno.

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

Este capítulo presenta el análisis estadístico realizado sobre los datos de lluvia en la cuenca del río Tonalá a fin de determinar los valores precipitación para condiciones de diseño. La primera sección introduce la base de datos de precipitación utilizada para la cuenca, en donde se elabora un análisis detallado de las estaciones y los registros utilizados. Adicionalmente, se evalúan diversas técnicas de interpolación geoespacial para correcto relleno de datos. Posteriormente, se presenta el análisis extremal realizado con los datos de lluvia, para lo que se utilizan los valores de intensidad de precipitación de lluvia acumulada en días consecutivos, ajustando una distribución de probabilidad para obtener las curvas intensidad, duración periodo de retorno (IDT, por sus siglas). Por último, se derivan los hietogramas asociados a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años.

4.2 ANÁLISIS DE LOS REGISTROS CLIMÁTICOS DE LA CUENCA

4.2.1 METODOLOGÍA

La metodología para el análisis de los registros de lluvia diaria en la cuenca del río Tonalá, está compuesta por cuatro etapas: la evaluación de la homogeneidad geoespacial de las estaciones, el análisis del comportamiento de las técnicas de interpolación geoestadísticas para la estimación de valores de precipitación, la obtención la precipitación para días consecutivos de lluvia, y la detección de datos espurios o extraños. A continuación, se describe a detalle cada una de ellas.

4.2.1.1 Criterios para evaluación de la homogeneidad geoespacial de las estaciones climáticas

La selección de las fuentes de información depende de la delimitación de la zona de estudio, es decir, delimitar la cuenca y los puntos de medición que se encuentran dentro de la zona de análisis. Por otro lado, además de ubicar las estaciones dentro de la cuenca, es conveniente descartar aquellas en las que la información no es de calidad, con el propósito de minimizar las alteraciones y los errores en la representación de las condiciones reales.

Con el objetivo de determinar las estaciones climatológicas que tienen información relevante dentro de la zona de estudio, existen diferentes técnicas de delimitación de variables homogéneas. Para el presente trabajo de tesis, se utilizaron las técnicas de coeficiente de correlación, el coeficiente de variación de los momentos L, y la delimitación a través del parámetro de forma β .

Coefficiente de correlación: La matriz de correlación de variables determina el rango de relación lineal entre dos parámetros. El coeficiente de correlación se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (4.1)$$

Donde X e Y son la muestras promedio de las matrices a relacionar.

Coefficiente de variación de los momentos L: Para una serie ordenada de mayor a menor

$$\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.2)$$

$$\beta_1 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^{n-1} X_i(N-i) \quad (4.3)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{N(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^n X_i(N-i)(N-i-1) \quad (4.4)$$

$$\beta_3 = \frac{1}{N(N-1)(N-2)(N-3)} \sum_{i=1}^{n-3} X_i(N-i)(N-i-1)(N-i-2) \quad (4.5)$$

$$X_1 = \beta_0 \quad (4.6)$$

$$X_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (4.7)$$

$$X_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (4.8)$$

$$X_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (4.9)$$

Coefficiente de variación $Z_2 = \frac{X_2}{X_1}$ (4.10) $Z_3 = \frac{X_3}{X_1}$ (4.11) $Z_4 = \frac{X_4}{X_2}$ (4.12)

Límites $Z_2 \pm S_{e3}$

Donde S_{e2} es la desviación estándar de la serie Z_2 de las series analizadas

Delimitación a través del parámetro de forma β de la función general de valores extremos (GVE). La delimitación de series homogéneas bajo el parámetro de forma β está definida de la siguiente manera:

$$f(x) = e^{-\left[1 - \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \quad (4.13)$$

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} e^{-\left[1 - \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta}} \left[1 - \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^\beta\right]^{1/\beta-1} \quad (4.14)$$

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

Si $\beta < 0$ $u - \frac{\alpha}{\beta} \leq x < \infty$ tipo II (Fretchet)

Si $\beta > 0$ $\infty < x \leq u - \frac{\alpha}{\beta}$ Tipo III (Weibull)

Donde u = parámetro de ubicación; β = parámetro de forma y α = parámetro de escala.

4.2.1.2 Métodos de interpolación de variables

Usualmente, los registros de precipitación pluviométrica y pluviográfica presentan periodos de tiempo sin información o con información errónea. La fuente de error en estas mediciones, puede asociarse a fallas en los mecanismos de medición del sitio o errores humanos de medición. En virtud de lo anterior, es necesario emplear métodos matemáticos de interpolación que permitan contar con un registro completo. Los métodos de interpolación de variables son mecanismos que determinan el peso de las variables conocidas, para la estimación de la variable conocida, tal y como lo define [Fuentes \(2011\)](#).

“Sean X_j y Y_j las coordenadas de un punto j en un espacio bidimensional y P_j , una función de las coordenadas X_j y Y_j la que denota el proceso observado en “ n ” estaciones de medición, j es el subíndice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido, $j=1,2,\dots, n$, P_e es una estimación del proceso en un punto con coordenadas X_e y Y_e . La estimación puntual se hace de los datos medidos en las “ n ” estaciones y ésta se puede ser representada por una combinación lineal pesada de aquellos valores medidos, es decir,

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad (4.15)$$

Donde W_j es el peso o factor de peso del punto de muestreo j ”.

Existen diversas técnicas de interpolación temporal de lluvia puntual, así como métodos de interpolación espacial. Es evidente que el fenómeno de precipitación sobre una cuenca dada es altamente dinámico y con una gran variabilidad espacial y temporal. Por lo tanto, la estimación adecuada depende del número y distribución de las estaciones de medición en el área ([Fuentes, 2011](#)). Por lo tanto, la mejor estimación depende tanto del número y la distribución de las estaciones de medición de área, como del método de interpolación de datos utilizados. A continuación se presentan las diferentes técnicas de interpolación utilizadas para el cálculo de variables desconocidas.

Método de Thiessen: El método de interpolación en base a los Polígonos de Thiessen es la técnica más tradicional en la hidrología. De acuerdo con este método, a cada estación hidrológica de una cuenca se le asocia un Polígono de Thiessen que define el área de influencia de estación sobre la cuenca.

El cociente que resulta de dividir el área de cada polígono entre el área total define un conjunto de pesos, conforme a los cuales la precipitación media puede ser calculada como un promedio pesado. El error de estimación del método de Thiessen es proporcional a la distancia del punto de estimación con respecto a la estación más cuenca

La estimación del proceso P_e en el punto de interés e , es igual al valor observado de la estación de muestreo más cercana en el área, Esta estimación puede representarse con $P_e = P_j$. Para j cuya distancia sea la menor de las “ n ” estaciones, es decir, si d_{ej} es la distancia entre el punto de interés e y la estación j . Calculándose mediante:

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

$$de_i = \sqrt{(X_e - X_j)^2 + (Y_e - Y_j)^2} \quad (4.16)$$

Donde “ de_i ” = $\min(de_1, de_2, de_3, \dots, de_n)$

Interpolación Polinomial: Este método consiste en ajustar una ecuación global para el área en estudio empleando una función algebraica o una polinomial siendo la forma general de la función polinomial.

$$P_e = \sum_{k=1}^m a_k \Phi_k(X_e, Y_e) \quad (4.17)$$

Donde: P_e es el valor interpolado en el sitio (X_e, Y_e) ; a_k es el K-esimo coeficiente polinomial; Φ_k es el K-esimo monomio en términos de las coordenadas (X_e, Y_e) ; m el número total de monomios que dependen de la función polinomial ajustada.

Los monomios algebraicos de las coordenadas X e Y para la función polinomial hasta grado 6 se encuentran relacionados en la [Tabla 4.1](#)

Tabla 4. 1 Valores de los monomios para la función polinomial

Grado del Polinomio	K	$\phi_k (X, Y)$	m
0	1	1	1
1	2 a 3	X Y	3
2	4 a 6	X^2 XY Y^2	6
3	7 a 10	X^3 X^2Y XY^2 Y^3	10
4	11 a 15	X^4 X^3Y X^2Y^2 XY^3 Y^4	15
5	16 a 21	X^5 X^4Y X^3Y^2 X^2Y^3 XY^4 Y^5	21
6	22 a 28	X^6 X^5Y X^4Y^2 X^3Y^3 X^2Y^4 XY^5 Y^6	28

Para determinar el arreglo entre parámetros a_k para $k=1,2,\dots, m$ es realizado mediante la aproximación por mínimos cuadrados. El requerimiento es que el número de estaciones de medición “ n ” sea mayor al número de monomios “ m ”.

$$[W_j] = [\alpha_{kj}]^T [\Phi_k(X_e, Y_e)] \quad (4.18)$$

$$[\alpha_{kj}] = [\Psi_{ki}] [\Phi_{kj}] \quad (4.19)$$

$$[\Psi_{ki}] = [\theta_{ki}]^{-1} \quad (4.20)$$

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

$$\theta_{ki} = \sum_{j=1}^n \phi_k(X_j, Y_j) \phi_i(X_j, Y_j) \quad (4.21)$$

θ_{ki} ; Es la multiplicación de la matriz de monomios $[\theta_k]$ por $[\theta_k]^T$

Aproximación de Lagrange: Este método es similar a la aproximación de mínimos cuadrados. Para la aplicación de esta técnica, los coeficientes a_k son evaluados de modo que el proceso P pueda pasar a través de los valores observados en las estaciones, de modo que se requiere que el número de monomios sea igual al número de estaciones ($m=n$). Conforme a lo anterior valor P_{ij} se establece como:

$$P_i = \sum_{k=1}^n a_{kj} \phi_k(X_j, Y_j) \quad (4.22)$$

Para $j=1,2,\dots,n$. En tanto los coeficientes a_k se estiman a través de

$$a_k = \sum_{j=1}^n \beta_{kj} P_j \quad (4.23)$$

Para $j=1,2,\dots,n$.

Interpolación Multicuadrática: En este método la influencia de pesos de cada estación está representada por superficies cuadradas en función de sus coordenadas. La aplicación de este método requiere contar con una matriz de distancias entre las estaciones:

$$[D_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & D_{13} & \dots & D_{1n} \\ D_{21} & 0 & & & \\ \vdots & & & & \\ D_{n1} & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad [D_e] = \begin{bmatrix} D_{e1} \\ D_{e2} \\ \vdots \\ D_{en} \end{bmatrix}$$

Los factores de peso se encuentran determinados cómo

$$[W_j] = [\delta_{ij}] [D_{ej}] \quad (4.24)$$

$$\text{Donde } [\delta_{ij}] \text{ se encuentra dado por el inverso de } D_{ej}. [\delta_{ij}] = [D_{ej}]^{-1} \quad (4.25)$$

Interpolación Inversa: La influencia de la precipitación en una estación para el cálculo de la misma en cualquier punto es inversamente proporcional a la distancia de los puntos. El método da mayor peso a la estación más cercana y se reduce conforme a la distancia es mayor, dependiendo del exponente β (Fuentes, 2011). Conforme a este método los factores de peso son obtenidos mediante la siguiente expresión.

$$W_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}} \right]^\beta} \quad (4.26)$$

Donde $\beta = 1$; Interpolación de la distancia inversa y $\beta = 2$; Interpolación del cuadrado de la distancia inversa

Interpolación Óptima: El método de interpolación óptima consiste en la minimización del error medio de interpolación, con el fin de determinar los factores de peso en cada estación. La varianza del error medio se encuentra expresar en términos de los factores de peso W_{ij} y de la correlación espacial a través de la siguiente ecuación:

$$[W_i] = \left[\hat{\rho}(d_{ij}) \right]^{-1} \left[\hat{\rho}(d_{ej}) \right] \quad (4.27)$$

Donde $\rho(d_{ij})$; Es la función espacial que se obtiene entre los pares de combinaciones ρ y d_{ij} no repetidas, la cual puede ajustarse a los siguientes modelos:

a) Modelo inverso $\rho(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \frac{d_{ij}}{C}}$ (4.28)

b) Modelo de potencia inversa $\rho(d_{ij}) = \frac{1}{\left(1 + \frac{d_{ij}}{C}\right)^a}$ (4.29)

c) Modelo exponencial $\rho(d_{ij}) = e^{-d_{ij}/C}$ (4.30)

Las variables C y a son coeficientes estimados por mínimos cuadrados. Los valores matriciales $\rho(d_{ij})$ $\rho(d_{ej})$ reales son:

$$\rho(d_{ej}) = \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \rho(d_{e2}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \end{bmatrix} \quad \rho(d_{ij}) = \begin{bmatrix} \rho(d_{11}) & \rho(d_{12}) & \dots & \rho(d_{1n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \rho(d_{n1}) & \rho(d_{n2}) & \dots & \rho(d_{nn}) \end{bmatrix}$$

La obtención del coeficiente de correlación entre los eventos medidos es obtenida como

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

$$\rho(d_{ij}) = \sum_{t=1}^N \frac{(P_i^t - \hat{m}_i)(P_j^t - \hat{m}_j)}{\hat{S}_i \hat{S}_j} \quad (4.31)$$

Donde

P_i^t ; Son las observaciones de las series de tiempo del proceso “P” en la estación i .

P_j^t ; Son las observaciones de las series de tiempo del proceso “P” en la estación j .

\hat{m}_i y \hat{m}_j ; Son las medias de las observaciones en las estaciones i y j .

\hat{S}_i y \hat{S}_j ; Desviaciones estándar de las observaciones en las estaciones i y j

N ; Número total de datos registrados en común entre el par de estaciones

Para que los factores de peso sean insesgados, debe satisfacerse que la sumatoria de los factores, debe ser igual a 1, si esta condición no se cumple las matrices originales se le aplica los multiplicadores de Langrange (λ), modificando las matrices $\rho(d_{ej})$ y $\rho(d_{ij})$ de la siguiente manera

$$\rho(d_{ej}) = \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \rho(d_{e2}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad \rho(d_{ij}) = \begin{bmatrix} \rho(d_{11}) & \rho(d_{12}) & \dots & \rho(d_{1n}) & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \rho(d_{n1}) & \rho(d_{n2}) & \dots & \rho(d_{nn}) & 1 \\ 1 & 1 & & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad [w_j] = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_1 \\ \vdots \\ w_1 \\ \lambda \end{bmatrix}$$

Interpolación Kriging: El método de interpolación Kriging es muy similar al método óptimo de interpolación, con la diferencia que las matrices de correlación de variables son reemplazadas por un semivariograma. Conforme a este método, se supone una homogeneidad en las medias, las varianzas y las covarianzas. Lo que asume una estructura de covarianza espacial isotrópica. Los factores de peso se encuentran determinados como:

$$[w_j] = [\gamma(d_{ij})][\gamma(d_{ej})] \quad (4.32)$$

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left[(P_i^t - \hat{m}_i) - (P_j^t - \hat{m}_j) \right]^2 \quad (4.33)$$

Donde P_k^t ; Son las observaciones en los sitios k . \hat{m}_k ; Son las medias de las observaciones en los sitios k , y N es el número total de observaciones entre el par de estaciones.

El variograma es estimado mediante el ajuste el semivariograma a través diferentes modelos de ajuste.

- Modelo lineal: $\gamma(d_{ij}) = a d_{ij}$ (4.34)

- Modelo monómico $\gamma(d_{ij}) = a d_{ij}^b$ Donde “b” toma valores en (0,2) (4.35)

- Modelo exponencial $\gamma(d_{ij}) = a [1 - \exp(-C d_{ij})]$ $C > 0$ (4.36)

- Modelo Gaussiano $a [1 - \exp(-C d_{ij}^2)]$ $C > 0$ (4.37)

- Modelo esférico $\gamma(d_{ij}) = \frac{a}{2} \left[3 \frac{d_{ij}}{C} - \left(\frac{d_{ij}}{C} \right)^2 \right]$ $C > 0$ (4.38)

Los valores de “a” y “C” son encontrados mediante mínimos cuadrados

a) *Método Kriging ordinario*: Este método minimiza la varianza respecto a los valores de peso y obtiene una solución matricial que deberá resolverse como un sistema de ecuación:

$$[W_i] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \\ \lambda \end{bmatrix} \quad [\gamma(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n1} & & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad [\gamma(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \gamma_{e1} \\ \gamma_{e2} \\ \vdots \\ \gamma_{en} \\ 1 \end{bmatrix}$$

b) *Método Kriging Universal*: Este método intenta incluir la no homogeneidad en la media del proceso. La solución matricial a resolver se encuentra determina de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \dots & \gamma_{1n} & \phi_{11} & \phi_{21} & \dots & \phi_{m1} \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \dots & \gamma_{2n} & \phi_{21} & \phi_{11} & \dots & \phi_{11} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & 0 & \dots & \gamma_{3n} & \phi_{31} & \phi_{11} & \dots & \phi_{11} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \dots & 0 & \phi_{n1} & \phi_{n2} & \dots & \phi_{mn} \\ \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \dots & \phi_{1n} & 0 & & \dots & 0 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{33} & \dots & \phi_{2n} & 0 & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \phi_{m1} & \phi_{m2} & \phi_{m3} & & \phi_{mn} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.1.3 Homogeneidad e independencia de las series de tiempo

Un paso previo al estudio de las tendencias de precipitación en la región, consiste en asegurarse de que los cambios observados en el valor medio de la información se deben a la dinámica natural del clima (Guenni, 2008). Una serie climática puede no ser homogénea, si la estación de medición ha sufrido modificaciones en los instrumentos, variaciones de

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

emplazamiento o cambios de observador o entorno (Saladié *et al.* 2005). En este sentido, es necesario contar con una técnica que permita verificar la homogeneidad de la información. Una forma común de hacer esta revisión, es a través de la comparación de las variaciones en la información entre dos estaciones cercanas, una de control y la que se desea examinar. La homogeneidad se confirma si los cambios observados en una serie candidato también son registrados en la estación de control. En este estudio se han aplicado tres pruebas de homogeneidad. Estas pruebas permiten determinar si las variables que integran cada una de las series de datos provenientes de las estaciones seleccionadas pertenecen estadísticamente a una misma población (Campos, 2007; Tucci, 1993 y Escalante-Reyes, 2005). En esta tesis las pruebas aplicadas son las siguientes: Helmert, t de Student y Cramer. Para el caso de evaluar la aleatoriedad de las series estadísticas, se valoró además la independencia de la serie por medio de la Prueba de Anderson, con la que se construye un correlograma con límites de confianza, en la que se puede conocer la independencia de los datos. Los resultados de este análisis se integran de forma completa en el ANEXO A de este trabajo.

4.2.1.4 Detección de puntos extraños

La detección de puntos extraños dentro de la serie temporal, se lleva a cabo por medio del análisis de tendencias en la información. Estas tendencias son obtenidas mediante dos escalas, a través de los acumulados anuales, la cual está conformada por la sumatoria de las lluvias al año, y por la serie de máximos anuales, cuyo registro comprende los valores más altos de lluvias en 24 horas en el año de cada registro.

El análisis de tendencia permite establecer la concordancia de los datos estimados, con los valores de intensidad verdaderos, de manera que permita determinar si la técnica de interpolación no afecta la estadística original de la serie analizada.

4.2.2 RESULTADOS

4.2.2.1 Identificación de las estaciones homogéneas:

La identificación de la homogeneidad en las estaciones climatológicas es producto de la evaluación mes a mes de las cinco estaciones analizadas, a través de los tres métodos de identificación de estaciones homogéneas. Esta evaluación se realiza con el fin de establecer tendencias de homogeneidad entre estaciones.

De acuerdo a los resultados encontrados para todos los meses, se determinó la homogeneidad de los datos ya que las estaciones seleccionadas para el análisis hidrológico pertenecen a una misma región. Sin embargo, debido a que la estación de Tequila cuenta con información de datos muy reducida, en comparación con las demás estaciones, el análisis se realizará sobre el comportamiento de cinco estaciones. En la [Tabla 4.2](#) se muestra el resumen de las relaciones entre estaciones para las estaciones A (Tanchochapa), B (Blasillo), C (Francisco Rueda), D (Centro experimental), E (Tequila) y F (Pueblo Nuevo).

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

Tabla 4. 2 Cuadro resumen de la prueba de homogeneidad

Mes	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN					MOMENTOS L		PARÁMETRO β		
	Zona homogénea $R^2 > 0.8$	Zona homogénea $0.8 > R^2 > 0.7$	Zona homogénea $0.7 > R^2 > 0.6$	Zona homogénea $0.6 > R^2 > 0.5$	COMBINACIONES	Zona homogénea	Estaciones fuera de los límites	Zonas homogéneas	Zonas homogéneas	Zonas homogéneas
Enero	B-D	E-F	A-C, A-F	A-D, C-D, C-F	ABCDEF	ABCEF	D	AEF	BD	C
Febrero	A-C, E-F, B-E	A-D, B-F	A-B, C-D		ABCDEF	ABDF	CE	ABCD	EF	
Marzo	A-B, E-F	B-D	A-F, B-F, D-E	A-C, A-D, B-E, D-F	ACBDEF	ABEF	CD	DEF	AB	C
Abril	A-C,	D-F		B-D, B-F, D-E	A C B D E F	ABF	CDE	ABCDF		E
Mayo	A-E, B-D, E-F	A-F, A-C, C-E, D-E, F-A	A-B, C-F	A-D, B-E, B-F	ABCDEF	ABCEF	D	ACEF		B
Junio	A-C, A-D, A-F, B-D, D-C, C-F, D-F	B-E, E-F, D-E, C-E	E-A, F-B, B-C	A-B	ABCDEF	ACDEF	B	ABDF	CE	
Julio	A-D	E-F		C-D	ACD E F	ACDEF	B	BCDEF		A
Agosto	B-C	A-D, B-F, C-F	A-B, D-F	A-C, B-D, D-E, A-F	ABCDEF	ACDEF	B	CDE	BF	A
Septiembre		A-B	A-D, A-F, C-D, D-F	B-F	ABC D F	ACDEF	B	ACDF	BE	
Octubre	A-C	A-F, E-F	B-E	A-B, A-E, B-C, C-F	ABC E F	ACDEF	B	ACF	DE	
Noviembre	-	-	-	-	-	ABCDF	E	ADE	BCF	
Diciembre	E-F	B-C	B-D, B-E, D-F	A-B, C-E, D-E, B-C, B-F	ABCDEF	BCDE	AF	ACDEF		B
CONCLUSIONE	Por la prueba de coeficiente de correlación se determinó que los valores son homogéneos entre todas las estaciones					Por la prueba de momentos, la combinación más reiterativa es A, C, D, E, F		Se conserva las la conclusion de la prueba de momentos L		

4.2.2.2 Interpolación de los datos faltantes de las series.

Con el propósito de uniformar la información de las estaciones en los datos porosos de las series, se realizó un proceso de rellenado de la información, el cual comienza con la evaluación de sensibilidad de los métodos de interpolación geoestadística. Para ello la muestra fue rellenada con una técnica de interpolación aleatoria, en este caso la interpolación B=2. A partir de ella se eliminaron los registros de una de las estaciones, con el fin de evaluar el nivel de estimación de las diferentes técnicas en relación con los datos reales.

Conforme al análisis de sensibilidad fue posible identificar que las técnicas con menores errores fueron las técnicas Inversa B=1 y la interpolación óptima potencia inversa (Tabla 4.3), de las cuales, la técnica Inversa B=1 logró conservar de una mejor manera la tendencia de los datos. La Figura 4.1 presenta los valores originales de la serie (puntos rojos) y los valores estimados por el método de interpolación (puntos azules).

Tabla 4. 3 Errores mínimos en las técnicas de interpolación geoespacial

METODOS	ERROR CUADRATICO	COEF. RELACIÓN CUADRADA	COF CORRELACIÓN
Thiesen	3.28E+06	0.23	0.48
Polinomial	2.67E+06	0.29	0.54

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

METODOS		ERROR CUADRATICO	COEF. RELACIÓN CUADRADA	COF CORRELACIÓN
Polinomial Lagrange		3.42E+06	0.23	0.48
Multicuadratica		2.75E+06	0.27	0.52
Inversa	BTA = 1	2.48E+06	0.29	0.54
	BTA = 2	2.84E+06	0.26	0.51
Optima	INVERSA	2.60E+06	0.28	0.53
	POTENCIA INVERSA	2.40E+06	0.3	0.54
	EXPONENCIAL	2.70E+06	0.27	0.52
Kriging	LINEAL	3.00E+06	0.26	0.51
	MONOMICO	2.67E+06	0.29	0.54
	EXPONENCIAL	2.67E+06	0.29	0.54
	GAUSSIANO	2.67E+06	0.29	0.54
	ESFERICA	3.00E+06	0.26	0.51

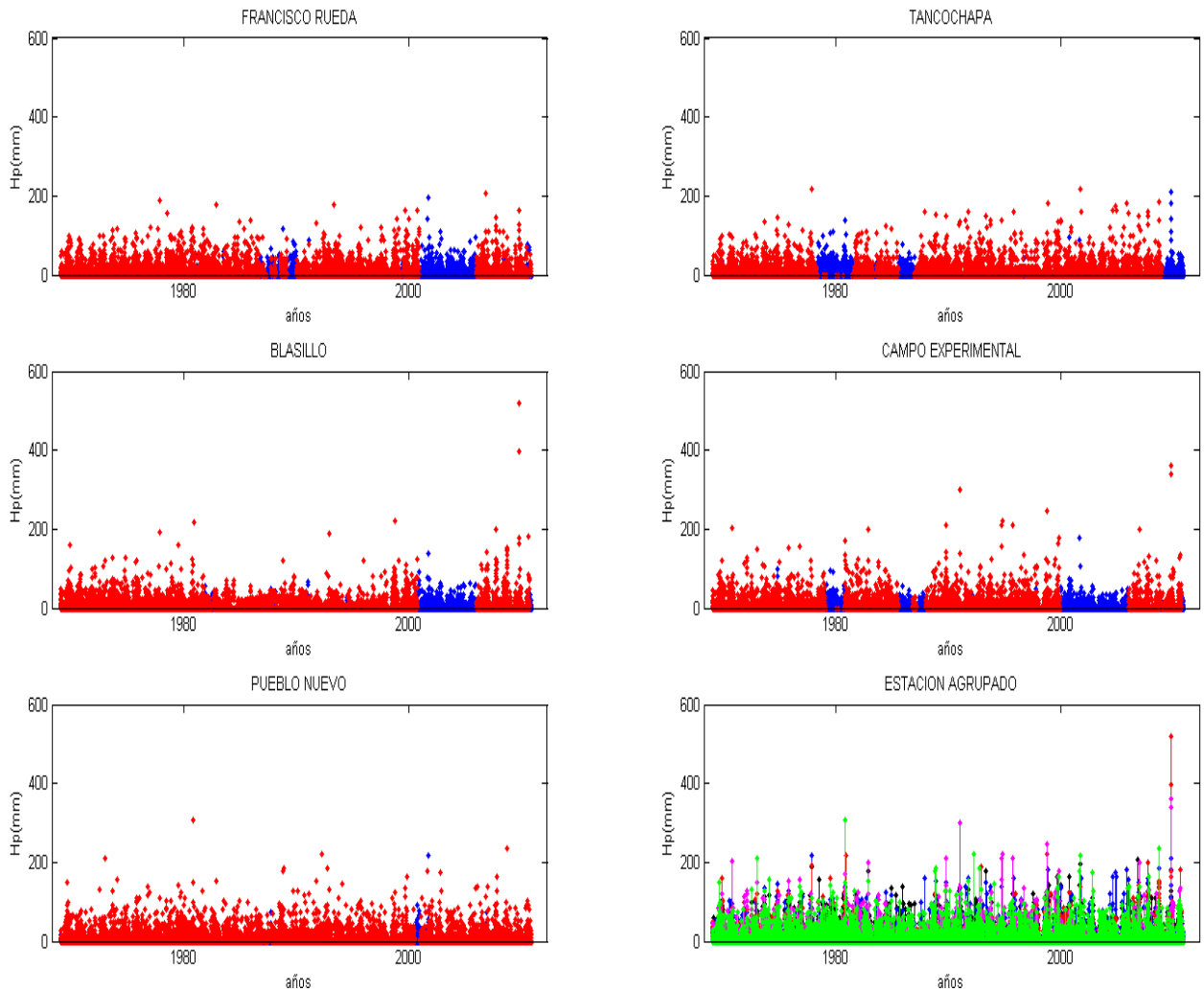


Figura 4. 1 Interpolación de los datos faltante en las series de tiempo

4.2.2.3 Pruebas de homogeneidad e independencia de las series.

La evaluación de homogeneidad e independencia de la series se realizó bajo dos diferentes escalas temporales, la primera de ellas tomando en consideración los registros máximos anuales de lluvia, y la segunda con los registros de precipitación anual acumulada. Esta prueba se realizó para cada una de las estaciones analizadas. Con el propósito de integrar esta información de una manera más clara, las tablas resúmenes y las gráficas de la evaluación se integran dentro del ANEXO A de esta tesis.

Como resultado de este análisis, se determinó que las series de precipitación diarias para cada estación climatológica analizadas representan registros homogéneos e independientes. En este sentido, es posible realizar un análisis de frecuencia de las series temporales de lluvia con el propósito de determinar los registros de lluvia asociados a periodos de diseño.

4.2.2.4 Detección de puntos extraños

El análisis de tendencias de los datos de precipitación bajo las escalas acumuladas y máximas anuales, permitió establecer los patrones de estacionalidad o no de las series climáticas. En el caso del análisis acumulado anual, las series climáticas muestran un comportamiento estacionario, caracterizado por la baja o nula pendiente de los registros obtenidos en la serie temporal (Figura 4.2). En el caso de las tendencias para los máximos anuales, las tendencias lineales de las series, muestran una pendiente creciente durante el periodo observado (Figura 4.3).

En virtud de este resultado, se observa que durante el periodo de 1969 a 2010, el volumen de lluvia registrado en la cuenca del Río Tonalá ha sido constante. Sin embargo, su intensidad se ha incrementado, lo que ha dado lugar a las fuertes inundaciones registradas en la región durante la última década. Por otro lado, este comportamiento puede ser un indicio en los procesos de variación climática y su influencia en cambios en la intensidad de precipitación dentro del Estado de Tabasco.

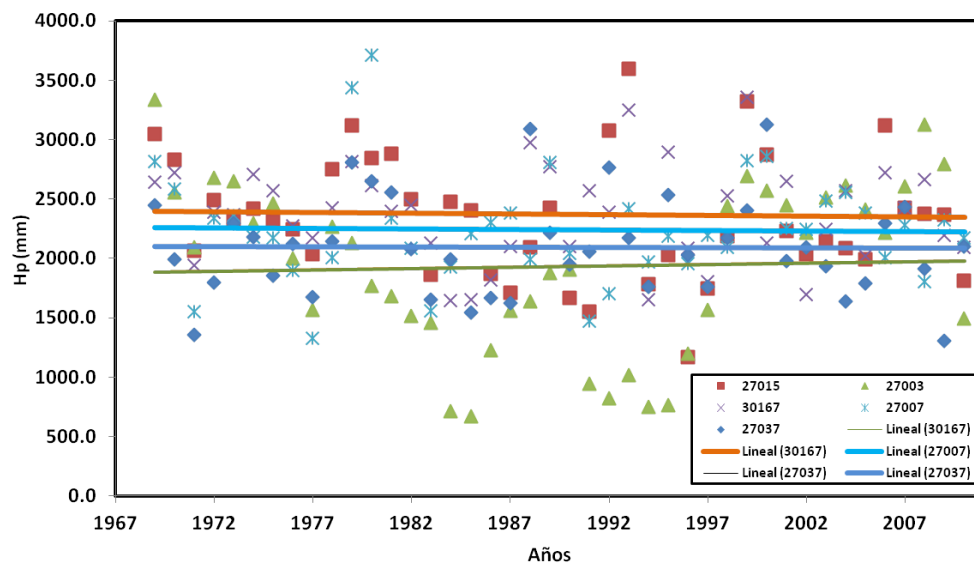


Figura 4. 2Tendencias de los registros acumulados anuales en las estaciones climáticas

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

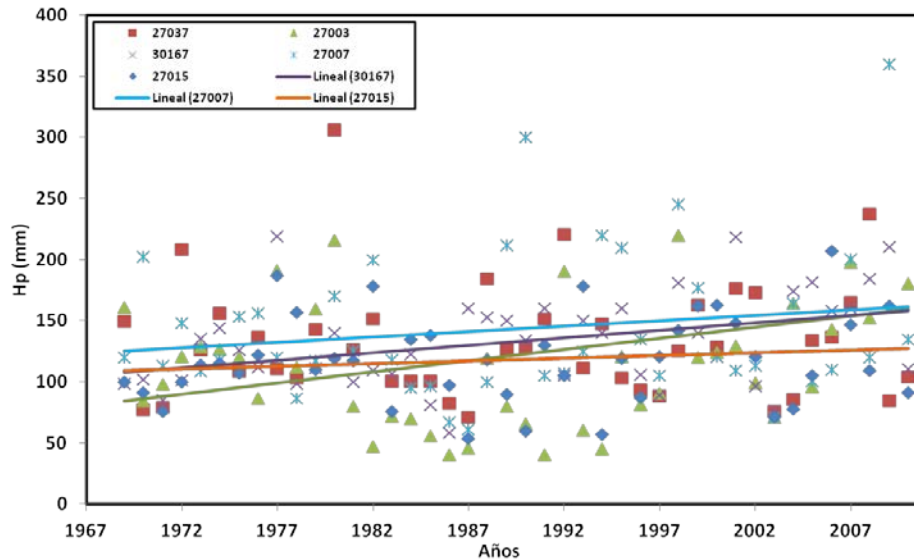


Figura 4. 3 Tendencias de los registros máximos anuales en las estaciones climáticas

4.3 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LAS SERIES

4.3.1 METODOLOGÍA

Una vez revisados y construidos los registros de lluvia confiables, el paso siguiente consiste en analizar los parámetros de lluvia atribuible a días de lluvia intensa consecutiva. El conocimiento de la duración y la intensidad de la lluvia, es de gran trascendencia ya que el escurrimiento ocurre sólo después de exceder un cierto valor umbral, es decir, cuando la intensidad de una avenida excede la tasa de infiltración, o la intensidad y la duración de una avenida exceden a la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Aparicio, 1994).

En el caso de la zona de estudio, las bajas pendientes del terreno hacen un tiempo de concentración de la cuenca muy largo (superior a 70 horas), en consecuencia, el periodo de respuesta a un evento extremo es muy prolongado. Por esta razón el análisis de lluvia para la cuenca del Río Tonalá debe ser evaluado a través de valores diarios de lluvia intensa, con el propósito de recrear, de la mejor manera posible, la duración de un evento de avenida.

Antes de iniciar el análisis probabilístico de las series, es necesario ajustar los registros de lluvia máxima, debido a que los valores son atribuibles a valores en 24 horas y no a valores diarios. Esta corrección se realiza multiplicando cada valor de la serie por un factor de ajuste. En el caso de estudio el factor de ajuste utilizado fue 1.14.

La metodología utilizada para el análisis probabilístico de las series, requiere de la obtención de los valores de precipitación promedio en días consecutivos de lluvia, el ajuste a distribuciones de valores extremos para conocer los valores de lluvia a eventos de diseño, y por último la estimación de los valores individuales de lluvia consecutiva diaria para periodos

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

de retorno de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500 y 1000 años. En las siguientes sub-secciones se describe cada una de estas etapas.

4.3.1.1 Obtención de precipitación promedio en días consecutivos de lluvia

La metodología para el cálculo de los valores medios de precipitación consecutiva diaria tienen su origen en el método curva de volumen por duración propuesto por [Beard \(1963\)](#) para el estudio en presas, el cual se describe de forma detallada en [Vieria et al. \(1987\)](#). De manera simplificada, el procedimiento de cálculo para la cuenca del Río Tonalá se detalla a continuación: Bajo la hipótesis de un registro pluviométrico que contiene información de precipitación máxima diaria en una semana. Se desfasa temporalmente a este registro n días, tal como se indica en la [Tabla 4.4](#). Una vez definidos los valores de desfase, es posible determinar los valores medios de lluvia a través del promedio de los valores con respecto al día consecutivo de desfase. En la [Tabla 4.5](#) se reportan los valores promedios de precipitación diaria consecutiva

En el caso de la cuenca del río Tonalá, este procedimiento se realizó para cada una de las 5 estaciones en todo el registro, obteniendo valores de precipitación consecutiva diaria de 15 días, a partir de los 42 años de registro.

Tabla 4. 4 Ejemplo de desfase de los registros diarios de precipitación máximo

t, días	HU	HU <i>despl</i> <i>1día</i>	HU <i>despl</i> <i>2días</i>	HU <i>despl</i> <i>3días</i>	HU <i>despl</i> <i>4días</i>	HU <i>despl</i> <i>5días</i>	HU <i>despl</i> <i>6días</i>	HU <i>despl</i> <i>7días</i>	HU <i>despl</i> <i>8días</i>	Σ
1	0									0
2	20	0								20
3	30	20	0							50
4	40	30	20	0						90
5	50	40	30	20	0					140
6	60	50	40	30	20	0				200
7	70	60	50	40	30	20	0			270
8		70	60	50	40	30	20	0		270
9			70	60	50	40	30	20	0	270
10				70	60	50	40	30	20	270
11					70	60	50	40	30	-
12						70	60	50	40	-
13							70	60	50	-
14								70	60	-
15									70	-

Tabla 4. 5 Desfase de los registros diarios de precipitación máximo

t, días	HU <i>prom</i> <i>1día</i>	HU <i>prom</i> <i>2días</i>	HU <i>prom</i> <i>3días</i>	HU <i>prom</i> <i>4días</i>	HU <i>prom</i> <i>5días</i>	HU <i>prom</i> <i>6días</i>	HU <i>prom</i> <i>7días</i>	HU <i>prom</i> <i>8días</i>
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	20.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
3	30.0	25.0	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

4	40.0	35.0	30.0	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
5	50.0	45.0	40.0	35.0	28.0	28.0	28.0	28.0
6	60.0	55.0	50.0	45.0	40.0	33.3	33.3	33.3
7	70.0	65.0	60.0	55.0	50.0	45.0	38.6	38.6
8		70.0	65.0	60.0	55.0	50.0	45.0	38.6
9			70.0	65.0	60.0	55.0	50.0	45.0
10				70.0	65.0	60.0	55.0	50.0
11					70.0	65.0	60.0	55.0
12						70.0	65.0	60.0
13							70.0	65.0
14								70.0

4.3.1.2 Distribución de ajuste de valores extremos

La determinación de los valores de intensidad-duración-periodo de retorno para la zona de estudio comienza con la búsqueda de la distribución de probabilidad de menor cuadrático. Este procedimiento requiere ajustar diferentes distribuciones de probabilidad, a fin de elegir aquel que represente mejor el comportamiento de la muestra. En el trabajo de tesis, y luego de un análisis del comportamiento de las muestras evaluada ante ocho diferentes distribuciones de probabilidad (Exponencial 2 parámetros; Normal; Log-normal2; Log-normal-3, Gamma 2, Gamma3, Gumbel, Doble Gumbel, GVE), se eligió la función Gumbel como la distribución de ajuste de valores extremos para los registros de lluvias en las cinco estaciones analizadas.

De esta manera el procedimiento de obtención de las lluvias de diseño sigue lo propuesto por Soil Conservation Service (USDA, 1972) y el International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI, 1978) ajustando los registros de lluvia máxima diaria de la siguiente manera:

1. Ordenar los (n) datos de precipitación (P) en orden decreciente.
2. Asignar un número de orden (r) en la serie a cada valor (Pr, r = 1, 2,3,....., n), siendo P₁ el valor más elevado, P_n el más bajo.
3. Asignarle un periodo de retorno mediante la ley de Weibull

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (4.39)$$

Donde: n; tamaño de la muestra, m; número de orden

4. Asignarle una probabilidad

$$F(X) = 1 - \frac{1}{T} \quad (4.40)$$

Una vez calculado el Tr, se calcula la función de probabilidad de tipo Gumbel I, la cual se encuentra determinada por:

$$y = H(x; \lambda, \delta) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-\lambda}{\delta} \right) \right] \quad (4.40)$$

En donde λ y δ están determinados por

$$\delta = \frac{S_x \sqrt{6}}{\pi} \quad (4.41)$$

$$\lambda = \bar{x} + 0.5772\delta \quad (4.42)$$

Finalmente la fórmula para determinar la variable η está determinada por

$$\eta = -Ln[-Ln(y)] \quad (4.43)$$

A partir de esta distribución se obtienen los valores de precipitación de diseño de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 500, y 1000 años periodo de retorno en cada una de las series consecutivas de lluvia para las estaciones analizadas.

4.3.1.3 Precipitación individual de diseño para lluvias consecutivas

Una vez obtenida la precipitación promedio de diseño para lluvias consecutivas, los valores de lluvia deben ser transformados a valores individuales de precipitación. El procedimiento consiste en resolver un sistema de ecuaciones lineales dado por:

$$\begin{aligned} P_1 | P_1 \\ \bar{P}_2 | P_2 = 2\bar{P}_2 - P_1 \\ \bar{P}_3 | P_3 = 3\bar{P}_3 - P_2 - P_1 \\ \bar{P}_4 | P_4 = 4\bar{P}_4 - (P_1 + P_2 + P_3) \\ \bar{P}_n | P_n = n\bar{P}_n - (P_1 + P_2 + P_3 \dots P_n) \end{aligned} \quad (4.44)$$

En este sistema los valores a calcular son $P_1, \bar{P}_2, \bar{P}_3 \dots \bar{P}_n$ conocidos los valores de precipitación promedio $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$. Estos valores son calculados para n días de lluvia consecutiva intensa en cada una de las estaciones analizadas.

4.3.1.4 Método de los bloques alternos

Con el propósito de dar fin al proceso de definición de las lluvias de diseño, se requiere generar el hidrograma sintético asociado, el cual permite representar la gradualidad en la intensidad de la lluvia durante una avenida. Para este proceso, el método de los bloques alternos es sin duda, el más utilizado, ya que considera la creación de un hidrograma sintético a través de la distribución normal de la lluvia.

El procedimiento de los bloques alternos para cada periodo de retorno radica en poner la intensidad más extrema en la parte central y alternando el resto de los valores a un lado y otro de este. En la [Figura 4.4](#) presenta de forma gráfica el procedimiento a seguir.

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

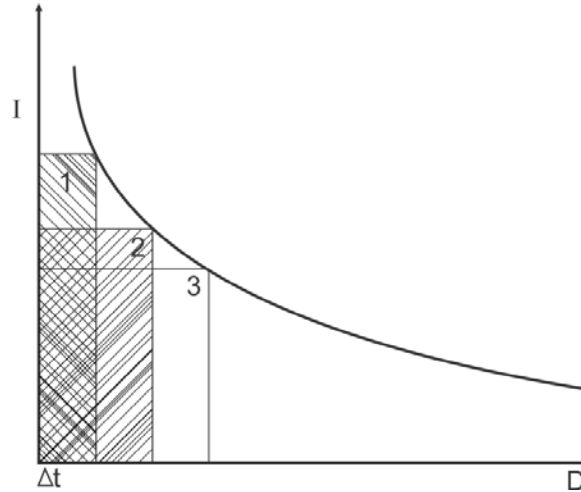


Figura 4. 4 Método bloques alternos Gómez (1996)

4.3.2 RESULTADOS

4.3.2.1 Análisis de lluvias

Como resultado del análisis de lluvia realizado, es posible identificar dos regímenes de precipitación dentro de la cuenca, uno húmedo en el que se registra el 74% del total de lluvia y que va desde junio a noviembre, periodo de tiempo que coincide con la temporada de ciclones tropicales y bajas presiones que se presentan en el Golfo de México. El segundo corresponde con el periodo de tiempo que va desde el mes de diciembre al mes mayo, y que se caracteriza por la poca presencia de agua en la cuenca (época de estiaje). Los meses de mayor precipitación son septiembre y octubre. A manera de resumen, la Figura 4.5 presenta la distribución anual de la lluvia en cada una de las estaciones analizadas.

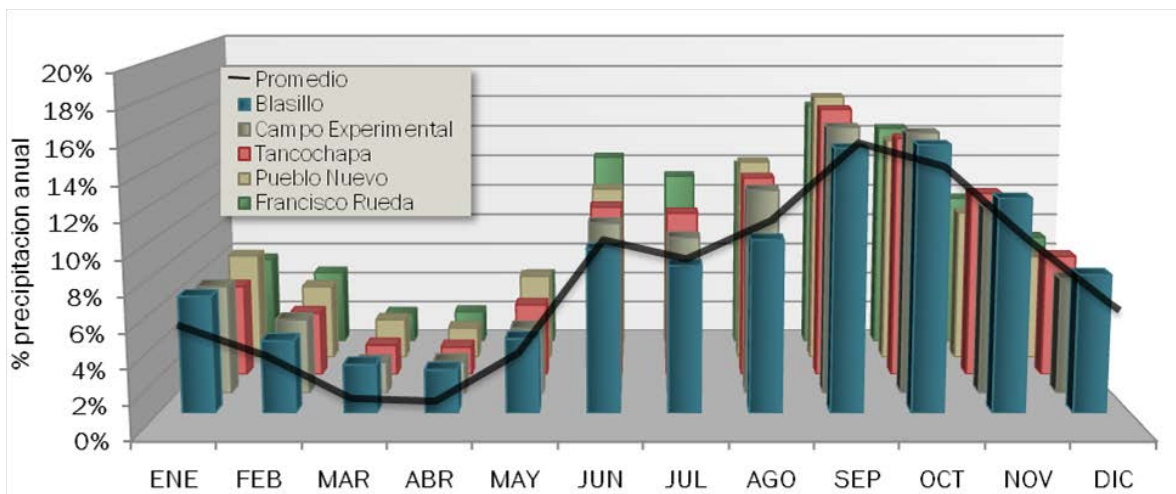


Figura 4. 5 Frecuencia de lluvia anual

4.3.2.2 Curvas Intensidad, duración y periodo de retorno

Las curvas Intensidad, duración y periodo de retorno (IDT) son producto de la división entre los valores de precipitación consecutiva intensa entre su duración. En esta medida los valores de

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

intensidad forman una especie de media luna, que indican que para valores cortos la intensidad reporta su máxima intensidad, la cual se reduce conforme pasa el tiempo. Las curvas IDT para la zona de estudio se llevaron a cabo tomando en consideración 15 días de lluvia intensa. En la [Figura 4.6](#) se presentan para todas las estaciones evaluadas, las curvas IDT de precipitación promedio, en días consecutivos de lluvia.

En general, se observa que el comportamiento de las intensidades altas en la cuenca varían desde 120 hasta 300 mm/día para Tr bajos (menor a 20 años) y entre 250-600 mm/día para periodos de retorno altos. De acuerdo a los resultados, se registra mayores intensidades de lluvia en las estaciones ubicadas al noroeste de la cuenca, definidas por Blasillo y Campo Experimental. Esta tendencia indica que la mayor parte de la precipitación dentro de la cuenca, es producto de los fenómenos hidrometeorológicos extremos como ciclones tropicales y frentes fríos, que azotan la región.

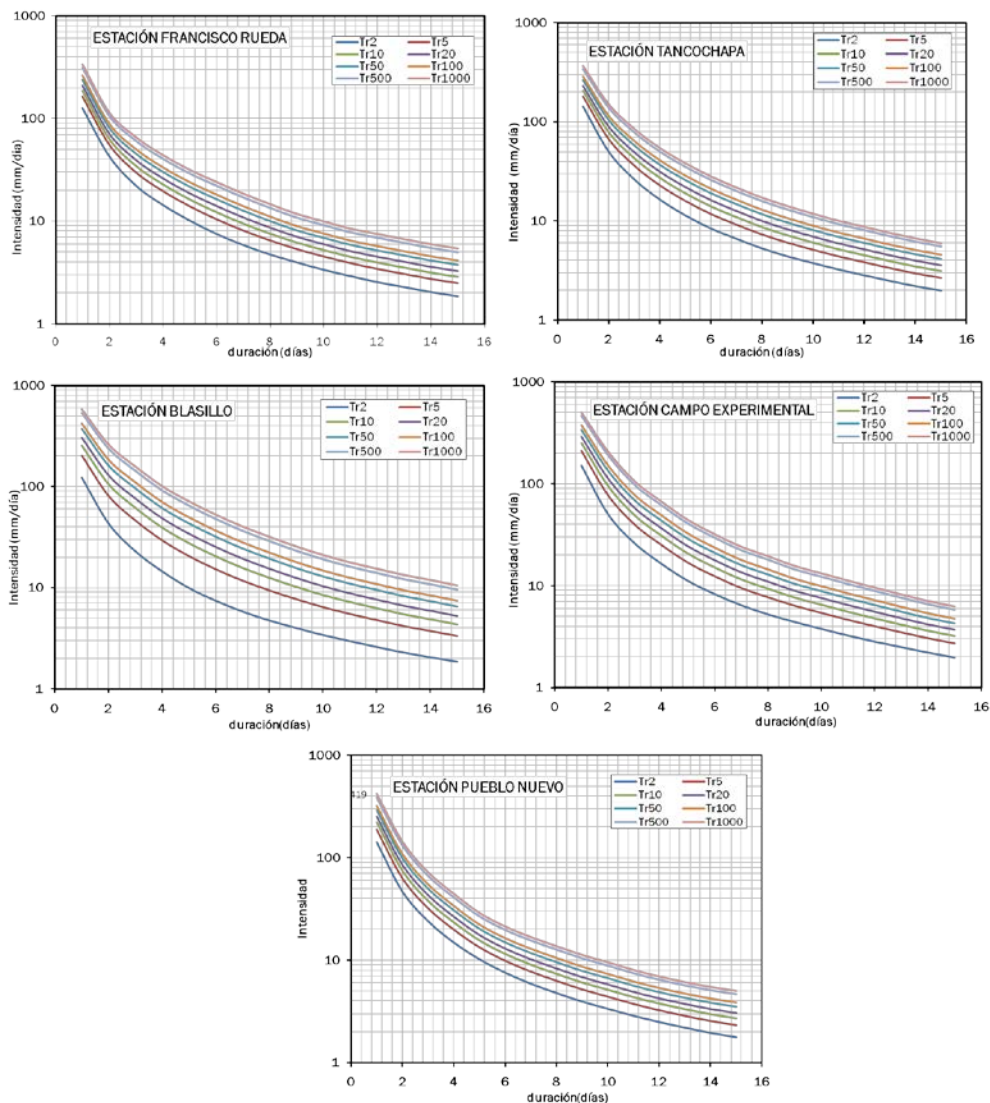


Figura 4. 6 Curvas Intensidad duración y periodo retorno de precipitación promedio en días consecutivos de Lluvias para las estaciones evaluadas

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

4.3.2.3 Hietogramas de diseño

Tomando como base, las curvas IDT de valores promedio de lluvia consecutiva intensa, se definieron los registros individuales de lluvia consecutiva intensa. Una vez obtenidos, estos registros fueron normalizados por medio del método de bloques alternos para construir los hietogramas de diseño.

Con base en los resultados de un análisis de las avenidas históricas extremas dentro de la zona de estudio, se observó que la precipitación intensa para una avenida dentro de la cuenca es en promedio de ocho días de lluvia. Por esta razón, y con el fin de recrear el comportamiento normal de un evento en la cuenca, los hietogramas fueron construidos con una duración de ocho días de lluvia intensa. En la [Figura 4.7](#) se muestra los hietogramas de diseño para periodos de retorno de 50, 100, 500 y 100 años en cada una de las estaciones evaluadas.

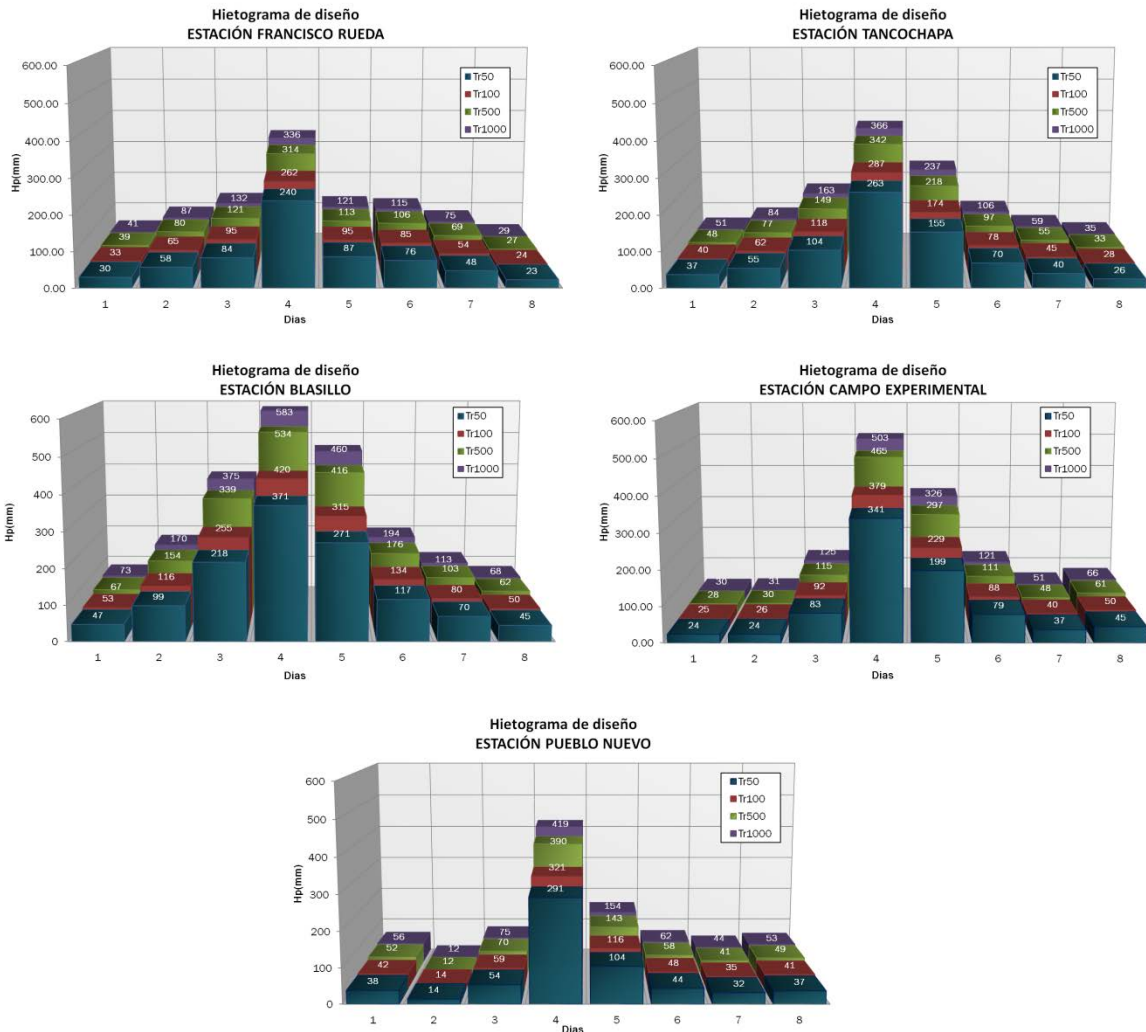


Figura 4. 7 Hietogramas de diseño para las estaciones seleccionadas.

CAPITULO 4. ESTIMACIÓN DE LOS VALORES DE PRECIPITACIÓN ASOCIADOS A DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO

Una vez definidos los hietogramas de las estaciones climáticas, estos son utilizados como datos de entrada para el modelo hidrológico distribuido, con el propósito de generar los escurrimientos de diseño asociados a los periodos de retorno estudiados (ej. 50, 50, 500 y 1000 años).

4.4 CONCLUSIONES

En este capítulo, se analizaron los registros de precipitación pluviométrica en la cuenca del Río Tonalá con el objetivo de determinar las lluvias de diseño asociadas a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. Para este propósito, fue necesaria la utilización de técnicas de rellenado de datos y análisis probabilísticos para estimar el nivel de lluvia. Como principales conclusiones de esta parte del trabajo, se rescatan las siguientes:

La cuenca presenta muy poca información histórica de registros climatológicos, esto se debe en general, a la inoperancia de las estaciones de medición o la porosidad en los registros de lluvia. De esta manera, se utilizaron 6 estaciones pluviométricas, de las cuales 5 fueron empleadas para caracterizar la cuenca debido a la porosidad en los registros de la estación Tequila. Los registros de lluvia utilizados cuentan con información desde 1969 y hasta el 2010.

Se aplicaron diferentes pruebas de interpolación geoestadística a fin de evaluar la sensibilidad de la estimación de datos faltantes ante las técnicas de rellenado. Si bien esta evaluación se realizó con el rellenado previo de los datos ante una técnica aleatoria, esta metodología permitió identificar cuales técnicas de interpolación presentan un menor error en la estimación de los datos de lluvia. Siendo las técnicas Inversa $B=1$ y la interpolación Optima potencia inversa las que reportaron un menor error. Sin embargo, en la estimación de los niveles de tendencia, se reporta una mayor linealidad en los datos obtenidos por medio de la técnica $B=1$ en contraste con aquella observada en los datos de la técnica de la óptima potencia inversa.

A partir de los resultados obtenidos, fue posible identificar dos periodos claros en la distribución temporal de la lluvia, uno húmedo que va desde junio a diciembre, donde se precipita el 74% del total de lluvia anual de la cuenca, y otro de estiaje que va desde el mes de diciembre al mes de mayo. Así mismo, se identificaron a los meses de Septiembre y Octubre como los de mayor intensidad de lluvia.

En relación con el análisis de lluvia, fue posible identificar que la cuenca está fuertemente influenciada por los fenómenos hidrometeorológicos extremos, como son ciclones tropicales y los frentes fríos provenientes del Golfo de México. Estos eventos afectan en gran medida los niveles de intensidad de lluvia registrados en las estaciones climatológicas ubicadas al noreste de la cuenca (Blasillo y Campo Experimental), en donde las precipitaciones de diseño a eventos máximos alcanzan cerca de los 600 mm/día.

CAPÍTULO 5.

MODELADO HIDROLÓGICO DE AVENIDAS DE DISEÑO

5.1 INTRODUCCIÓN

Dentro del campo de la hidrología, la cuenca representa la unidad básica de análisis, la solución de la ecuación del balance hídrico en su interior, determina el balance entre procesos de precipitación, infiltración, evaporación y transpiración, que a su vez determina la cantidad de agua que se convertirá en escurrimiento superficial sobre los ríos. El entendimiento de estos procesos y sus interacciones representa una de las tareas más complejas dentro del área de la hidrología, esto se debe a la gran cantidad de factores climáticos y fisiográficos que dan lugar al balance hídrico en un tiempo y espacio dado, además de la alta no linealidad de las interacciones entre los procesos (ej. relación lluvia-escurrimiento). Dada la importancia de los procesos y sus interacciones, la literatura ha registrado el desarrollo de diversos modelos matemáticos que representan abstracciones del funcionamiento del ciclo hidrológico.

Dentro de todas las relaciones existentes que se desarrollan a nivel de cuenca, la que ha recibido mayor atención por parte de los investigadores es la que existe entre la lluvia y el escurrimiento. En este sentido, es posible clasificar a los modelos en función de la descripción de los parámetros físicos (conceptuales) o en relación a la como descripción espacial de los procesos de captación (ej. agrupados y distribuidos) ([Refsgaard, 1996](#)).

Conforme con [Refsgaard \(1996\)](#), los modelos hidrológicos pueden de tipo determinista o probabilista ([Figura 5.1](#)). Los modelos deterministas son formulados siguiendo las leyes físicas

o analíticas rígidas e inmutables. Es decir, bajo este enfoque se estudian los fenómenos hidrológicos considerando la relación causa-efecto entre los valores elegidos y los resultados obtenidos en la aplicación de las ecuaciones. Generalmente, asumen hipótesis de estacionalidad de los parámetros y se concentran en obtener una relación directa entre causa y consecuencia. Dentro de este tipo de modelos, existen a su vez tres diferentes tipos conocidos como modelos empíricos o de caja negra, modelos conceptuales y modelos distribuidos con base en la física.

Los modelos empíricos o paramétricos representan los más sencillos de todos los modelos y como su nombre lo indica, la solución del modelo se encuentra basada en parámetros empíricos lineales o no lineales. Por otra parte, los modelos conceptuales agrupados son representaciones simplificadas de procesos físicos, los cuales simulan procesos complejos basándose en pocos valores conceptuales, por ejemplo, en el modelo conceptual agrupado la captación es considerada como una unidad de computo (Refsgaard, 2007). Los modelos distribuidos basados en la física, a diferencia de los modelos agrupados, permiten la variación espacial de los procesos de captación en toda cuenca. Una aproximación intermedia que permite agrupar las características de los modelos conceptuales agrupados y distribuidos son los modelos semi-distribuidos, estos modelos distribuyen los parámetros de captación a través de subcuencas o unidades de respuesta hidrológica.

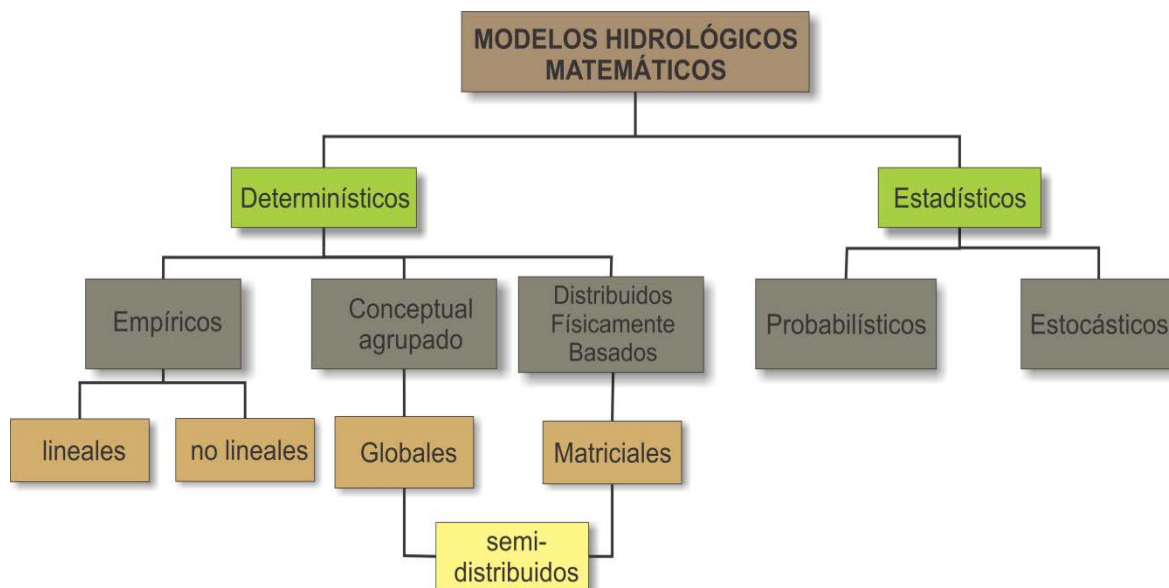


Figura 5. 1 Clasificación de los modelos hidrológicos de acuerdo con el proceso de descripción

En la literatura, existen diversos ejemplos de modelos de tipo deterministas, para el caso de los modelos conceptuales se encuentran el Stanford Watershed Model (Crawford and Linsley, 1966), el Sacramento (Burnash, 1995), el HBV (Bergström, 1995) y el NAM (Nielsen and Hansen, 1973). Respecto a modelos distribuidos basados en la física, se han reportado aproximaciones como el MIKE SHE (Abbott et al., 1986a, b), el Thales (Grayson et al., 1992) y el MPE (Dominguez et al., 2008). Finalmente, un ejemplo de modelo típicamente semi-distribuido es el modelo SWAT (Soil -Water Assessment Tool) de la Universidad de Texas (Arnold et al., 1998).

Por otro lado, los modelos probabilísticos presentan un enfoque completamente diferente a los modelos deterministas. Los modelos estadísticos tienen su base en las leyes del azar o la probabilidad. Dichas herramientas pueden ser de dos tipos: los modelos de tipo estadístico y los de tipo estocástico. Los modelos estadísticos parten su análisis en variables observadas, en el caso de los modelos estocásticos el análisis parte de la estructura del azar observada en diversas variables hidrológicas a lo largo del tiempo. Como ejemplos de este tipo de modelos se encuentran los modelos de tipo Gumbel para el análisis de frecuencia de inundación desde un punto de vista probabilista, o el de las simulaciones tipo Monte Carlo y los modelos de Markov en métodos estadísticos.

Basados en los valores de los precipitación de diseño obtenidos con anterioridad, el objetivo de este capítulo consiste en calcular los hidrogramas de diseño a través de la utilización del modelo hidrológico de parámetros semidistribuidos conocido como SWAT, en su versión GIS 2009. La selección de este modelo se debe a su aplicabilidad para trabajar con diferentes escalas de cuenca, su libre acceso tanto a software como a los códigos fuentes y debido a su flexibilidad espacial en el proceso de calibración manual del modelo. Los principales pasos metodológicos se encuentran definidos de la siguiente manera: (1) Definición de los parámetros del modelo. (2) Selección de los datos de entrada. (3) Calibración y validación del modelo. (4) Simulación de los escenarios de avenidas

5.2 METODOLOGÍA

5.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT

El modelo SWAT (Soil-Water Assessment Tool), es un modelo hidrológico de parámetros semidistribuidos diseñado para el estudio de cauces, ríos y cuencas hidrológicas. Desarrollado por Dr. Jeff Arnold para el USDA Agricultural Research Service (ARS), SWAT tiene la finalidad de evaluar el impacto que tienen diferentes prácticas de manejo de suelos sobre la producción de agua, sedimentos, rendimientos agrícolas y el uso de químicos. Este modelo puede ser aplicado en grandes y complejas cuencas, con diferentes tipos de suelo, así como diversos manejos durante largos periodos de retorno. El modelo se encuentra compuesto por ocho módulos: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de los cultivos, nutrientes pesticidas y manejo de cultivos. Estos componentes permiten calcular gran número de procesos del ciclo hidrológico basados en el conocimiento de las características del entorno, el clima, las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo de tierra presente en la cuenca.

Entre las características más importantes del modelo SWAT se cuenta:

- Utiliza un número flexible de entradas. Los estudios dentro del modelo pueden ser tan complejos como lo requiera el usuario, permitiendo realizar análisis con un número mínimo de datos disponibles.

- La interfaz gráfica permite un manejo más sencillo, además de proporcionar una simulación controlada de los procesos.
- Es un método de ágil extrapolación e integración de la información, en la cual se puede acceder de forma inmediata a los datos de entrada y salida.
- Permite el estudio de impactos a largo plazo. Pueden incorporarse el modelo la presencia de varios aspectos, como la presencia gradual de contaminantes y el impacto en cuerpos de aguas río abajo.
- Proporciona un rango amplio de iteraciones en la simulación de procesos físicos.

La distribución geográfica de la cuenca en el modelo SWAT es realizada en tres niveles conceptuales: Cuenca (Basin), subcuenca (Subbasin) y unidades de respuesta de cuenca (HRU) o hidrotopo. La división entre cuenca y subcuenca permite reflejar las diferencias en evapotranspiración por varios tipos de cultivo y suelo. El escurrimiento superficial se predice de manera separada a través de los hidrotopos, en donde el valor total del escurrimiento es representado por la sumatoria de los valores del HRU. Esta caracterización permite una mejor descripción física del balance hídrico al interior de la cuenca, lo que proporciona al modelo mayor confiabilidad. A pesar de lo anterior, no se debe perder de vista que la confiabilidad de los resultados de un modelo numérico dependen de la calidad de la información base con la que se utiliza.

5.2.2 MODELADO HIDROLÓGICO DEL MODELO SWAT

La simulación hidrológica con el modelo SWAT tiene su base en el concepto de balance hídrico. De esta forma, el proceso de simulación se divide en dos fases del ciclo hidrológico, la terrestre y la de enrutamiento. La primera fase es la encargada de controlar la cantidad de agua, sedimentos, cargas de alimento nutritivo y de pesticida al canal principal en cada subcuenca. La segunda es la que define el movimiento de agua, sedimentos y demás a través de canales de la cuenca hidrológica hacia el vertedero (Neitsch *et al.*, 2005).

Dado que el énfasis de este trabajo de investigación está asociado al modelado hidrológico de las lluvias de diseño, se utilizó el modulo hidrológico. A continuación, se describen los parámetros de hidrología del SWAT para obtener los hidrogramas asociados a estas lluvias.

5.2.2.1 Fase terrestre del ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es simulado a partir de la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_i^t (R_i - Q_{surf,i} - E_{a,i} - W_{seep,i} - Q_{gw,i}) \quad (5.1)$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm H₂O), SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo en un día i (mm H₂O), t es el tiempo (días), R_i es la cantidad de precipitación en un día i (mm H₂O), $Q_{surf,i}$ es la cantidad de escurrimiento de la superficie día i (mm H₂O), $E_{a,i}$ es la

cantidad de evapotranspiración en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$), $W_{seep,i}$ es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$), y $Q_{gw,i}$ es la cantidad de flujo de retorno en un día i ($\text{mm H}_2\text{O}$). En la **Figura 5.2** se muestra el diagrama esquemático de los movimientos del agua dentro del ciclo hidrológico considerados en el SWAT.

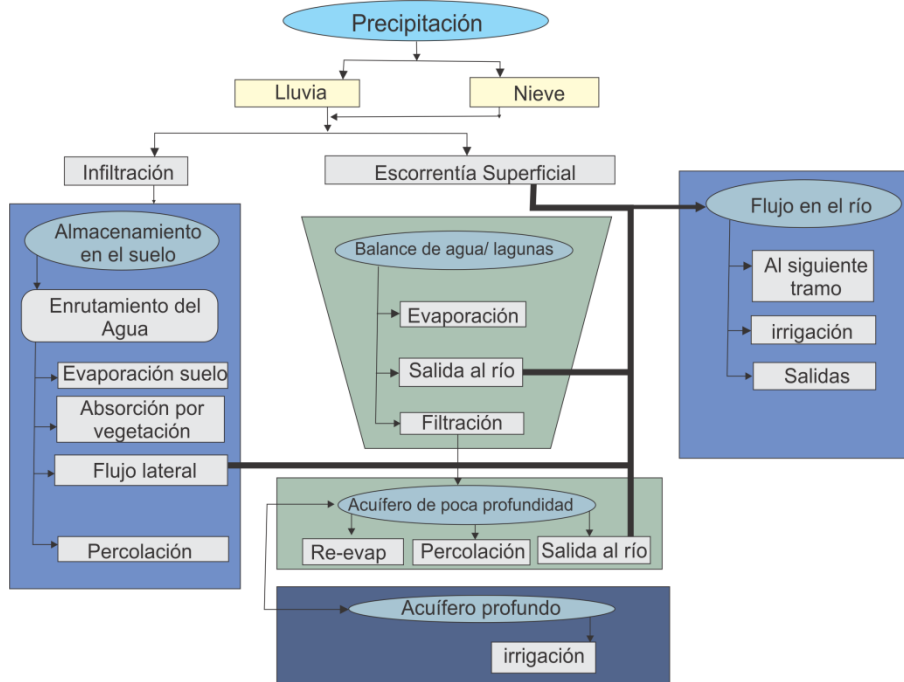


Figura 5. 2 Movimientos del agua en el ciclo hidrológicos considerados en el SWAT

Escurrimiento superficial: El modelo simula el escurrimiento superficial y los gastos máximos que se producen por lluvias diarias y sub-diarias utilizando el modelo del número de curva numérica del SCS ([Servicio de Conservación de suelo de USDA, 1972](#)) o por medio del método de infiltración de Green & Ampt ([Green & Ampt, 1911](#)).

El modelo del número de curva numérica, es un modelo de tipo conceptual que se basa en asumir la proporcionalidad entre la retención y el escurrimiento ([Ponce, 1989](#)). Se encuentra dado por:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (5.2)$$

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (5.3)$$

Donde R_{day} es la precipitación diaria, I_a las condiciones iniciales (intercepción, infiltración, almacenamiento superficial), S es el parámetro de retención y CN es el número de curva obtenido a partir del tipo de suelo. El modelo de Green & Ampt es un modelo de tipo

determinístico, el cual se encuentra basado en la física del proceso de infiltración. Se encuentra determinado por:

$$f_{inf,t} = K_e \left(1 + \frac{\psi_{wf} \cdot \Delta\theta_v}{F_{inf,t}} \right) \quad (5.4)$$

Donde K_e es la conductividad hidráulica efectiva (mm/h), ψ_{wf} es potencial del frente de la infiltración (mm) y $\Delta\theta_v$ es el cambio en el volumen del contenido de agua a través del frente (mm/mm).

Percolación: El proceso de percolación del agua se presenta solamente si el contenido del horizonte excede la capacidad de campo. Dentro SWAT la percolación es calculada para cada horizonte en el perfil del suelo a partir de la siguiente ecuación:

$$W_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \left(1 - \exp \left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (5.5)$$

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (5.6)$$

Siendo $W_{perc,ly}$ la cantidad de agua que percola por día, SW_{ly} el agua disponible, Δt el paso de tiempo en horas, TT_{perc} el tiempo de transito en horas, FC_{ly} el contenido de agua de la capa de suelo en la capacidad de campo (mm H₂O) y K_{sat} la conductividad hidráulica saturada (mm-h-1)

Flujo lateral superficial: El flujo lateral se presenta principalmente en áreas con conductividades altas y suelos delgados o con una capa impermeable. El modelo calcula el flujo lateral simultáneamente con el proceso de percolación y considera las variaciones de conductividad, pendiente y contenido de agua en el suelo. El flujo está determinado por:

$$Q_{lat} = 0.024 \left(\frac{2SW_{ly,excess} \cdot K_{lat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (5.7)$$

En donde Q_{lat} es la descarga de agua de una ladera (mm H₂O/día), $SW_{ly,excess}$ el volumen de agua almacenada en la ladera, K_{sat} la conductividad hidráulica saturada (mm-h-1), L_{hill} es la longitud de la ladera (m) y ϕ_d la porosidad

Flujo de agua subterráneo: La modelación de estos flujos se realiza a través de la generación de un acuífero somero, en el que se permite el proceso de percolación. La estimación del factor de retardo del acuífero hacia la corriente superficial de agua es determinada por medio de una constante de recesión, que se estima a partir de los datos diarios de flujo.

Evapotranspiración: En los procesos de evapotranspiración se incluyen la evaporación en los cuerpos superficiales de agua, sean ríos, lagos y lagunas así como suelo descubierto, además

se incorpora la transpiración de la vegetación y la sublimación de las superficies de hielo y nieve. El modelo determina la evaporación real del suelo y de las plantas de manera separada. En el caso del suelo, la estimación se realiza utilizando funciones exponenciales de profundidad del suelo y contenido de agua. Mientras que para el caso de la vegetación, ésta se realiza a través de una función lineal de la evapotranspiración potencial y el índice de área de hoja

5.2.2.2 Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico

Una vez calculado la cantidad de agua que va hacia el canal principal, el modelo SWAT dirige las cargas por medio de la corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la estructura del modelo hidrológico (HYMO) (William y Hann, 1972).

Durante el enrutamiento del flujo, y dado que aguas abajo del río es muy probable que se presenten pérdidas por procesos de evaporación y transmisión, se determina un factor de pérdida potencial de flujo debido a las actividades agrícolas y el uso humano. Estos flujos pueden ser sustituidos por la precipitación directa en el canal y/o la suma de descargas del punto de la fuente. En el modelo SWAT, el enrutamiento del flujo es dirigido por medio del método de variable de coeficiente de almacenamiento propuesto por William (1969) o por el método de enrutamiento de Muskingum (Nash, 1959).

El método de coeficiente de almacenamiento se encuentra basado en la ecuación de continuidad para un segmento dado, a partir de:

$$V_{entr} - V_{sal} = \Delta V_{alm} \quad (5.8)$$

Donde V_{entr} y V_{sal} , representan los volúmenes de entrada y salida durante el paso de tiempo ($m^3 H_2O$), y ΔV_{alm} la variación en el volumen de almacenamiento durante cada intervalo de tiempo ($m^3 H_2O$). El volumen de salida al final del intervalo de tiempo se determina por medio de un coeficiente de almacenamiento que relaciona el volumen de entrante promedio durante el paso de tiempo y el almacenamiento al inicio del paso de tiempo. Esta relación se encuentra en función de la longitud del paso de tiempo y el tiempo de transito, (Neitsch, et al., 2005).

El método de enrutamiento de Muskingum tiene su base teórica en la relación entre descarga y almacenamiento. Este método modela el volumen de almacenamiento de inundación en un río, por medio de la combinación de la cuña y el prisma de almacenamiento (ver Figura 5.3).

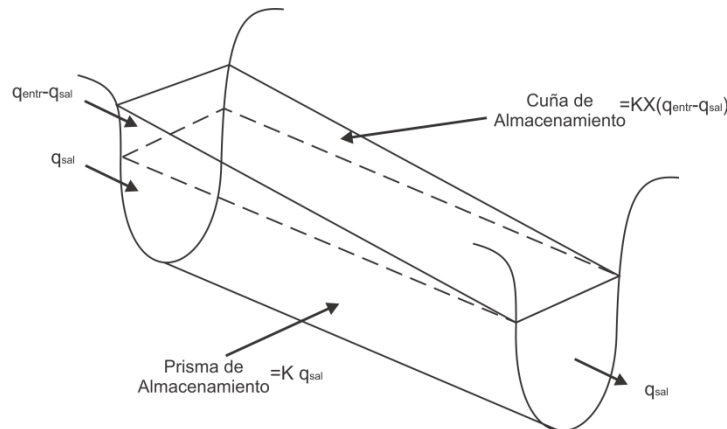


Figura 5. 3 cuña y el prisma de almacenamiento en un canal (Neitsch et al., 2005)

El almacenamiento de cuña se genera cuando una onda de inundación de entrada, a su paso por un tramo del segmento, excede la onda de salida.

La cuña de almacenamiento dentro de un prisma, está formada por un volumen constante en la sección transversal a lo largo de un canal prismático. El volumen del prisma de almacenamiento puede ser expresado como Kq_{sal} . Donde K es el radio de almacenamiento de descarga y la dimensión de tiempo y q_{sal} es la descarga. De manera similar, el volumen de cuña de almacenamiento puede ser expresado como $KX(q_{ent}-q_{sal})$. Donde X es el factor de peso que controla la importancia de salida que controla el flujo de entrada y salida determinando así el almacenamiento en el río. Los valores q_{in} y q_{sal} son los rangos de descarga de entrada y salida (Neitsch et al., 2005).

5.2.3 DATOS DE ENTRADA

En la construcción del modelo hidrológico, los datos de entrada se dividen en tres tipos: físicos, climáticos, y de escurrimiento. Las variables físicas del modelo permiten determinar las características geomorfológicas de la cuenca, tales como la pendiente del terreno, su rugosidad, y las pérdidas por infiltración e interceptación de la vegetación y zona forestada. Las variables climáticas son las utilizadas por el modelo para convertir la lluvia en escurrimiento, entre ellas se encuentran la precipitación, la temperatura del aire, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa. Finalmente las variables de escurrimiento son las que permiten la calibración del mismo. En este sentido, los datos de entrada utilizados son el modelo digital de elevaciones de la cuenca, el caudal de los ríos, el tipo de suelo y su vegetación, así como los parámetros de calidad del agua. En la Figura 5.4 se muestra el procedimiento de entradas y salidas del modelo SWAT para la zona de estudio.

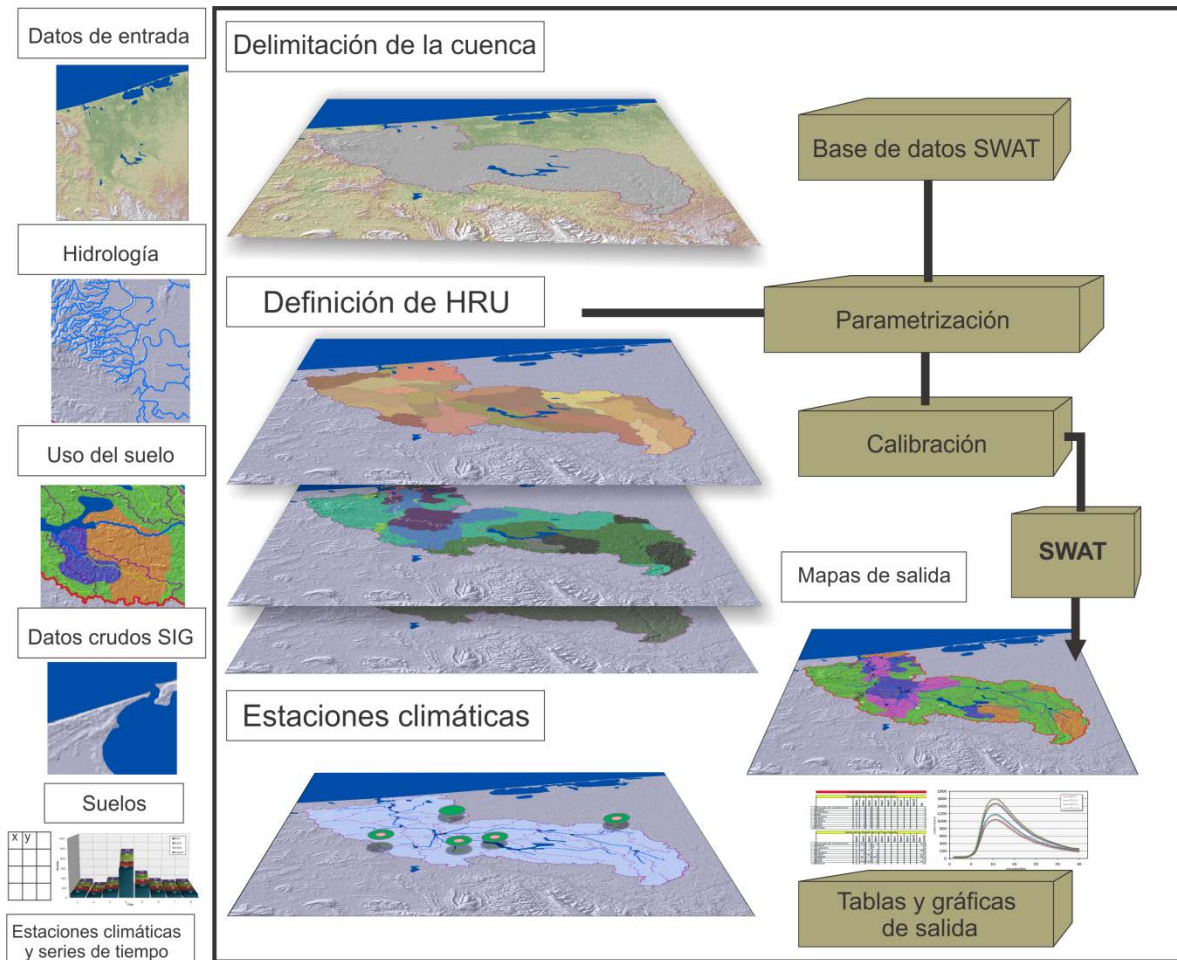


Figura 5. 4. Procesamiento de entradas y salidas del modelo SWAT

5.2.3.1 Físicos

Las características geomorfológicas de la cuenca se determinan en función de las siguientes piezas de información fundamentales. La topografía, que se define a partir de la información proveniente de los modelos digitales de elevación DEM, en este estudio se utiliza una nube de puntos LiDAR para su generación. Los datos de uso de suelo (vegetación, áreas urbanas, etc.) y tipo de suelo (textura, profundidad, conductividad hidráulica, etc.) que se definen en función del catálogo de metadatos geográficos de la CONABIO (Figuras 5.5a y 5.5b). Información que fue descrita a detalle en el capítulo dos de esta tesis, correspondiente a área de estudio y datos disponibles.

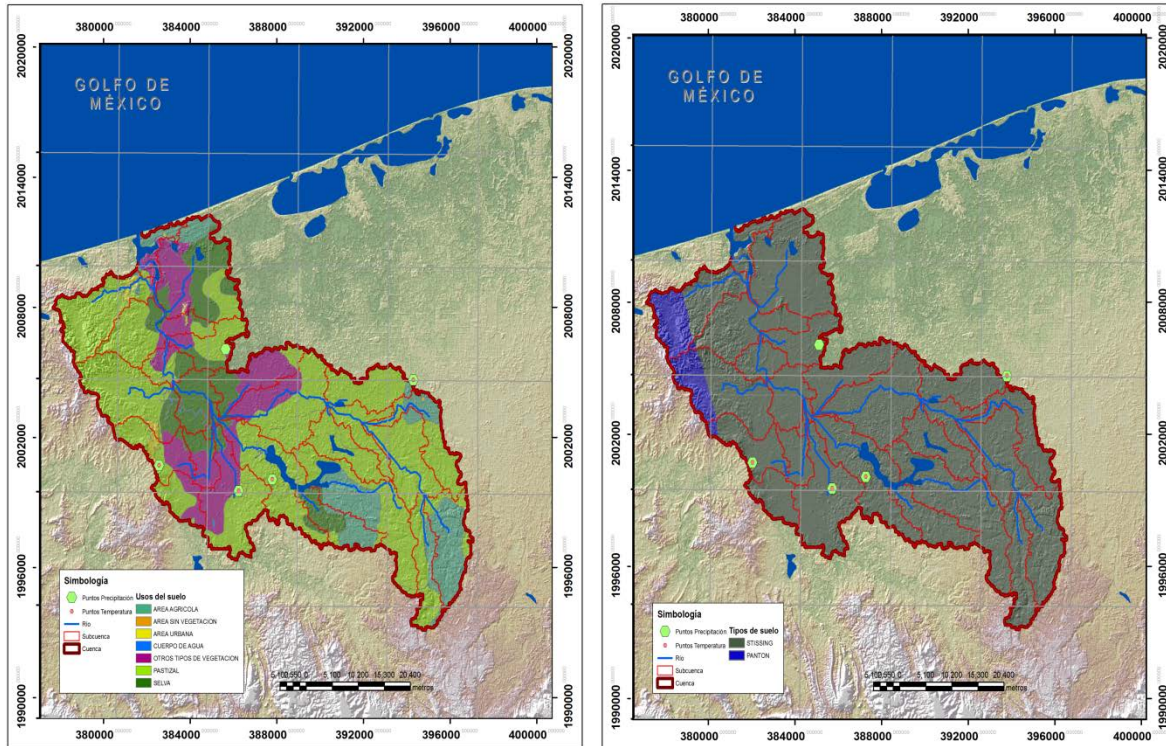


Figura 5. 5 a) Mapa de uso de suelo b) Mapa de tipo de suelo

5.2.3.2 Climáticos

El modelo SWAT permite la simulación de un gran conjunto de variables climáticas que pueden ser modeladas considerando el ingreso o no, de datos observados en campo. Entre estas variables se destacan: la precipitación diaria, temperatura aérea máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. En el caso del presente estudio, dada la disponibilidad e información, se consideró el ingreso de datos observados en el periodo de tiempo entre los años 1969 y 2010 correspondientes a precipitación máxima diaria y temperatura máxima y mínima, con lo que se simuló de forma numérica variables relacionadas con la radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Para completar la información, a continuación se describe cada una de estas variables.

Precipitación: En el proceso de calibración y validación de la herramienta numérica, se utilizaron los registros de valores máximos de lluvia. Una vez el modelo fue calibrado y validado, se ingresaron los valores de los hietogramas de diseño obtenidos en el capítulo 4 a fin de obtener las avenidas de diseño asociadas a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años.

Temperatura del aire: La temperatura máxima y mínima diaria se definieron a partir de la información proveniente de estaciones climatológicas dentro de la cuenca (ver capítulo 2). El tratamiento de estos registros de temperatura, fue similar al realizado para los datos de precipitación máximas (ver capítulo 4). La Figura 5.6, presenta El comportamiento mensual

promedio de las temperaturas máximas y mínimas en todas las estaciones, durante el periodo 1969-2010.

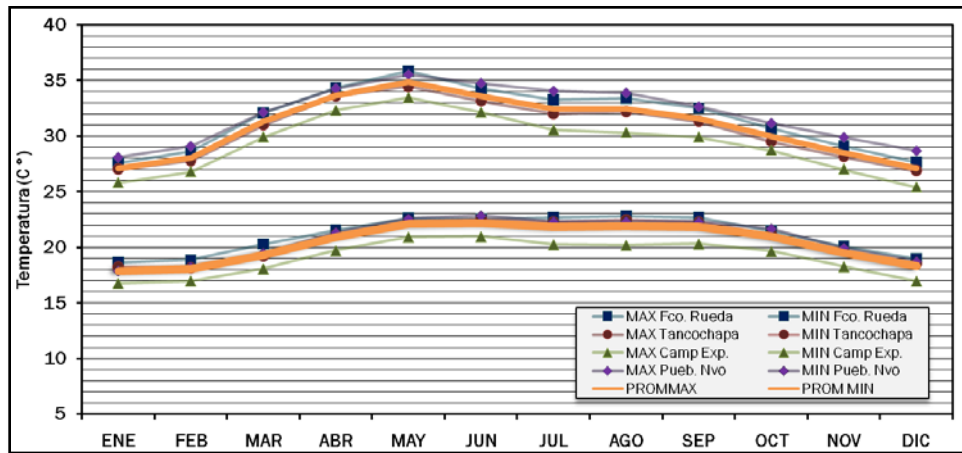


Figura 5. 6 Temperatura promedio mensual (1969-2010)

Velocidad del viento: Es una variable simulada por el modelo. Los valores de temperatura son generados en función de una ecuación exponencial modificada que permite generar una media de viento diario dado la media mensual de la velocidad del viento.

Radiación solar: Simulada por el modelo, la radiación solar es generada de una distribución normal. Una ecuación de continuidad es integrada en el generador para justificar las variaciones de radiación causadas por las condiciones secas vs lluviosas.

Humedad relativa: Es simulada utilizando una distribución triangular que calcula la humedad relativa media y diaria del promedio mensual. Esta simulación, al igual que en la radiación solar, ajusta por parámetros de humedad en torno a los periodos secos y húmedos.

5.2.3.3 Escurrimiento

Los datos de escurrimiento utilizados contaron de los registros hidrométricos de la cuenca en la estación San José del Carmen (*ver capítulo 2*) obtenidos de la base de datos del Banco Nacional de Aguas Superficiales BANDAS del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua IMTA y de la Comisión Nacional del Agua CONAGUA.

5.2.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Los ingredientes esenciales de cada modelo son las variables y los parámetros. Las variables son las cantidades físicas en sí mismas, esto es: descarga, estado, área de flujo, profundidad de flujo, velocidad media, etc. Los parámetros son cantidades que controlan el comportamiento de las variables. Cada componente del modelo puede tener una o más variables y parámetros (Ponce, 1989).

El proceso de búsqueda de la mejor distribución de parámetros y variables es un proceso arduo, con un sin número de incertidumbres que se deben identificar y caracterizadas, que aumentan en relación al rango y número de variables. El proceso de modelado hidrológico está afectado por tres fuentes principales de incertidumbre ([Renard 2010](#)):

- 1) Incertidumbre de observación: está dada por la medición de entrada (ej. precipitación y temperatura) y de salida (ej. caudal) de los flujos en los sistemas hidrológicos y algunas veces de sus estados (ej. el contenido de humedad del suelo, los niveles de agua subterránea). La incertidumbre de observación o de datos por lo general consta de dos componentes: i) los errores de medición debidos a errores, tanto instrumentales y humanos; ii) error debido a la insuficiente representatividad de una muestra de datos debido a la incompatibilidad o diferencia en el tiempo y en el espacio entre la variable medida por el instrumento y la variable del modelo correspondiente. Este último se denomina a veces la incertidumbre del muestreo.
- 2) La incertidumbre del modelo: Un modelo es una representación simplificada de la realidad ([Refsgaard, 1996](#)). Los procesos reales complejos se simplifican considerablemente, mientras que se derivan de los conceptos básicos y las ecuaciones del modelo. Conceptualización con aproximaciones inadecuadas e ignorado o tergiversando procesos pueden dar lugar a grandes errores en la estructura conceptual del modelo.
- 3) Incertidumbre de parámetros: La incertidumbre en los parámetros del modelo resulta de la incapacidad de cuantificar con precisión los parámetros de entrada del modelo. Los parámetros del modelo pueden no tener significado físico directo. Además, los parámetros que tienen un significado físico no se pueden medir directamente o es demasiado costoso medir en el campo. En tal caso, sus valores se calculan generalmente por medios indirectos (ej. modelo de calibración).

El proceso de calibración del modelo hidrológico, permite reducir la incertidumbre de parámetros pero no la elimina.

El modelo hidrológico SWAT, incorpora un gran número de variables y parámetros que permite la recreación del proceso lluvia-escurrimiento. Sólo en el módulo de hidrológico, el modelo cuenta con 26 parámetros que deben ser calibrados para cada HRU de la cuenca. Debido a esto, es necesario limitar el número de parámetros y su rango dentro de la física y la representatividad de la cuenca a través de un análisis de sensibilidad.

Durante este análisis el modelo hidrológico es puesto a prueba a fin de establecer una unidad de cambio relativo en los resultados, por medio de una modificación en el valor de los parámetros del modelo. En otras palabras, se estudia el comportamiento individual de los parámetros con respecto al resultado final de lo que se desea predecir, en este caso escurrimiento. Para estimar el nivel de sensibilidad de los parámetros, el modelo combina la simulación Latin Hipercube (LH) y el análisis One-Factor-At-a-Time (OAT) en un modelo de tipo iterativo.

El concepto de la simulación Latin Hipercube ([McKay et al., 2000](#)) es muy parecido a las simulaciones de tipo Monte Carlo. La diferencia radica en que en vez de utilizar una técnica de muestreo aleatorio, el LH utiliza una técnica de muestreo estratificado. Esta técnica subdivide

la distribución de cada parámetro en n rangos, cada uno con una probabilidad de ocurrencia de $1/n$, de manera que los valores aleatorios sean muestreados sólo una vez.

La sensibilidad individual de los parámetros del modelo, se determinada por el One-Factor-At-a-Time (OAT). Bajo esta perspectiva, se evalúa la proporción de cambio en la salida con relación a los parámetros de entrada. Si un parámetro es altamente sensible, pequeñas variaciones producirían grandes cambios en los gastos de salida. Las mediciones de sensibilidad son calculadas usando un índice de sensibilidad tal y como el que se presenta en la ecuación (5.9).

$$I = \frac{(y_2 - y_1) / y_1}{(x_{i2} - x_{i1}) / x_{i1}} \quad (5.9)$$

Donde, y_1 y y_2 , son las salidas correspondientes a los parámetros de entrada x_{i1} y x_{i2} respectivamente

5.3 RESULTADOS

5.3.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS

En análisis de sensibilidad fue realizado con base en el índice de sensibilidad de los parámetros de flujo del modelo en la representación de un registro observado. El periodo de análisis comprendió desde el 1 de julio al 31 de diciembre de 1999. Dado que la clasificación de los parámetros es determinado por el tipo de método utilizado en la simulación de los escurrimientos superficiales (SCS o Green & Ampt), fue necesaria la evaluación de los parámetros para cada método. En la [Tabla 5.1](#) se muestra los parámetros de flujos utilizados para el análisis de sensibilidad.

Tabla 5. 1 Parámetros y rango de parámetros usados en el análisis de sensibilidad

NOMBRE	MIN	MAX	DEFINICIÓN	PROCESO
ALPHA_Bf	0	1	Factor del flujo base Alpha (días)	A. subterránea
Canmx	0	10	Índice máximo de dosel	Precipitación
CH_K2	0	150	Conductividad efectiva hidráulica en el canal principal	Canal
Ch_N2	-20	20	Coeficiente de Manning del canal	Canal
Cn2	-50	50	Número de curva para el método SCS*	Precipitación
Epc0	-50	50	Factor de compensación por evaporación de las plantas*	Evaporación
ESCO	0	1	Factor de compensación por evaporación de las plantas	Evaporación
GW_DELAY	0	100	retraso de las aguas subterráneas (días)	A. subterránea
Gw_Revap	0.02	0.2	Coeficiente "revap" aguas subterráneas	A. subterránea
GWQMN	0	1000	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial requerida para el retorno al producirse (mm)	Suelo
rcharg_dp	0	1	Recarga de aguas subterráneas a los acuíferos profundos (%)	A. subterránea
Revapmn	0	500	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial para la ocurrencia "revap" (mm)	A. subterránea

Slope	-50	50	Pendiente media inclinada (m/m)*	Geomorfología
Slsubbsn	-50	50	Pendiente media longitudinal (m/m)*	Geomorfología
Sol_AWC	-50	50	Capacidad de agua disponible	Suelo
Sol_K	-50	50	Conductividad del suelo*	Suelo
Sol_Z	-50	50	Profundidad del suelo*	Suelo
Surlag	0	10	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	Precipitación
FFBC	0	1	Almacenamiento inicial en la zona no saturada	Precipitación

*Cambio porcentual relativo

Como resultado de la evaluación se identificaron que para el método de número de curva los valores más sensibles fueron: el factor de flujo base Alpha (Alpha_Bf), el número de curva (Cn2) y el coeficiente de retraso de la escorrentía superficial (SURLAG). En el caso del ranking de sensibilidad para el método de Green & Ampt, los valores más sensibles fueron los días de retraso de aguas subterráneas (GW_Delay), el coeficiente de Manning del Canal (Cn_N2) y la conductividad hidráulica del canal principal. En la [Tabla 5.2](#) se muestran los rankings de los parámetros para cada método de simulación de flujo superficial.

Tabla 5. 2 Ranking de los parámetros del flujo del modelo

MÉTODO	RANKING							
	1	2	3	4	5	6	7	8
CSC	ALPHA_BF	Cn2	SURLAG	SOL_AWC	SOL_Z	ESCO	GWQMN	Sol_AWC
Geen & Ampt	GW_DELAY	Ch_N2	Ch_K2	SOL_Z	ESCO	ALPHA_Bf	EPCO	SLOPE

5.3.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO

El proceso de calibración dentro del modelo puede hacerse de manera automática o manualmente. En la calibración automática, el modelo toma el ranking de los valores más sensibles del análisis de sensibilidad y los gradúa automáticamente en cada subcuenca y HRU respecto a un registro de gasto observado. Esta proceso sólo puede hacerse solo si los gastos observados pertenecen a los gastos de la desembocadura en la cuenca.

En caso de no contar con los registros de gasto en la desembocadura, como es en el caso de estudio, se debe hacer la calibración del modelo de forma manual. Este proceso de calibración se lleva a cabo a través de la “prueba y error”, modificando los parámetros en la subcuenca que tiene un gasto observado y comprobándolo con los gastos de salida del modelo en este punto. Para calibrar el modelo hidrológico en la cuenca del Río Tonalá, se seleccionaron 11 parámetros de calibración para los dos diferentes métodos de escurrimiento ([Tabla 5.3](#)). En la [Figura 5.7](#) se muestra la subcuenca de calibración del modelo. La selección de esta región de calibración se debe a que esta subcuenca cuenta con registros hidrométricos históricos provenientes de la estación San José del Carmen.

CAPITULO 5. MODELADO HIDROLÓGICO DE AVENIDAS DE DISEÑO

Tabla 5. 3 Parámetros de calibración del modelo

Nombre	Unidades	valor Default SWAT
Alpha_Bf	días	0.048
Ch_K2	mm/h	0
Ch_N2	n/a	-
Cn2	n/a	0-100
Epc0	%	0.95
Esco	%	0.95
Gw_Delay	días	31
Sol_Awc	mm/h	0.09-0.19
Sol_Z	metros	-
Surlag	n/a	4
FFCB	%	0

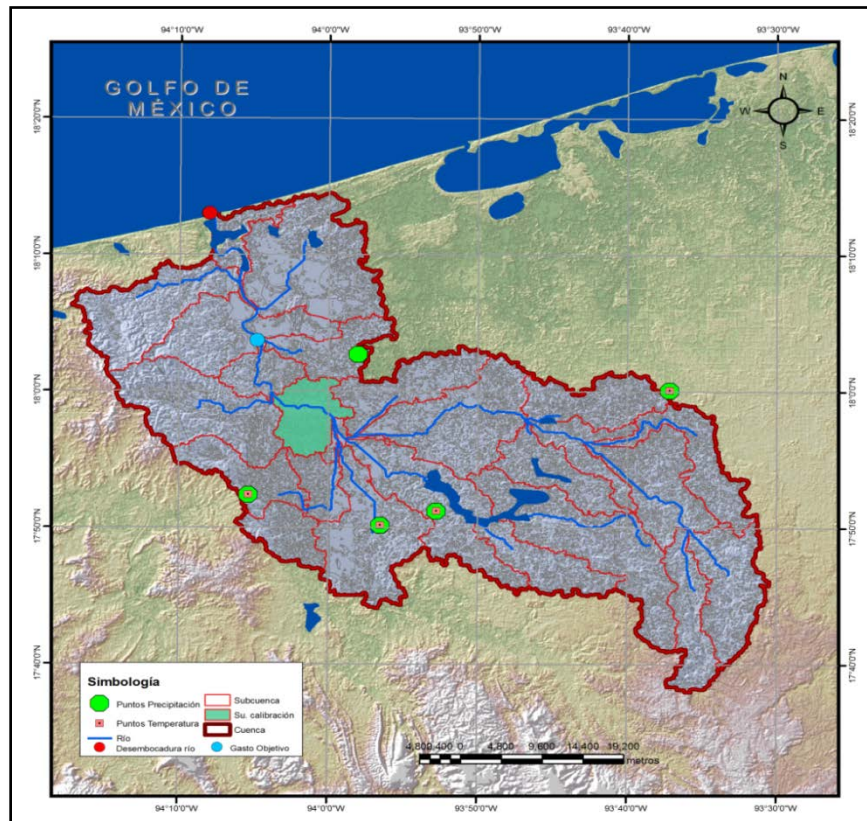


Figura 5. 7 Ubicación de la subcuenca de calibración

Tomando como base los datos hidrométricos, el modelo es calibrado para un registro de lluvias de seis meses por medio de la metodología de escurrimiento superficial de Green & Ampt. El periodo modelado va desde el 1 de Julio al 31 de diciembre de 1999. En la Figura 5.8 se ilustran los hidrogramas observados y simulados por el modelo y el registro de lluvias en ese periodo. En esta calibración se pudo obtener un coeficiente de correlación de datos de 90.43%

y un error medio cuadrático de $58.15\text{m}^3/\text{s}$. La [Figura 5.9](#) muestra la correlación entre los gastos observados y modelados para esta etapa

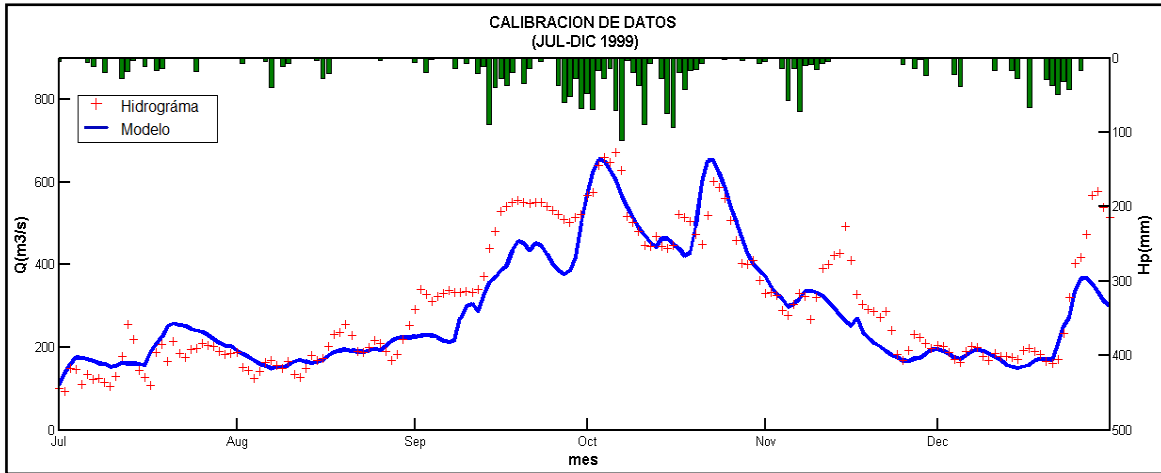


Figura 5. 8 Hidrogramas observados y modelados en la etapa de calibración del modelo

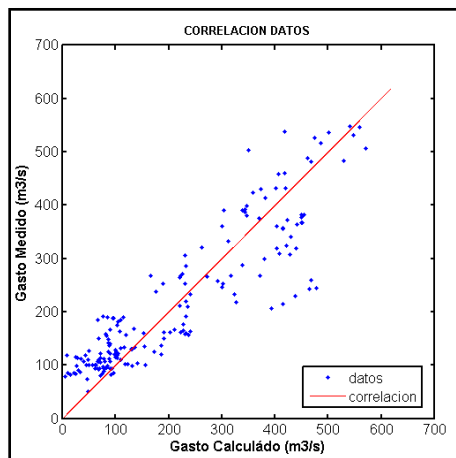


Figura 5. 9 Correlación entre los gastos medidos y calculados en la fase de calibración del modelo

5.3.3 VALIDACIÓN

Una vez que haya ajustado a una serie temporal observada, el siguiente paso consiste en verificar que el ajuste de los parámetros seleccionados sea capaz de reproducir otro evento o serie temporal dentro de la cuenca. Para este propósito, se utilizan los gastos registrados durante seis meses en la época de avenidas. El registro inicia el 1 de julio y termina el 31 de diciembre del año 2000. En la [Figura 5.10](#) se muestra los hidrogramas observados y simulados por el modelo y el registro de lluvias en ese periodo para la etapa de validación del modelo.

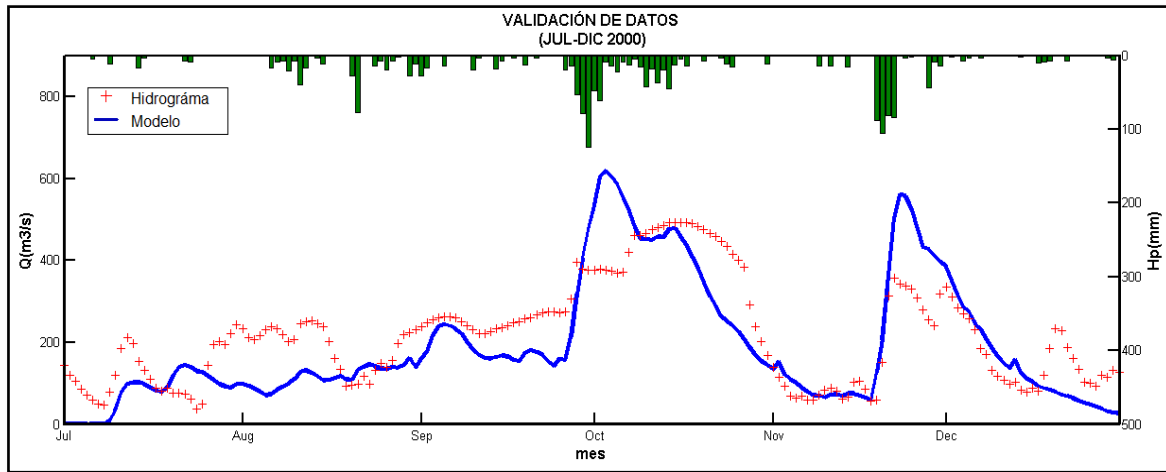


Figura 5. 10 Hidrogramas observados y modelados en la etapa de validación del modelo

A partir de la comparación entre los datos observados y modelados para este evento, se registra un valor de correlación de 79.48% y un error medio cuadrático de 91.53m³/s. Ambos valores dan una certeza razonable de que los parámetros seleccionados en el proceso de calibración, representan de forma aceptable tanto las condiciones de flujo como la relación lluvia escurrimiento al interior de la cuenca. En la Figura 5.11 se muestra la correlación de datos medidos y calculados para la etapa de calibración del modelo.

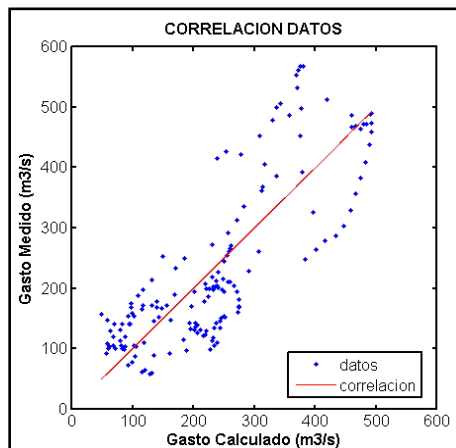


Figura 5. 11 Correlación entre los gastos medidos y calculados en la fase de validación del modelo

5.3.4 SIMULACIÓN DE LAS AVENIDAS DE DISEÑO

Una vez calibrado y validado la configuración de los parámetros en el modelo hidrológico, la última etapa del modelado consiste en la predicción de avenidas de diseño para los hietogramas calculados en el capítulo 4 de esta tesis, los cuales representan avenidas asociadas a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años.

En virtud de que los hidrogramas de diseño serán utilizados para simular los flujos de inundación en la cuenca baja del río Tonalá, es necesario definir el gasto en un punto objetivo dentro de la cuenca. Este punto está indicado por el círculo azul en la [Figura 5.7](#). La [Figura 5.12](#) presenta los hidrogramas de diseño obtenidos a partir del modelo hidrológico en el punto objetivo seleccionado para los periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. De acuerdo a estos resultados se aprecia que el gasto pico para un periodo de retorno de 50 años es de 1046 m³/s, mientras que este valor se incrementa a 1078 m³/s para un Tr de 100 años de, y a 1462 m³/s y 1600 m³/s para los Tr de 500 años y 1000 años respectivamente.. En todos los casos, el tiempo aproximado de drenaje de la avenida es de treinta días.

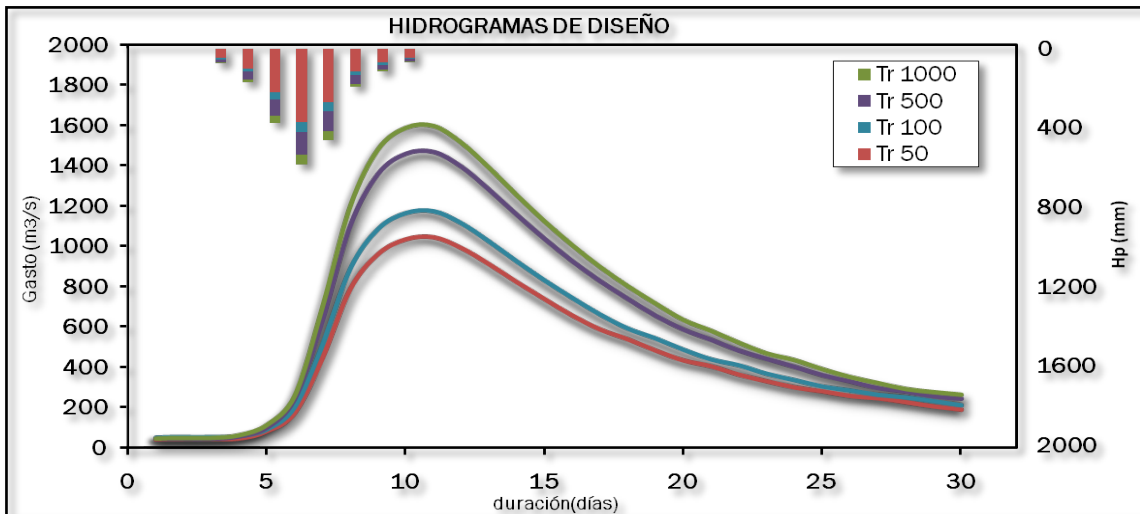


Figura 5. 12 Hidrogramas de avenidas asociadas a periodos de retorno de 50, 100,500 y 1000 años

5.4 CONCLUSIONES DEL MODELADO HIDROLÓGICO DE AVENIDAS DE DISEÑO

Con el propósito de determinar los hidrogramas de diseño asociados a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años, este capítulo presentó la utilización del modelo hidrológico de parámetros semidistribuidos conocido como SWAT. Para ello, se realizó la calibración y validación del mismo a través del empleo de registros históricos medidos de precipitación y temperatura. A partir de los resultados obtenidos se rescatan las siguientes conclusiones:

El modelo hidrológico utilizado representa un buen compromiso entre complejidad y requerimiento de datos, el cual permite la simulación de un amplio rango de escenarios en diversas escalas de cuenca. Su utilización en formato GIS, facilita el ingreso y procesamiento de datos espaciales haciéndolo más flexible a los bancos de datos locales disponibles.

El análisis de sensibilidad representó una herramienta útil para la limitación de parámetros en el proceso de calibración del modelo. De un total de 26 parámetros para caracterizar el flujo, este análisis permitió limitar el número a 12 parámetros que fueron variados manualmente para calibrar el modelo.

CAPITULO 5. MODELADO HIDROLÓGICO DE AVENIDAS DE DISEÑO

Para la simulación de escurrimiento superficial en la cuenca del Río Tonalá, el método de infiltración Green & Ampt obtuvo una buena correlación en la etapa de calibración, entre los gastos calculados y los observados en la cuenca.

De esta forma, fue posible generar los hidrogramas de diseño a partir de hietogramas sintéticos asociados a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. Mostrando que ante lluvias extremas consecutivas (ocho días lluvia), los gastos máximos de lluvia en el Río Tonalá se encuentran entre los 1000 y los 1600 m³/s. Por otro lado se determinó que el tiempo de drenaje de la cuenca bajo estas intensidades, es aproximadamente de un mes.

CAPÍTULO 6.

MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

6.1 INTRODUCCIÓN

En virtud del avance tecnológico de los últimos años, el desarrollo y utilización de herramientas numéricas para la predicción de las inundaciones han sido actividades que se han vuelto cada vez más frecuentes. La aplicación de modelos para la evaluación de la amenaza de inundación es considerada como una herramienta de gestión muy útil para la toma de decisiones ([Alkema, 2007](#)). Dada la diversidad de modelos existentes y la gran cantidad de parámetros que resuelven, la selección de un modelo hidrodinámico para la evaluación de la amenaza debe estar estrechamente ligado a la complejidad del problema a estudiar.

Bajo un enfoque simple, en el cual, el problema puede ser abordado solamente con el conocimiento de la superficie libre del agua, puede representarse perfectamente con la utilización de un modelo hidrodinámico en una dimensión. Sin embargo, si el propósito del estudio es determinar no solo el comportamiento de la superficie libre, sino también su variación espacial, es necesario la utilización de modelos más sofisticados que resuelvan el flujo en diversas dimensiones, como son los modelos de 2, quasi 3 y 3 dimensiones.

Por otro lado, el incremento en la disponibilidad de datos de percepción remota en alta resolución, favorecen el uso de modelado en 2D para el estudio de flujos de inundación en planicies y llanuras de inundación ([Horrit y Bates, 2001](#)). Sin embargo, es necesario hacer notar que la fiabilidad de los resultados de este tipo de aproximaciones está restringida por la

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

calidad de los datos de entrada y los datos utilizados para la discretización de la zona de estudio. En esta tesis, se utiliza el modelo hidrodinámico bidimensional MIKE 21-FM desarrollado por el DHI (Danish Hydraulic Institute). Este modelo resuelve las ecuaciones de aguas someras utilizando un mallado de tipo flexible y puede ser utilizado para ambientes riverinos, costeros y estuarinos. La utilización de este modelo se debe a la aplicación exitosa por parte del Instituto de Ingeniería en la modelación de varios ríos en el país entre los que se encuentran el río González (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2011a) y Tonalá (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2011b; Rodríguez-Rincón *et al.*, 2012) en el Estado de Tabasco y el Río Panuco en los Estados de Veracruz y Tamaulipas (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2012).

Es necesario hacer notar que de acuerdo con Pedrozo-Acuña (2012), todos los modelos hidrodinámicos existentes están sujetos a incertidumbres asociadas a los datos de entrada, la variabilidad de cada evento, los errores de los datos geográficos y la falta de datos para la calibración del modelo. En consecuencia, es posible que en algunos casos, los resultados generados a través de este tipo de herramientas contengan una gran cantidad de incertidumbre (Ratto *et al.* 2001; Rauch *et al.*, 2002; Pappenberger y Beven, 2006).

En este sentido, con el propósito de reducir la incertidumbre de los resultados asociados a este trabajo, se utiliza una metodología integral para el proceso de puesta a punto del modelo numérico. Esta consiste en la combinación de datos de percepción remota de alta resolución (ej. Modelos Digitales de Elevación e imágenes satelitales) y con datos de campo recientes. Lo anterior permitirá construir una mejor idealización de la zona de estudio (ej. datos batimétricos del cauce, niveles de agua y velocidades).

6.2 METODOLOGÍA

6.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo hidrodinámico Mike 21 es un sistema bidimensional basado en la solución numérica de las ecuaciones promediadas de Reynolds (Reynolds averaged Navier-Stokes equations) en dos dimensiones e incompresible, implicando suposiciones de Boussinesq y de presión hidrostática (DHI, 2011). Debido a esto el modelo lo componen las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, temperatura, salinidad, y densidad. Estas ecuaciones se encuentran discretizadas espacialmente utilizando el método de volumen finito de celda centrada.

6.2.1 Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones de gobierno utilizadas por el MIKE 21 son las ecuaciones de aguas someras (2D-Shallow Water equations). Estas ecuaciones pueden ser descritas de la siguiente manera:

Integrando las ecuaciones de momento horizontal y de continuidad vertical en la profundidad $h = \eta + d$ se obtienen las ecuaciones bidimensionales de aguas someras. Estas ecuaciones describen el flujo y las variaciones del nivel del agua a través de un sistema de ecuaciones que componen la ecuación de continuidad de masa (6.1) y las ecuaciones de cantidad de movimiento en la horizontal (6.2) y vertical (6.3).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ &\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} &= -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ &\frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ &\frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (6.3)$$

Donde t es el tiempo (s); x, y son las coordenadas cartesianas (m); η es la elevación de la superficie (m); h es la profundidad total (m); u y v son los componentes de velocidad en la dirección x, y ; F es el parámetro de coriolis (s^{-1}); g es la aceleración debido a la gravedad (m/s^2), p_a es la presión atmosférica ($kg/m/s^2$); ρ_0 es la densidad del agua (kg/m^3) y S es la magnitud de la descarga. Las velocidades promediadas en la vertical están determinadas por:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz, \quad (6.3-6.4)$$

El esfuerzo constante T_{ij} incluye la fricción por esfuerzos viscosos, la fricción turbulenta y la advección diferencial. Estas son estimadas a través de una formulación basada en la viscosidad de remolino (eddy viscosity) sobre los gradientes de velocidad de profundidad media.

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \quad T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \quad T_{yy} = 2A \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \quad (6.5-6.7)$$

6.2.1.2 Resolución numérica e integración en el tiempo

La discretización espacial de las ecuaciones está basada en el método de volumen finito. En el modelado bidimensional, los elementos pueden ser polígonos de forma arbitraria. Para este caso sólo se consideraron elementos triangulares.

Considerando la forma general de las ecuaciones

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G(U) \quad (6.8)$$

La integración el tiempo puede realizarse por medio dos métodos, uno de orden inferior y otro utilizando un método de orden superior. El método de orden inferior corresponde al método explícito de Euler de primer orden. Este se encuentra determinado por

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_n) \quad (6.9)$$

Donde Δt es el intervalo de paso de tiempo. El método de orden superior corresponde al Runge Kutta de segundo orden definido de la forma:

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G(U_n) \quad (6.10)$$

$$U_{n+\frac{1}{2}} = U_n + \frac{1}{2} \Delta t G(U_n) \quad (6.11)$$

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t G \left(U_{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (6.12)$$

6.2.1.3 Condiciones de mojado y secado de las celdas

Las condiciones de mojado y secado en las celdas se encuentran basados en los enfoques de [Zhao et al, \(1994\)](#) y [Sleigh et al. \(1998\)](#) para la predicción de las condiciones de mojado y secado de las celdas. Según estas propuestas, las celdas de modelación dentro de un enmallado numérico pueden ser de tres tipos: mojada, seca, y parcialmente seca, de acuerdo con dos tolerancias de profundidad de agua definida por el usuario.

Una celda es considerada mojada si se cumplen con los siguientes parámetros: primero, si la profundidad de agua a un lado de la cara debe ser menor que la profundidad de tolerancia h_{dry} y la profundidad de agua en el otro lado de la cara debe ser mayor a la profundidad de tolerancia, h_{flood} . Segundo, la suma de la profundidad es menor que h_{dry} y la elevación de la superficie en el otro lado debe ser mayor a cero.

Una celda es considerada seca si la profundidad de agua es menor que a profundidad de tolerancia, h_{dry} y ninguna de las caras de la celda son fronteras mojadas o inundadas. En este caso el elemento es eliminado de los cálculos.

6.1.2 PROCESAMIENTO Y PUESTA A PUNTO DEL MODELO

De acuerdo con el marco metodológico propuesto por Musall et al. (2011), la aplicación de un modelo hidrodinámico está compuesta por tres fases principales: El pre-proceso, el proceso y el post-proceso (Figura 6.1). La fase de pre-proceso comprende la definición del problema, la obtención y análisis de los datos de entrada del modelo y características del flujo. La fase de proceso del modelo es en donde, a partir de los datos de entrada, los flujos son simulados en todo el dominio. Finalmente, la fase de post-proceso es la etapa de revisión y evaluación de los resultados. A continuación se describen los componentes utilizados en la zona de estudio en cada una de las etapas.

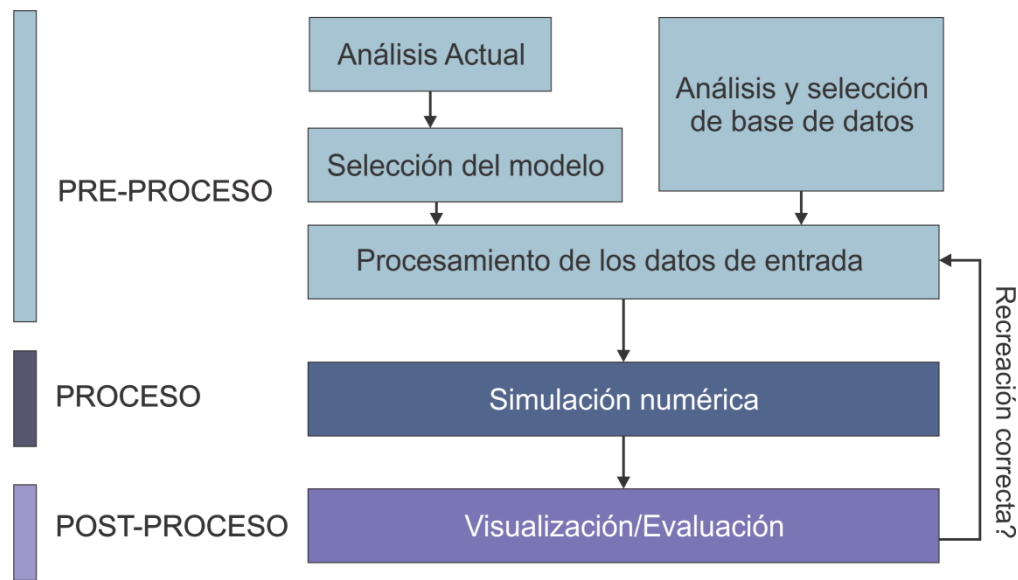


Figura 6. 1 Esquema del procedimiento de modelado hidrodinámico (Musall et al., 2011)

La etapa de pre-proceso, se compone por la delimitación del área a modelar, la colección y preparación de los datos topo-batimétricos, la definición de la malla y la caracterización de los coeficientes de rugosidad en toda la cuenca baja del Río Tonalá. En el caso de estudio se tiene lo siguiente:

- **Datos topo-batimétricos:** La preparación de los datos topo-batimétricos contó con la evaluación en la sensibilidad del modelo ante el ingreso de diferentes resoluciones del DEM (10m, 20m y 50m). Esta evaluación es realizada bajo condiciones constantes de flujo definición del cauce y tamaño de celda con el propósito de determinar la variabilidad de la mancha de inundación con respecto del tipo de información topográfica suministrada. El proceso de obtención y preparación de los datos topográficos y batimétricos fue descrita en el capítulo 2 correspondiente al área de estudio y datos disponibles.
- **Malla numérica:** La malla de modelación fue construida a través de 16 subdominios, cada uno con diferente resolución (la resolución máxima es dada al cauce y la mínima en función de la mancha de inundación). Dentro del análisis de sensibilidad del modelo y con el fin de evaluar la injerencia de malla en la predicción de la mancha de inundación, fueron construidos 4 tipos de enmallado, cada uno con diferentes combinaciones de resolución en la planicie inundable (Figura 6.2). Esta evaluación permite identificar el nivel óptimo de

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

resolución en la malla, en la medida busque la mejor relación entre tamaño de celda, tiempo computacional del modelo y solución adecuada de las variables de interés.

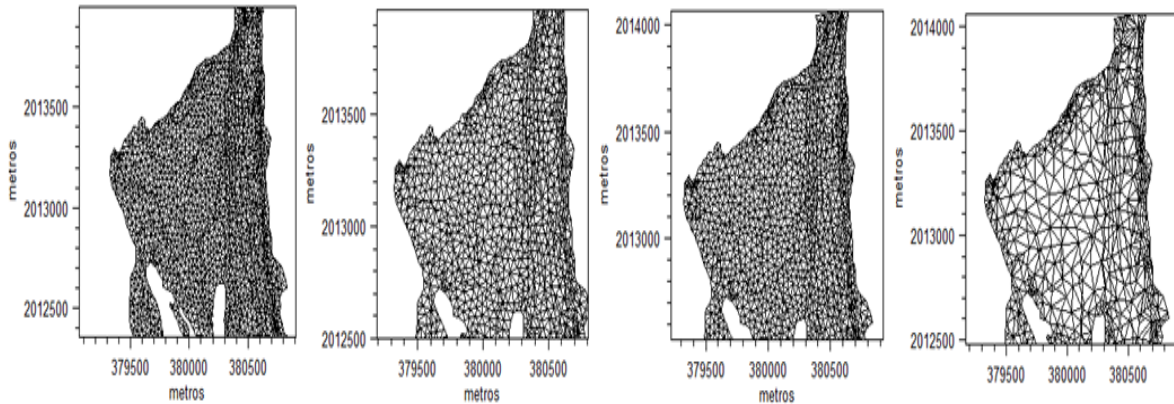


Figura 6. 2 Tipos de enmallado utilizados en el modelo

- **Rugosidad:** Para la definición de la rugosidad en la llanura de inundación, se utilizó el método propuesto por [Mason et al. \(2003\)](#) quienes a través de la combinación de imágenes satelitales, la identificación de zonas de vegetación y el valor de elevación dentro del DEM definen la rugosidad de un punto en el espacio. El valor de rugosidad se define en cada punto por medio del coeficiente de fricción de Manning. En la [Figura 6.3](#) se muestra la variación espacial de la rugosidad en la cuenca conforme al coeficiente de Manning utilizado.

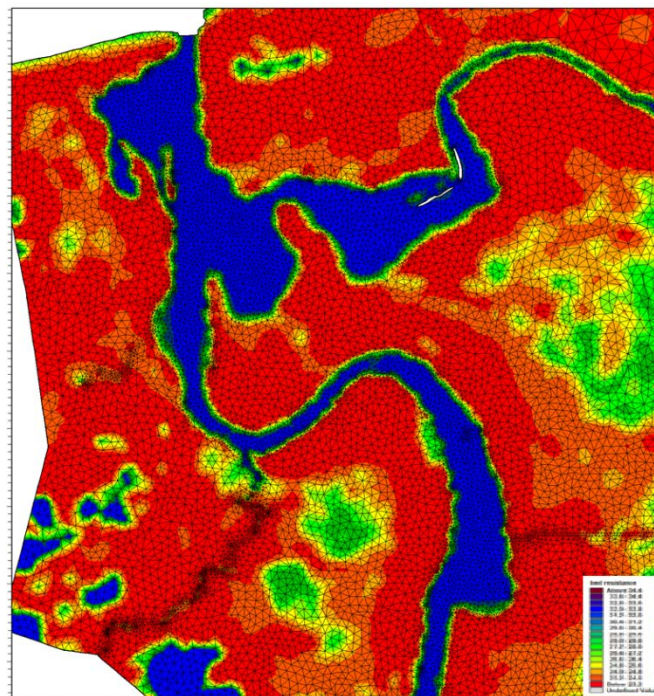


Figura 6. 3 Variación de la rugosidad en la cuenca en función al coeficiente de Manning (Ej. Valores bajos = alta resistencia)

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

Con la puesta en orden los datos de entrada, se da inicio a la etapa de procesamiento que considera la simulación numérica con la discretización seleccionada. Para la simulación de las condiciones extremas de diseño (ej. periodos de retorno), es necesario especificar los forzamientos en cada uno de las fronteras especificadas al modelo. Este paso es conocido como la definición de las condiciones de frontera o contorno.

El dominio numérico a utilizar se presenta en la [Figura 6.4](#), donde las tres condiciones de frontera están indicadas con los círculos de colores, la primera de ellas indica la entrada del flujo debida al río Tonalá (en azul), otra a la entrada del río Agua dulcita (rojo) y una condición de salida en la desembocadura del río (verde). La línea amarilla de la figura, corresponde a las fronteras cerrada del modelo. A continuación se describe la información utilizada para la definición de cada una de estas condiciones de frontera.

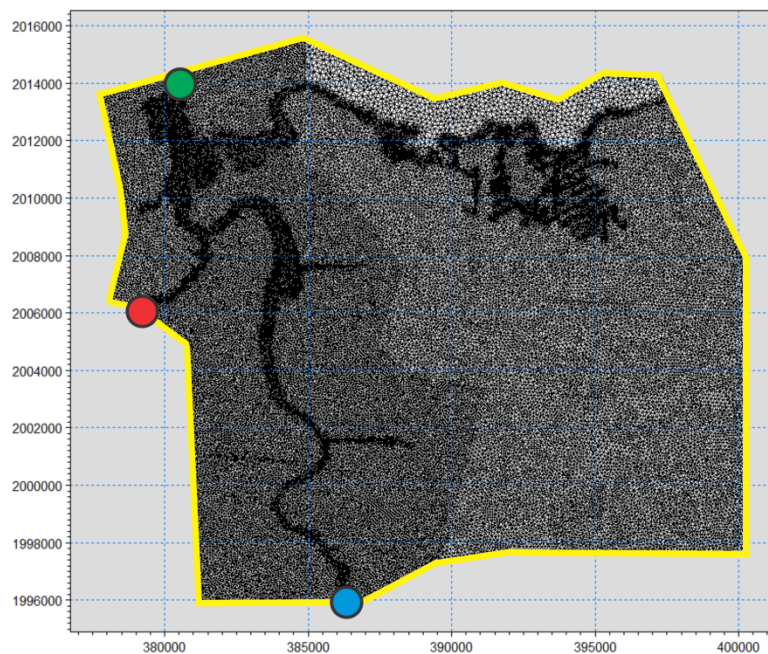


Figura 6. 4 Condiciones de frontera

a) Gastos de avenida en el Río Tonalá asociados a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años (Azul): Tal como se ha definido en capítulos anteriores la definición del gasto de avenida es producto del análisis extremal de la lluvia y el modelado hidrológico para obtener los hidrogramas de avenidas de diseño asociados a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años. Estos hidrogramas tienen una duración de 32 días. En el [capítulo 4](#) del documento se presenta los gastos de avenidas para cada uno de periodos de retorno modelados.

b) Gasto en el río tributario Agua Dulcita (rojo): Conforme a los valores de velocidad colectados en la campaña de campo, se observó que el gasto aportado por el río Agua Dulcita es muy reducido, debido a esto, en el modelo se introdujo un forzamiento constante de flujo de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ en la entrada del río para que pueda ser transitado por el modelo en todas las ejecuciones.

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

c) Desembocadura del Río Tonalá (verde): Dado que en el modelo no se consideró la influencia del nivel del mar en el río, la frontera en la desembocadura del río fue definida como una frontera abierta de descarga del flujo hacia el mar.

El tiempo de duración de cada una de las modelación depende directamente de los números de días a modelar, el área de modelado y la resolución de la malla de cálculo. Para cada una de las simulaciones realizadas en la cuenca baja del Río Tonalá, el tiempo de modelaje fue de aproximadamente de tres días en la versión multiproceso del modelo (MPI).

Una vez definido el dominio numérico y las condiciones de forzamiento, es posible simular los hidrogramas de diseño calculados en el capítulo 4, para así definir los mapas de amenaza en la cuenca baja del río Tonalá.

6.2.3 ANÁLISIS DE LA AMENAZA

El análisis de la amenaza por inundación, requiere la identificación de los niveles de peligrosidad asociados a la profundidad máxima alcanzada y la velocidad de desplazamiento del evento. Siguiendo los lineamientos del Departamento del Medio Ambiente del Reino Unido, (DEFRA, 2005), es posible definir el nivel de amenaza ante una inundación a través de la siguiente expresión:

$$HR = d(v + n) + DF \quad (6.13)$$

Donde, HR = El nivel de amenaza por inundación.

d = Profundidad del agua (m).

v = Velocidad de desplazamiento del flujo.

DF = Factor de escombros (0, 0.5, 1 dependiendo de la probabilidad que los escombros intervengan en la amenaza).

n = Una constante de 0.5.

Los rangos de intensidad de la amenaza se dividen en 5 categorías, muy bajo, bajo, moderado, significativo y extremo. En la [Tabla 6.1](#) se muestra la descripción de las categorías de intensidad asociadas a los niveles de amenaza.

Tabla 6. 1 Rangos de amenaza ante inundación

Grado de Amenaza	Rango de RH	Descripción
Muy bajo	<0.5	Zona de inundación en aguas poco profundas con aguas estancadas
Bajo	0.51-0.75	Zona de inundación en aguas poco profundas con velocidades bajas
Moderado	0.75-1.25	Zonas de inundación de profundidad media que pueden presentar velocidades considerables
Significante	1.25-2.0	Peligrosidad Alta: Zonas de profundidad alta que pueden moverse rápidamente ocasionando un nivel de daño alto
Extremo	>2.0	Peligrosidad extrema: Zonas de inundación de profundidad alta y/o velocidad rápida que ocasiona daños extremos

CAÍTULO 6.MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

Por otro lado, [Surendran et al. \(2008\)](#) proponen un método alternativo en el que se establecen los límites de amenaza en función de las variables que la definen, es decir la profundidad de inundación y su velocidad promedio. En la [Tabla 6.2](#) se presentan los límites de profundidad y rangos de intensidad bajo diferentes velocidades de flujo, sin considerar flujo con escombros, es decir con DF =0.

Tabla 6. 2 Clasificación de los parámetros de amenaza ante diferentes velocidades de flujo

Velocidad (m/s)	PROFUNDIDAD DE INUNDACIÓN (m)													
	0	0.05	0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.5	2	2.5
0	0.52	0.53	0.55	0.60	0.63	1.15	1.20	1.25	1.30	1.40	1.50	1.75	2.00	2.25
0.1	0.52	0.53	0.56	0.62	0.65	1.18	1.24	1.30	1.36	1.48	1.60	1.90	2.20	2.55
0.3	0.53	0.54	0.58	0.65	0.69	1.23	1.30	1.38	1.45	1.60	1.75	2.13	2.50	2.88
0.5	0.54	0.55	0.60	0.70	0.75	1.30	1.40	1.50	1.60	1.80	2.00	2.50	3.00	3.50
1	0.58	0.58	0.65	0.80	0.88	1.45	1.60	1.75	1.90	2.20	2.50	3.25	4.00	4.75
1.5	0.59	0.60	0.70	0.90	1.00	1.60	1.80	2.00	2.20	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00
2	0.62	0.63	0.75	1.00	1.13	1.75	2.00	2.25	2.50	3.00	3.50	4.75	6.00	7.25
2.5	0.64	0.65	0.80	1.10	1.25	1.90	2.20	2.50	2.80	3.40	4.00	5.50	7.00	8.50
3	0.67	0.68	0.85	1.20	1.38	2.05	2.40	2.75	3.10	3.80	4.50	6.25	8.00	9.75
3.5	0.69	0.70	0.90	1.30	1.50	2.20	2.60	3.00	3.40	4.20	5.00	7.00	9.00	11.00
4	0.72	0.73	0.95	1.40	1.63	2.35	2.80	3.25	3.70	4.60	5.50	7.75	10.00	12.25
4.5	0.74	0.75	1.00	1.50	1.75	2.50	3.00	3.50	4.00	5.00	6.00	8.50	11.00	13.50
5	0.77	0.78	1.10	1.60	1.88	2.65	3.20	3.75	4.30	5.40	6.50	9.25	12.00	14.75

FUENTE:([Surendran et al., 2008](#)).

6.3 RESULTADOS

6.3.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA MALLA

Antes de generar los resultados de amenaza, se decidió llevar a cabo un análisis de sensibilidad de la malla, este comprende una evaluación de dos parámetros que intervienen directamente en el resultado de la modelación numérica, el área de cálculo y la definición de la planicie inundable ([Pedrozo-Acuña et al. 2011b](#)). El número de celdas de un dominio indica la cantidad de operaciones a realizar por cada paso de tiempo, y el tamaño de la celda indica la precisión del cálculo. El procedimiento para determinar el patrón de enmallado que optimice los procesos de tiempo computacional y área inundada, consiste en evaluar, a partir de un enmallado de alta resolución, el tipo de malla que no altere el comportamiento del flujo. Como resultado de la evaluación se eligió un patrón de enmallado con una resolución máxima de 400 m² y una mínima de 1600 m². La distribución geográfica del valor del enmallado se definió en función del ingreso o no del gasto del río.

Una vez obtenida la malla de cálculo, el paso siguiente es evaluar la definición del terreno. Este parámetro es fijado por el tipo de DEM utilizado. Tal y como se describió con anterioridad, los DEM utilizados se generaron a partir de una nube de puntos LiDAR con diferentes

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

resoluciones horizontales, correspondientes a los 10, 20 y 50 metros (Figura 6.5). Estos DEM's son definidos como los mapas interpolados de datos de elevación sobre la malla que el modelo utiliza para la modelación numérica.

Una vez obtenidas las diferentes mallas con los tres DEMs a evaluar, cada una de ellas fue utilizada para simular diferentes gastos asociados a condiciones de flujo permanente a fin de determinar la diferencia en el área inundada. En la Tabla 6.3 se presentan los gastos utilizados para este ejercicio numérico.

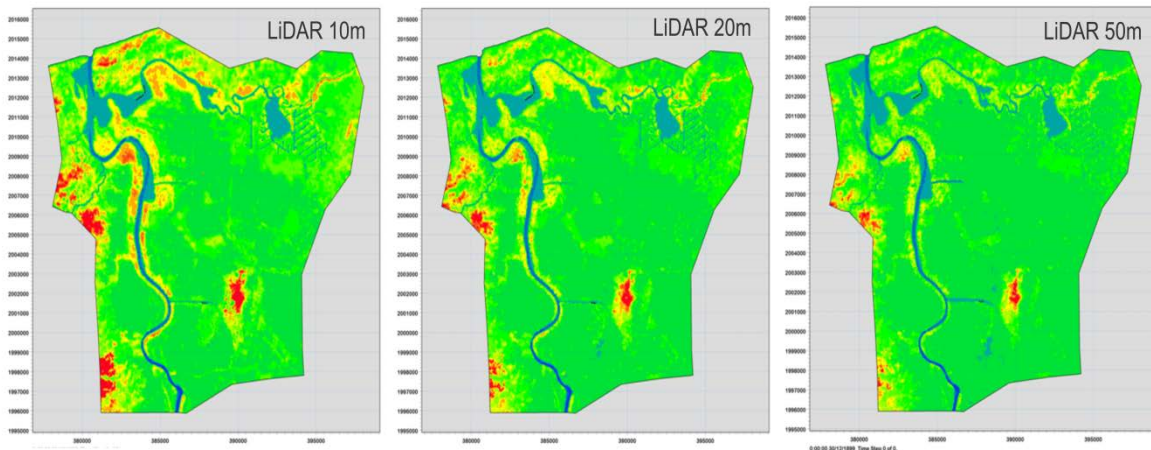


Figura 6. 5 Tipos de MESH utilizados para el análisis de sensibilidad

Tabla 6. 3 Gastos seleccionados en la evaluación de definición del terreno

Descargas (m ³ /s)	LiDAR		
	10m	20m	50m
700	X	X	X
900	X	X	X
1100	X	X	X
1300	X	X	X

La Figura 6.6 se presenta un resumen de los resultados obtenidos, donde se muestra la relación entre área total inundada y la resolución del DEM empleada. Los resultados indican una alta sensibilidad de la zona de inundación identificada en el modelo con la resolución espacial de la información topográfica, El comportamiento de la mancha de inundación indica una disminución del área afectada en relación con la resolución de la información. En función de estos resultados, se definió una resolución espacial de 20m para la simulación numérica de los flujos en la cuenca baja del río Tonalá.

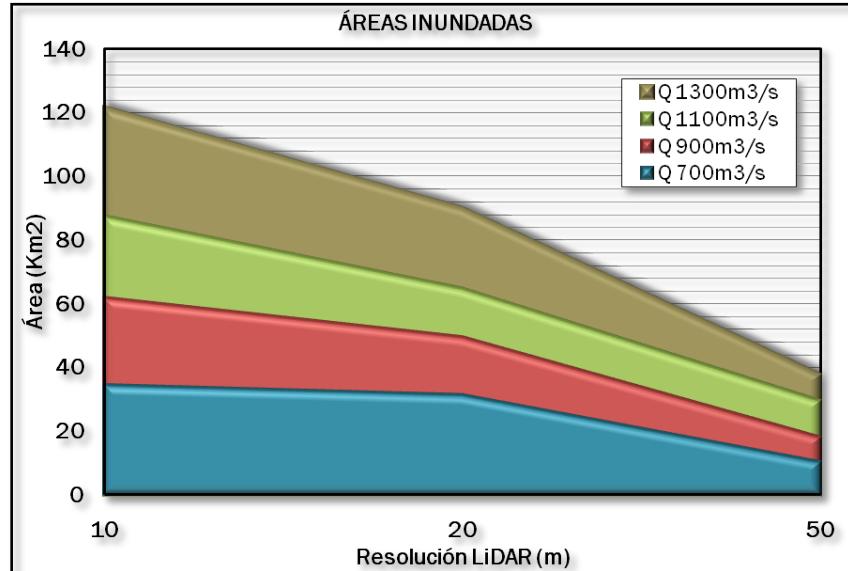


Figura 6. 6. Áreas inundadas en relación con el tipo de definición del terreno

6.3.2 ESCENARIOS DE INUNDACIÓN ASOCIADOS A AVENIDAS EXTREMAS DE $Tr= 50$, 100, 500 Y 1000 AÑOS

En esta sección se muestran los resultados de las simulaciones numéricas realizadas en la cuenca baja del Río Tonalá considerando las avenidas extremas correspondientes a 50, 100, 500 y 1000 años periodo de retorno. Para todos los escenarios se consideraron 27 días de duración concernientes a los gastos de diseño producto del modelo hidrológico. Tomando como base las fechas de la inundación del 2009, iniciando el hidrograma el 25 de octubre del 2009 y terminando el 20 de noviembre del mismo año. Los mapas de amenaza así construidos, se presentan en función del valor de profundidad total de la columna de agua sobre la planicie de inundación.

En las Figuras 6.7 a 6.10, se muestran las condiciones del sistema durante los escenarios de avenidas extremas correspondientes a 50, 100, 500, y 1000 años periodo de retorno. Estas figuras están compuestas por cuatro momentos de la inundación que permiten dar seguimiento al comportamiento hidráulico del río y su llanura. En el panel superior izquierdo se muestra el mapa de inundación a los ocho días de modelación, momentos posteriores al desbordamiento del río. El panel superior derecho muestra el comportamiento del sistema transcurridos 10 días de modelación. El panel inferior izquierdo, muestra el avance máximo de inundación en la cuenca, presentado alrededor de los 15 días de modelación. Finalmente, en el panel inferior derecho se observa la mancha de inundación drenada al término de los 27 días de modelación.

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

ESCENARIO DE INUNDACIÓN TR 50 AÑOS

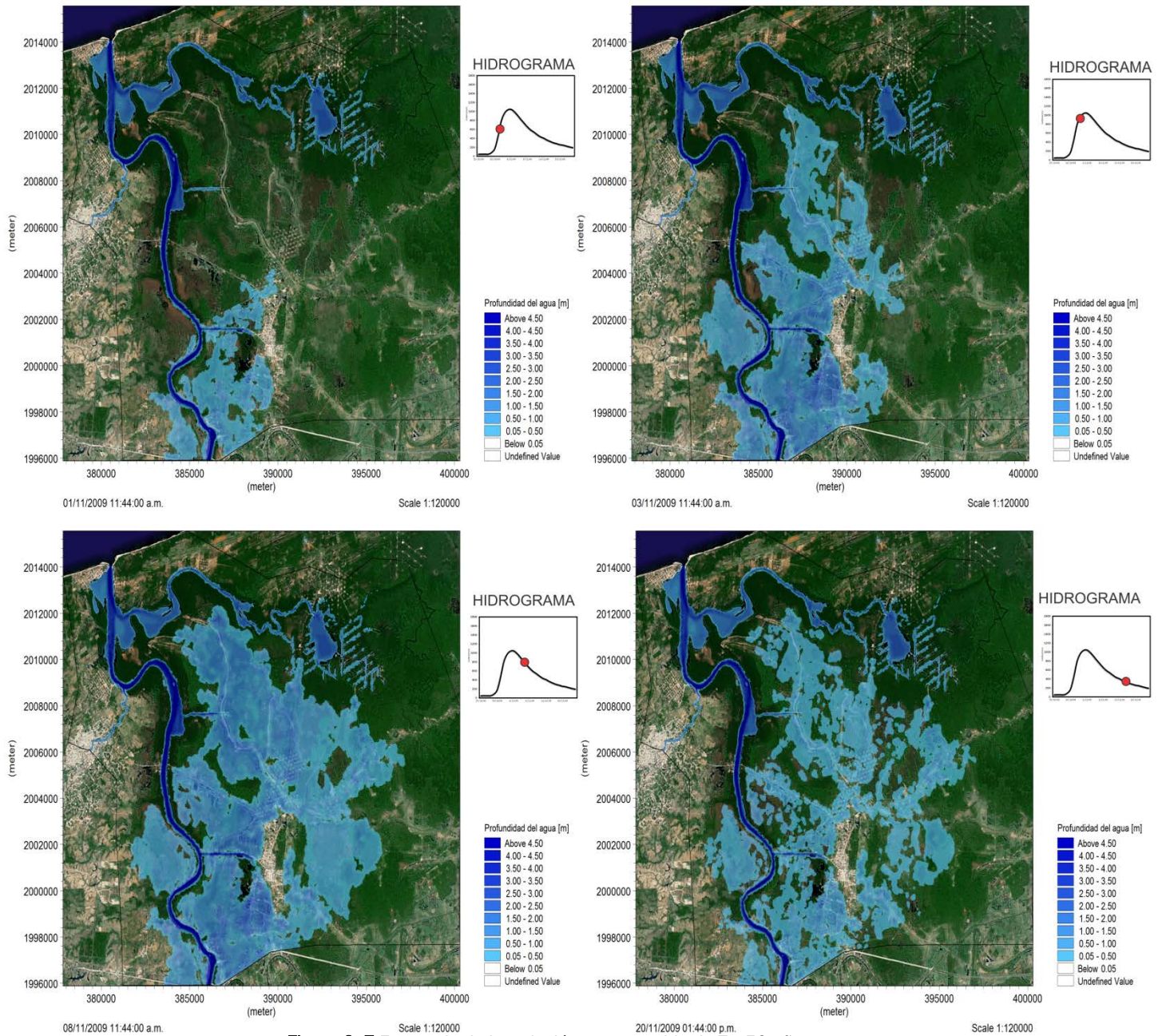


Figura 6. 7 Escenario de inundación ante avenida de $Tr=50$ años

Estos resultados indican la alta fragilidad de la cuenca baja del Río Tonalá ante eventos extremos. En el caso de la avenida de $Tr= 50$ años (Figura 6.7), el comportamiento hidráulico del río desborda una gran cantidad de agua sobre la llanura, inundando la mayor parte de las zonas bajas de la cuenca. Las profundidades máximas alcanzadas bajo esta condición se encuentran entre los 2.5 y los 3 metros, siendo las regiones más afectadas, los ejidos cercanos al municipio de la Venta y la infraestructura petrolera de la zona este de la cuenca. En cuanto a su capacidad de drenaje, el río empieza a reducir los niveles de inundación a partir del día 17 (10 nov.). Hacia el final de la modelación, se presenta un drenaje de la zona

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

afectada con regiones aún inundadas. Entre las que se destacan los pozos petroleros de La Venta y parte de la carretera intermunicipal La Venta–Benito Juárez.

Por otro lado la [Figura 6.8](#) presenta los resultados del mapa de amenaza bajo una condición de flujo asociada a un $Tr=100$ años. En este caso, con un gasto pico de aproximadamente $1200 \text{ m}^3/\text{s}$, se registra una mayor extensión en la mancha inundación. Las profundidades máximas se encuentran entre los 2.5 y los 3 metros. Los sistemas más afectados en este escenario son los sistemas viales urbanos y rurales y zonas de producción petrolera.

ESCENARIO DE INUNDACIÓN TR 100 AÑOS

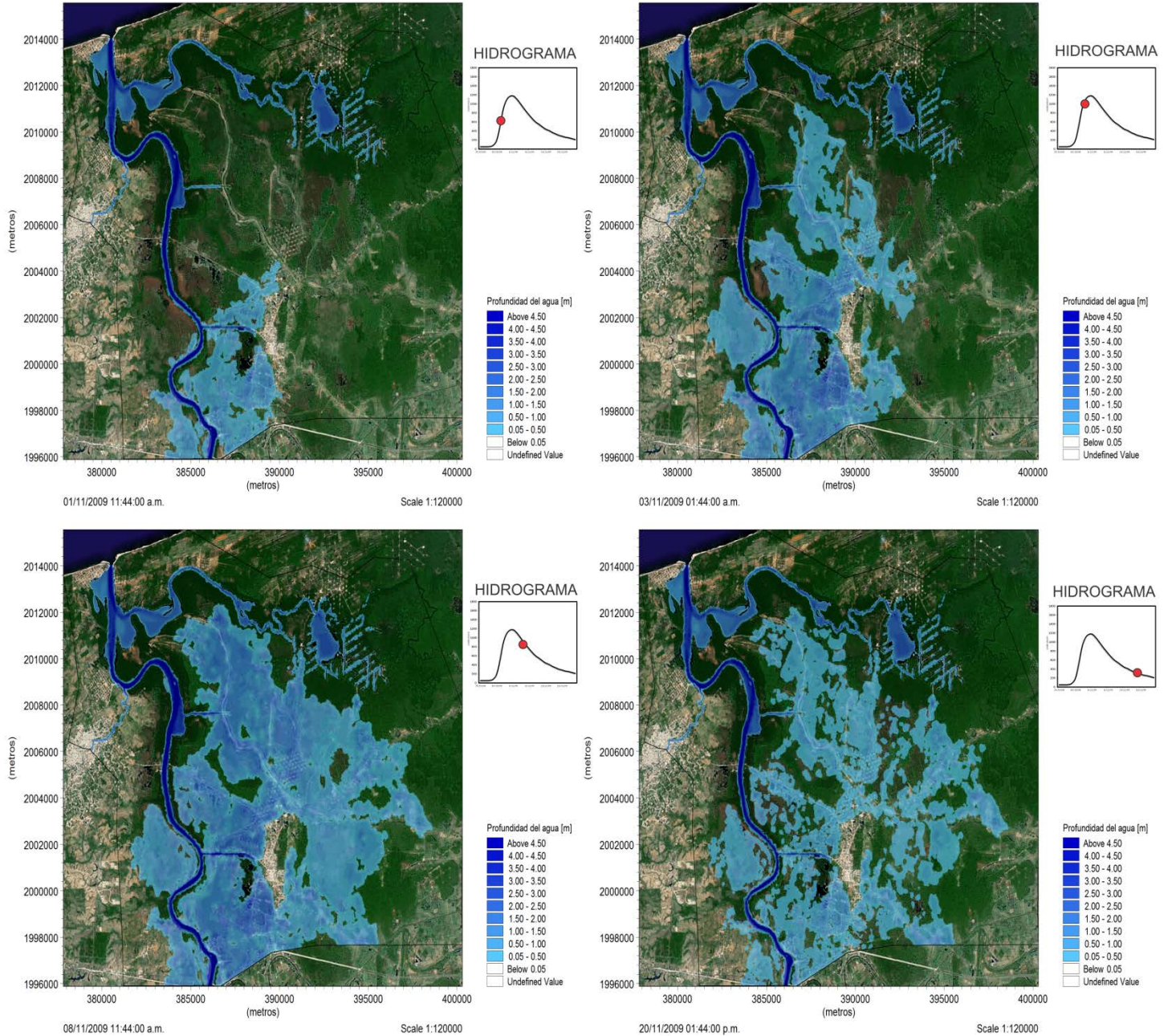


Figura 6. 8 Escenario de inundación ante avenida de $Tr=100$ años

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

Por último, las Figuras 6.9 y 6.10 presentan resultados de la simulación de los escenarios de inundación ante eventos de 500 y 1000 años periodo de retorno. Tal y como se aprecia en ambos eventos, estos se caracterizan por la rápida inundación en las zonas bajas, producto de la gran cantidad de volumen de agua presente en el río. En el escenario de 500 años (Figura 6.9), los niveles máximos de agua en la planicie se encuentran alrededor de los 3 a los 3.5 metros de profundidad, afectando zonas de importancia económica como son los ejidos cercanos al municipio de la Venta y zonas de producción petrolera. Mientras que bajo el escenario de 1000 años de periodo de retorno, el volumen de agua generado por un gasto pico de $1600\text{m}^3/\text{s}$, aumenta considerablemente el grado de afectación en las zonas bajas de cuenca, y llegando en algunos casos a inundar zonas medias como se ve en la zona petrolera del municipio de Agua Dulce-Veracruz.

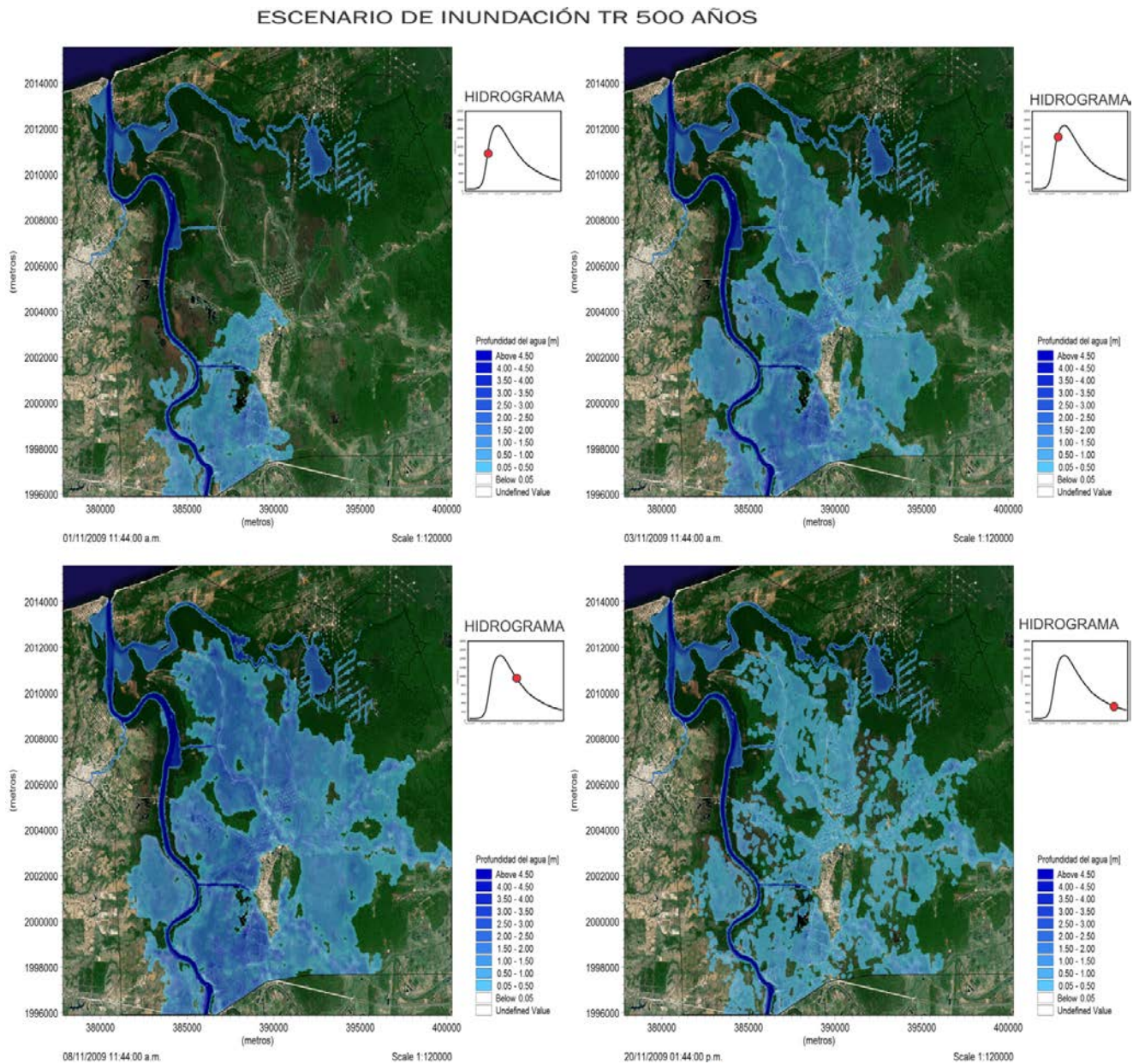


Figura 6. 9 Escenario de inundación ante avenida de $T_r=500$ años

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

ESCENARIO DE INUNDACIÓN TR 1000 AÑOS

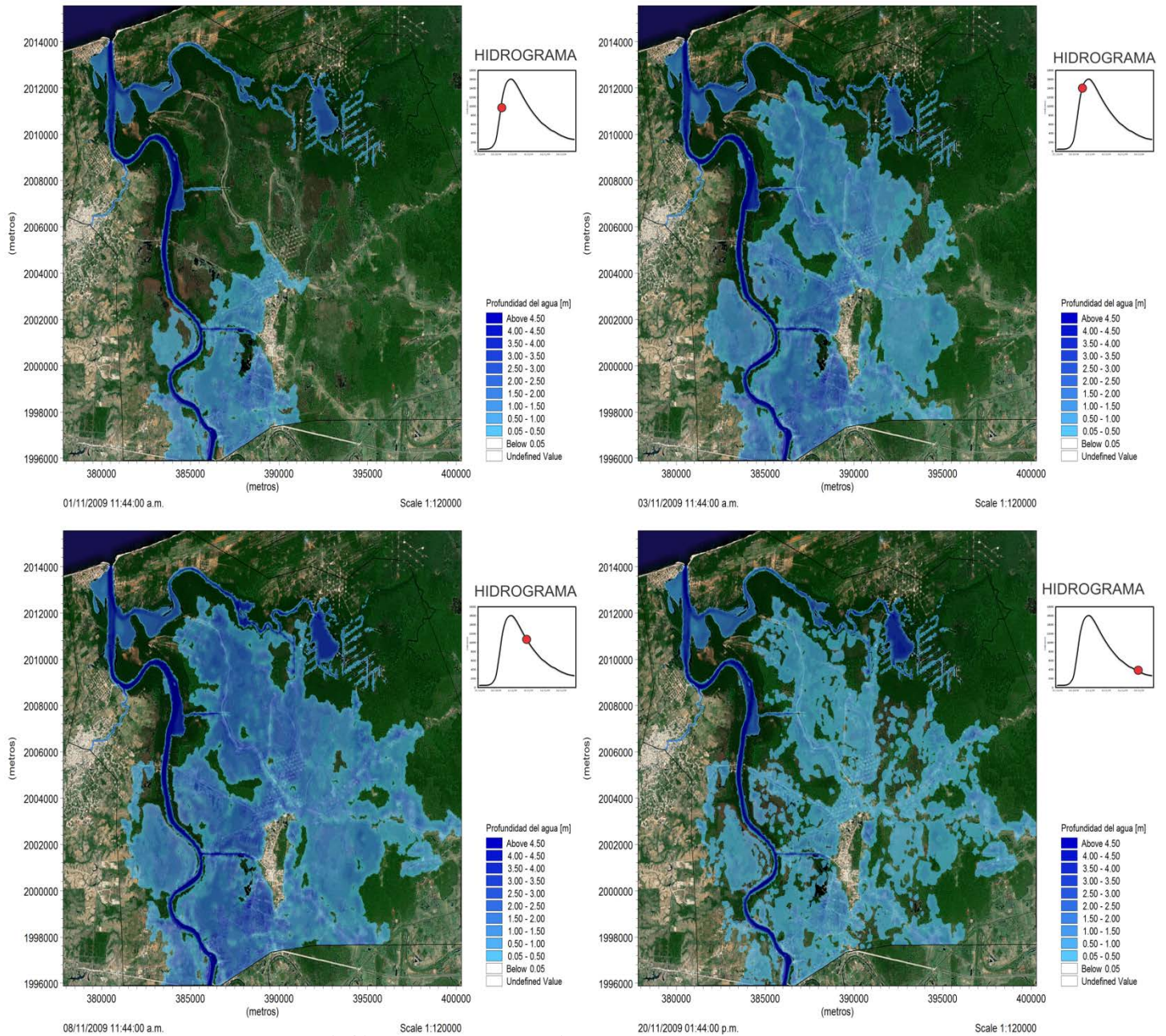


Figura 6. 10 Escenario de inundación ante avenida de Tr=1000 años

6.3.3 IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA

Por último con el propósito de construir los mapas de nivel de amenaza de acuerdo con la metodología de DEFRA, la Figura 6.11 presenta el mapa de nivel de peligro en función de ambos, la velocidad de la inundación y la profundidad del agua en un punto dado. Una característica en los escenarios de inundación modelados, consiste en la baja velocidad de flujo presente en las diferentes avenidas (entre 0.1 y 0.125 m/s). A partir de este parámetro,

CAÍTULO 6. MODELADO HIDRODINÁMICO: IDENTIFICACIÓN DE LA AMENAZA EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

fueron definidos los límites de intensidad basados en los rangos de peligrosidad presentados en la [Tabla 6.3](#). Los rangos de intensidad están definidos de la siguiente manera: Muy Bajo <0.33m, Bajo 0.34-0.66m, Medio 0.67-1.25m, Alto 1.26-2m y Muy Alto >2m.

En estas figuras, los colores cálidos representan un nivel de peligrosidad mayor, mientras que colores fríos (azul y verde) representan un nivel de peligrosidad bajo. De la comparación de los mapas obtenidos se aprecia una división en dos del nivel de peligrosidad registrado para las avenidas simuladas, por un lado los escenarios de $Tr=50$ años y $Tr=100$ años presentan un nivel de peligrosidad similar mientras que para el caso de las avenidas más extremas $Tr=500$ y 1000 años, el nivel de peligrosidad se incrementa considerablemente.

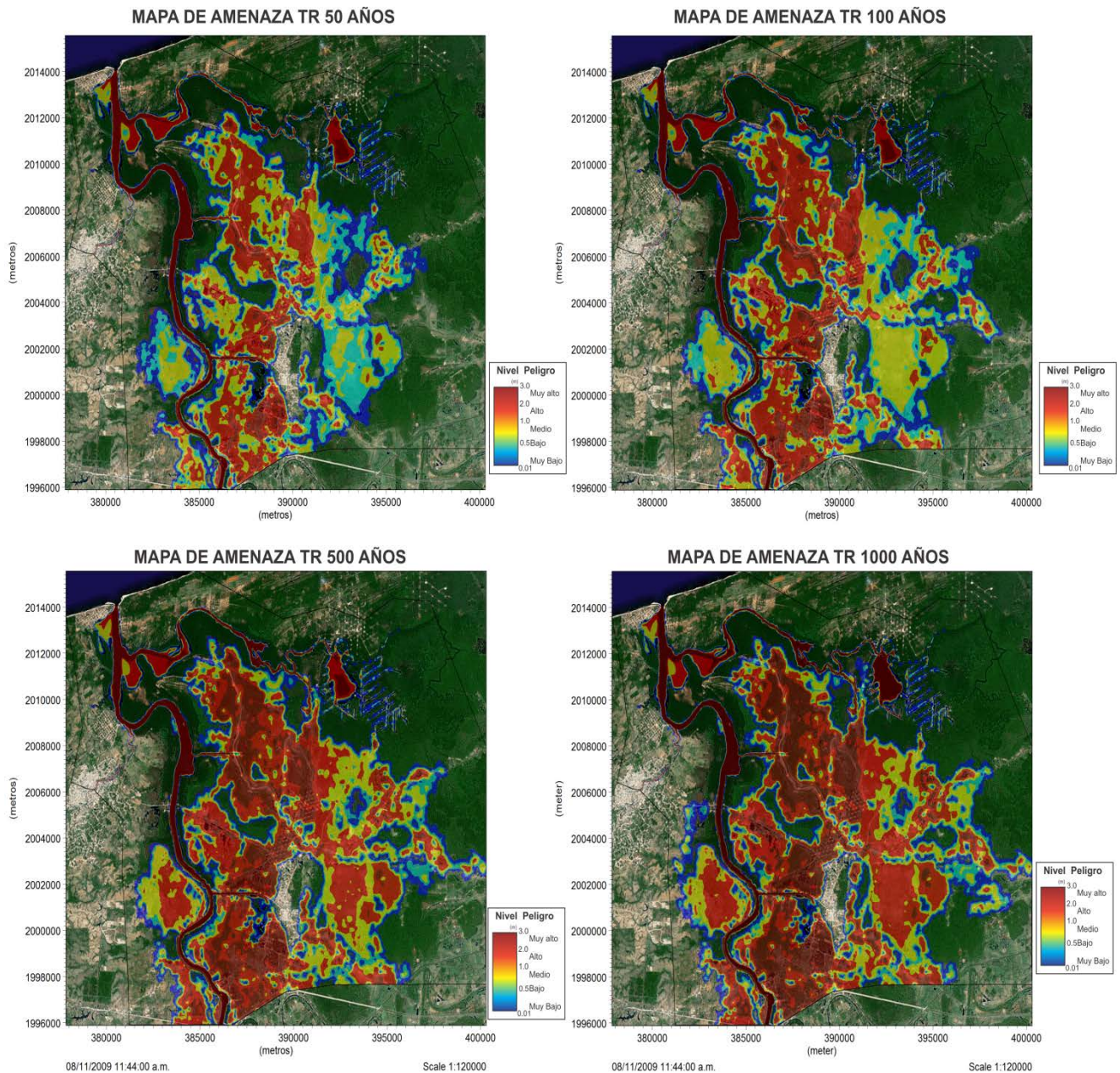


Figura 6. 11 Mapas de Amenaza asociados a periodos de retorno de 50, 100, 500 y 1000 años

6.4 CONCLUSIONES

Si bien la utilización de los modelos hidrodinámicos para la caracterización de escenarios extremos, tiene asociada una incertidumbre en los resultados calculados, el empleo de datos de alta calidad tomados a partir de información de campo y datos de percepción remota de gran resolución, así como los análisis de sensibilidad en los parámetros del modelo, permiten reducir el rango de incertidumbre del propio modelo para la identificación de la amenaza ante forzamientos extremos.

Los resultados obtenidos permitieron identificar la alta fragilidad del sistema ante eventos extremos. La distribución de la inundación toma generalmente dirección noreste, inundando la mayor parte de las zonas bajas de la cuenca. Los sistemas de mayor afectación son las áreas de explotación petrolera y zonas de interconexión municipal. En las regiones urbanas de la cuenca las afectaciones se encuentran en las áreas limítrofes del municipio de La Venta en el Estado de Tabasco. Los niveles de amenaza se encuentran entre bajo y alto para periodos de retorno de 50 y 100 años, con zonas muy altas en los ejidos cercanos a villa la venta y la vía rural de conexión de pozos. Para los periodos de retorno de 500 y 1000 años, el rango de amenaza se encuentra entre medio y muy alto. En estos escenarios se ve una alta peligrosidad en la mayor parte de la cuenca, impactando drásticamente a zonas de importancia económica y social.

Los mapas de inundación producto de este capítulo representan la información base para el análisis de vulnerabilidad y riesgo, que se presenta en capítulos posteriores de este trabajo.

CAPÍTULO 7.

VULNERABILIDAD

7.1 INTRODUCCIÓN

En general, la vulnerabilidad es una herramienta analítica muy eficaz para la descripción de los estados de peligrosidad, empobrecimiento, marginalidad de los sistemas físicos y sociales, además de la formulación de políticas y alternativas de reducción de riesgo ([Adger, 2006](#)).

La evaluación de la vulnerabilidad es usada para determinar el daño potencial y la pérdida de vidas debido a eventos naturales extremos. El nivel de daño potencial de un sistema, es derivado de las interacciones entre la sociedad y las condiciones físicas y ecológicas que lo rodean, las cuales afectan la capacidad de resiliencia del ambiente a responder ante una amenaza ([Cutter, 1996](#)).

Antes de definir el significado que se ha utilizado en este trabajo para la definición de la vulnerabilidad, es necesario distinguir los diferentes contextos que encierra este concepto. A lo largo de la historia, el termino de vulnerabilidad ha tomado diferentes dimensiones producto de las orientaciones epistémicas que lo estudian (la ingeniería, la ecología, la política, las ciencias ambientales), los diferentes tipos de amenaza investigados (pobreza, inundación, sequia, eventos sísmicos) y las regiones que son evaluadas (países desarrollados o países no desarrollados) ([Cutter, 1996](#)). En este ámbito, los estudios de vulnerabilidad pueden ser agrupados en dos categorías. Los estudios de vulnerabilidad vistos en términos del daño potencial causado a un sistema, debido a la presencia de un evento desastroso ([Jones and](#)

Boer, 2003), o como un estado preexistente del sistema que lo hace susceptible a la amenaza (Allen, 2003).

Dentro del marco de este trabajo, se puede describir a un sistema vulnerable como la condición de un determinado grupo social o sistema biofísico que lo hace susceptible y no es capaz de hacerle frente a los efectos adversos de la una amenaza, en este caso a la inundación (McCarthy et al., 2001). Conforme a esta definición, la vulnerabilidad puede ser evaluada a partir de la relación entre el rango de fragilidad de los sistemas analizados y el grado de exposición al que se encuentran sujetos (Luers et al., 2003).

La fragilidad de los sistemas puede ser conceptualizada a través de diferentes factores que determinan su grado de susceptibilidad. Füssel (2007) identifico cuatro factores que integran la vulnerabilidad, basados en las escalas internas y externas de las características socioeconómicas y biofísicas (Figura 7.1). Estos factores muestran las interrelaciones entre las esferas y los dominios del conocimiento.

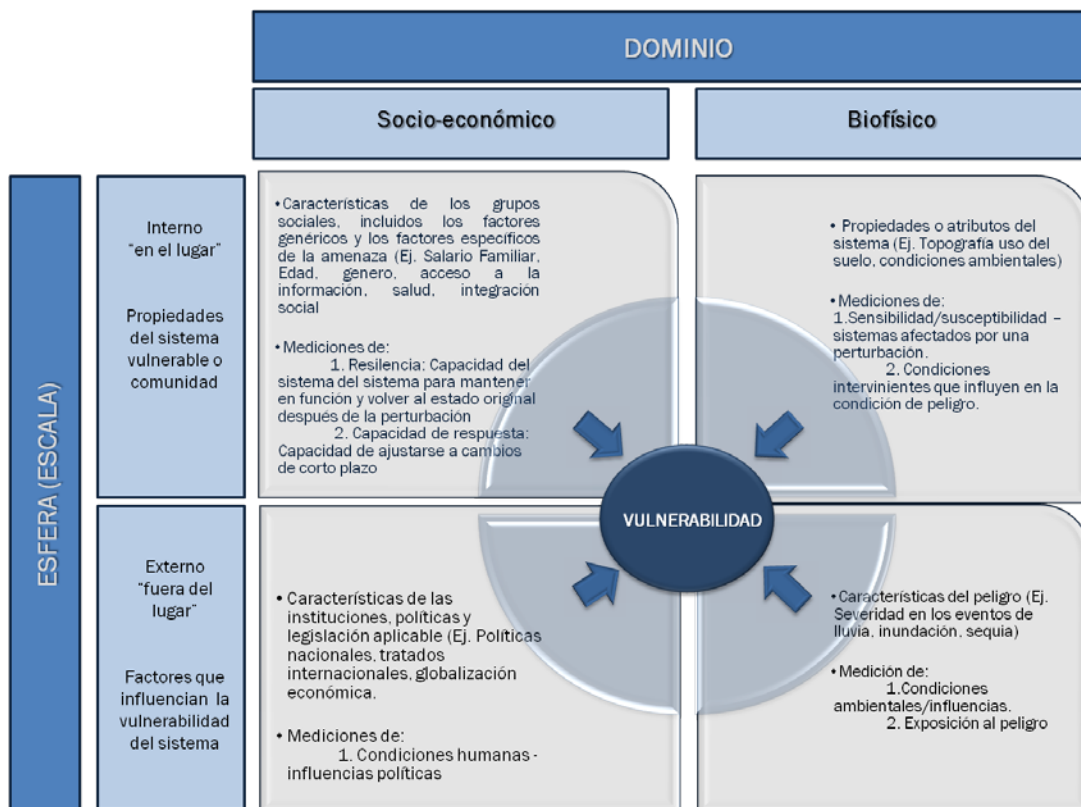


Figura 7. 1 Diagrama conceptual de los cuatro componentes claves en la definición de la vulnerabilidad (Hebb and Mortsch., 2007, modificado de Füssel, 2007)

En este capítulo, la vulnerabilidad es estimada para la escala interna de lugar, a través de la relación entre el nivel de fragilidad de los sistemas físicos, sociales, económicos y ecológicos con su rango de exposición ante la inundación. En la primera etapa, el nivel de exposición de la cuenca es determinado, en función de las condiciones geomorfológicas del terreno que lo hacen propenso a la inundación. La segunda etapa consta de la evaluación del nivel de

fragilidad de los sistemas ante la amenaza. Este grado de susceptibilidad, determina el nivel de resiliencia del ambiente ante la inundación.

7.2 METODOLOGÍA

7.2.1 ESTIMACIÓN DEL NIVEL EXPOSICIÓN ANTE LA INUNDACIÓN

La dinámica hidrológica de la región, las características físicas de sus afluentes y las particulares del terreno, como son sus bajas pendientes y terrenos compuestos en su mayor parte por zonas de planicie pluvio-lacustres y palustres, confieren a la zona baja de la cuenca del río Tonalá un elevado nivel de exposición ante los eventos de inundación. Este nivel de exposición es amplificado por las presiones antrópicas que dan lugar en la región. El grado de exposición en la cuenca es determinado a partir del análisis de las características geomorfológicas del área de estudio con el propósito de establecer las áreas propensas a la inundación.

Las zonas propensas a la inundación en el contexto físico, son definidas como el área cercana al río que es inundado o saturado cuando la elevación del agua es el doble a la profundidad máxima del cauce lleno (Rosgen, 2002). En la identificación de estas zonas, se han desarrollado diferentes metodologías para delimitar las áreas inundables, en torno a sus características geológicas y geomorfológicas. Estas parten desde métodos exhaustivos como los detallados o los históricos, métodos intermedios como los analíticos y fisiográficos, hasta métodos de aproximación como son métodos de reconocimiento (Burkham, 1988). La delimitación de las áreas propensas a inundación en la cuenca baja del Río Tonalá es estimada mediante un análisis fisiográfico de distancia de ruta acumulativa modificado de Fernandez et al., (2012). Conforme a esta metodología, la delimitación de las áreas inundadas es estimada por medio de la menor distancia de coste acumulativa para el canal del río en función de las condiciones geomorfológicas del terreno (Pendiente, elevación y uso del suelo).

7.2.1.1 Delimitación de zonas propensas a la inundación por la distancia de ruta

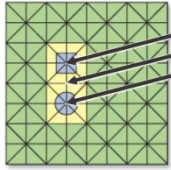
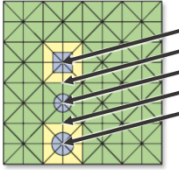
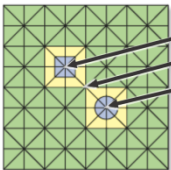
Las zonas inundables son estimadas por medio del paquete de análisis espacial incluido en el software ArcGIS (ESRI, 2011). La herramienta distancia de ruta emplea un algoritmo de cálculo del recorrido mínimo de coste acumulativo de un río (RMCA), a partir de costes de distancia mínima de las condiciones fisiográficas de la cuenca, y tomando en cuenta la distancia de la superficie y los factores de coste vertical y horizontal. El valor principal de salida del modelo, consiste en un mapa de superficie de la cuenca con los valores individuales de RCMA en cada una de las celdas de cálculo.

Los costos individuales son calculados según las leyes del trabajo de la mecánica clásica, en la cual para un ΔX constante, el costo de viaje se encuentra definido por:

$$\text{Costo} = F \cdot DP \cdot FH \cdot FV \quad (7.1)$$

Donde F es el factor de fricción de la superficie, DP la distancia de pendiente y FH y FV las fuerzas verticales y horizontales. El procedimiento de cálculo de los costes de viaje adyacente, perpendicular acumulativo y diagonal entre nodos es descrito en la [Tabla 7.1](#).

Tabla 7. 1 Calculo de los costes de viaje entre nodos

COSTES	DESCRIPCIÓN	FORMULA
Coste nodo adyacente	 <p>nodos de calculo Horizontal y Vertical</p>	$a_1 = \frac{\text{cost } 1 + \text{cost } 2}{2}$
Coste perpendicular acumulativo	 <p>nodos de calculo costo Acumulativo</p>	$a_2 = \frac{\text{cost } 2 + \text{cost } 3}{2}$ $\text{accum_cost } t = a_1 + a_2$
Coste nodo diagonal	 <p>nodos de calculo Horizontal y Vertical</p>	$a_1 = 1.4142 \left(\frac{\text{cost } 1 + \text{cost } 2}{2} \right)$ $\text{accum_cost } t = a_1 + 1.4142 \left(\frac{\text{cost } 2 + \text{cost } 3}{2} \right)$

7.2.1.2 Cálculo del mapa de recorrido mínimo de coste acumulativo (RMCA)

Como se observa en la [ecuación 7.1](#), la pendiente es una variable que normalmente es considerada para el cálculo de los costes de distancia, sin embargo, el predominio de las pendientes ligeramente suaves y suaves en más del 90% de la cuenca (0 a 5°), no resulto ser una variable muy apta para ser utilizada en el estudio. Por tal motivo, la evaluación del RMCA fue realizada en función a costo mínimo por elevación del terreno calculada sobre la superficie de uso de suelo, siguiendo el siguiente procedimiento:

Tomando en cuenta el cauce principal del río Tonalá y los valores topográficos del DEM LiDAR de 50m ([Ver cap. 2 datos disponibles](#)), es calculado el costo de viaje independiente por elevación del terreno a través del algoritmo costo distancia de ArcGIS en todo el dominio. Estos valores, a su vez, fueron ingresados en el algoritmo distancia de ruta en combinación con el mapa de uso de suelo como variable de superficie para obtener el mapa RMCA en la cuenca baja del Río Tonalá.

7.2.1.3 Índice de coste y niveles exposición en la cuenca

La obtención del mapa de recorrido mínimo de coste acumulado RCMA, es una variable muy útil a la hora de determinar el grado de exposición en una cuenca. Sin embargo, la estimación del nivel de exposición por sí sola, conlleva a un mecanismo muy subjetivo de valoración. Es por esto que en este estudio se propone un método de estimación del grado de exposición a través del cálculo del índice de coste de distancia de ruta ICDR. Este índice valora el nivel de exposición en base al grado relativo de RCMA de la cuenca. El valor del índice para cada nivel de exposición se encuentra dado por:

$$ICDR_i = ICDR_{i-1} \cdot n \quad (7.2)$$

Donde n es el número de niveles a evaluar y $ICDR_{i-1}$ es el índice de coste de distancia de ruta del nivel inferior. El valor para el momento $ICDR_0$ se encuentra determinado por la fórmula de razón de coste (3)

$$RC = \frac{RCMA_{\min}}{RCMA_{\max}} \quad (7.3)$$

Donde $RCMA_{\min}$ es el mínimo recorrido coste acumulado en tierra de la cuenca y $RCMA_{\max}$ es el valor máximo de RCMA calculado. En la [Figura 7.2](#) se muestra los índices de coste de distancia de ruta en escala logarítmica en relación con los niveles de exposición. Conforme a esta figura, es posible evidenciar que ante un mayor ICDR, es más difícil el tránsito hacia la zona y por ende presenta una menor exposición ante la presencia de una inundación.

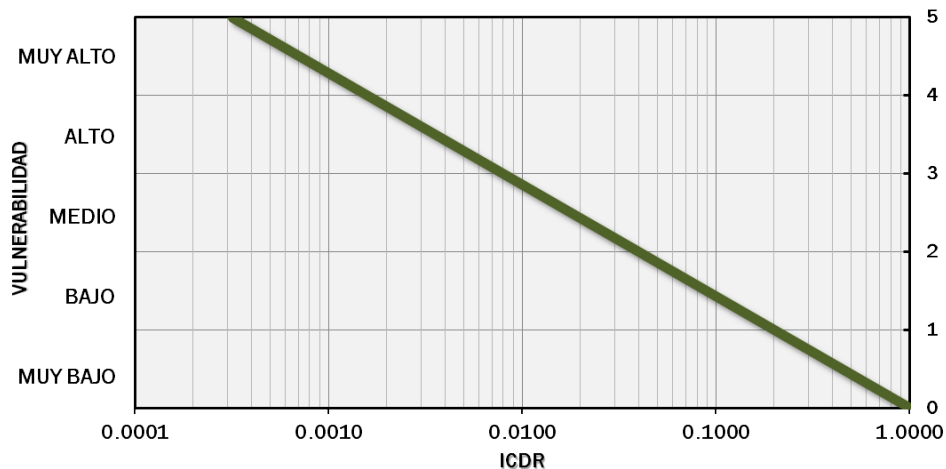


Figura 7.2 Niveles de exposición en relación con índices de coste de distancia de ruta

7.2.2 EVALUACIÓN DE LA FRAGILIDAD DE LOS SISTEMAS EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

La fragilidad o susceptibilidad de un sistema, es una medida de cómo la sensibilidad de un elemento en riesgo se comporta ante un tipo de amenaza (Messner and Meyer, 2006). Este nivel de sensibilidad puede analizarse desde diferentes ámbitos, que van desde lo físico, lo

social, lo económico, lo ecológico y lo cultural. En la zona de estudio, la evaluación de susceptibilidad es realizada a través del análisis de las condiciones de estos sistemas que lo hacen susceptibles a la inundación. A continuación se describe las metodologías utilizada para la determinación de la fragilidad en estos parámetros.

7.2.2.1 Evaluación de la susceptibilidad del medio social

El propósito fundamental de la gestión del riesgo consiste en la búsqueda de medidas de control y reducción del riesgo con el fin de salvaguardar la vida, la salud y la integridad de las personas. En este marco, la identificación del grado de fragilidad social en la zona de estudio es un mecanismo vital en el análisis del riesgo. La construcción social del riesgo es un proceso en el cual, la sociedad transforma y configura el riesgo debido a sus constantes interrelaciones con un medio natural cambiante.

En un enfoque de estado, la vulnerabilidad social es determinada por los factores que hacen a una sociedad o comunidad susceptibles a un peligro externo (Allen, 2003). Entre estos factores se incluyen la pobreza e inequidad de la población, el grado de marginación por parte del Estado, la composición y estatus social, la estructura económica, y el acceso a los recursos tales como salud, vivienda información y tecnología (Tapsell et al, 2002; Brooks, 2003; Cutter et al. 2003). En este estudio, la evaluación del nivel de vulnerabilidad social de la cuenca baja del río Tonalá, es determinada por el Índice de susceptibilidad social por inundación (SFVI) propuesta por Tapsell et al., (2002). Este índice mide el impacto potencial que las inundaciones podrían tener sobre las comunidades, en torno a las características sociales y financieras de la componen.

El SFVI, se basa en el análisis de cuatro características normalizadas de la población que lo hacen vulnerable ante la inundación. Estas son, el rango de edad de la población, las condiciones de salud preexistentes, la estructura familiar, y las privaciones financieras que limitan la capacidad de respuesta de la población. De acuerdo con Tapsell et al., (2002), la selección de las variables responden a la identificación de necesidades locales evaluadas sobre datos disponibles de la zona de estudio. Para la estimación del índice de susceptibilidad social por inundación en la cuenca baja el río Tonalá, fueron utilizadas seis variables sociales disponibles para la estimación del rango de vulnerabilidad en cada localidad (urbana/rural). Estas variables fueron evaluadas y normalizadas para la construcción de cuatro índices sectoriales de susceptibilidad social (tamaño por localidad, edad vulnerable, salud y privación financiera), los cuales sumados integran el índice social de susceptibilidad por inundación SFVI.

- **Índice de tamaño de la población por localidad:** Es considerada en el estudio como la principal característica de los grupos sociales. El índice de tamaño de la población por localidad evalúa la fragilidad social en base a la densidad de los grupos sociales en cada localidad. El cálculo es encuentra determinado por:

$$Tam.Pob_suscep = \frac{Esc_tamaño}{Total_escala} \quad (7.4)$$

En donde la escala de tamaño de la población se encuentra establecida en la [Tabla 7.2](#) y el valor total de la escala corresponde al número total de niveles. El índice es determinado mediante la normalización de la tasa de población frágil en base al método de transformación de indicadores de [Tapsell et al., \(2002\)](#).

$$Ind_Tam.suscep = LN(1 + Tam.Pob_suscep) \quad (7.5)$$

Tabla 7. 2 Niveles de fragilidad por tamaño de la población

ESC. TAMAÑO POBLACIÓN	No. HAB. LOCALIDAD	NIVEL
MUY BAJO	0	1
BAJO	1-20	2
MEDIO	21-235	3
ALTO	236-3370	4
MUY ALTO	3371-36079	5

- **Índice de edad frágil:** Corresponde a la susceptibilidad social por el rango de población que, debido a su intervalo de edad, son más sensibles a afectaciones producto de las inundaciones. Los rangos de edad considerados frágiles para la zona de estudio son de 0 a 2 años y mayores de 65 años. El cálculo del índice del índice susceptibilidad se encuentra determinado por:

$$Edad_suscep = \frac{(0 - 2 \text{ años}) + (> 65 \text{ años})}{Total_PobLoc} \quad (7.6)$$

$$Ind_edad.suscep = LN(1 + Edad_suscep) \quad (7.7)$$

- **Índice de salud vulnerable:** [Green et al. 1994](#) hace mención, que los factores de morbilidad post inundación son incrementados cuando las víctimas sufren de problemas de salud preexistentes. En el índice de salud susceptible, las condiciones preexistentes de salud son evaluadas conforme al rango de la población por localidad que presenta algún tipo de problema en su condición de salud. Dado que en la zona de estudio no se contó con información muy detallada respecto a las características de salud de la población, el índice de salud fue evaluado en base al rango de la población por localidad que presenta algún tipo de discapacidad física. El cálculo se encuentra determinado por:

$$Salud_suscep = \frac{Pob_ConLIM}{Total_PobLoc} \quad (7.8)$$

$$Ind_salud.suscep = LN(1 + Salud_suscep)$$

- **Índice de privación financiera:** Parte del análisis conjunto de dos variables, el nivel de desempleo de la población por localidad y el porcentaje de viviendas particulares sin ningún tipo de bien material. En el caso del nivel de empleo de la población, el rango se encuentra determinado por la relación entre la población desempleada y la población económicamente activa ([ecuación 7.9](#)).

$$Nivel.Empleo = \frac{Pob_desocup}{PEA} \quad (7.9)$$

Por su parte el rango de viviendas particulares sin ningún tipo de bien particular es determinado por el total de viviendas sin ningún bien entre el total de viviendas particulares ([ecuación 7.10](#)).

$$Bienes_VPH = \frac{VPH_SNBIEN}{Total_VPH} \quad (7.10)$$

El índice de privación financiera es determinado por:

$$Ind_finan.suscep = LN \left(1 + \frac{(Nivel.empleo + Bienes_VPH)}{2} \right) \quad (7.11)$$

Finalmente, los índices sectoriales de susceptibilidad social son integrados en el Índice de susceptibilidad social por inundación SFVI en cada localidad a través de la [ecuación 7.12](#). El nivel de fragilidad en base al SFVI se encuentra determinado a través de la [Tabla 7.3](#).

$$SFVI = Ind_edad.suscep + Ind_salu.vul + Ind_finan.suscep \quad (7.12)$$

Tabla 7.3 Niveles de vulnerabilidad

SFVI	NIVEL
0.00-0.2	Muy Bajo
0.21-0.4	Bajo
0.41-0.6	Medio
0.61-0.8	Alto
0.81-1.0	Muy Alto

7.2.2.2 Evaluación de la susceptibilidad del medio físico y económico

En el marco de la evolución de la vulnerabilidad propuesta por [Wisner et al., \(2004\)](#) en su modelo Presión y Liberación (PAR), la vulnerabilidad es producto de una cadena de factores internos y externos de los sistemas, que evaluados ante una fuerza opuesta (la amenaza) conllevan al desastre. En la evolución de la vulnerabilidad, las dos primeras fases (las causas de fondo y las presiones dinámicas) determinan la fragilidad del sistema, y la tercera fase (las condiciones inseguras) establece al grado potencial de exposición ante la inundación.

El nivel de susceptibilidad del medio físico y económico en la zona de estudio, incorpora este concepto definiendo, a través de un análisis descriptivo, las condiciones de fondo y las presiones dinámicas de los sistemas que intervienen en la vulnerabilidad ante la inundación. La evaluación se realiza por medio de la calificación de diversos parámetros en una escala de uno a cinco. El promedio de los valores determina el grado de susceptibilidad ante la inundación en cada sistema evaluado. Los parámetros analizados son:

a) ***Causas de Fondo***

- **Importancia social:** Corresponde al valor social del sistema en términos de su importancia en el bienestar colectivo de la población. Una mayor importancia del sistema conlleva a una mayor fragilidad ante la inundación. La calificación va desde 1=Muy Bajo hasta 5= Muy Alto.
- **Importancia económica:** Es el valor económico del sistema en términos de su contribución en el desarrollo económico de la región. Ante una mayor importancia, mayor es su fragilidad. (1=Muy Bajo; 5= Muy Alto)
- **Nivel de complejidad:** La complejidad de un bien es evaluada en torno al tipo de sistema expuesto. Si en este sistema intervienen muchas variables adicionales, tanto sociales como económicas, su afectación provocaría una parálisis en todos los sistemas que dependen de él. (1=Muy Bajo; 5= Muy Alto)

b) ***Presiones dinámicas:***

- **Estado del bien:** Son las condiciones actuales del sistema analizado. Si el sistema presenta un mal estado, conlleva a una mayor fragilidad ante la inundación. (5=Muy Bajo; 1= Muy Alto)
- **Precio del Bien:** Relacionado con los parámetros económicos, el precio del bien es el valor del mercado del sistema, en cuanto a su construcción, operación y mantenimiento. (1=Muy Bajo; 5= Muy Alto)
- **Capacidad de afrontamiento:** Es la habilidad de los sistemas a enfrentar condiciones adversas en situación de emergencia o desastres. (5=Muy Bajo; 1= Muy Alto)
- **Capacidad de adaptación:** Es un ajuste en los sistemas como respuesta a los estímulos producto de la inundación. (5=Muy Bajo; 1= Muy Alto).

7.2.2.3 Evaluación de la susceptibilidad del medio ecológico y cultural

Al igual que la evaluación de la fragilidad para el medio físico y económico, la estimación del nivel de susceptibilidad ecológico y cultural consiste en evaluar las condiciones de fondo y las presiones dinámicas que estimulan la fragilidad ante la inundación. En esta evaluación se incorpora un nuevo parámetro para evaluar la susceptibilidad, el cual consiste en la importancia ecológica del sistema. En el sistema ecológico, los parámetros que no son evaluados son el nivel de complejidad en las causas de fondo y el precio del bien en las presiones dinámicas. Para la evaluación de la fragilidad del sistema cultural no son evaluados la importancia ecológica, el nivel de complejidad, el estado y el precio del bien.

7.2.3 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Reconociendo que la relación de los factores que componen la vulnerabilidad, determinan el grado de afectación del sistema ante la inundación, el nivel de vulnerabilidad es obtenido en base al Índice de Vulnerabilidad por Inundación (IVI) propuesto (Luers *et al.*, 2003). Esta evaluación se encuentra determinada por el nivel relativo de fragilidad del sistema ante una amenaza, multiplicado por el nivel de exposición al que se encuentra expuesto. La fórmula general se encuentra dada por:

$$IVI = \frac{\text{Fragilidad del sistema ante una amenaza}}{\text{Umbral relativo de fragilidad } \times \text{ nivel. de exposición}} \quad (7.13)$$

7.3 RESULTADOS

7.3.1 NIVEL DE EXPOSICIÓN DE LA CUENCA ANTE LA INUNDACIÓN

La construcción del mapa de exposición en la cuenca baja el río Tonalá fue elaborado en base en cinco niveles de intensidad (Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto, Muy Alto). Estos niveles son estimados a partir del índice de coste de distancia de ruta (ICDR) calculado a partir del recorrido mínimo de coste acumulado RMCA. En la [Figura 7.3](#) se muestra el mapa de exposición para la cuenca baja del río Tonalá.

Conforme a los resultados obtenidos, es posible dividir a la zona de estudio en tres zonas de exposición. En el primer grupo se encuentran las exposiciones intensas. Estas zonas, compuestas en su mayor parte por áreas de Popal, integran alrededor de 100 km² que corresponde al 24% de la cuenca baja del río Tonalá. La principal característica de este grupo consiste en su baja altitud, la cual determina su alto nivel de exposición ante la ocurrencia de un fenómeno de inundación. Otras zonas que también integran el grupo de exposiciones intensas, son las áreas ribereñas y costeras del río y algunas zonas rurales como son Tonalá, El muelle y Cuauhtemoczín.

El segundo grupo está conformado por las exposiciones de nivel medio. Este grupo lo integra el 44.3% del total de la zona de estudio. Esta zona comprende las áreas de manglar y selva baja perennifolia, además de parte de la zona urbana de Agua Dulce por Veracruz y la periferia del municipio de la Venta en Tabasco. La extensión total del área en este nivel es de 86.7 km².

El último grupo corresponde a los niveles bajos de exposición. Este grupo comprende el 24% del área de estudio. Se encuentra integrado por regiones de elevaciones medias y bajas, además de regiones de poca influencia del cauce principal. El uso de suelo de este grupo lo componen zonas de pastizales y cultivos agrícolas temporales, además de las zonas urbanas de la Venta y las partes altas del municipio de Agua Dulce. En la [Tabla 7.4](#) se muestra la distribución del grado de exposición en la zona de estudio.

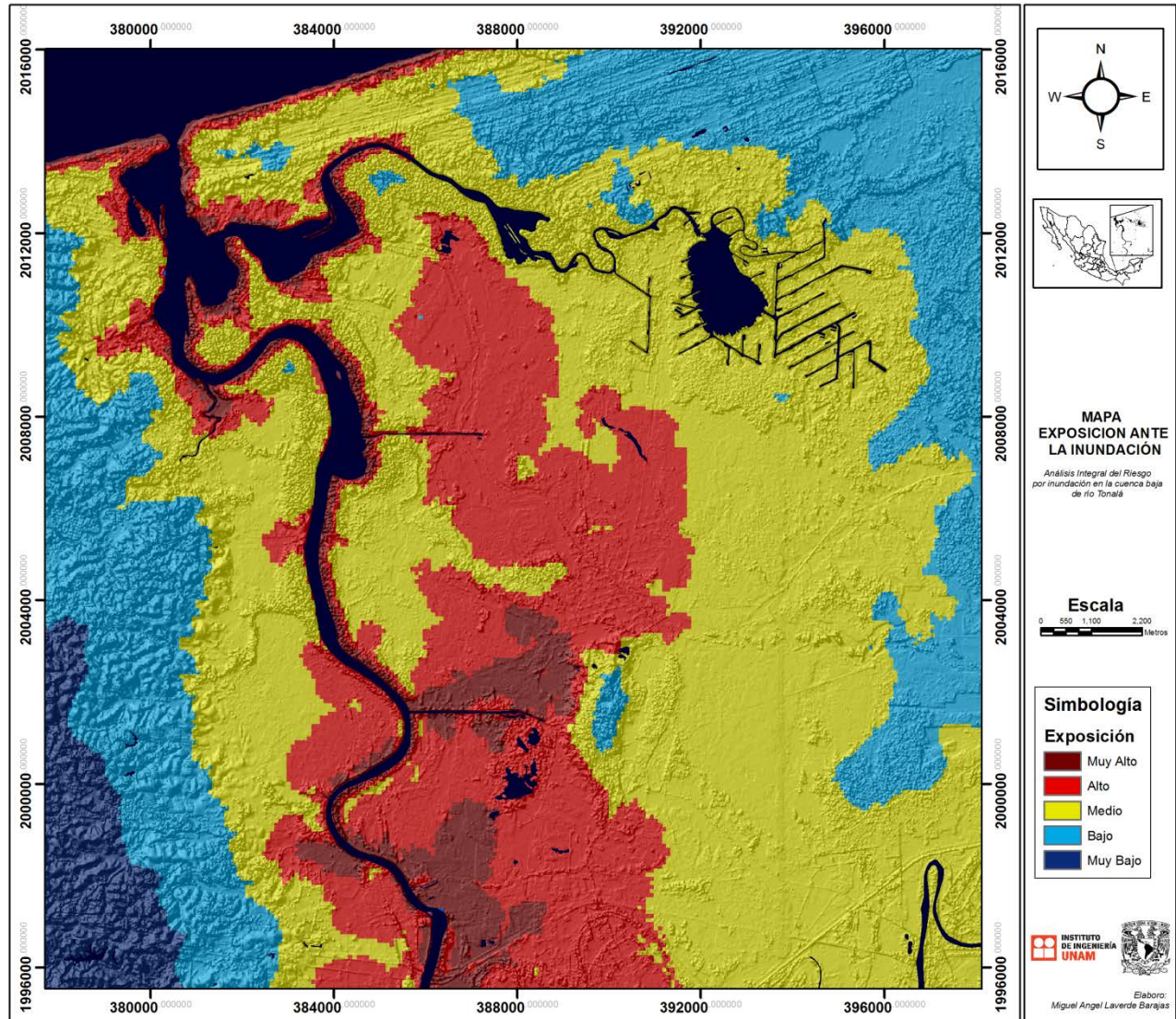


Figura 7. 3 Mapa de exposición ante la inundación

Tabla 7. 4 Distribución del grado de exposición en la cuenca

Nivel Exposición	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Muy Bajo	25.60	6.12%
Bajo	74.85	17.89%
Medio	187.25	44.76%
Alto	86.97	20.79%
Muy Alto	12.76	3.05%
Zona de Agua	30.93	7.39%
Área total	418.35	100.0%

7.3.2 VULNERABILIDAD DEL MEDIO SOCIAL

La construcción de los escenarios de vulnerabilidad social ante inundación en la zona de estudio, puede indicarse como un análisis integrado de las variables sectoriales que afectan a la población y que limitan su resiliencia ante un evento potencial de inundación. En la evaluación social de la vulnerabilidad, las localidades urbanas y rurales son analizadas conforme a al grado de fragilidad de la población (edad vulnerable, características económicas y de salud) y su relación con el grado de exposición ante la amenaza. El cálculo de la población vulnerable fue obtenida a través de los habitantes por metro cuadrado en cada una localidad analizada. En el **Anexo B** se presentan los mapas de los índices sectoriales de fragilidad social y el mapa de susceptibilidad asociado a este sistema.

La evaluación de la susceptibilidad del sistema social en relación su grado de exposición, muestra que los grupos urbanos de mayor población cuentan con un bajo nivel de exposición ante la inundación. Conforme a los resultados obtenidos, los niveles de vulnerabilidad muy alta y alta afectan a 18 localidades de la zona de estudio. La población vulnerable en estos niveles es de 8100 habitantes que corresponde al 14% del total de la población (**Figura 7.4**). La vulnerabilidad media se encuentra presente en 19 localidades, afectando a un total de 15.800 habitantes (26%). Los niveles bajos de vulnerabilidad en el medio social se encuentran agrupados en zonas de alta densidad poblacional. Estas vulnerabilidades se presentan en 38 localidades de la cuenca y afectan a 34.200 habitantes, correspondiente al 59% de la población. La **Figura 7.5** muestra el mapa de vulnerabilidad del medio social para la cuenca baja del río Tonalá.

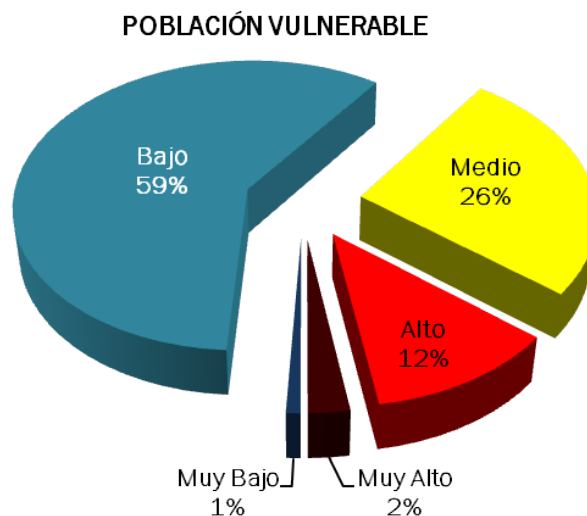


Figura 7. 4 Distribución del nivel de vulnerabilidad de la población

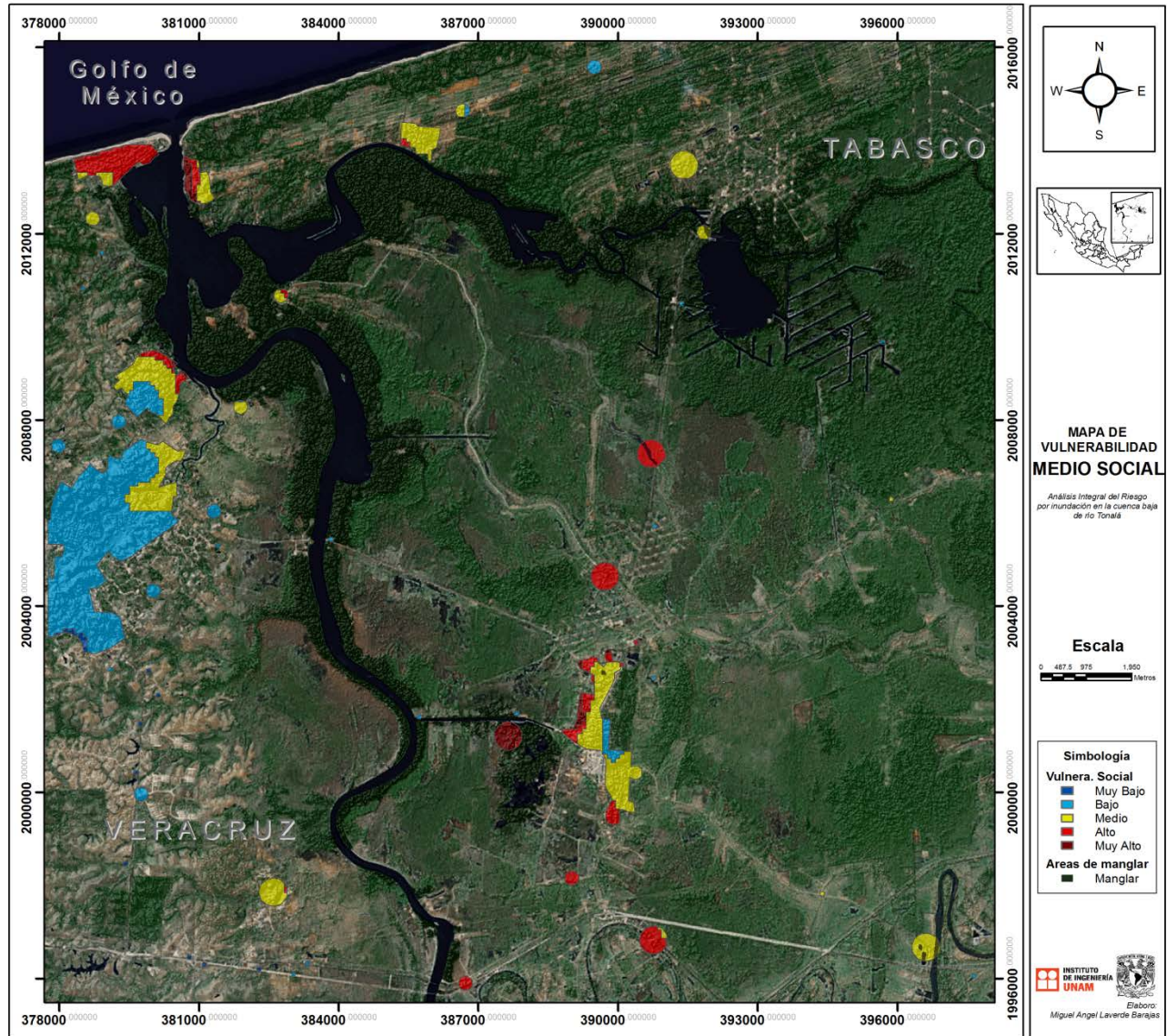


Figura 7. 5 Mapa de vulnerabilidad social de la cuenca baja del río Tonalá

7.3.3 VULNERABILIDAD DEL MEDIO FÍSICO Y ECONÓMICO

En la evaluación de la vulnerabilidad fueron analizadas cuatro variables de los sistemas físicos y económicos. En el sistema físico, las variables evaluadas corresponden al tipo de línea de conducción (Electricidad, petróleo/gas) y la infraestructura vial (primaria y secundaria). En el sistema económico fueron evaluadas las zonas de extracción petrolera, particularmente el área de pozos petroleros, y las zonas agropecuarias (agricultura de temporal y pastizales cultivados). En el ANEXO B se muestran la tabla de evaluación de los sistemas en base a las causas de fondo y las presiones dinámicas, además del mapa de susceptibilidad económica para la zona de estudio.

CAPITULO 7. VULNERABILIDAD

En relación con la evaluación de la vulnerabilidad, la **Figura 7.6** muestra el mapa de vulnerabilidad del medio físico y económico para la cuenca baja del río Tonalá. A partir de este mapa, es posible evidenciar que en los sistemas viales sobresalen las vulnerabilidades medias para los sistemas primarios (49.67%) y bajas para los sistemas viales secundarios (60.9%). En los sistemas de conducción, tanto eléctrico como de transporte de petróleo y gas, las vulnerabilidades altas afectan a casi la mitad del total de los sistemas de conducción.

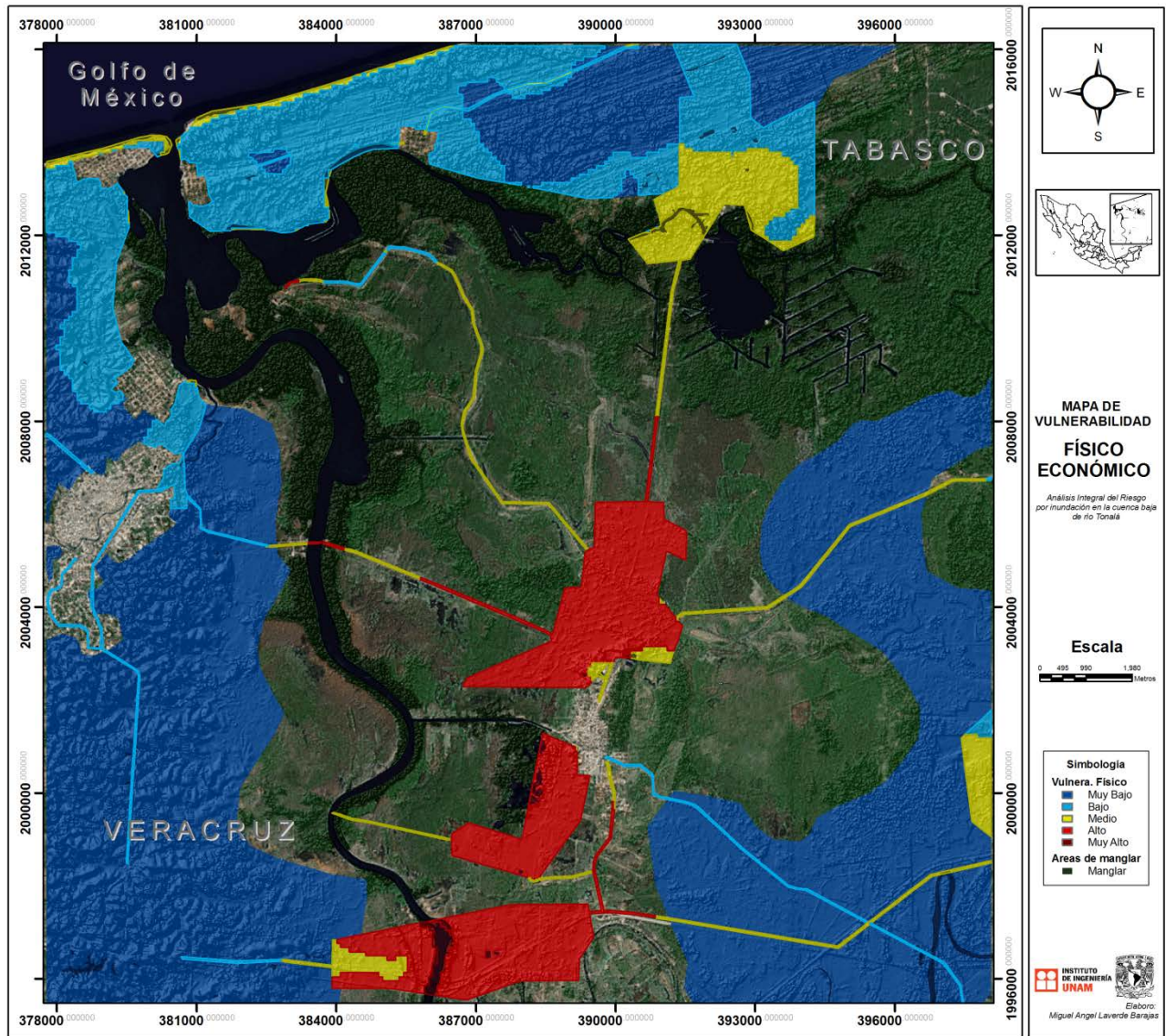


Figura 7.6 Mapa de vulnerabilidad físico y económico de la cuenca baja del río Tonalá

La distribución de la vulnerabilidad de los sistemas económicos es muy variada conforme al sector económico analizado. En las zonas de extracción petrolera sobresale en fuerte medida los niveles altos de vulnerabilidad que llegan a afectar a más del 60% del área total utilizada para dicho fin. En los sectores agropecuarios, los niveles de vulnerabilidad están entre bajos y

muy bajos. Para las áreas de agricultura de temporal la vulnerabilidad baja en encuentra presente en 65.2% y la baja en el 38.8%. En las zonas de pastizales cultivados, el 100% presenta un nivel muy bajo de vulnerabilidad. En la [Tabla 7.5](#) se muestra un cuadro resumen de las afectaciones de los sistemas en cada nivel de vulnerabilidad.

Tabla 7.5 Cuadro resumen de las vulnerabilidades en los sistemas físicos y económicos

PARÁMETROS			MUY BAJO	BAJO	MEDIO	ALTO	MUY ALTO
FÍSICO	Infraestructura vial	Primaria (m)	2,891.16 (5.53%)	3,360.89 (6.43%)	25,954.11 (49.67%)	19,395.48 (31.12%)	-
		Secundaria (m)	1,936.41 (3.71%)	31,822.18 (60.9%)	13,916.05 (26.63%)	4,580.35 (8.77%)	-
	sistemas de conducción	Electricidad Petróleo/Gas (m)	2,891.16 (5.53%)	3,360.89 (6.43%)	25,954.11 (49.67%)	19,395.48 (31.12%)	-
ECONÓMICO	Zonas Extracc. Petrolera	Pozos petroleros (km ²)	-	5.531 (17.32%)	6.534 (20.46%)	19.868 (62.22%)	-
	Agropecuario	Agricultura temporal (km ²)	12.16 (38.8%)	22.74 (65.2%)	-	-	-
		Pastizal cultivado (km ²)	108.62 (100%)	-	-	-	-

7.3.4 VULNERABILIDAD DEL MEDIO ECOLÓGICO Y CULTURAL

En cuanto a la vulnerabilidad del medio ecológico y cultural, fueron evaluadas cuatro variables ecológicas y una variable cultural. En el sistema ecológico, la evaluación comprende el análisis de las áreas de flora y fauna presentes en la región. La fragilidad de la flora se valoró en función de las zonas de mangle, Tular, Palmar y áreas selváticas existentes. En el caso de la fauna, la evaluación se realizó a partir de los sitios prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad, definidos por la [CONABIO et al en 2007](#).

En relación del medio cultural, dada la importancia social que presentan los rasgos arqueológicos en la región, la evaluación de la vulnerabilidad del medio cultural se basó en la fragilidad de los parámetros arqueológicos existentes. En el [ANEXO B](#) se muestra la tabla de evaluación de fragilidad y el mapa de susceptibilidad para los sistemas ecológicos y culturales.

Los resultados de la estimación de la vulnerabilidad, son presentados en el mapa de vulnerabilidad ecológica y cultural para la cuenca baja del río Tonalá de la [Figura 7.7](#). Conforme a este mapa, la distribución de vulnerabilidad en los sistemas analizados es:

- **Ecológico:**

Flora: En general, las áreas de flora en la cuenca presentan una vulnerabilidad baja ante la inundación. En las zonas de manglar, las vulnerabilidades bajas ocupan el 72% del total del mangle de la región, las zonas medias representan el 23.11% y las altas solo ocupan el

CAPITULO 7. VULNERABILIDAD

4.4%. En las áreas de selváticas, el 80% corresponde a vulnerabilidades bajas, el 19% a muy bajas y solo un 1% presenta niveles de vulnerabilidad media. En las áreas de Palmar y Tular las vulnerabilidades bajas ocupan el 93.5% y las vulnerabilidades muy bajas ocupan el 6.5% del total de área disponible para este fin.

Fauna: En las zonas prioritarias para la conservación de la vulnerabilidad, la mayor parte del territorio lo ocupan los niveles de vulnerabilidad alta presenten en el 61.4% del área total. Seguido de esto, los niveles medios conforman 37% y los niveles bajos el 1.6%.

- **Cultural:** La vulnerabilidad ante la inundación en la zona arqueológica de La Venta comprende en su mayoría un nivel bajo. La vulnerabilidad baja en este parámetro comprende el 78% del total de la zona y el nivel medio abarca el 22%.

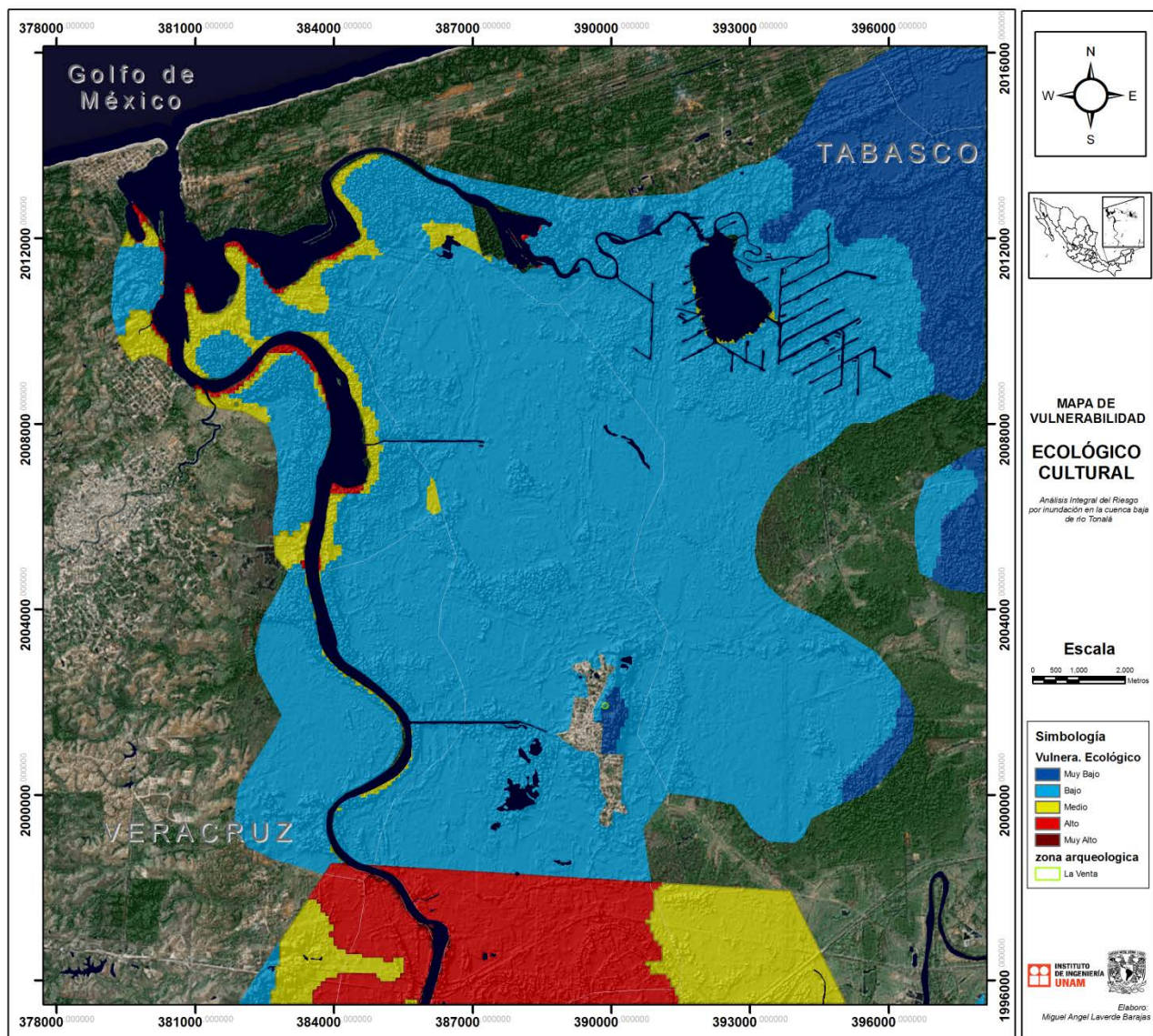


Figura 7. 7 Mapa de vulnerabilidad del medio ecológico y cultural para la cuenca baja del río Tonalá

7.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó la estimación de la vulnerabilidad ante inundación en la cuenca baja del río Tonalá. Esta estimación se realizó para los sistemas sociales, físicos, económicos, ecológicos y culturales, a través de un enfoque de estado de sistema. Este enfoque, analizó el nivel de vulnerabilidad de la zona de estudio, en función de las características de los sistemas que lo hacen susceptible, y no es capaz de hacerle frente a los efectos adversos de la inundación. Al igual que para los mapas de amenaza, los escenarios de vulnerabilidad fueron construidos en base a cinco niveles de vulnerabilidad, partiendo de la evaluación entre el rango de fragilidad de los sistemas analizados y el grado de exposición al que se encuentran sujetos. Conforme a esta evaluación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El análisis sistemático de la morfología de la cuenca a través del coste de distancia del río, es una muy buena herramienta para determinar el grado de exposición de los sistemas ante la inundación. Considerando que la morfología es el reflejo de las condiciones del escurrimiento, su análisis permitió identificar las características del terreno que hacen que un sistema se encuentre expuesto o no.

Existen innumerables diferencias en las características de los grupos sociales, como son su estructura organizacional, disponibilidad de recursos y estado de la población. Estas diferencias también se encuentran presentes en su nivel de resiliencia ante la inundación. En el análisis del medio social, estas características fueron evaluadas con el fin de determinar su nivel de vulnerabilidad ante la incidencia de un evento de inundación. Sin embargo es necesario contar con una fuente de información más completa para estimar con mejor detalle los niveles de vulnerabilidad social en la zona de estudio.

La cuenca en general presenta una vulnerabilidad natural a los eventos de inundación. Esta vulnerabilidad se debe a las particulares del terreno, como son sus bajas pendientes, poca elevación topográfica y terreno compuestos en su mayor parte por zonas de planicie pluvio-lacustres y palustres. En el medio físico- económico, dada su alta fragilidad, las áreas con un alto de vulnerabilidad son las zonas de extracción petrolera y algunos sistemas de infraestructura vial primaria y de conducción. En el caso del medio ecológico- cultural, las mayores vulnerabilidades se encuentran en zonas prioritarias para la conservación de la biodiversidad y algunas áreas ribereñas de manglar.

CAPÍTULO 8.

ANÁLISIS DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

8.1 INTRODUCCIÓN

El análisis de riesgo es considerado un elemento muy relevante en la planeación de estrategias de preparación y mitigación frente a desastres, a la par también es un elemento importante en la evaluación del costo-beneficio de las medidas de mitigación para la optimización de las inversiones ([Apel et al., 2009](#)). La determinación del riesgo, entendido como un resultado de las interacciones entre la humanidad y la naturaleza ([Schumann, 2011](#)), es producto del análisis de la amenaza de inundación con un periodo de retorno dado, en relación con los sistemas vulnerables presentes en la cuenca.

En este capítulo se presentan los resultados finales del análisis del riesgo por inundación en la cuenca baja del río Tonalá. En la determinación del riesgo, los resultados del análisis de precipitación (capítulo 4), hidrológico (capítulo 5) e hidráulico (capítulo 6) que definen la amenaza, y la estimación de los sistemas vulnerables a la inundación (capítulo 7) son integrados con el fin de establecer las áreas de mayor riesgo de inundación dentro de la zona de estudio.

8.2 METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL RIESGO POR INUNDACIÓN EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO TONALÁ

A lo largo del documento, se ha descrito al riesgo como la relación de tres elementos; la amenaza de inundación, la vulnerabilidad de los sistemas y el riesgo que conlleva al desastre. Con el propósito de entender mejor el riesgo y las variables que intervienen en su

determinación, la metodología es descrita a partir del modelo Presión-Respuesta propuesta por la Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo OCDE (SPR, en inglés) (OECD, 1994). Con base en este modelo, el riesgo es visto desde un enfoque de causa y efecto, en donde interrelacionan tres factores: la presión (la amenaza), el estado (la vulnerabilidad del sistema) y la respuesta (riesgo). En la Figura 8.1 se ilustra el esquema PER modificado para el análisis de riesgo por inundación.

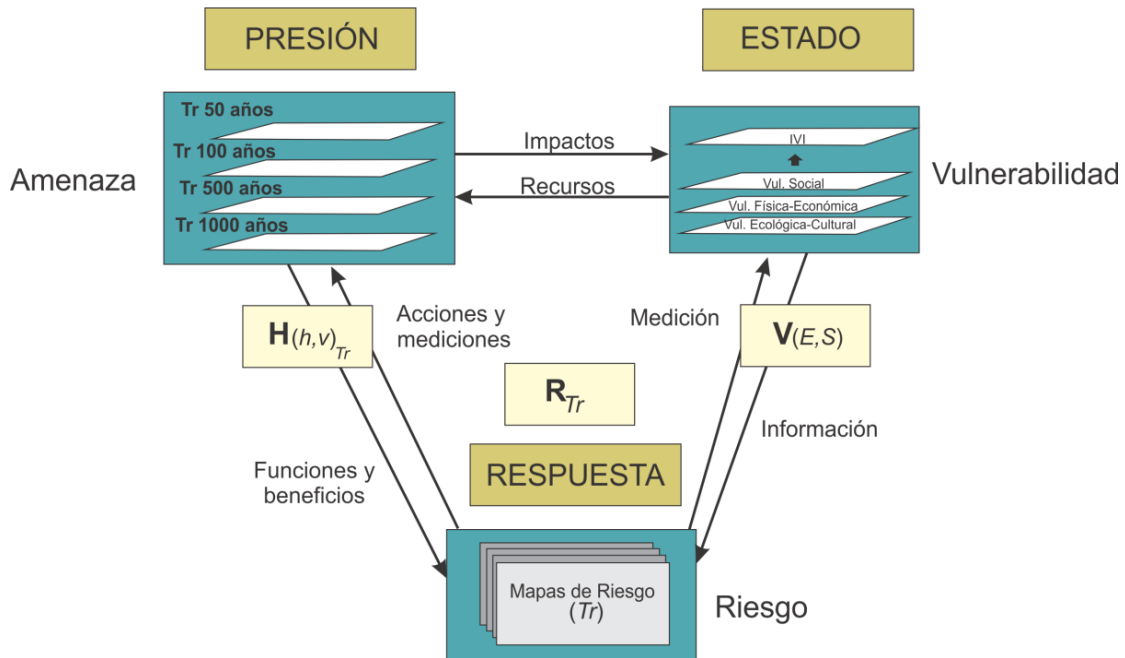


Figura 8. 1 Esquema de integración de las variables para la estimación del riesgo

- **Presión:** Los indicadores de presión describen los eventos (naturales o antrópicos) que alteran el equilibrio del medio ambiente. En el caso de las inundaciones, el factor detonante o la causa inicial del desastre es la amenaza de inundación.
- **Estado:** El indicador de estado consiste en las condiciones actuales del ambiente, sus fortalezas, debilidades y su grado de exposición frente a una presión. En este sentido, el estado del sistema está representado por la vulnerabilidad del sistema en las dimensiones social, físico, económico, ecológico y cultural.
- **Respuesta:** La respuesta determina las consecuencias de la amenaza sobre un sistema vulnerable, es decir, definiendo el grado en que un sistema responde a los cambios en el ambiente. En este análisis, el indicador de respuesta se encuentra determinado por el nivel del riesgo del ambiente ante la inundación.

Conforme a lo anterior, la relación entre estos tres parámetros se da a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo} (t) = f (\text{Amenaza} (t) \times \text{Vulnerabilidad}) \quad (8.1)$$

Donde t es el periodo de retorno de la amenaza. El nivel de riesgo se determina a través del intervalo de clases del producto entre la amenaza y la vulnerabilidad. Estos intervalos se distribuyen en cinco niveles de riesgo (Muy Alto, Alto, Medio, Bajo, Muy Bajo). En la [Figura 8.2](#) se muestra el nivel de riesgo en función de los niveles de amenaza y vulnerabilidad.

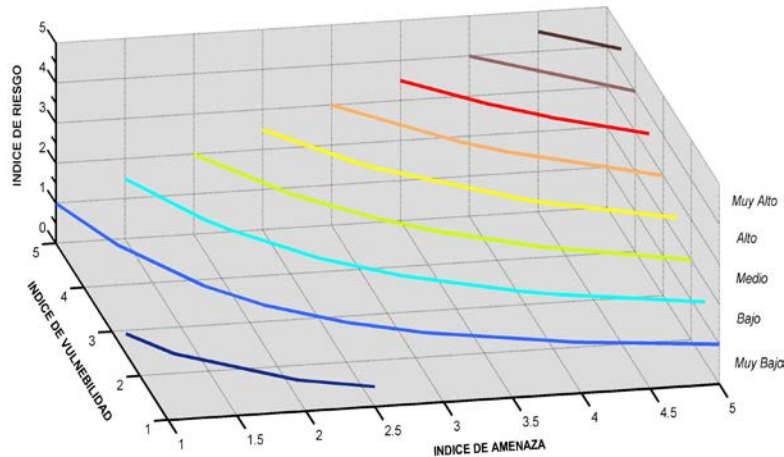


Figura 8.2 Relación entre riesgo y vulnerabilidad para la determinación del riesgo

Con el propósito de estimar el riesgo, el procesamiento de los datos de amenaza y vulnerabilidad de la cuenca, se llevó a cabo con base en el empleo de un Sistema de Información Geográfica (SIG), de tal suerte que las operaciones entre diversas capas de información fuera posible. Este procedimiento, permitió elaborar un mapa de superficie de los niveles de riesgo para cada periodo de retorno analizado. A continuación se muestran los resultados obtenidos de este análisis.

8.3 RESULTADOS

8.3.1 RIESGO DE INUNDACIÓN PARA UN ESCENARIO DE 50 AÑOS PERIODO DE RETORNO

La [Figura 8.3](#) presenta el mapa de riesgo en la cuenca baja del río Tonalá calculado para un escenario de inundación definido por un periodo de 50 años, tal y como se observa en la [Tabla 8.1](#) la distribución del riesgo en las dimensiones de análisis es muy diversa. En los sistemas sociales por ejemplo, son muy pocas las localidades que presentan riesgo a la inundación. La distribución del riesgo en las localidades afectadas, muestra que alrededor de 2250 habitantes presentan algún nivel de riesgo. Los sistemas económicos y físicos son los más perjudicados bajo este escenario. En las zonas de extracción petrolera, más del 30% del área de la cuenca destinada para tal fin, presenta niveles altos de riesgo. Por otro lado, la infraestructura carretera presenta un alto nivel de riesgo en alrededor de 25 kilómetros de longitud de vía.

CAPITULO 8. RIESGO

Respecto a la dimensión ecológica y cultural, la inundación afecta de una mayor manera a los componentes faunísticos presentes en la cuenca. En dicho sector, cerca de un 36% presenta un nivel alto de riesgo y un 31% un nivel medio. En contraste, los componentes florísticos presentan en su mayoría, un nivel de riesgo en niveles bajos y muy bajos.

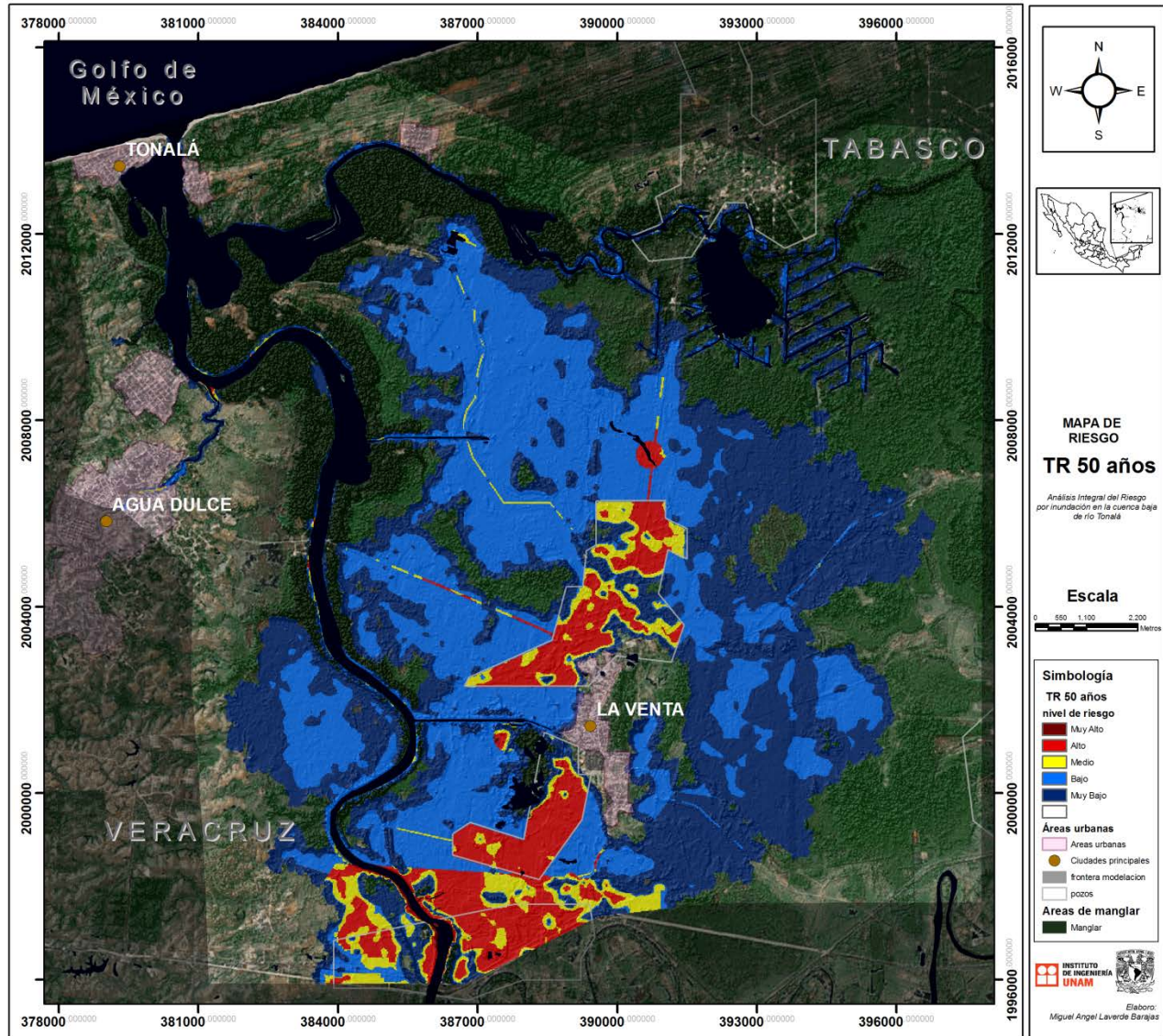


Figura 8. 3 Mapa de riesgo de inundación de TR= 50 años para la cuenca baja del río Tonalá

Tabla 8. 1 Distribución del riesgo de inundación para Tr=50 años

SISTEMA TR=50años		1-Muy Bajo	2-Bajo	3-Medio	4- Alto	5- Muy Alto
SOCIALES	Población No. Hab.	867 hab.	163 hab.	292 hab.	895 hab.	23 hab.
FÍSICOS	Infra. vial primaria km (incl. Elec y/o gas)	25.45km	22.91km	9.78km	16.41km	-
	Infra. vial secundaria km	10.78km	22.23km	16.27km	7.72km	-
ECONÓMICOS	Extracción petrolera km ²	3.187 (10.8%)	1.222 (4.2%)	3.811 (12.9%)	9.212 (31.3%)	-
	Agricultura km ² (A.Temporal / Past. cultivados)	0.359 (1.37%)	0.222 (0.85%)	0.029 (0.11%)	-	-
		14.093 (22.95%)	0.537 (0.87%)	0.464 (0.76%)	0.450 (0.73%)	-
ECOLOGICOS	Fauna km ² (Biodiversidad)	1.201 (22.68%)	0.365 (6.89%)	1.679 (31.71%)	1.878 (35.48%)	-
	Flora km ² (manglar/selva)	4.684 (14.89%)	1.002 (3.18%)	0.079 (0.25%)	-	-
		36.861 (37.74%)	18.007 (18.44%)	0.128 (0.13%)	-	-
CULTURALES	Zonas arqueológicas	-	-	-	-	-

8.3.2 RIESGO DE INUNDACIÓN PARA UN ESCENARIO DE 100 AÑOS PERIODO DE RETORNO

La [Figura 8.4](#) ilustra los resultados obtenidos bajo el forzamiento de una avenida con periodo de retorno de 100 años, los resultados indican que el nivel de riesgo abarca una mayor extensión dentro de la cuenca en comparación al escenario de TR=50 años, sin embargo, los valores de intensidad no se modifican considerablemente ([ver](#)). La [Tabla 8.2](#) presenta la distribución del riesgo en cada dimensión de análisis, en este caso, los niveles de riesgo en la dimensión social no presentan un incremento significativo en relación al número de personas expuestas. La población identificada con algún de estado de riesgo es de alrededor 2300 habitantes, de los cuales 918 se encuentran en riesgo alto y muy alto. La infraestructura vial primaria y secundaria (incluida los sistemas de conducción eléctrica y/o gas) es afectada en por lo menos 140 km de longitud de vía. Del total del vía afectada, el 20% corresponde a niveles de riesgo alto.

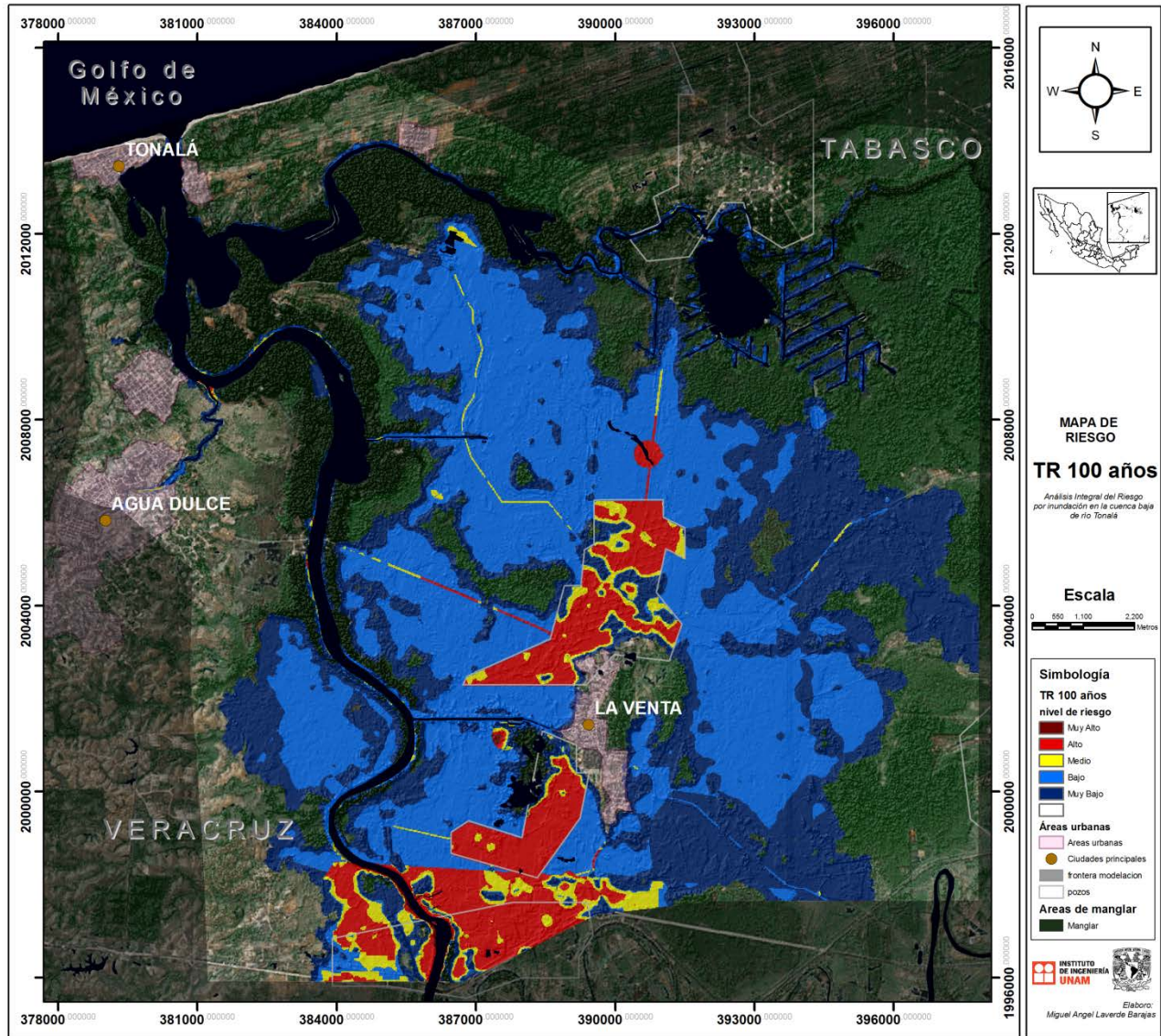


Figura 8. 4 Mapa de riesgo de inundación de TR= 100 años para la cuenca baja del río Tonalá

Tabla 8. 2. Distribución del riesgo de inundación para Tr=100 años

SISTEMA TR=100 AÑOS		1-Muy Bajo	2-Bajo	3-Medio	4- Alto	5- Muy Alto
SOCIALES	Población	885hab.	169 hab.	299 hab.	895 hab.	23 hab.
	No. Hab.					
FÍSICOS	Infra. vial	22.0km	23.7km	10.5km	19.2km	-
	Primaria km (incl. Elec y/o gas)					
ECONÓMICOS	Infra. vial	13.0km	23.7km	16.9km	8.56km	-
	secundaria km					
ECONÓMICOS	Extracción	2.736	1.122	2.896	10.864	-
	petrolera km ²	(9.3%)	(3.8%)	(9.8%)	(36.8%)	
	Agricultura km ²	0.362	0.223	0.03	-	-
	(A.Temporal / Past. cultivados)	21.069	0.787	0.360	0.679	-
		(34.3%)	(1.28%)	(0.59%)	1.11%	

SISTEMA TR=100 AÑOS		1-Muy Bajo	2-Bajo	3-Medio	4- Alto	5- Muy Alto
ECOLOGICOS	Fauna km ² (Biodiversidad)	1.005 (18.11%)	0.302 (5.43%)	1.511 (27.23%)	2.609 (47.01%)	-
	Flora km ² (manglar/selva)	5.215 (16.1%)	1.757 (5.42%)	0.301 (0.93%)	-	-
		29.118 (29.68%)	30.324 (30.91%)	0.203 (0.21%)	-	-
CULTURALES	Zonas arqueológicas	-	-	-	-	-

La afectación de la inundación de TR=100 años, en los sistemas económicos y ecológicos muestra un 37% de riesgo alto en las zonas de extracción petrolera y un 1% de riesgo alto en sistemas agropecuarios (Pastizales cultivados). La fauna de la cuenca es afectada en un 98%, de los cuales el 47% presenta un nivel de riesgo alto. La zona arqueológica de la Venta no presenta ningún nivel de riesgo bajo este escenario.

8.3.3 RIESGO DE INUNDACIÓN PARA UN ESCENARIO DE 500 AÑOS PERIODO DE RETORNO

Los resultados correspondientes al escenario de riesgo por inundación inducido por una avenida con periodo de retorno de 500 años son presentados en la [Figura 8.5](#). En esta caso se presenta en todas las zonas, una intensificación de los niveles de riesgo identificados en el escenario de Tr=100 años. La [Tabla 8.3](#) muestra la distribución del riesgo en cada dimensión de análisis, reportándose un incremento en la parte social. Este se verifica en los 2700 habitantes registrados en riesgo, de los cuales 1080 presentan niveles de riesgo alto y muy alto. Con respecto al riesgo asociado a la infraestructura vial, alrededor de 30 km de longitud de vía primaria y secundaria presentan niveles de riesgo alto, 43 km niveles medios, 46 km niveles bajos y 30 km niveles muy bajos. El riesgo estimado en los sistemas económicos indica un fuerte impacto de la inundación en las zonas de extracción petrolera. El porcentaje de riesgo alto en este sector supera el 40% del total del área destinada para dicho fin. En los sistemas agrícolas el riesgo ante inundación es bajo. Cerca del 95% del área agrícola en estado de riesgo (agricultura temporal y pastizales cultivados) corresponde a niveles bajos y muy bajos de riesgo de inundación. La dimensión ecológica presenta, al igual que los escenarios de inundación anteriores, un mayor nivel de impacto en la fauna de la cuenca. Bajo este escenario, los niveles altos de vulnerabilidad afectan al 66% del total del área. En el componente de flora, la inundación afecta a casi 70 km² de áreas de bosque y manglar. Del total del área afectada, el 36.47% corresponde a niveles de riesgo muy bajo, 63% bajo y solo 0.6% al nivel medio.

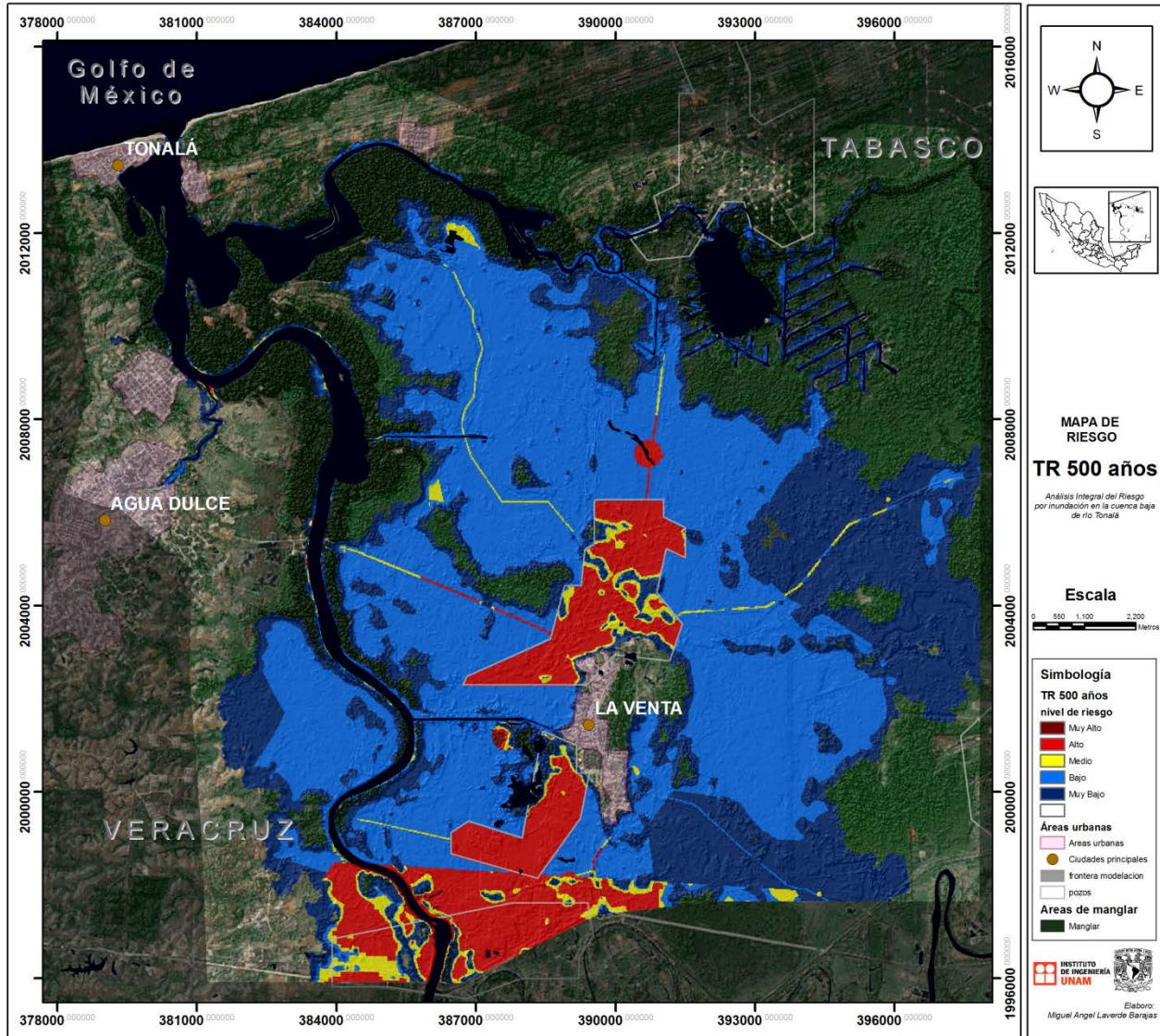


Figura 8. 5 Mapa de riesgo de inundación de TR= 500 años para la cuenca baja del río Tonalá

Tabla 8. 3.. Distribución del riesgo de inundación para Tr=500 años

SISTEMA 500 TR AÑOS		1-Muy Bajo	2-Bajo	3-Medio	4- Alto	5- Muy Alto
SOCIALES	Población No. Hab.	1169 hab.	124 hab.	264 hab.	1080 hab	101 hab.
	FÍSICOS	Infra.vial Primaria km (incl. Elec y/o gas)	17.4km	22.27km	22.42km	21.52km
Infra. vial secundaria km		12.828km	23.85km	20.29km	9.62km	-
ECONÓMICOS	Extracción petrolera km2	2.049 (6.9%)	0.813 (2.8%)	2.347 (7.9%)	12.653 (42.9%)	-
	Agricultura km2 (A.Temporal / Past. cultivados)	0.363 (1.39%)	0.261 (0.99%)	0.03 (0.11%)	-	-
		26.448 (43.06%)	0.952 (1.55%)	0.618 (1.01%)	0.858 (1.40%)	-

SISTEMA 500 TR AÑOS		1-Muy Bajo	2-Bajo	3-Medio	4- Alto	5- Muy Alto
ECOLOGICOS	Fauna km2 (Biodiversidad)	0.642 (12.15%)	0.279 (5.28%)	0.838 (15.85%)	3.478 (65.8%)	-
	Flora km2 (manglar/selva)	4.930 (15.65%)	2.651 (8.41%)	0.327 (1.04%)	-	-
		20.012 (21.1%)	40.337 (42.54%)	0.129 (0.14%)	-	-
CULTURALES	Zonas arqueológicas	-	-	-	-	-

8.3.4 RIESGO DE INUNDACIÓN PARA UN ESCENARIO DE 1000 AÑOS PERIODO DE RETORNO

Por último, la [Figura 8.6](#) presenta los resultados para el caso más extremo de los que se simularon en este trabajo de investigación. En general, el panorama de riesgo de inundación ante el máximo escenario dado por $Tr=1000$ años, presenta las mayores afectaciones en los sistemas económicos (petróleo) y ecológicos (fauna) de la cuenca. El resumen de la distribución del riesgo en este caso se presenta en la [Tabla 8.4](#), en la que para la dimensión social se reportan 2800 habitantes riesgo dentro de la zona de estudio. De estos habitantes, 1240 presentan un riesgo alto y muy alto ante la inundación. En la parte económica, el riesgo se distribuye de la siguiente manera: para las zonas de explotación petrolera, el 44% presenta nivel alto, el 8% un nivel medio y el 11% presenta niveles bajos y muy bajos de riesgo. En el sector agrícola el porcentaje de riesgo lo domina los niveles bajos con un 94% del total del área en riesgo para este sector, y solo un 6% para niveles medios. De acuerdo a los resultados respecto a las dimensiones ecológica y cultural, se registra un riesgo afecta más de 5 km² de fauna y 70 km² de extensión de flora. Del total del área de fauna afectada, el 70% corresponde a niveles de riesgo alto, 15% medio, 5% bajo y 10% muy bajo. La zona arqueológica presente en la cuenca no presenta ningún nivel de riesgo bajo este escenario.

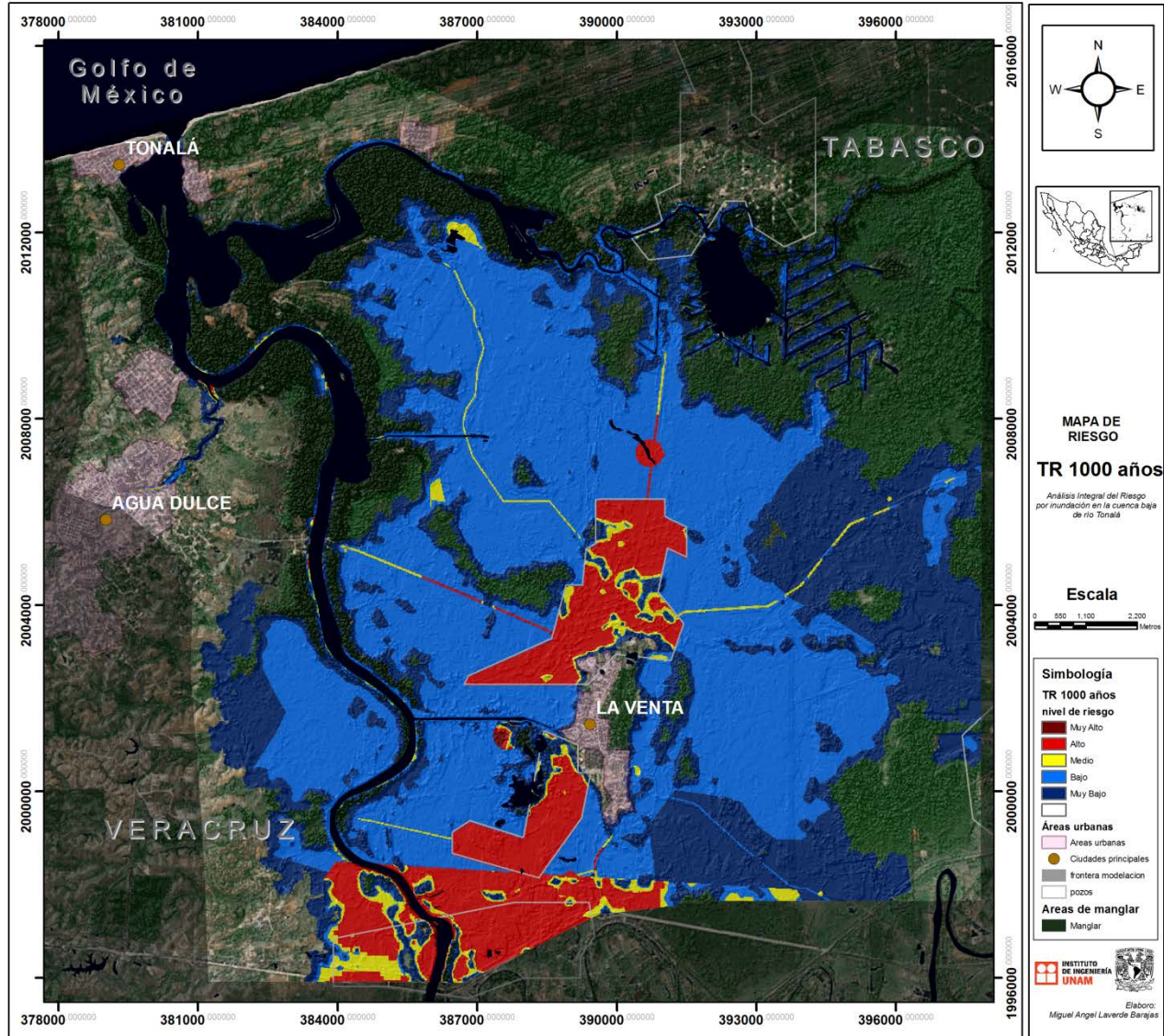


Figura 8. 6 Mapa de riesgo de inundación de TR= 1000 años para la cuenca baja del río Tonalá

Tabla 8. 4. Distribución del riesgo de inundación para Tr=1000 años

SISTEMA 1000 TR AÑOS		1-Muy Bajo	2-Bajo	3-Medio	4- Alto	5- Muy Alto
SOCIALES	Población	1204 hab.	145 hab.	245 hab.	1131 hab	111 hab.
	No. Hab.					
FÍSICOS	Infra. vial primaria km (Incl. Elec y/o gas)	18.7km	22.39km	27.41km	23.8km	-
	Infra. vial secundaria km	11.69km	26.65km	21.98km	9.92km	-
ECONÓMICOS	Extracción petrolera km ²	2.335 (7.9%)	0.866 (2.9%)	2.342 (7.9%)	13.00 (44.1%)	-
	Agricultura km ² (A.Temporal / Past. cultivados)	0.369 (1.41%)	0.271 (1.04%)	0.031 (0.12%)	-	-
		29.354 (47.79%)	0.990 (1.61%)	0.77 (1.25%)	0.890 (1.45%)	-

SISTEMA 1000 TR AÑOS		1-Muy Bajo	2-Bajo	3-Medio	4- Alto	5- Muy Alto
ECOLOGICOS	Fauna km ² (Biodiversidad)	0.514 (9.74%)	0.264 (5.00%)	0.764 (14.96%)	3.691 (69.88%)	-
	Flora km ² (manglar/selva)	4.792 (15.23%)	2.973 (9.45%)	0.371 (1.18%)	-	-
		19.047 (20.12%)	42.638 (45.05%)	0.146 (0.15%)	-	-
CULTURALES	Zonas arqueológicas	-	-	-	-	-

8.4 CONCLUSIONES

En este capítulo se presentaron los resultados del análisis del riesgo, a partir de un modelo de causa-respuesta, empleado en diversas dimensiones de análisis de tal suerte que se examinó su estructura, propiedades y funciones con el fin de conocer su proporcionalidad en la construcción del riesgo. Los tres elementos estudiados son: la amenaza como un indicador de presión; la vulnerabilidad como el indicador del estado del sistema a la inundación; y el riesgo, definido como la respuesta del sistema a la amenaza. A partir del análisis presentado en este capítulo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Ante cuatro escenarios de amenaza, la distribución del riesgo a lo largo de la zona de estudio afecta en mayor medida la zona este de la cuenca baja del río Tonalá. Los sistemas más afectados fueron las zonas de explotación petrolera y los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad. En cuanto al riesgo en la población, las localidades más afectadas se encuentran concentradas en la zona periferia del municipio La Venta en el Estado de Tabasco. Para la infraestructura vial primaria y secundaria el nivel de riesgo para todos los escenarios se encuentra entre medio y alto.

En general las zonas de manglar, bosque, y áreas agrícolas tanto de agricultura temporal como de pastizales cultivados presentan un nivel de riesgo bajo. Este nivel de riesgo se encuentra presente en los cuatro escenarios de amenaza modelados. En la zona arqueológica de la cuenca no se presenta ningún nivel de riesgo.

CAPÍTULO 9.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

El trabajo realizado en esta tesis presenta un análisis integral del riesgo para la cuenca baja del río Tonalá. El estudio reconoce que uno de los retos más importantes para los científicos e ingenieros que trabajan con eventos extremos, reside en la estimación adecuada de su probabilidad de ocurrencia, severidad, duración, así como su ubicación. En este sentido, el trabajo realizado acepta que a pesar de que el conocimiento científico formal, está construido sobre hipótesis y juicios; y que éste tiene asociada una gran cantidad de incertidumbre, es necesario transitar hacia un modelo preventivo del riesgo. Es decir, la prevención toma un rol decisivo durante el análisis del mismo.

Por ello se evalúa de forma integral, con el mejor conocimiento y datos disponibles, los efectos que las inundaciones producen sobre la cuenca baja del río Tonalá. En este enfoque se plantea una cascada de modelos en el que se realiza la simulación hidrológica de los forzamientos (lluvia y escurrimiento) y su propagación hidrodinámica al interior de la cuenca. Así mismo, bajo una visión holística del problema, se descompone la vulnerabilidad con n base en la fragilidad ante la inundación en diversas dimensiones a saber: física, social, económica, ambiental y cultural, considerando su interacción con el grado de exposición al que se encuentran sujetos.

Para el análisis de riesgo se utilizó un modelo de presión estado y respuesta, con el propósito de integrar los escenarios de amenaza y vulnerabilidad. A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se rescatan las siguientes conclusiones generales:

- En el análisis de lluvia se pudo comprobar que la cuenca baja del río Tonalá es fuertemente influenciada por fenómenos hidrológicos extremos, como los son los ciclones tropicales y frentes fríos, presentes durante los meses de junio a octubre. Estos eventos

CAPITULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

son determinantes en la estimación de los niveles de intensidad de avenidas de diseño del río.

- La baja permeabilidad del suelo producto de su origen fluvial, combinada con la reducida pendiente, hacen que el comportamiento del escurrimiento en la cuenca presente un alto tiempo de concentración. En las avenidas de diseño de 50, 100, 500 y 1000 años periodo de retorno, ante ocho días de lluvia intensa, los gastos pico de lluvia en el Río Tonalá se encuentran entre los 1000 y los 1600 m³/s. El tiempo de drenaje de la cuenca bajo estas intensidades es de aproximadamente un mes.
- En la modelación hidráulica de la amenaza, la distribución de la inundación toma dirección noreste inundando la mayor parte de las zonas bajas en la cuenca. Bajo las condiciones dadas por los escenarios de Tr=50 y Tr=100 años, los niveles de amenaza se encuentran entre bajo y alto afectando con una mayor intensidad la región media de la cuenca. Por otro lado bajo los escenarios de Tr=500 y Tr=1000 años, los niveles de amenaza se encuentran entre medio y muy alto, con una mayor proporción de la intensidades altas. Notablemente, los sistemas que presentan una mayor afectación son las áreas de explotación petrolera y las zonas de interconexión municipal y estatal. En las regiones urbanas de la cuenca las afectaciones se encuentran en las áreas limítrofes del municipio de La Venta en el Estado de Tabasco.
- Las características geomorfológicas de la cuenca y su ubicación geográfica, hacen que la zona de estudio presente una vulnerabilidad natural a la inundación. Esta vulnerabilidad es intensificada por el nivel de fragilidad intrínseca de los sistemas ante la inundación. Conforme al nivel de vulnerabilidad, los sistemas que sobresalen en relación a su alto grado de vulnerabilidad son las zonas de extracción petrolera y algunos tipos de infraestructura vial para el caso de los sistemas físico-económicos. En el caso de los sistemas sociales, las zonas periféricas al municipio de La Venta, y en los sistemas ecológicos y culturales, las áreas prioritarias terrestres para la conservación de la biodiversidad y algunas áreas ribereñas de manglar.
- El riesgo, evaluado ante cuatro escenarios de amenaza, permitió identificar las zonas de mayor afectación ante inundaciones extremas. En este marco, las áreas que presentan un mayor riesgo de inundación son las zonas de extracción petrolera y las áreas prioritarias terrestres para la conservación de la biodiversidad. Con respecto al riesgo estimado sobre la población, el análisis identificó que las zonas urbanas que presentan una mayor afectación ante la inundación son las localidades rurales ubicadas en la periferia a La Venta.

RECOMENDACIONES

- La concepción integral de la amenaza permite conocer de una mejor manera los forzamientos climáticos que intervienen en un evento de inundación, reduciendo a su vez las fuentes de incertidumbre epistémica. Sin embargo, aun se presentan diversas

incertidumbres producto de su enfoque determinístico, las cuales deberán ser analizadas en futuras investigaciones.

- Es necesario tomar en cuenta que la valoración de la vulnerabilidad es un proceso dinámico que va cambiando en torno a los patrones sociales, y como estos afectan su ambiente circundante. la influencia humana y tecnológica puede cambiar la gestión del riesgo en una cuenca, el cambio en los patrones económicos, como son las prácticas agrícolas y uso del suelo, conllevan a una modificación del todo el proceso de gestión. En este marco, el análisis de vulnerabilidad presentado en esta tesis, debe ser tomado como índice restringido de la vulnerabilidad en la cuenca baja del río Tonalá, el cual deberá ser actualizado a los continuos cambios de los sistemas que lo componen.
- Un parámetro fundamental en el análisis integral del riesgo, consiste en la calidad de los datos disponibles de la cuenca. En la identificación de la amenaza, la estimación del nivel de inundación ante avenidas extremas se baso en datos de campo y percepción remota de alto detalle, los cuales permitieron un óptimo análisis de la amenaza. Para el caso de la vulnerabilidad, la falta de un mayor detalle en los datos económicos y sociales, imposibilito un análisis más detallado de estos sistemas. Una recomendación en este campo, consiste en la búsqueda de datos de mayor detalle de características de los sistemas sociales y económicos de la cuenca, esto con el fin de mejorar la precisión en el análisis en estos dos campos.
- Los parámetros iniciales utilizados para la modelación numérica, tanto hidrológica como hidráulica, son muy sensibles a cambios en el tipo y calidad de la información base, dado que esta tiene un impacto directo sobre resultados que se obtienen. Un mecanismo idóneo para reducir el grado de fluctuación de los parámetros de entrada, es el análisis de sensibilidad del modelo. Este análisis, permite ver el comportamiento individual de las variables de entrada en relación al resultado de la modelación, con el propósito de reducir la franja inicial de los parámetros utilizados en el modelo, y por ende, su nivel de incertidumbre.
- Al igual que la mayoría de los estudios del riesgo, los resultados mostrados deben tomarse como una variable indicativa de la cuenca ante eventos de inundación. Si bien la construcción del análisis se realizo bajo parámetros detallados de modelación de la amenaza y la vulnerabilidad, los resultados deben ser considerados más como un instrumento de gestión que un mapa de afectación de una ocurrencia futura en la región.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En el marco de la gestión del riesgo, el trabajo presentado abre la puerta a numerosas investigaciones sobre el tema con el propósito de complementar y extender dicho análisis. Entre estas investigaciones se proponen las siguientes líneas de investigación:

CAPITULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

- El riesgo en este trabajo es analizado como una condición estática de las condiciones actuales de la cuenca. No obstante, es necesario analizar el dinamismo natural de las variables que lo componen. Este escenario abre un marco de estudio para la investigación del riesgo ante la variación de los parámetros que componen el riesgo como son: la amenaza como una condición fluctuante producto del cambio climático; y la vulnerabilidad, producto de los constantes cambios sociales y económicos que se presentan en la región.
- Bajo esta misma línea de investigación, es evidente la importancia de las áreas de manglar sobre el comportamiento hidráulico del río Tonalá, sin embargo, la deforestación de estas áreas repercute en la intensificación de la amenaza de inundación. Con el propósito de estudiar este fenómeno, una línea futura de investigación consistiría en analizar la amenaza bajo diferentes escenarios de deforestación de manglar, y como estos repercuten en el nivel de riesgo de los sistemas de la cuenca.
- En la evaluación del riesgo de inundación, un componente muy importante consiste en la valorización económica de la vulnerabilidad de los sistemas presentes en la cuenca. Por tal motivo, un trabajo que complementaría este estudio, consistiría en la valoración económica del grado de vulnerabilidad de los sistemas físicos, sociales, económicos, ecológicos y culturales ante la inundación.
- Un análisis no incorporado en este estudio, y en cual puede determinar la eficiencia de los mecanismos de control y mitigación de la amenaza consistiría en el análisis y evaluación del riesgo residual producto de obras diseñadas para el control de avenidas. como por ejemplo construcción de diques o bordos.
- Una de las principales aportaciones de este trabajo, consiste en convertirse en un instrumento de gestión para el desarrollo de diversas metodologías de prevención y atención de desastres para la cuenca baja del río Tonalá. Entre ellas se encuentran los programas de emergencia y rescate de la población afectada, los sistemas de logística para la asistencia humanitaria, y lo planes de reconstrucción de zonas afectadas por la inundación.

Como reflexión final de esta tesis, quedó de manifiesto que es necesario evaluar de forma integral, con el mejor conocimiento disponible, los efectos que las inundaciones producen sobre los sistemas naturales. Cabe mencionar que la generación de mejores estrategias para el manejo del riesgo, pasa de manera forzosa por una mejor comunicación entre la academia, el gobierno y la sociedad.

En países en vías de desarrollo, la predicción adecuada de eventos extremos (ej. inundaciones) es trascendental para permitir una mejor gestión de los recursos disponibles, que por otro lado están limitados debido la alta vulnerabilidad de la sociedad durante su incidencia. La exposición continua a eventos extremos no anticipados, es un factor determinante en la persistencia de la pobreza y la desigualdad social.

BIBLIOGRAFÍA

Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'Connell, P., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1), 61-77.

Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., & Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87(1), 45-59.

Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281.

Alkema, D. (2007). Simulating floods: On the application of a 2D-hydraulic model for flood hazard and risk assessment. ITC dissertation(147).

Allen, K. (2003). 11 Vulnerability reduction and the community-based approach. *Natural Disaster and Development in a Globalizing World*, 170.

Alvarez, Irving. (2011) Evaluación de la incertidumbre en la modelación numérica de flujos de inundación en ríos. Tesis profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. México D.F

Aparicio Mijares, F.J. (1999). Fundamentos de hidrología se superficie. Mexico, Ed. Limusa, 303 pp

Apel, H., Aronica, G., Kreibich, H., & Thielen, A. (2009). Flood risk analyses—how detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1), 79-98.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.

ASEAN (2009) Agreement on Disaster Management and Emergency Response: Building disaster-resilient nations and safer communities. Work Programme for 2010 – 2015

Barradas O., A. C.; Error! Marcador no definido. **y Z. Chavez A., (1987).** La poliquetofauna del río Tonalá, Ver., México. *Res. IX Congr. Nal. Zool.* cartel p60.

Barradas O., A. C.; Error! Marcador no definido., **(1988).** La poliquetofauna béntica del río Tonalá, Veracruz, México. Tesis profesional. Fac. Biol. U. V. 115p

Beard, L. R. (1963). Flood control operation of reservoirs. *J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Eng*, 89, 1-23.

Bergström, S., & Singh, V. (1995). The HBV model. *Computer models of watershed hydrology.*, 443-476.

Beven, K. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1-12.

BIBLIOGRAFÍA

- Beven, K. (2006).** A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of Hydrology*, 320(1), 18-36.
- Brooks, N. (2003).** Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework. Tyndall Centre for Climate Change Research Working Paper, 38, 1-16.
- Bozada R., L. M., J. A. Garcia N., R. Guillaumin E., S. Villegas B., S. Yopez A., S. Moreno T., F. Cancino C., A. Casanova C. y A. Monroy, (1983).** La macrofauna del estuario del río Tonalá, Ver., México. *Res. VII Congr. Nal. Zool.* 170p.
- Bozada L. y M. Paez, (1986).** *La fauna acuática del río Tonalá.* Ser. Med. Amb. Coatzacoacoalcos. 7. CECODES. 172p
- Burkham, D. (1988).** Methods for delineating flood-prone areas in the Great Basin of Nevada and adjacent states. Geological Survey water-supply paper.
- Burnash, R., & Singh, V. (1995).** The NWS river forecast system-catchment modeling. Computer models of watershed hydrology., 311-366.
- Campos Aranda, D. F. (2007).** Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento. 440p. Editorial Campos, San Luís de Potosí, México.
- Carrera-Hernández, J., & Gaskin, S. (2007).** Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 336(3), 231-249.
- Castillo-Campos, G., Medina Abreo, M. E., Dávila Aranda, P., & Zavala Hurtado, J. A. (2005).** Contribución al conocimiento del endemismo de la flora vascular en Veracruz, México. *Acta Botanica Mexicana*(73), 19-57.
- CENAPRED, (2008).** Tabasco: Características e Impacto Socioeconómico de las inundaciones provocadas a finales de Octubre y comienzos de Noviembre de 2007 por el frente frío Número 4. Resumen. Secretaría de Gobernación. México DF
- CENAPRED (2010),** Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la republica mexicana en el año 2009. Secretaria de Gobernación .México D.F
- CEPAL. (2011)** Tabasco: Características E Impacto Socioeconómico De Las Lluvias Extremas De 2008. Naciones Unidas, México, D. F
- Cerrats CH., A. L. (1986).** Contaminación por hidrocarburos del petróleo en el Río Coatzacoalcos y áreas adyacentes: sedimentos y organismos. Tesis profesional. Fac. de Cienc. UNAM. 60 p.
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA CONAGUA, (2010).** Atlas digital del Agua México 2010, Sistema Nacional de Información del Agua
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2012)** Libro Blanco CONAGUA-OI Programa Integral Hídrico de Tabasco (PIHT). México DF
- Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la biodiversidad CONABIO (1999)** Uso del suelo y vegetación modificado por CONABIO. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad .Ciudad de México México
- Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la biodiversidad CONABIO (2008)** Distribución y extensión reciente de la cobertura de los manglares de México. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México México

Comisión Nacional para el conocimiento y Uso de la biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional de Áreas Nacionales Protegidas (CONAP). The Natural Conservancy –Programa México (TNC). Pronatura (2007). “Sitios Prioritarios terrestres para la conservación de la biodiversidad” Escala 1:1000000 D.F. México

Committee on floodplain mapping technologies, NRC. (2007). Elevation Data for Floodplain Mapping. National Academic Press.

Crawford, N. H., & Linsley, R. K. (1966). Digital simulation in hydrology's stanford watershed model 4.

Cutter, S. L. (1996). Vulnerability to environmental hazards. *Progress in human geography*, 20, 529-539.

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards*. *Social science quarterly*, 84(2), 242-261.

Change, I. C. (2001). Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK, 1000.

Defra and Agency (2005) *Framework and Guidance for Assessing and Managing Flood Risk for New Development*, Flood Risk Assessment Guidance for New Development, FD2320 Technical Report 2,

DEFRA, (2005). Making space for water: Taking forward a new Government strategy for flood and coastal erosion risk management in England.

Demeritt, D., Cloke, H., Pappenberger, F., Thielen, J., Bartholmes, J., & Ramos, M.-H. (2007). Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting. *Environmental Hazards*, 7(2), 115-127.

Demyanov, V., Kanevski, M., Chernov, S., Savelieva, E., & Timonin, V. (1998). Neural network residual kriging application for climatic data. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 215-232.

DHI, (2011). MIKE 21 FM Flow model, Scientific documentation. DHI Group, Horslhome

Di Baldassarre, G., & Uhlenbrook, S. (2012). Is the current flood of data enough? A treatise on research needs for the improvement of flood modelling. *Hydrological Processes*, 26(1), 153-158.

Dominguez, M., Esquivel, G., Baldemar, M., Mendoza, R., & Argenis, J. (2008). Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento. Serie Manuales, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Easterling, D. R., Evans, J. L., Groisman, P. Y., Karl, T. R., Kunkel, K. E., & Ambenje, P. (2000). Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 417-425. doi: Doi 10.1175/1520-0477(2000)081<0417:Ovatie>2.3.Co;2

Environment Agency - National Centre for Environmental Data and Surveillance (1997). *Evaluation of the LIDAR technique to produce elevation data for use within the Agency*.

Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2011). ArcGIS Desktop: Release 10, Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA, USA,

Escalante C. y Reyes, L. (2005). “Técnicas Estadísticas en Hidrología” 2ª Edición. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 298p. México.

Faber, R. (2006). Flood risk analysis: Residual risks and uncertainties in an Austrian context. Dissertation, University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 143.

BIBLIOGRAFÍA

Fernández, D., Barquín, J., Álvarez-Cabria, M., & Peñas, F. (2012). Quantifying the performance of automated GIS-based geomorphological approaches for riparian zone delineation using digital elevation models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(10), 3851-3862.

Fondo para la Prevención Nacional de Desastres FONDEN (2011) “La experiencia de México en la implementación del FONDEN y del FOPREDEN”. Serie de documentos. Semana de riesgos del instituto de ingeniería de la UNAM. Mexico D.F

Fuentes Claudia (2011). Análisis hidrológico en cuencas con información escasa. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México

Fuentes, O.A., De Luna F., Cruz, J.A., Sánchez, J.A., Morales, H.L., Hernández, D.A., Eb, J.E., Morales, A., (2010). Revisión Hidráulica mediante simulación matemática del flujo en los ríos Tonalá, Zanapa, Blasillo y Naranjeño. Capítulo 2 - Plan Hídrico Integral de Tabasco Tercera Etapa Informe Final. Instituto de 475 Ingeniería, UNAM

Füssel, H.-M. (2007). Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17(2), 155-167.

Gallegos M., M. E. (1991). Impacto de las actividades petroleras sobre la vegetación de la cuenca media y baja del río Tonalá, México. Tesis de maestría. Fac. de Ciencias. UNAM. 78 p.

Gómez, M. (1996), Lluvias de diseño. Método de los bloques alternados, Diseño y operación de redes de colectores de aguas de lluvia, Quito.

Grayson, R. B., Moore, I. D., & McMahon, T. A. (1992). Physically based hydrologic modeling: 1. A terrain-based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, 28(10), 2639-2658.

Green, W.H. and G.A. Ampt (1911). Studies an soil physics.1. The flow for air and water throught soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24

Green, C., van der Veen, A., Wierstra, E., & Penning-RowSELL, E. (1994). Vulnerability refined: analysing full flood impacts. *Floods across Europe–Flood hazard assessment, modelling and management.* Middlesex University Press, London.

Guenni, L., Degryze, E., & Alvarado, K. (2008). Análisis de la tendencia y la estacionalidad de la precipitación mensual en Venezuela. *Revista Colombiana de Estadística*, 31(1), 41.

Guillaumin E., R.¡Error! Marcador no definido., (1986). Aspectos ecológicos de la ictiofauna del río Tonalá, Veracruz. Tesis profesional. Fac. Biol. U. V. 56 p.

H.-J, Bao, L.-N, Z., Z.-J, L., & HL, C. (2011). Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjiang model for flood forecast. *Advances in Geosciences*, 29(30), 61-67.

Haberlandt, U. (2011). Interpolation of Precipitation for Flood Modelling. *Flood Risk Assessment and Management.*

Hall, J., & Penning-RowSELL, E. C. (2010). 1 Setting the Scene for Flood Risk Management. *Flood risk science and management*, 1.

Hardy, R., Bates, P., & Anderson, M. (1999). The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments. *Journal of Hydrology*, 216(1), 124-136.

Hebb, A., & Mortsch, L. (2007). Floods: Mapping vulnerability in the Upper Thames watershed under a changing climate. Project Report XI, University of Waterloo, 1-53.

Horritt, M., & Bates, P. (2001). Predicting floodplain inundation: rasterbased modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, 15(5), 825-842.

Huang, Y., Wong, P., & Gedeon, T. (1998). Spatial interpolation using fuzzy reasoning and genetic algorithms. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 204-214.

Hutchinson, M. F. (1998a). Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part I: Two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 139-151.

Hutchinson, M. F. (1998b). Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines. Part II: Analysis of topographic dependence. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2(2), 152-167.

International Decade for Natural Disaster Reduction IDNDR (1999). Despite Dedicated Efforts, Number and Cost of Natural Disasters Continue To Rise. Press Release, United Nations International Strategy for Disaster Reduction <http://www.unisdr.org/forum/press3.htm>

International Institute for Land Reclamation and Improvement ILRI (1978) Principios y aplicaciones del drenaje. Tomo III. Estudios e investigaciones. Wageningen, The Netherlands.

International Strategy for Disaster Reduction ISRD (2004a). Living with risk: A global review of disaster reduction initiatives, United Nations Publications, Genf.

International Strategy for Disaster Reduction ISRD (2004b) AFRICA REGIONAL STRATEGY FOR DISASTER RISK REDUCTION: Disaster Risk Reduction for Sustainable Development in Africa. http://www.unisdr.org/files/13093_AFRICAREGIONALDRRSTRATEGYfullPDF.pdf

Jha, A. K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century: World Bank Publications.

Johnson, C. L., Tunstall, S. M., & Penning-Rowsell, E. C. (2005). Floods as catalysts for policy change: historical lessons from England and Wales. *Water resources development*, 21(4), 561-575.

Johnson, C., Penning-Rowsell, E. and Tapsell, S. (2007a) Aspiration and reality: flood policy, economic damages and the appraisal process. *Area*, 39, 214-223.

Johnson, C., Penning-Rowsell, E.C. and Parker, D.J. (2007b) Natural and imposed injustices: the challenges in implementing 'fair' flood risk management policy in England. *Geographical Journal*, 173, 374-390.

Jonkman, S.N. and Penning-Rowsell, E.C. (2008) Human instability in flood flows. *Journal of the American Water Resources Association*, 44, 1-11.

Jones, R., & Boer, R. (2003). Assessing current climate risks Adaptation policy framework: a guide for policies to facilitate adaptation to climate change. UNDP, in review, see <http://www.undp.org/cc/apf-outline.htm>.

Leon A., C. A. Error! Marcador no definido., (1990). Distribución y abundancia del ictioplancton en la zona nerítica bajo la influencia de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá, Veracruz, México. Tesis profesional. Universidad Veracruzana.

Luers, A. L., Lobell, D. B., Sklar, L. S., Addams, C. L., & Matson, P. A. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 13(4), 255-267.

BIBLIOGRAFÍA

Marquez C., G. Marcador no definido., (1986). Composición, abundancia y distribución del ictioplancton en la parte media y baja del estuario del río Tonalá, Veracruz. Tesis profesional. Fac. Biol. U. V. 74 p.

Mason, D. C., Cobby, D. M., Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2003). Floodplain friction parameterization in two-dimensional river flood models using vegetation heights derived from airborne scanning laser altimetry. *Hydrological Processes*, 17(9), 1711-1732.

Mateos M., M. Marcador no definido., **M. Paez R. y J. C. Stivalet C., (1987).** Ecología del zooplancton del estuario del río Tonalá, Veracruz. *Res. II Reunión Indicativa de Actividades Regionales Relacionadas con la Oceanografía (Golfo de México y Mar Caribe Mexicanos)*. p88.

McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. S. (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Cambridge University Press.

McKay, M., Beckman, R., & Conover, W. (2000). A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code. *Technometrics*, 42(1), 55-61.

Messner, F., & Meyer, V. (2006). Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research: Springer.

Nash, J. E. (1959). A note on the Muskingum flood-routing method. *Journal of geophysical research*, 64(8), 1053-1056.

Musall, M., Oberle, P., & Nestmann, F. (2011). Hydraulic Modelling Flood Risk Assessment and Management (pp. 187-209): Springer.

Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., & King, K. (2005). SWAT theoretical documentation version 2005. Blackland Research Center, Temple, TX.

Nielsen, S. A., & Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the Rainfall-Runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology*, 4, 171-190.

Obersteiner, M., Azar, C., Kauppi, P., Möllersten, K., Moreira, J., Nilsson, S., . . . Yamagata, Y. (2001). Managing climate risk. *Science*, 294(5543), 786-787.

Organization of Economic Cooperation and Development OECD (1994) Environmental indicators. OECD core sets. OECD, Paris

Ortega D., M. Marcador no definido., **F. Ramos L. y R. Lecuanda C., (1990).** Distribución de materia orgánica en sedimentos de la plataforma y talud continental adyacente a la desembocadura de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá, Veracruz, México. *Res. II Congr. Cienc. del Mar*. La Habana, Cuba. p193.

Ortiz Pérez (2010) B.2. Geología. Atlas Regional de Impactos Derivados de las Actividades Petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz. Instituto de Geografía. UNAM. México. Pág. 29 -34 <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/629/geologia.pdf>

Pappenberger, F. and Beven, K.J. (2006), Ignorance is bliss: 7 reasons not to use uncertainty analysis, *Water Resources Research*, 42, W05302, doi:10.1029/2005WR004820

Pedrozo-Acuña, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Medellín Mayoral, G., & González Villareal, F. J. (2012a). Evaluation of inundation areas resulting from the diversion of an extreme discharge towards the sea: case study in Tabasco, Mexico. *Hydrological Processes*, 26(5), 687-704.

Pedrozo-Acuña, A., Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., & González Villareal, F. (2012b). Factors controlling flooding at the Tonalá river mouth (Mexico). *Journal of Flood Risk Management*, 5(3), 226-244.

Pedrozo-Acuña A., (2012c). Inundaciones: Evaluación y manejo del riesgo. AGUA en Quintana Roo, Año 2, No.2, Enero-Marzo 2012. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Quintana Roo

Petroleos Mexicanos PEMEX (2007). Memoria de Labores. PEMEX, 2007. Anuario Estadístico. PEMEX, Mexico. 68 pp.

Penning-Rowse E, Johnson C, Tunstall S, Tapsell S, Morris J, Chatterton J, Coker A and Green C (2005) The benefits of flood and coastal defence: techniques and data for 2003 Flood Hazard Research Centre Middlesex University

Penning-Rowse, E., Johnson, C., & Tunstall, S. (2006). 'Signals' from pre-crisis discourse: lessons from UK flooding for global environmental policy change? *Global Environmental Change*, 16(4), 323-339.

Plate, E. J. (2002). Flood risk and flood management. *Journal of Hydrology*, 267(1), 2-11.

Ponce, V. M. (1989). Engineering hydrology: Principles and practices (Vol. 640): Prentice Hall Englewood Cliffs.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente PNUMA, (2002). Global Environment Outlook GEO-3, Capitulo 2-9 desastres pag. 269-300

Ramos L., F. Error! Marcador no definido., M. Ortega D. y R. Lecuanda C., (1990). Esquema descriptivo de la distribución de sedimentos sobre la plataforma y talud continental adyacentes a la desembocadura de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá, Veracruz, México. *Res. II Congr. Cienc. del Mar. La Habana, Cuba* p 194.

Ramos L., F. Error! Marcador no definido. y M. Ortega D., (1990). Sedimentos sobre la plataforma y talud continentales en el área adyacente, a las desembocaduras de los ríos Coatzacoalcos y Tonalá, Veracruz, México. *Res. VIII Cong. Nal. Oceanog.* p29.

Ratto, M., Tarantola, S., and Saltelli, A. (2001). Sensitivity analysis in model calibration: GSA-GLUE approach, *Computer Physics Communication*, 136, 212-224.

Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J.-L., Krebs, P., Mark, O., Schilling, W., Schütze, M., Vanrolleghem, P.A. (2002). Deterministic modelling of integrated urban drainage systems. *Wat. Sci. & Tech.*, 45(3), 81-94.

Reeve, D. E., Horrillo-Caraballo, J., & Pedrozo-Acuna, A. (2010). 16 Handling Uncertainty in Coastal Modelling. *Flood risk science and management*, 336.

Reeve, D.E. (2011), Risk and Reliability, CRC Press, ISBN-10: 0415467551, Taylor & Francis

Refsgaard JC, Storm B, Abbott MB (1996) Comments on 'A discussion of distributed hydrological modelling'. In: Abbott MB, Refsgaard JC (Eds): *Distributed Hydrological Modelling*, Kluwer Academic Publishers, 279-287.

Refsgaard, J. C. (2007). Hydrological modelling and river basin management: GEUS.

Renard, B., D. Kavetski, G. Kuczera, M. Thyer, and S. W. Franks (2010), Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors, *Water Resour. Res.*, 46, W05521, doi:10.1029/2009WR008328.

Rios Q., L. Error! Marcador no definido., (1993). Evaluación de las concentraciones de metales pesados en sedimentos de la plataforma continental de los estados de Veracruz y Tabasco, México. Tesis profesional. ENEP-Zaragoza, UNAM. 93. p.

BIBLIOGRAFÍA

Rodriguez-Rincon, J., Pedrozo-Acufia, A., Mora, R. D., Reeve, D., & Cluckie (2012) I. Probabilistic estimation of flood maps: An ensemble approach. *Flood Risk Management*~ autofilled~, 183.

Rodriguez S., H. ¡Error! Marcador no definido.y **A. V. Botello, (1987)**. Contaminación enterobacteriana en la red de agua potable y en algunos sistemas acuáticos del sureste de México. *Cont. Amb.* 3: 37-53.

Sanchez S. María T., Martínez L Norma (2010) C1 Capacidad instalada y productos petrolíferos y petroquímicos. Atlas Regional de Impactos Derivados de las Actividades Petroleras en Coatzacoalcos, Veracruz. Instituto de Geografía. UNAM. México Pág. 73-78
<http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/629/capacidad.pdf>

Rosgen, D. L. (2002). Applied River Morphology. Second Edition. Wildland Hydrology. Pagosa Springs, Colorado.

Salas Salinas, M., & Jiménez Espinosa, M. (2007). Inundaciones.

Saladié, O., Brunet, M., Aguilar, E., Sigró, J. & López, D. (2005), Datos de precipitación mensual ajustada del sector nororiental de la península ibérica (1850-2000), Technical report, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España.

Schanze, J., Hutter, G., Penning-Rowsell, E., Nachtnebel, H. P., Meyer, V., Koniger, P., Neuhold, C., Harris, T., Kuhlicke, C., and Olfert, A. (2008) Evaluation of Effectiveness and Efficiency of nonstructural measures in Flood Risk Management, in: Managing Flood Risk, Reliability and Vulnerability, Proceedings of the 4th International Symposium on Flood Defence, Toronto, Canada, 67 pp., 6–8 May 2008

Schumann, A. H. (2011). Introduction–Hydrological Aspects of Risk Management Flood Risk Assessment and Management (pp. 1-10): Springer.

Senado de la Republica, Comisión de Asuntos Hidráulicos (2008). Informe de las inundaciones de 2007 en el Estado de Tabasco. Diagnostico Preliminar. México DF

Secretaría de la Defensa Nacional SEDENA (2012). ¿Que es el Plan DN-III-E?. Disponible http://www.sedena.gob.mx/index.php/actividades/plan-dn-iii-e/ique-es-el-plan-dn-iii-e_10/02/2013

Secretaría de la Defensa Nacional SEDENA (2004) Manual del Plan DN-III- E Auxilio a la Población Civil en Casos de Desastre. México, Estado Mayor de la Defensa Nacional.

Sleigh, P., Gaskell, P., Berzins, M., & Wright, N. (1998). An unstructured finite-volume algorithm for predicting flow in rivers and estuaries. *Computers & Fluids*, 27(4), 479-508.

Smith, K. (2012). Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster: Routledge.

Solis S., J. ¡Error! Marcador no definido., (1988). Investigación e informe sobre las principales fuentes de contaminación y algunos efectos sobre los cuerpos de agua en el estado de Veracruz. Tesis profesional. Fac. Biol. U. V. 43 p.

SOPAC/SPC Secretariat of the Pacific Community (SPC) Applied Geoscience and Technology Division (SOPAC) (2005). An Investment for Sustainable Development in Pacific Island Countries Disaster Risk Reduction and Disaster Management: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters A Framework for Action 2005 – 2015. 12th Pacific Regional Disaster Management Meeting, 6th – 8th June 2005 and endorsed by the Leaders at the Thirty-Sixth Pacific Islands Forum, 25 – 27 October 2005

Stirling, A. (2007). Risk, precaution and science: towards a more constructive policy debate. *EMBO reports*, 8(4), 309-315.

Surendran, S., Gibbs, G., Wade, S., & Udale-Clarke, H. (2008). Supplementary note on flood hazard ratings and thresholds for development and planning control purpose—Clarification of Table 13.1 of FD2320/TR2 and Figure 3.2 of FD2321. Environment Agency and HR Wallingford.

Tapsell, S. M., Penning-Rowsell, E. C., Tunstall, S. M., & Wilson, T. (2002). Vulnerability to flooding: health and social dimensions. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1796), 1511-1525.

Tucci, C. E. M. (1993). "Hidrología, Ciencia y Aplicación". Editora da Universidade, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil.

UNISDR (2005). Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres. Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres. 18 a 22 de enero de 2005, Kobe, Hyogo, Japón. A/CONF.206/6

UNISDR (Estrategia Internacional para la Reducción de los desastres de las Naciones Unidas) (2009) Terminología sobre reducción del riesgo de desastres. Ginebra, Suiza

UNISDR ROAS (United Nations Office for Disaster Risk Reduction - Regional Office for Arab States) (2011). The Arab strategy for disaster risk reduction 2020. Final version adopted by the Council of Arab Ministers Responsible for the Environment, resolution # 345, in its 22nd session held at the League of Arab States 19-20 December 2010. 20 p.

United Educational Scientific and Cultural Organization UNESCO (2010) Risk Management Training Handbook: Bureau of Strategic Planning. Paris Francia

USDA, S. (1972). National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology. Washington,DC.

Vidal Q., J. (1985). Crecimiento y aspectos poblacionales del bagre *Arius melanopus* del río Tonalá, Veracruz. Tesis profesional. Fac. Cienc. UNAM. 62 p.

Vidal Q., J. y L. M. Bozada R. (1987). Crecimiento y aspectos poblacionales del bagre *Cathorops melanopus* del río Tonalá, Ver., Res. IX Congr. Nal. Zool. pag. 27.

Vieira A.M, Sales P.R.H Sales y Barreto L,A,L (1987)The Brazilian Electric Sector Experience in Flood Control. V.P, Singh (ed) FLOOD HYDROLOGY. pag 409-418

Villegas-Banderas S., H. Lila P., J. Moreno T., M. E. Olguin V. y Z. Chavez A., (1983). Estrategias alimenticias de la ictiofauna del río Tonalá, Ver., Res. VII Congr. Nal. Zool. 68p.

Webster, P. J., & Hoyos, C. (2004). Prediction of monsoon rainfall and river discharge on 15-30-day time scales. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(11), 1745-1765.

Williams, J. R., & Hann, R. W. (1972). HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resources Research*, 8(1), 79-86.

Wisner, B. (2004). At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters: Psychology Press.

White House (2000). Vulnerabilities and Potential Consequences. White House Initiative on Global Climate Change <http://www.whitehouse.gov/Initiatives/Climate/vulnerabilities.html>

Zhao, D., Shen, H., Tabios III, G., Lai, J., & Tan, W. (1994). Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(7), 863-883.

ANEXO A

PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES

A1 METODOLOGÍA

A1.1 PRUEBA ESTADÍSTICA DE HELMERT:

Esta es la prueba más sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento Hp_i^j de la serie "j" para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$ con respecto de su valor medio $\overline{Hp_i^j}$. ([Escalante - Reyes, 2005](#)).

Si una desviación de cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una secuencia (s), de lo contrario se considera un cambio c.

La serie se considera homogénea si se cumple:

$$\sqrt{n_j - 1} \leq (s - c) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (\text{A.1})$$

A1.2 PRUEBA ESTADÍSTICA T DE STUDENT:

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, esta prueba es muy útil.

Si se considera una serie Hp_i^j para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$, para el sitio "j", la cual se divide en dos conjuntos de tamaño $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$, entonces, el estadístico de prueba se define como:

ANEXO A: PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (A.2)$$

Donde X_1, S_1^2 ; Son la media y la varianza de la primera parte del registro de tamaño n_1 ; X_2, S_2^2 ; Son la media y la varianza de la segunda parte del registro de tamaño n_2 ; EL valor absoluto de t_d se compara con el valor de la distribución “t” de student de dos colas, y con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$.

El valor absoluto de t_d , se compara con el valor de la distribución “t” de student de dos colas, y con $\mathcal{G} = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y par un nivel, este puede cambiar (ver [Tabla A.1](#))

GRADOS DE LIBERTAD	NIVEL DE SIGNIFICANCIA		GRADOS DE LIBERTAD	NIVEL DE SIGNIFICANCIA	
	Prueba una cola 5%	Prueba dos colas 5%		Prueba una cola 5%	Prueba dos colas 5%
1	6.314	12.706	18	1.734	2.101
2	2.92	4.303	19	1.729	2.093
3	2.353	3.182	20	1.725	2.086
4	2.132	2.776	21	1.721	2.08
5	2.015	2.571	22	1.717	2.074
6	1.943	2.447	23	1.714	2.069
7	1.895	2.365	24	1.711	2.064
8	1.86	2.306	25	1.708	2.06
9	1.833	2.262	26	1.706	2.056
10	1.812	2.229	27	1.703	2.052
11	1.796	2.201	28	1.701	2.049
12	1.792	2.179	29	1.699	2.045
13	1.771	2.16	30	1.697	2.042
14	1.761	2.145	40	1.684	2.021
15	1.763	2.131	60	1.671	2
16	1.746	2.12	120	1.658	1.98
17	1.74	2.11	∞	1.645	1.96

Tabla A.1 Distribución “t” Student

A1.3 PRUEBA ESTADÍSTICA DE CRAMER

Esta prueba se utiliza con el propósito de verificar homogeneidad en el registro Hp_i^j de la serie “j” para $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$.

La prueba compara el valor de Hp^j del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos $\overline{Hp_{30}^j}$ y $\overline{Hp_{60}^j}$. Para que se considere una serie analizada como estacionaria en la media, se deberá cumplir que no existe una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$Hp^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{Hp_i^j}{n_j}, \text{ para una sola muestra analizada} \quad (A.3)$$

$$S_{Hp}^j = \left[\frac{1}{(n_j-1)} \sum_{i=1}^{n_j} (Hp_i^j - \overline{Hp}^j)^2 \right]^{1/2} \quad (A.4)$$

$$\overline{Hp}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Hp_k^j}{n_{60}} \quad \overline{Hp}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{Hp_k^j}{n_{60}} \quad (A.5- A.6)$$

$$\tau_{60}^i = \frac{\overline{Hp}_{60}^j - \overline{Hp}^j}{S_{Hp}^j} \quad \tau_{30}^i = \frac{\overline{Hp}_{30}^j - \overline{Hp}^j}{S_{Hp}^j} \quad (A7- A.8)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j-2)}{n_j - n_w [1 + (\tau_w^j)^2]} \right\} |\tau_w^j|, \text{ para } w = 60 \text{ y } w = 30 \quad (A.9)$$

El estadístico t_w tiene distribución “t” de Student de dos colas con $\nu = n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad y para un nivel $\alpha = 0.05$.

Si y solo si, el valor absoluto de t_w para $w = 60$ y $w = 30$, 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 la serie Hp_i^j se considera no homogénea.

A.1.4 PRUEBA DE INDEPENDENCIA DE EVENTOS

Se requiere de muestras aleatorias para realizar el análisis de frecuencias, una de las pruebas para determinar la independencia es la Prueba de Anderson, con la que se construye un correlograma con límites de confianza, en la que se puede conocer la independencia de los datos. Si sólo el 10% de los valores r_k^i sobrepasan los límites de confianza, se dice que la serie es independiente y puede emplearse para el análisis de frecuencias.

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \quad (A.10)$$

K; es el tiempo de retraso

Se obtiene r_k desde $k=1$, hasta $K=n/3$

$$r_k(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{n-k+1}}{n-k} \quad (A.11)$$

Se dice que la serie es independiente si a lo más el 10% de los r_k sobrepasan los límites de confianza

A.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES.

Para establecer el correcto relleno de la muestras y pueden ser usadas para análisis estadísticos, son las pruebas de homogeneidad e independencia de las series. Como se indico en el capítulo metodológico las pruebas de homogeneidad a utilizar son las pruebas de Helmert, “t” de Student, y las pruebas de Cramer. Para las pruebas de Independencia fue utilizada la prueba de Anderson. A partir del análisis realizado bajo dos escalas (máximos anuales y acumulados mensuales), la evaluación identifico que las series se comportan como homogéneas e independientes.

A.2.1 PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD

A.2.1.1 Homogeneidad para la estación Francisco Rueda

Las pruebas de homogeneidad para la estación Francisco Rueda, entregan los resultados de la [Tabla A.2](#). Como se puede ver, en los resultados indican que la prueba es homogeneidad en dos de las tres pruebas realizadas, con lo que se concluye que la serie de datos es homogénea. Para el nivel de máximos anuales la prueba pasa en las tres pruebas siendo homogénea también para máximos anuales. La [Tabla A.3](#) muestra el resumen correspondiente

Tabla A.2. Prueba de homogeneidad en Francisco Rueda para acumulados anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	2314.904096			X1	2402.7804	X2	2227.02779
secuencias	26	S	535.1520858			S1	407.044236	S2	636.547855
cambios	15	n60	25.0	n30	13.0	S1^2	165685.01	S2^2	405193.172
S - C	11	X60	2415.2	X30	2145.9	TD	1.040267606		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	516.4	S30	607.7	v	40		
		S60^2	266703.9	S30^2	369358.8	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ S-C \leq \sqrt{n-1}$	$3 < 4.12310$	-t60	0.2	-t30	0.3	Td	2.0117	(Tabla 4.11)	
		t60	0	t30	0.0		HOMOGENIA		
		v	36						
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195 (Tabla 5)						
			HOMOGENIA	HOMOGENIA					
			HOMOGENIA						

Tabla A.3 Prueba de homogeneidad en Francisco Rueda para máximos anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	120.7556736			X1	117.743279	X2	123.768068
secuencias	23	S	35.44832838			S1	30.862719	S2	40.0553773
cambios	18	n60	25	n30	13	S1^2	952.507424	S2^2	1604.43325
S - C	5	X60	117.824354	X30	123.9763	TD	0.532839644		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	33.1208401	S30	42.54714	ν	40		
		S60^2	1096.99005	S30^2	1810.259	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$		-f0	-0.08269274	-p0	0.090854	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	0	t30	0	HOMOGENEA			
		ν	36						
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA		HOMOGENIA					
HOMOGENEA		HOMOGENEA							

A.2.1.2 Homogeneidad para la estación Tancochapa

Para la estación de Tancochapa, las pruebas de homogeneidad para los niveles dos niveles se muestran en las tablas [Tabla A.4](#) Y [A.5](#). Conforme a los resultados obtenidos se demuestra que la serie es homogénea en los dos niveles de análisis. A nivel de acumulados anuales, la serie es homogénea en todas las pruebas, para los máximos anuales, la prueba es homogénea en dos de las tres pruebas. A continuación se muestran los resúmenes para esta estación,

Tabla A.4 Prueba de homogeneidad en Tancochapa para acumulados anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	2345.320448			X1	2320.85627	X2	2369.78463
secuencias	20	S	419.8243046			S1	372.550014	S2	470.390434
cambios	21	n60	25	n30	13	S1^2	138793.513	S2^2	221267.161
S - C	-1	X60	2361.71126	X30	2335.577	TD	0.364659781		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	393.201166	S30	508.0395	ν	40		
		S60^2	154607.157	S30^2	258104.2	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$	3 < 4.12310	-f0	0.03904208	-p0	0.023209	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	0.29977527	t30	0.098289	HOMOGENIA			
		ν	36						
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA		HOMOGENIA					
HOMOGENEA		HOMOGENEA							

ANEXO A: PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES

Tabla A.5 Prueba de homogeneidad en Tanchochapa para máximos anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	131.6020703			X1	119.992717	X2	143.211423
secuencias	25	S	38.29078269			S1	33.3590093	S2	40.1225862
cambios	16	n60	25	n30	13	S1^2	1112.8235	S2^2	1609.82192
S - C	9	X60	122.753883	X30	141.8307	TD	1.99002011		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	32.2670332	S30	42.29812	ν	40		
		S60^2	1041.16143	S30^2	1789.131	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$		-60	-0.23107879	-30	0.26713	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	1.84626478	t30	1.149701				
NO HOMOGENEA		ν	36			HOMOGENEA			
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENEA		HOMOGENEA					
		HOMOGENEA							

A.2.1.3 Prueba de Homogeneidad para la estación Blasillo

En base al análisis realizado, la serie de datos para la estación blasillo es homogénea en dos de las tres pruebas para los dos niveles de análisis. Por tal motivo se concluye que la serie de datos es homogénea. Las [Tablas A.6.](#) y [A.7.](#) muestran los resúmenes correspondientes

Tablas A.6. Pruebas de homogeneidad en Blasillo para acumulados anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	1878.776753			X1	1905.45761	X2	1852.0959
secuencias	32	S	682.1080543			S1	651.702548	S2	726.357509
cambios	9	n60	25	n30	13	S1^2	424716.211	S2^2	527595.231
S - C	23	X60	1787.16773	X30	1862.383	TD	0.244543022		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	678.35952	S30	628.8369	ν	40		
		S60^2	460171.639	S30^2	395435.8	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$		-60	-0.1343028	-30	0.024034	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	1.04399471	t30	0.101786				
NO HOMOGENEA		ν	36			HOMOGENEA			
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA		HOMOGENIA					
		HOMOGENIA							

ANEXO A: PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES

Tablas A.6 Pruebas de homogeneidad en la estación Blasillo para máximos anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	120.6829415			X1	105.319048	X2	136.046835
secuencias	27	S	79.96059284			S1	47.7946924	S2	101.622053
cambios	14	n60	25	n30	13	S1^2	2284.33262	S2^2	10327.0416
S - C	13	X60	102.527769	X30	112.1146	TD	1.22367218		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	50.3961929	S30	44.39801	ν	40		
		S60^2	2539.77626	S30^2	1971.183	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$		- β_0	-0.2270515	β_0	0.107158	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	1.8114228	t30	0.454931				
NO HOMOGENEA		ν	36			HOMOGENEA			
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA	HOMOGENIA						
		HOMOGENIA							

A.2.1.4 Prueba de Homogeneidad para la estación Centro experimental

Para la estación centro experimental, el análisis a nivel de máximos acumulados refleja que la muestra es homogénea en dos de las tres pruebas realizadas. Para el análisis con máximos anuales la muestra resulto ser homogénea en las tres pruebas realizadas. Por tal motivo se concluye la serie es homogénea. Las [Tablas A.8](#) y [A.9](#) muestran los resúmenes correspondientes

Tablas A.8 Pruebas de homogeneidad en la estación Centro Experimental para acumulados anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	2086.8768			X1	2083.82801	X2	2089.92559
secuencias	25	S	395.9754547			S1	482.518984	S2	297.638809
cambios	16	n60	25	n30	13	S1^2	232824.569	S2^2	88588.8604
S - C	23	X60	2055.54974	X30	2132.348	TD	0.048099423		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	468.631687	S30	278.8488	ν	40		
		S60^2	219615.658	S30^2	77756.66	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$		- β_0	-0.07911364	β_0	0.114833	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	0.6095858	t30	0.487705				
No HOMOGENEA		ν	36			HOMOGENIA			
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA	HOMOGENIA						
		HOMOGENIA							

ANEXO A: PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES

Tablas A.9 Pruebas de homogeneidad para la estación Centro Experimental para máximos acumulados

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	141.5496847			X1	125.655679	X2	157.443691
secuencias	19	S	62.98560607			S1	45.043721	S2	74.6545034
cambios	22	n60	25	n30	13	S1^2	2028.9368	S2^2	5573.29488
S - C	-3	X60	131.03077	X30	142.6013	TD	1.630451234		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	54.4010989	S30	55.63542	ν	40		
		S60^2	2959.47956	S30^2	3095.3	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$		$\bar{z}60$	-0.16700505	$\bar{z}30$	0.016697	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	1.3079749	t30	0.070707				
HOMOGENEA		ν	36			HOMOGENEA			
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA	HOMOGENIA						
		HOMOGENIA							

A.2.1.5 Prueba de Homogeneidad para la estación Pueblo Nuevo

El análisis de homogeneidad para la estación Pueblo Nuevo para los dos niveles reflejo ser homogénea para las tres pruebas. Conforme a esto se considera que la serie es homogénea. Las [Tablas A.10](#) y [A.11](#) muestran los resúmenes correspondientes

Tablas A.10 Pruebas de homogeneidad en la estación de Pueblo Nuevo para acumulados anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	2079.667058			X1	2076.51649	X2	2082.81763
secuencias	20	S	400.866727			S1	453.025217	S2	352.378036
cambios	21	n60	25	n30	13	S1^2	205231.847	S2^2	124170.28
S - C	1	X60	2102.22703	X30	2081.424	TD	0.049098819		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	437.331732	S30	320.2965	ν	40		
		S60^2	191259.044	S30^2	102589.9	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S-C) \leq \sqrt{n-1}$		$\bar{z}60$	0.05627798	$\bar{z}30$	0.004382	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	0.4326411	t30	0.018556				
HOMOGENEA		ν	36			HOMOGENIA			
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA	HOMOGENIA						
		HOMOGENIA							

Tablas A.11 Pruebas de homogeneidad en la estación de Pueblo Nuevo para máximos anuales

Prueba Helmert		Prueba de Cramer				Prueba t Student			
n	42	n	42			n1	21	n2	21
		Xm	133.2970754			X1	130.942857	X2	135.651294
secuencias	20	S	48.27419244			S1	53.4804317	S2	43.6522588
cambios	21	n60	25	n30	13	S1^2	2860.15657	S2^2	1905.5197
S - C	-1	X60	134.42	X30	126.7675	TD	0.305020794		
$\sqrt{n-1} =$	6.403	S60	52.362216	S30	34.36794	ν	40		
		S60^2	2741.80167	S30^2	1181.155	α	0,05 PARA DOS COLAS		
$ (S - C) \leq \sqrt{n-1}$		$\hat{\rho}0$	0.02326139	$\hat{\rho}0$	0.135261	Td	2.0117	tabla 5	
		t60	0.17847771	t30	0.575125	HOMOGENEA			
		ν	36						
		α	0,05 PARA DOS COLAS						
		Td	2.0195	tabla 5					
		HOMOGENIA		HOMOGENIA					
HOMOGENEA		HOMOGENIA							

A.2.2 PRUEBAS DE INDEPENDENCIA DE LAS SERIES

A partir de la prueba de anderson feuron obtenidos las graficas de independencia de los series. Conforme a este prueba, se considera independiente una serie de datos, si menos del 10% de los valores de K sobrepasan los límites de confianza. A continuación se muestra los resultados de la prueba de independencia de las estaciones analizadas para los niveles de análisis de acumulados anuales y maximos anuales

A.2.2.1 Prueba de independencia para la estación Francisco Rueda 27015

Para esta estación los resultados de la prueba de Anderson indican que la serie es independiente, debido a q sólo un valor de k se encuentra por fuera los intervalos de confianza en los dos niveles analizados. La Figura A.1 se muestra la independencia de los valores de K para esta estación

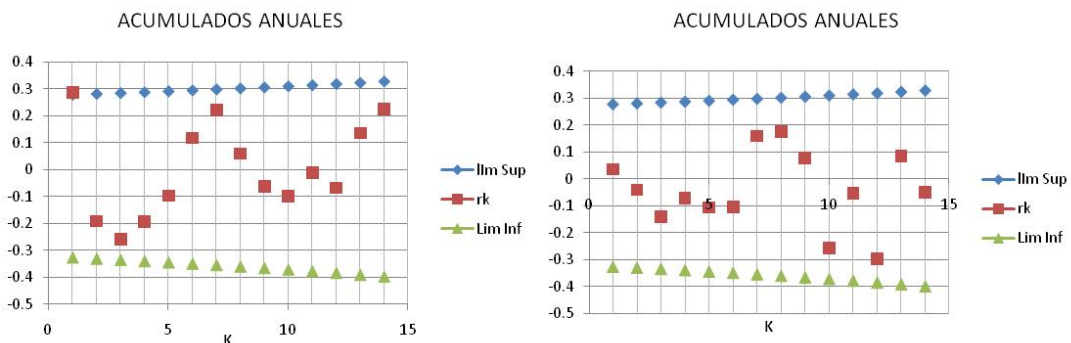


Figura A.1 Pruebas de independencia para la estación Francisco Rueda.

A.2.2.2 Prueba de independencia para la estación Tancochapa 30167

En la estación Tancochapa la prueba de independencia realizada, refleja que la serie es independiente al no presentarse ningún valor de k que supere los límites de confianza en las dos escalas analizadas. En la [Figura A.2](#) se muestra la gráfica correspondiente

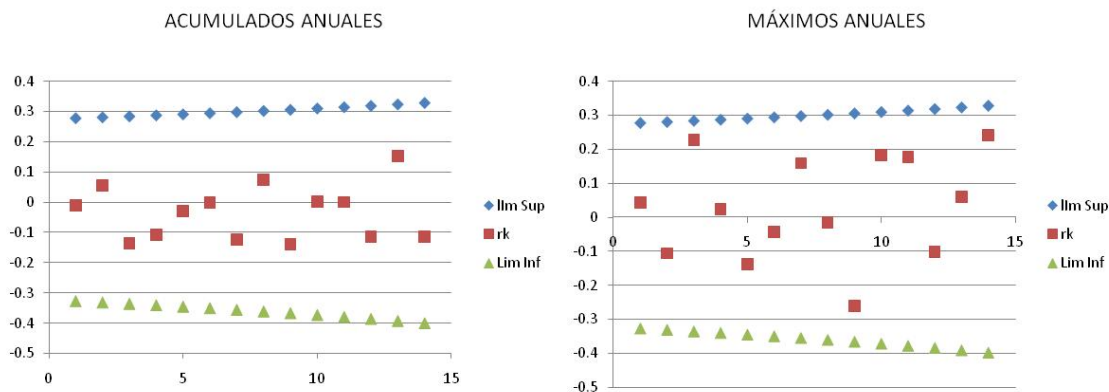


Figura A.2 Pruebas de independencia para la estación Tancochapa

A.2.2.3 Prueba de independencia para la estación Blasillo 27003

La prueba de independencia para esta estación muestra una dependencia de variables para la escala de valores acumulados anuales. Esta condición se da porque en más del 10 % de los valores de k sobrepasan los intervalos de confianza ([Figura A.3](#)). Debido a esta condición se hizo necesario realizar la prueba de independencia para los datos originales de la serie ([Figura A.4](#)). Donde se comprobó que la serie presenta una dependencia en esos parámetros. Para la escala de máximos anuales, la serie de datos muestra un comportamiento independiente. A continuación se muestran las graficas de independencia obtenidas

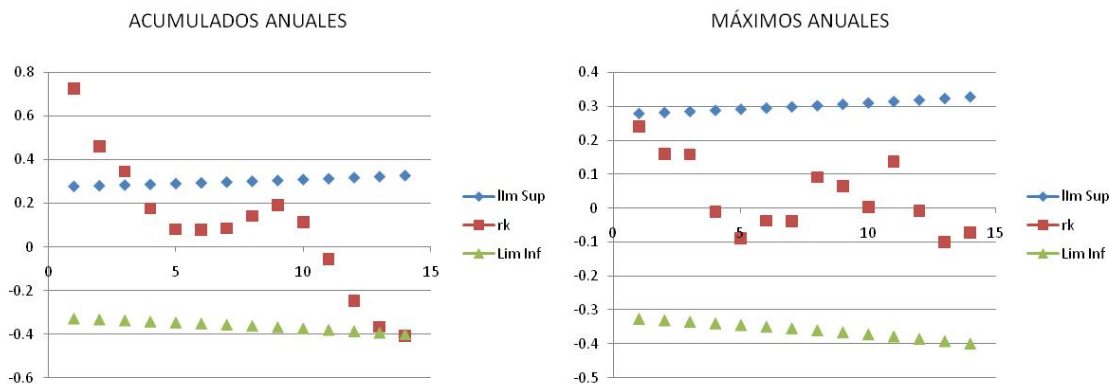


Figura A.3 Pruebas de independencia para la estación Blasillo

ANEXO A: PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA DE LAS SERIES

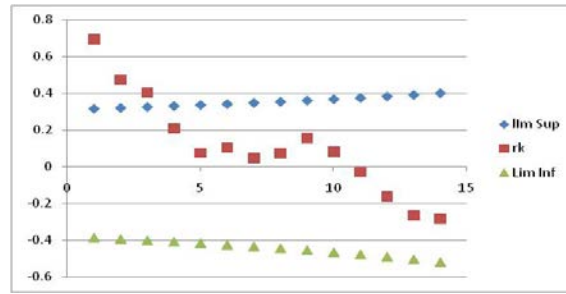


Figura A.4 Prueba de independencia para la estación original de Blasillo para acumulados anuales

A.2.2.4 Prueba de independencia la estación Centro experimental 27007

La estación Centro experimental muestra un comportamiento independiente en sus series para las dos escalas de análisis. La Figura A.5 muestra la grafica de independencia de Anderson para las escalas de acumulados anuales y máximos anuales.

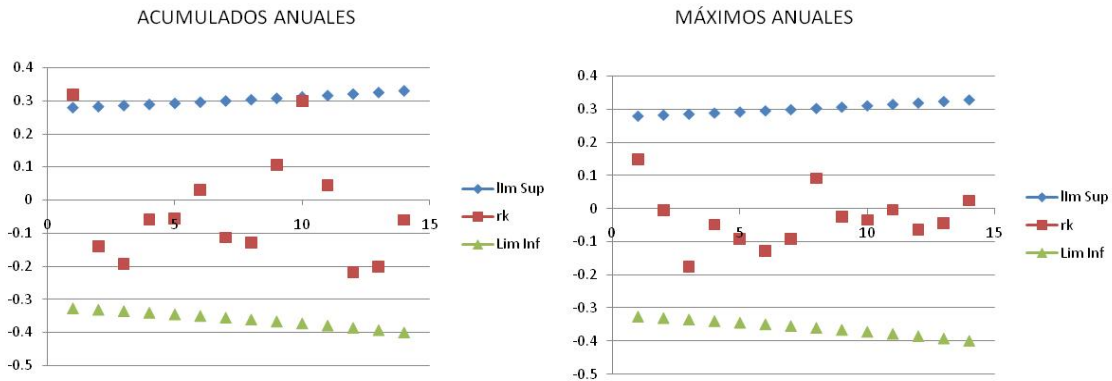


Figura A.5 Pruebas de independencia para la estación Centro experimental

A.2.2.5 Prueba de independencia para la estación Pueblo Nuevo 27037

La estación de pueblo nuevo, de igual manera que las anteriores, presenta un comportamiento independiente en su serie de datos. Este comportamiento es el mismo bajo las dos escaladas de análisis. La Figura A.6 muestra la grafica de independencia para esta estación.

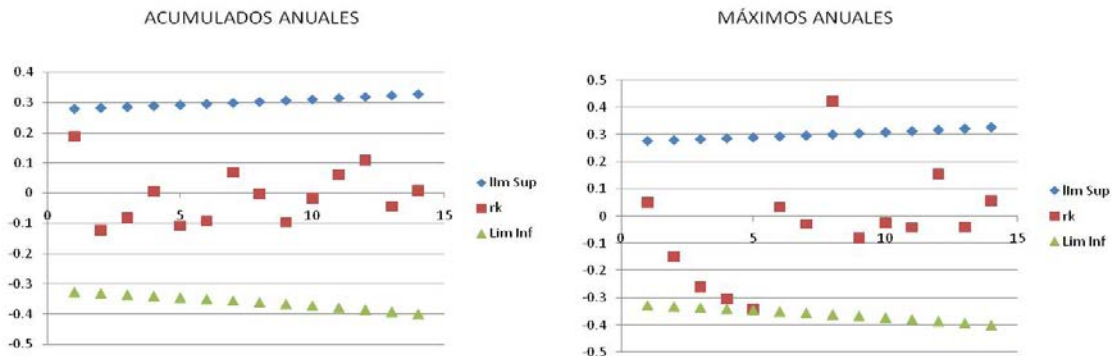


Figura A.6 Pruebas de independencia para la estación Pueblo Nuevo

ANEXO B

MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LOS SISTEMAS SOCIALES, FÍSICOS ECONÓMICOS Y ECOLÓGICOS

En esta sección se muestran los mapas de susceptibilidad por sistema para la estimación de vulnerabilidad en la cuenca baja del Río Tonalá. Los mapas se encuentran organizados de la siguiente manera:

Mapas de susceptibilidad por sistema evaluado	149
B.1 Susceptibilidad social	150
B.1.1 Rangos de susceptibilidad social por sector	150
B.1.2 Mapa de susceptibilidad social.....	151
B.2. Susceptibilidad Física y económica.....	152
B.2.1 Mapa de susceptibilidad social y	152
B.3. Mapa de susceptibilidad Ecológica y cultural.....	153
B.3.1 Mapa de susceptibilidad ecológica y cultural	153

B.1 SUSCEPTIBILIDAD SOCIAL

B.1.1 RANGOS DE SUSCEPTIBILIDAD SOCIAL POR SECTOR

Para el cálculo del índice de susceptibilidad social, a continuación se muestra los rangos de fragilidad sectorial correspondiente a: Rango de edad susceptible [Figura B.1a](#); Rango de salud susceptible [Figura B.1b](#).

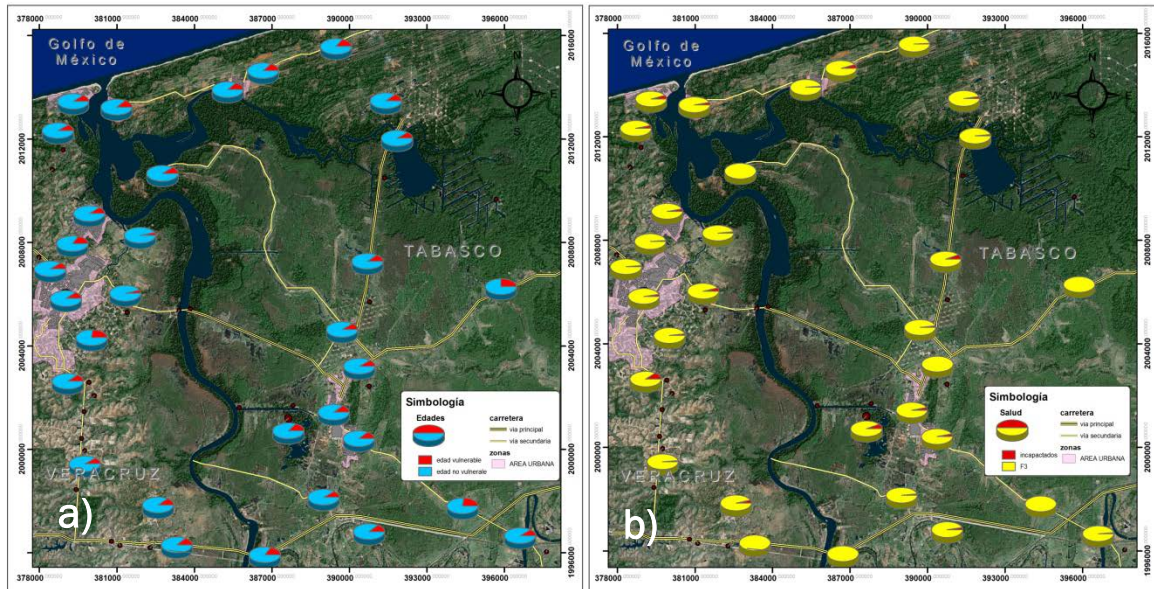


Figura B.1. Mapas de rango de fragilidad para el sector salud

En el caso del índice de privación financiera, en la [Figura B.2](#) se muestra los rangos del sector socioeconómico correspondiente: a) Rango de vivienda sin bienes; b) nivel de población desempleada.

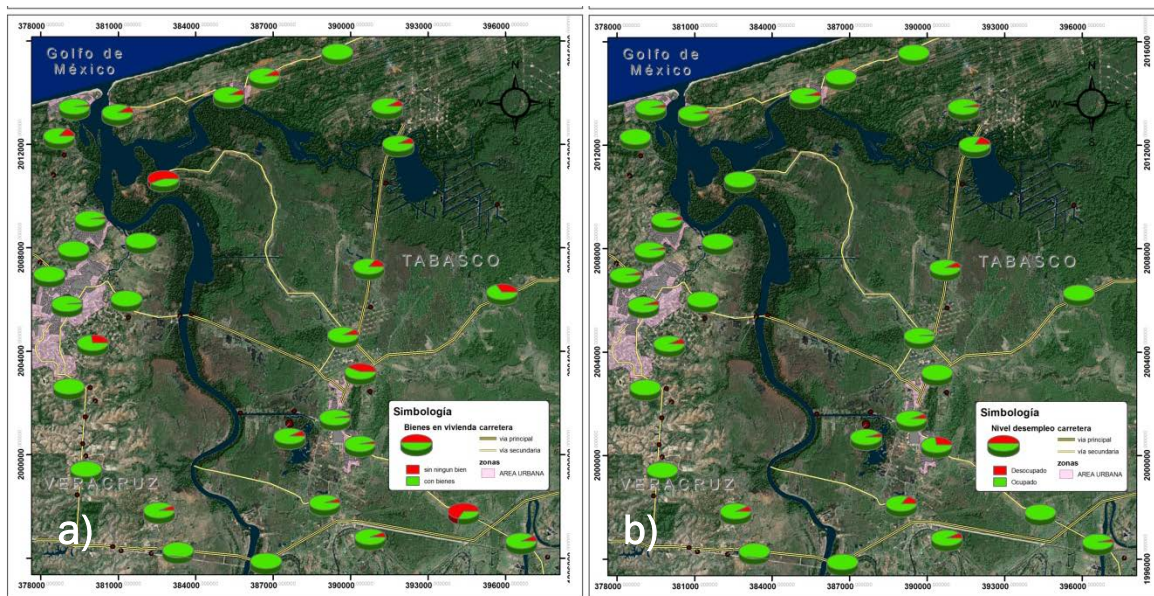


Figura B.2. Mapas de rango de fragilidad para el sector de privación económica

B.1.2 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD SOCIAL

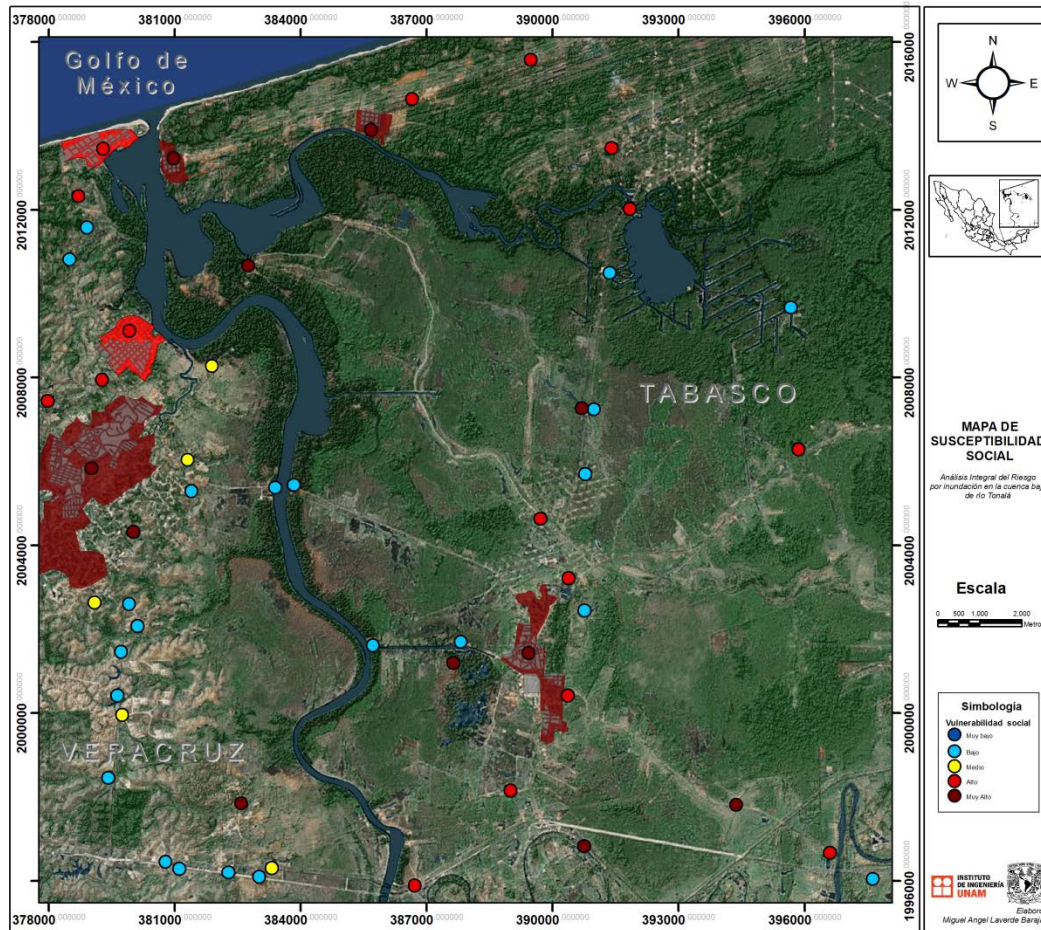


Figura B.3 Mapa de susceptibilidad social

B.1.3 DISTRIBUCIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD SOCIAL

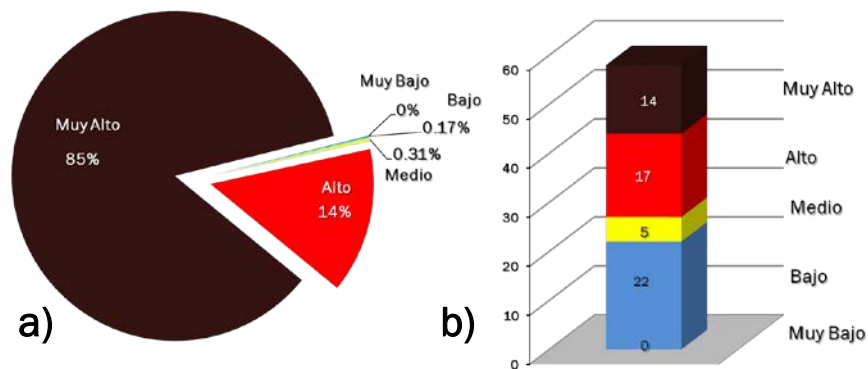


Figura B.3 a) Población susceptible; b) Localidades

B.2 SUSCEPTIBILIDAD FÍSICA Y ECONÓMICA

B.2.1 PUNTAJE DE EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD FÍSICA Y ECONÓMICA

Tabla B.1 Evaluación de la susceptibilidad física y económica

SISTEMAS PARÁMETROS	FÍSICO				ECONÓMICO		
	Líneas de conducción		Sistema vial		Petróleo	Zonas agropecuarias	
	Electricidad	Petróleo/Gas	Primario	Secundario	Pozos petroleros	Agricultura de temporal	Pastizales cultivados
CAUSAS DE FONDO							
Importancia social (5=bajo 1= Alto)	5	5	5	4	5	3	2
Importancia económica	4	5	5	3	5	3	1
Nivel de Complejidad	4	5	4	3	4	2	1
PRESIONES DINÁMICAS							
Estado del bien (5=bajo 1= Alto)	4	4	3	3	4	2	2
Precio del bien	4	5	4	3	5	2	1
Cap.de Afrontamiento (5=bajo 1= Alto)	3	3	4	3	3	3	1
Cap. de Adaptación (5=bajo 1= Alto)	3	3	1	4	3	2	1
SUSCEPTIBILIDAD	4	4	4	3	4	2	1

B.2.3 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD FÍSICA Y ECONÓMICA

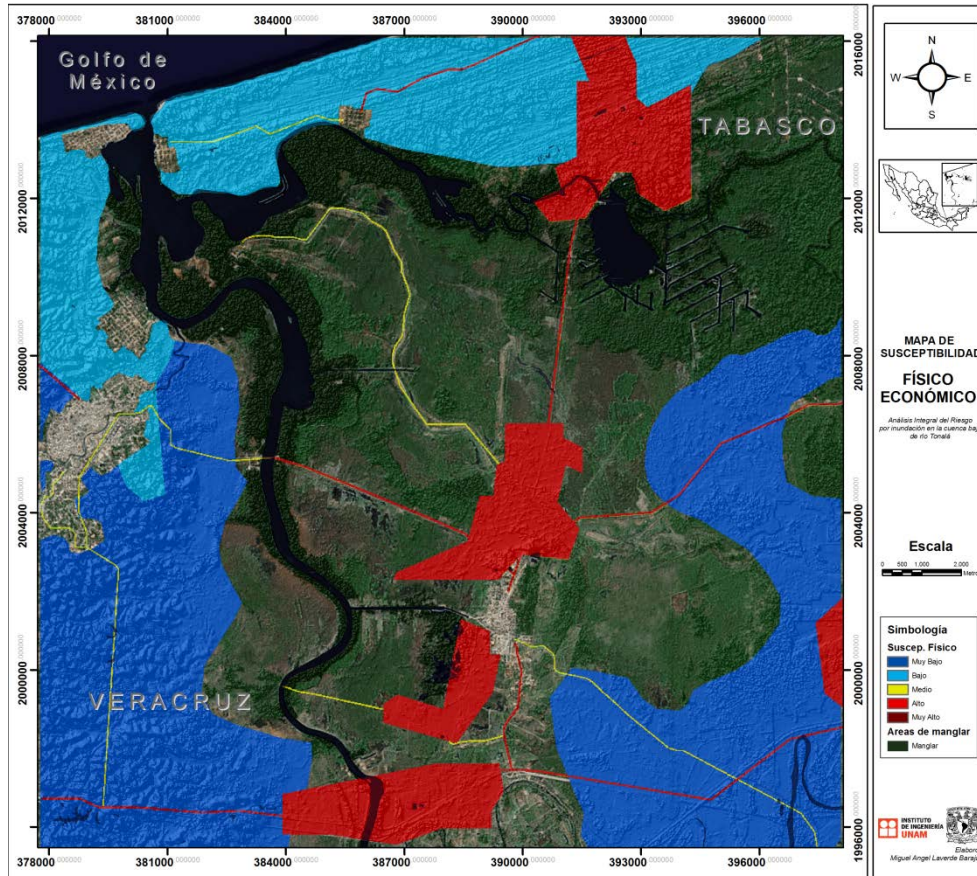


Figura B.4 Mapa de susceptibilidad físico-económico

ANEXO B: MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD DE LOS SISTEMAS SOCIALES, FÍSICOS ECONÓMICOS Y ECOLÓGICOS

B.3. MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD ECOLÓGICA Y CULTURAL

B.3.1 PUNTAJE DE EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD ECOLÓGICA Y CULTURAL

Tabla B.2 Evaluación de la susceptibilidad ecológica y cultural

SISTEMAS PARÁMETROS	ECOLÓGICO				CULTURAL
	Flora			Fauna	Rasgos Arqueolog.
	Bosque	Manglar	Tular/ Palmar	Biodiversidad	zonas arqueológica
CAUSAS DE FONDO					
Importancia social	3	3	1	4	5
Importancia económica	2	2	1	2	3
Importancia ecológica	4	4	2	4	-
PRESIONES DINÁMICAS					
Estado del bien (5=bajo 1= Alto)	3	4	4	4	-
Capacidad de afrontamiento (5=bajo 1= Alto)	1	1	1	4	3
Capacidad de adaptación (5=bajo 1= Alto)	1	1	1	5	5
SUSCEPTIBILIDAD	2	3	2	4	4

B.3.2 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD ECOLÓGICA Y CULTURAL

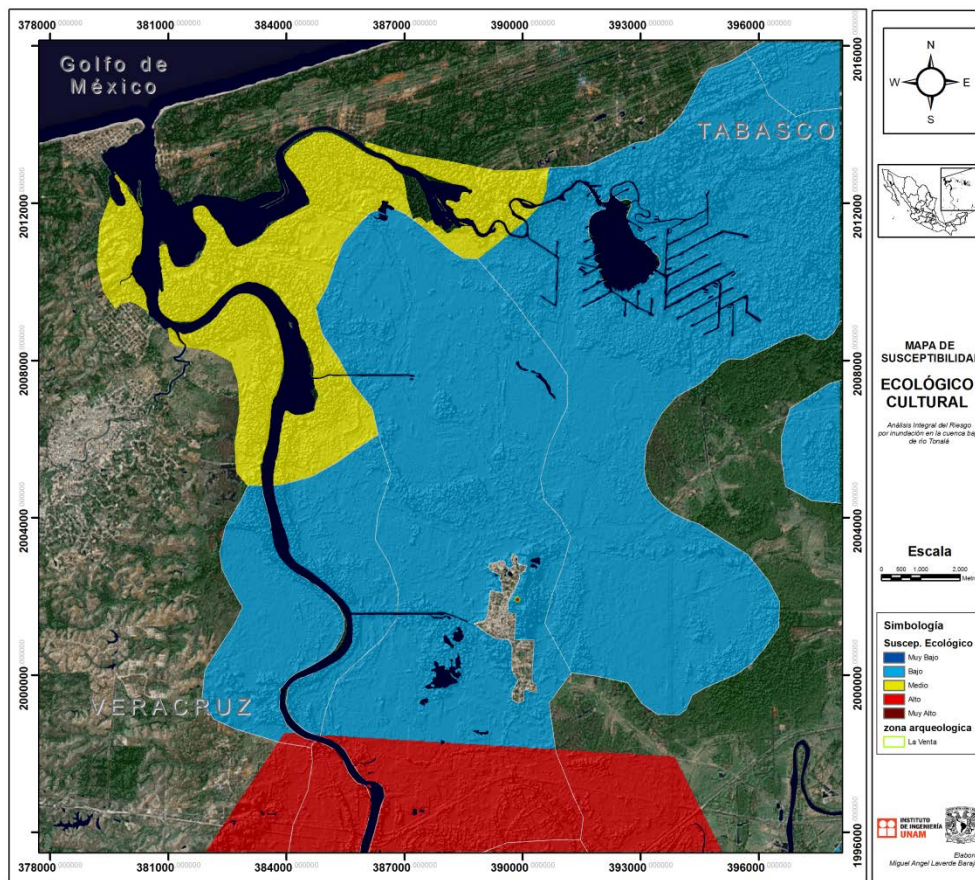


Figura B.4 Mapa de susceptibilidad ecológico-cultural