



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DEL PELIGRO A LA  
POBLACIÓN DE ZONAS URBANAS, DEBIDO  
A INUNDACIONES SÚBITAS**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERA CIVIL**

**P R E S E N T A**

Carmen Hernández Pastor

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Adrián Pedrozo Acuña



**Ciudad Universitaria, Cd. México, 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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





UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/054/16

Señorita  
CARMEN HERNÁNDEZ PASTOR  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"EVALUACIÓN DEL PELIGRO A LA POBLACIÓN DE ZONAS URBANAS, DEBIDO A INUNDACIONES SÚBITAS"**

- INTRODUCCIÓN
- I. INUNDACIONES
- II. ZONA DE ESTUDIO
- III. ANÁLISIS HIDROLÓGICO
- IV. MODELO HIDRODINÁMICO
- V. RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 7 de junio del 2016.  
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LÓPEZ RINCÓN

GLR/MTH\*gar.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: M.I. AMALIA ADRIANA CAFAGGI FELIX

Secretario: M.I. RODRIGO TAKASHI SEPULVEDA HIROSE

Vocal: DR. ADRIAN PEDROZO ACUÑA

1<sup>er</sup> suplente: ING. JOSUE GARDUÑO CHAVEZ

2<sup>do</sup> suplente: DR. JOSE AGUSTIN BREÑA NARANJO

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la UNAM, por ser mi casa, porque en ella me formé, porque me ha brindado todo lo necesario para mi formación profesional, por la calidad educativa que tienen sus académicos.

A mis padres por ser el pilar fundamental de todo lo que soy, por ser siempre mi fortaleza y motivación, mis ganas de crecer. Gracias por su incondicional apoyo en todo lo que he hecho en la vida. A ti papi porque no tienes comparación, porque siempre has estado ahí como caballo de guerra siempre dispuesto a hacer todo por tus hijos, y a ti mami, por siempre entregarnos tu vida, tu cariño y amor, por ser nuestro cobijo y nuestra protección. A ustedes por ser nuestra vida.

A mis hermanos, porque son el mejor equipo y ustedes también son mi alegría y fortaleza, mi inspiración.

A ti Gio, por todo tu cariño, tu incondicional apoyo, tu compromiso. A ti por darme siempre alegría y ganas de crecer más. Por ser mi compañero, mi amigo, mi confidente.

Al doctor Adrián Pedrozo, por ser mi tutor, por darme la oportunidad de conocer a un gran equipo en el Instituto de ingeniería, gracias a usted porque en este periodo de trabajo he aprendido muchas cosas que me ayudan profesionalmente.

A los profesores que cultivaron sus enseñanzas, a aquellos que sirvieron de inspiración no sólo por su profesionalismo, también por su calidad humana y brindar su mano amiga.

A mis amigos, porque siempre han sido un equipo excelente.

A mis sinodales por brindarme su tiempo, su paciencia, por ayudarme a mejorar este trabajo.

Finalmente a Marco, Roberto y Ale, gracias porque han sido una parte fundamental en la realización de este trabajo, por brindarme sus enseñanzas

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	3
<b>OBJETIVOS</b> .....	7
<b>CAPÍTULO I. INUNDACIONES</b> .....	8
1.1 Generalidades.....	9
1.2 Causas de la inundación .....	15
1.3 Clasificación de las inundaciones .....	17
1.3.1 De acuerdo a su origen .....	17
1.3.2 De acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca .....	20
1.4 Efectos.....	22
1.5 Mitigación de daños por inundaciones .....	23
1.5.1 Medidas estructurales.....	23
1.5.2 Medidas no estructurales .....	24
<b>CAPÍTULO II. ZONA DE ESTUDIO</b> .....	25
2.1 Descripción de la zona de estudio .....	25
2.1.1 Ubicación .....	25
2.2 Fisiografía .....	26
2.3 Geología.....	27
2.4 Edafología.....	28
2.5 Hidrología.....	28
2.6 Clima.....	29
2.4 Riesgos de inundación en José Cardel.....	30
2.5 Inundaciones en José Cardel .....	31
2.5.1 Descripción del fenómeno hidrometeorológico Karl .....	33
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS HIDROLÓGICO</b> .....	35
3.1 Estimaciones Preliminares.....	36
3.1.1 Revisión de datos .....	37
3.2 Análisis de frecuencias de eventos extremos.....	39
3.2.1 Pruebas de homogeneidad.....	39
3.2.2 Prueba de independencia de eventos.....	46
3.2.3 Resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia .....	48
3.3 Teoría distribucional.....	48
3.3.1 Metodología.....	50

3.3.2	Distribución de probabilidad.....	51
3.4	Análisis conjunto de eventos hidrológicos.....	56
3.4.1	Estimación de avenidas de diseño .....	57
3.4.2	Técnica de mayoración de la avenida más adversa registrada .....	58
<b>CAPÍTULO IV. MODELO HIDRODINÁMICO</b>	.....	<b>64</b>
4.1	Descripción del modelo .....	65
4.1.1	Ecuaciones de gobierno .....	65
4.2	Solución numérica.....	68
4.2.1	Discretización espacial .....	68
4.3	Implementación y calibración del modelo.....	69
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS</b>	.....	<b>75</b>
5.1	Validación del modelo .....	75
5.2	Mapas de inundación .....	84
5.3	Recomendaciones .....	92
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES</b>	.....	<b>95</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	.....	<b>98</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	.....	<b>98</b>
<b>LISTA DE GRÁFICAS</b>	.....	<b>99</b>
<b>REFERENCIAS</b>	.....	<b>99</b>



## INTRODUCCIÓN

La ubicación geográfica del país favorece la presencia de fenómenos hidrometeorológicos, un ejemplo son los 25 huracanes, que en promedio, se generan anualmente afectando principalmente las zonas costeras en ambos litorales. Asociadas a estos fenómenos, también se presentan lluvias torrenciales que provocan inundaciones y deslaves. Por el contrario, algunas regiones del país se ven afectadas por escasez de agua durante tiempos prolongados dando lugar a sequías. Algunas otras regiones se ven afectadas por sistemas invernales. Adicionalmente, existen fenómenos como los incendios forestales, marea roja, y las actividades humanas como la industria y el manejo de materiales peligrosos, que igualmente afectan año con año al país (Melorose et al. 2015).

El efecto devastador de los fenómenos se magnifica por la elevada vulnerabilidad en la que se encuentra la mayoría de la población asentada en zonas de riesgo, aunado a esto, la insuficiencia de medidas preventivas y de mitigación, la falta de planificación de asentamientos humanos, manejo insuficiente de las cuencas hidrográficas y la falta de sistemas de alerta temprana.

Por otra parte, las consecuencias de los desastres provocan retraso en el desarrollo económico y social, ya que debido al incipiente desarrollo de instrumentos financieros que protejan a la población y a la infraestructura económica y social frente a riesgos de esta índole, estas consecuencias económicas incluso pueden llegar a comprometer la seguridad nacional y así, afectar la calidad de vida de los habitantes. Así, en el periodo del año 1980 al año 1999, los efectos causados por los desastres en México significaron, en promedio anual, pérdidas de 500 vidas humanas y daños materiales por 700 millones de dólares (Melorose et al. 2015)

En la actualidad no se proyectan las ciudades, y por lo tanto el crecimiento de asentamientos humanos y la infraestructura que se desarrolla en zonas aledañas

a los cauces (debido a la necesidad de este recurso hídrico), es uno de los principales factores que favorece el riesgo de inundaciones, principalmente en temporadas de lluvia cuando se presentan las más grandes avenidas; razón por la que es importante estudiar las avenidas para diseñar la infraestructura necesaria, y así evitar el riesgo a la población por los problemas de inundación latentes; como las inundaciones súbitas debidas a eventos meteorológicos.

Sin duda se ha avanzado en el aspecto de prevención de riesgos, sin embargo, aún falta invertir mayores esfuerzos y recursos para transitar de un esquema reactivo a uno preventivo en el que se enfoque a prevenir y reducir el efecto de los fenómenos; un esquema en donde se logre que la sociedad sea capaz de afrontar los peligros naturales; para lograr esto, es indispensable establecer estrategias, políticas y programas de largo alcance.

Para lograr la prevención poniendo en práctica acciones de protección civil, es necesario conocer las características de los eventos, determinar el riesgo, las consecuencias que éstos pudieran causar y la forma en que inciden sobre el entorno humano y la infraestructura.

Tomando como punto de partida los eventos meteorológicos que han azotado las costas del país y cuyas consecuencias fueron severas para la integridad humana, es importante poder crear una herramienta que pueda ayudar a evitar el peligro de inundación, ésta es un mapa de riesgo en donde es posible visualizar la zona propensa a la afectación, para que el usuario pueda saber qué zonas debe evitar en caso de riesgo latente de inundación.

Actualmente existe un sistema de información sobre riesgos en zonas vulnerables, es el denominado Atlas Nacional de riesgos (ANR), mismo para el cual el CENAPRED ha propuesto lineamientos generales y criterios uniformes para identificar y cuantificar los peligros.

Existen diversas acciones a seguir para la prevención (Melorose et al. 2015):

- **Identificación de Riesgos:** conocer los peligros y amenazas a los que se está expuesto; estudiar y conocer los fenómenos perturbadores identificando dónde, cuándo y cómo afectan. Identificar y establecer, a distintos niveles de escala y detalle, las características y niveles actuales de riesgo, entendiendo el riesgo como el productor del peligro (agente perturbador), la vulnerabilidad (propensión a ser afectado) y la exposición (el valor del sistema afectable).
- **Mitigación y prevención:** basado en la identificación de riesgos, consiste en diseñar acciones y programas para mitigar y reducir el impacto de los desastres antes de que éstos ocurran. Incluye la implementación de medidas estructurales y no estructurales para reducción de la vulnerabilidad o la intensidad con la que impacta un fenómeno: planeación del uso de suelo, aplicación de códigos de construcción, obras de protección, educación y capacitación a la población, elaboración de planes operativos de protección civil y manuales de procedimientos, implementación de sistemas de monitoreo y de alerta temprana, investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de mitigación, preparación para la atención de emergencias (disponibilidad de recursos, albergues, rutas de evacuación, simulacros, etc.).
- **Atención de emergencias:** se refiere a acciones que deben tomarse inmediatamente antes, durante y después de un desastre con el fin de minimizar la pérdida de vidas humanas, sus bienes y la planta productiva, así como preservar los servicios públicos y el medio ambiente, sin olvidar la atención prioritaria y apoyo a los damnificados.
- **Recuperación y reconstrucción:** acciones orientadas al restablecimiento y vuelta a la normalidad del sistema afectado (población y entorno). Esta etapa incluye la reconstrucción y mejoramiento de infraestructura y servicios dañados o destruidos.

Una vez identificados los fenómenos que pueden afectar una zona en estudio, se procede a la evaluación del peligro, que consiste en obtener una descripción probabilística de la posible ocurrencia de dichos eventos perturbadores con distintas intensidades. Esto deberá calcularse para cada medida de la intensidad que sea significativa según el tipo de sistema y los modos de falla o daño que se deban incluir en el análisis de riesgo. Dos medidas clásicas asociadas al peligro son el periodo de retorno o bien, la tasa de excedencia. La tasa de excedencia es el número de eventos por unidad de tiempo (generalmente por año) que sobrepasan un cierto nivel de intensidad; el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia y se define como el lapso que, en promedio, hay que esperar para que ocurra un evento con intensidad superior a una especificada. En lo que se refiere a las medidas de intensidad, éstas son propias de cada fenómeno y están relacionadas con los parámetros con los que se evalúa la vulnerabilidad (Impacto et al. 1980).

En esta tesis se presenta el trabajo realizado para la elaboración de un mapa de riesgo por peligro de inundación para la Ciudad de José Cardel. Se realizó la etapa de “identificación de riesgo” y posteriormente se podrá llegar al objetivo de “prevención del riesgo”, cuando la población tenga acceso a los mapas de riesgo (mismos que se pueden obtener en Atlas de Riesgos o en Protección Civil de la localidad) realizados para diferentes periodos de retorno, en donde podrán visualizar las zonas propensas a inundación.

También se muestra el proceso de selección y manejo de la información hidrométrica obtenida de la base de datos de aguas superficiales (BANDAS) de Conagua, así como la determinación de las avenidas de diseño calculadas a través de un enfoque probabilístico, usando la técnica estadística del análisis de frecuencias.

Con ayuda del modelo hidrodinámico, se determinan los diferentes escenarios con probabilidad de ocurrencia, obtenidos con la modelación de flujos y simulaciones.

Finalmente, obtendremos los resultados de las simulaciones, que nos permitirán contar con un diagnóstico de riesgos, es decir, nos permitirán conocer las características de los eventos y su incidencia en la infraestructura.

## **OBJETIVOS**

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño de mapas de riesgo de inundación ocasionados por eventos extremos, con representación de la extensión previsible de inundación para diversos escenarios de ocurrencia<sup>1</sup> en la ciudad de José Cardel, Veracruz. A partir del objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Evaluar el peligro de inundaciones en zonas urbanas, para ayudar en la prevención oportuna de los riesgos producidos por inundaciones súbitas.
- Ayudar a la planeación y minimización de incidentes producidos por inundaciones súbitas.
- Facilitar la evaluación de las afectaciones (posteriores a la inundación).
- Delimitar las zonas con riesgo a inundación en la subcuenca del río La Antigua.

---

<sup>1</sup>Periodo de retorno: inverso de la probabilidad de que en un año se presente una avenida superior a un valor dado.

## CAPÍTULO I. INUNDACIONES

Las inundaciones constituyen uno de los principales riesgos naturales en el país, principalmente en las zonas del Pacífico y del Golfo, por ser éstas unas zonas de mayor precipitación (figura 1), las cuales tienen variaciones medias anuales de 1000.1 mm a 2500 mm, siendo los estados de Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Nayarit en donde se han presentado más problemas de inundaciones por efecto de las grandes precipitaciones registradas históricamente y aunado a éstas, la mayor parte de la zona costera es plana, con elevaciones muy pequeñas y propensas a inundación.

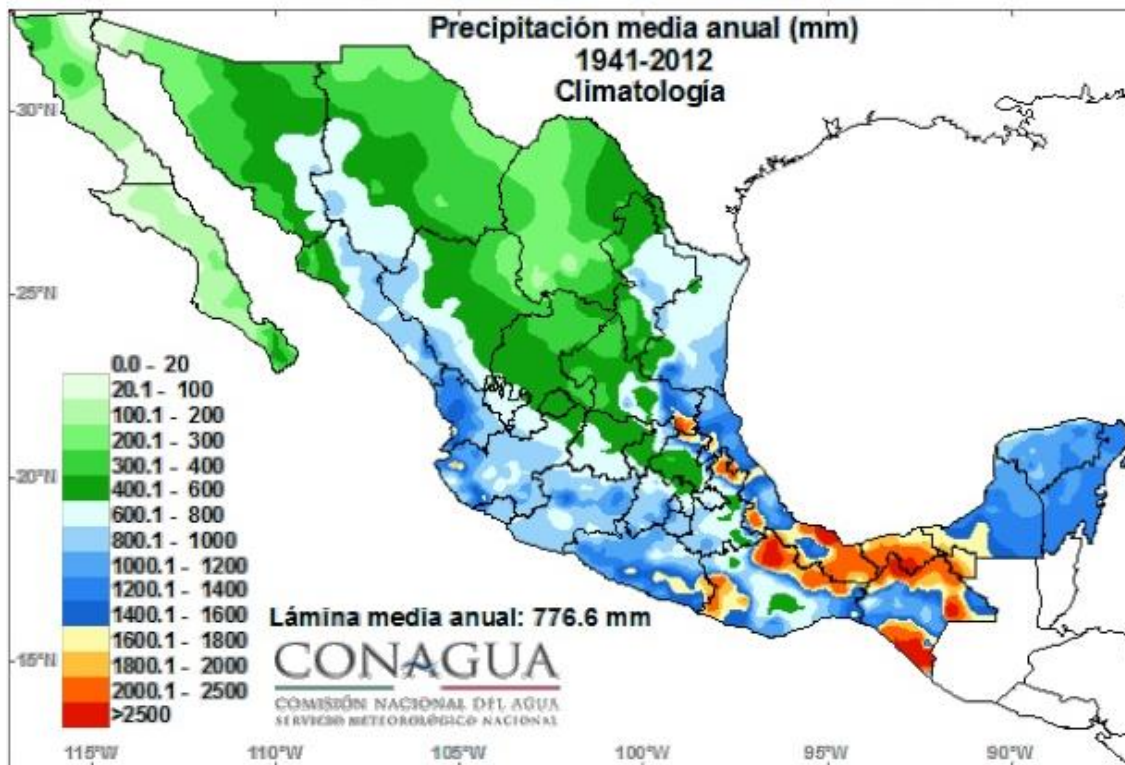


Figura 1. Mapa de precipitaciones del país (Fuente: Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional).

La temperatura del mar ideal para la formación de estos meteoros es arriba de los 26 °C, por lo que el monitoreo de esta variable es una manera de conocer las zonas donde es posible que los ciclones se desplacen manteniendo o

incrementando su intensidad. De hecho, el Caribe mexicano, así como la costa sur del Pacífico mantienen temperaturas de la superficie del mar que permiten sustentar ciclones tropicales durante todo el año; por esto, es importante hacer una reflexión respecto a la situación del país en las planicies de los grandes ríos y los desbordamientos de estos (CENAPRED/IMTA 2002).

## 1.1 Generalidades

Tomando como referencia el glosario internacional de hidrología, inundación es un “aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce”, en donde el “nivel normal” es aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños ni pérdidas (WMO y UNESCO 1998).

Una inundación es el evento que debido a la precipitación (lluvia, nieve o granizo extremo), oleaje, marea de tormenta o falla de alguna estructura hidráulica, provoca un incremento en el nivel de la superficie libre del agua de los ríos o del mar mismo, generando invasión o penetración de agua en sitios donde usualmente no la hay y, generalmente, daños a la población, agricultura, ganadería e infraestructura (Salas y Jiménez 2014).

Se pueden originar en la temporada de lluvias a partir de mayo, o en la época de invierno. En invierno los estados más susceptibles son los ubicados en la zona noroeste del país, sin embargo, también afectan la vertiente del Golfo de México y la península de Yucatán.

El mayor número de inundaciones del país, se presenta en los estados de Chiapas, Veracruz y México (figura 2), con un registro de 101 a 500 inundaciones presentadas durante el periodo 1950-2000.

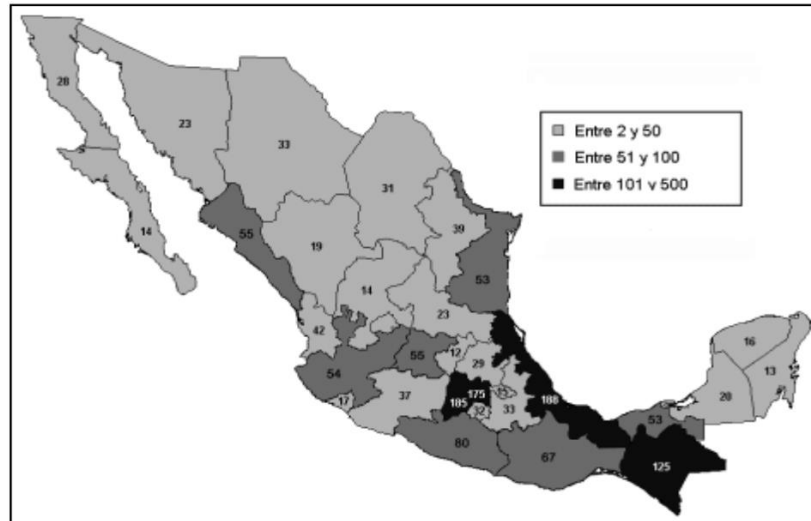


Figura 2. Inundaciones registradas entre 1950 y 2000. (Fuente: Base de datos del área de riesgos)

## Precipitación

El vapor de agua, al condensarse en las capas altas y frías de la atmósfera, se transforma en nubes que se presentan en diversas formas: cúmulos, cirros, estratos y nimbos; de acuerdo con el contenido de vapor de agua que se condensa, se convierte en gotas de agua. Al estar suficientemente grandes aumenta su peso y velocidad, haciendo que se precipiten hacia el suelo en forma de lluvia (Salas y Jiménez 2014)

La precipitación que ocurre en una zona no es constante y el escurrimiento que se genera depende en gran medida de la extensión donde tiene lugar y de sus características (tamaño de la cuenca, pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, etc.). Es por eso que la precipitación se caracteriza como una altura o lámina; de esta manera es posible comparar la altura de la lluvia en diferentes puntos de una cuenca, o bien, obtener un promedio; también, al ser una variable independiente del área, permite convertir la lluvia en volumen precipitado para cualquier subárea dentro de la cuenca que se esté estudiando. En México es común expresarla en mm debido a que se expresa en unidades de volumen por unidad de área (normalmente litros por m<sup>2</sup>).



Los aparatos que miden la lluvia, pluviómetros o pluviógrafos (figura 3) la expresan como láminas de lluvia, y es de interés particular en el tema de las inundaciones, conocer la cantidad de precipitación que se acumula en duraciones, generalmente, menores a un día.

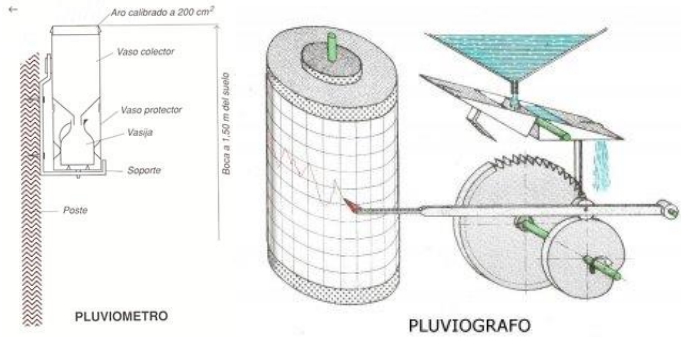


Figura 3. Pluviómetro y pluviógrafo

La cantidad de lluvia que se precipita en cierto tiempo es conocida como la intensidad de la precipitación (altura de precipitación por unidad de tiempo). Sus unidades son mm/ h, mm/día, etc.

Un pluviógrafo es el instrumento ideal para registrar la lluvia (figura 4), ya que al medir la intensidad de ésta, es posible saber cuándo y cuánto llovió en cada instante, durante una tormenta.

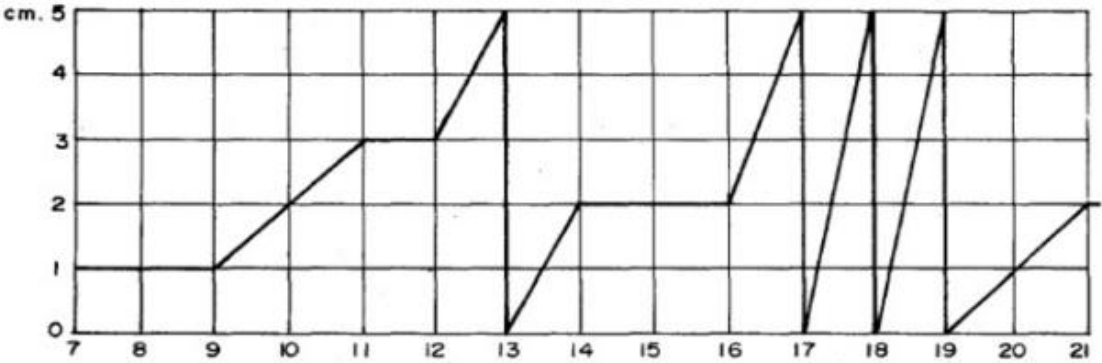


Figura 4. Registro de lluvia (cm/h)

El parámetro de la intensidad de lluvia es de suma importancia para evaluar las inundaciones, porque proporciona una idea de la cantidad de lluvia, ya que no es lo mismo que lluevan 50 mm en cinco horas, a que lluevan los mismos 50 mm en una hora.

Por lo tanto, la propensión a inundación, dependerá de la intensidad de la lluvia y las condiciones del drenaje (natural y/o artificial) de la zona.

### Causas de la precipitación

La precipitación se presenta cuando las nubes se saturan y alcanzan una masa considerable que se precipita por acción de la gravedad.

Los principales mecanismos a través de los que se genera la precipitación son:

#### 1. Ciclones tropicales

Al transportar grandes cantidades de humedad, los ciclones tropicales pueden provocar tormentas de larga duración, del orden de varios días y abarcar grandes extensiones. Por lo que pueden ser causa de inundaciones en las principales cuencas del país, principalmente en aquellas que vierten hacia el golfo de México o hacia el océano Pacífico.

#### 2. Lluvias orográficas

Se originan con las corrientes de aire húmedo que chocan con las barreras montañosas, provocando su ascenso y consecuente enfriamiento, lo que da lugar para su condensación y, como resultado, la ocurrencia de precipitación en el lado por donde sopla el viento (barlovento) hacia las montañas. El relieve representa un importante factor en la distribución de las lluvias, ya que actúa como una barrera o un modificador de la dirección del viento. Usualmente, esta distribución de la precipitación es muy irregular entre las dos vertientes de una misma cadena montañosa, sobre todo cuando su eje es más o menos perpendicular a la dirección de los vientos húmedos dominantes (figura 5).



Figura 5. Esquema del efecto orográfico

### 3. Lluvias invernales (frentes fríos)

Consisten en el desplazamiento de frentes de aire frío procedentes de la zona del Polo Norte. En el país, la zona más afectada por este tipo de fenómenos meteorológicos es la noroeste, donde se originan precipitaciones importantes; sin embargo, también afectan la vertiente del Golfo de México y la Península de Yucatán. Las grandes avenidas ocurridas en los ríos Fuerte y Yaqui en Sinaloa y Sonora, son consecuencia de este tipo de fenómenos.

### 4. Lluvias convectivas

Las lluvias convectivas tienen su origen en el calentamiento de la superficie terrestre, ya que algunas áreas de la superficie de la tierra absorben mejor que otras los rayos solares, por ello, el aire en contacto con esas “zonas cálidas” llega a calentarse más que en los alrededores, lo que da lugar a corrientes verticales con las que asciende el aire caliente húmedo (figura 6).

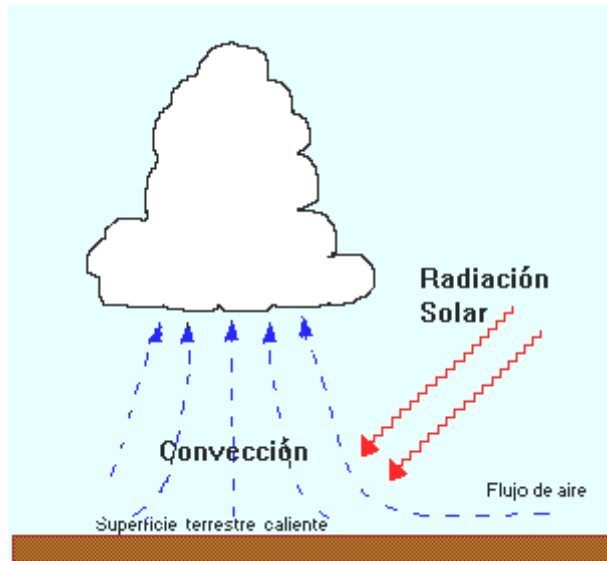


Figura 6. Esquema de fenómeno de lluvia convectiva

Estas corrientes al llegar a la capa de la troposfera, se enfrían rápidamente, produciéndose la condensación del vapor de agua y formándose nubes densas, por lo general del tipo cúmulos o nubes macizas. Se presentan en áreas reducidas ya que el ascenso y descenso de las corrientes sólo muestran un espacio local.

Aún en la Ciudad de México, donde se han realizado grandes inversiones en obras para el drenaje y control de avenidas, cada año las lluvias de origen convectivo causan inundaciones en las zonas de más baja elevación (Salas y Jiménez 2014).

### Cuenca

Cuenca hidrográfica es el territorio en el que las aguas convergen hacia los puntos más bajos de la superficie del mismo y se une en una corriente resultante o río principal que las evacuan hacia un lago, un mar u océano (Saltav, 1975). Las cuencas hidrográficas se conciben como un sistema natural dinámico compuesto de elementos, biológicos, físico y antrópicos que reaccionan dialécticamente entre sí, creando por lo tanto un conjunto único e inseparable en permanente cambio.

La cuenca es una zona de la superficie terrestre donde, si fuera impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella tenderían a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (figura 7). En realidad, el terreno no es impermeable, por lo que un porcentaje del volumen llovido es absorbido por el suelo, otro es atrapado en pequeñas depresiones del terreno, formando charcos, otro queda sobre la vegetación y otra parte escurre hacia los ríos y arroyos. Usualmente, el área de una cuenca se expresa en  $\text{km}^2$ .

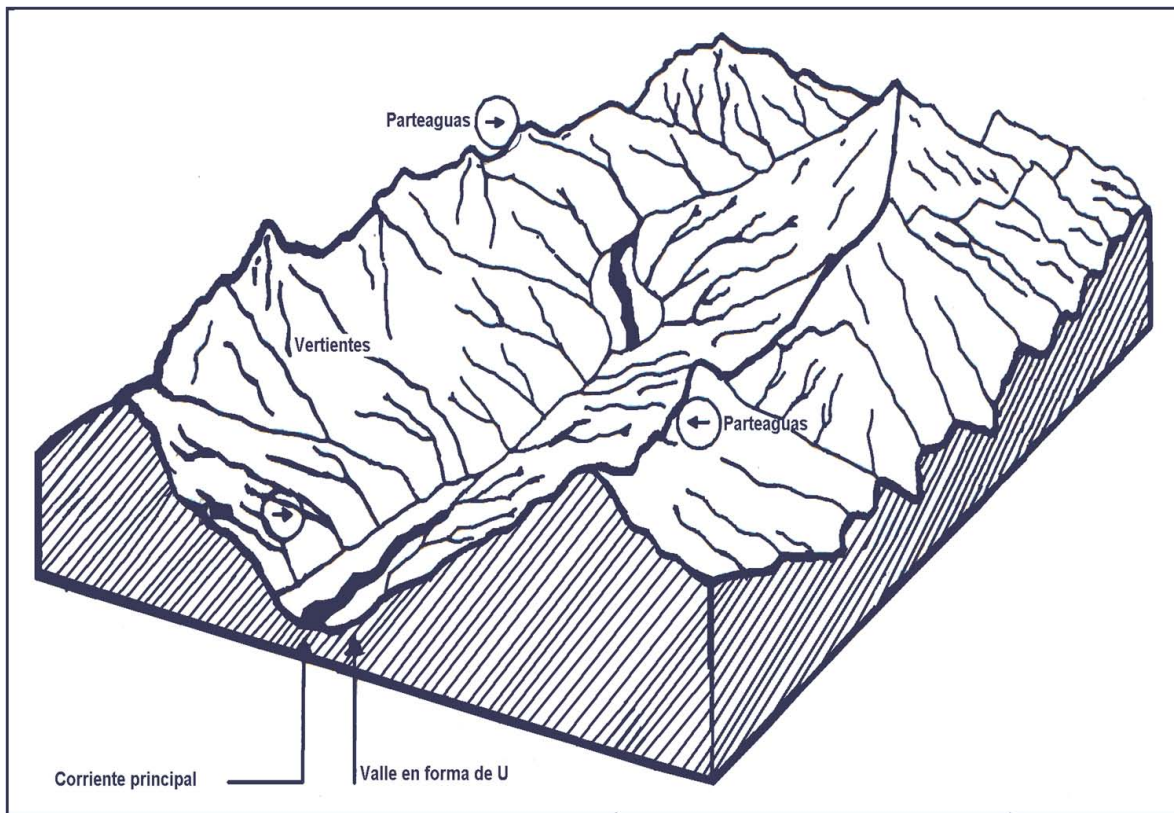


Figura 7. Componentes de la cuenca hidrográfica

## 1.2 Causas de la inundación

Antes de la aparición del hombre y de cualquier tipo de asentamientos humanos en las márgenes de los grandes ríos, el agua que llovía en las zonas montañosas bajaba por los cauces e inundaba las zonas bajas, para luego volver a su estado físico inicial, desde luego, sin que ello representara un problema.

Posterior a la aparición del hombre, se desarrollaron asentamientos humanos en las zonas aledañas a los cuerpos de agua, por lo que las inundaciones que antes no eran problema, ahora lo son. Adicionalmente a este problema, el medio ambiente comienza a degradarse (deforestación, erosión, etc.) y se modifica la respuesta hidrológica de la cuenca, incrementando la ocurrencia y magnitud de las inundaciones.

La modificación del terreno en las cuencas (cambio en los usos del suelo), produce daño cada vez más considerable por efecto de las inundaciones, debido a que:

- Se producen crecientes mayores que las que habían ocurrido (avenidas históricas) cuando las cuencas eran naturales o la degradación del medio ambiente era mínima.
- El tiempo que debe transcurrir para que los efectos de una inundación sean percibidos por la población ha disminuido, provocando que en ocasiones la respuesta de las autoridades y de la población se vea comprometida.

### Actividades humanas

- a) La urbanización de las ciudades provoca que el suelo se cubra de una capa impermeable de concreto o asfalto, que no permite que el agua pueda infiltrarse al subsuelo; el escurrimiento superficial es mayor y la basura que bloquea el drenaje ocasiona que la capacidad de éste no sea suficiente para conducir grandes volúmenes de agua.
- b) Se propicia la erosión del suelo al destruir la cobertura vegetal cuando la deforestación se presenta, el suelo arrastrado bloquea el sistema de drenaje y azolva ríos y presas.
- c) Construir viviendas cerca de zonas de riesgo como ríos y barrancas, propicia un riesgo latente de desbordamientos.

## Exceso de precipitación

Se presenta en temporada de ciclones tropicales

## Falla de obras hidráulicas

Al fallar por rompimiento una presa, dique o bordo, o por desbordamiento, el agua almacenada o retenida por éstos, sale descontroladamente en gran volumen y puede provocar inundaciones en asentamientos ubicados aguas abajo.

### 1.3 Clasificación de las inundaciones

#### 1.3.1 De acuerdo a su origen

Las clasificaciones más comunes obedecen a su origen, o bien, al tiempo que tardan en presentarse sus efectos.

## Inundaciones pluviales

Este tipo de inundación, se debe a la poca absorción del terreno posterior a su saturación inducida por una precipitación antecedida; el agua de lluvia excedente comienza a acumularse sobre el área afectada por la precipitación, permaneciendo ahí horas o días, hasta que se evapore y el terreno recupere su capacidad de infiltración.

Su principal característica es que el agua acumulada es agua precipitada sobre esa zona y no la que viene de alguna otra parte (por ejemplo de la parte alta de la cuenca).

### Inundaciones fluviales

La inundación de tipo fluvial consiste en una consecuencia de una lluvia ocurrida en algún punto de la cuenca, y cuyo escurrimiento provoca el desbordamiento de un río aguas abajo de la zona de precipitación.

El volumen que escurre sobre el terreno a través de los cauces se va incrementando con el área de aportación de la cuenca, por lo que las inundaciones fluviales más importantes se darán en los ríos con más longitud o aquellos que lleguen hasta las planicies costeras (Salas y Jiménez 2014).

### Inundaciones costeras

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

La marea de tormenta es generada por los vientos de los ciclones tropicales sobre la superficie del mar y por la disminución de la presión atmosférica en el centro de estos meteoros. Por su parte, el oleaje en el océano puede ser provocado por diferentes factores; sin embargo, su causa más común es el viento.

En las zonas costeras, los mayores impactos de un ciclón tropical que golpea tierra se deben a la marea de tormenta, el oleaje, vientos fuertes y lluvias intensas. Históricamente y a lo largo del mundo, la marea de tormenta ha sido responsable de una mayor cantidad de daños comparada con los otros efectos. Sin embargo, el viento y la marea están concentrados dentro de unos pocos kilómetros del centro del ciclón, mientras que las lluvias intensas frecuentemente afectan áreas a cientos de kilómetros del centro de ciclón, esto es por el efecto de las bandas nubosas de la tormenta (Jiménez-Espinosa et al. 2003).



## Inundaciones por falla de infraestructura hidráulica

Existe una causa que puede generar una inundación aún más grave que las antes mencionadas: si la capacidad de las obras destinadas para protección es insuficiente, la inundación provocada por la falla de dicha infraestructura será mayor que si no existieran dichas obras.

Este tipo de fallas es poco frecuente, históricamente se conoce el evento de 1976, año en el que el huracán Liza produjo lluvias extraordinarias que hicieron fallar uno de los bordos del arroyo El Cajoncito, afectando la ciudad de La Paz, en el estado de Baja California Sur.

Otra falla se presentó en el año de 1973, la falla de la presa El Conejo y algunas otras represas pequeñas provocaron una inundación en la zona del Bajío. En el año 2003, la falta de mantenimiento, debido a la conclusión de la vida útil de la infraestructura, propició la falla de la presa Dolores en San Luis Potosí y la presa El Capulín en Zacatecas.

En el caso de presas de materiales sueltos (tierra y roca), es de suma importancia y peligrosidad evitar el desbordamiento de éstas, pues en pocas horas pueden llegar a destruirse y el gran volumen de agua almacenado en su embalse sería descargado de manera súbita, de modo que esa descarga repentina provocaría considerables fuerzas de arrastre, superando la capacidad del cauce y provocando daños muchas veces mayores a los ocasionados sin la existencia de la obra (Salas y Jiménez 2014).

Eventualmente, dichas obras pueden presentar fallas en su funcionamiento hidráulico debido a diferentes factores:

1. Diseño escaso por falta de información hidrológica o climatológica que afecta la región.

2. Mala operación (específicamente en presas con compuertas).
3. Falta de mantenimiento o término de vida útil de la obra (bordos de protección, presas antiguas).

### 1.3.2 De acuerdo al tiempo de respuesta de la cuenca

La respuesta hidrológica de una cuenca depende de sus características fisiográficas. Básicamente se han definido dos grupos: inundaciones lentas (aquellas en donde se generan avenidas en un periodo largo) e inundaciones rápidas (aquellas que se desarrollan en un periodo corto de tiempo).

#### Inundaciones lentas

Cuando una precipitación satura el terreno, el volumen excedente de agua escurre por la red de drenaje de la cuenca (ríos y arroyos); el escurrimiento avanza hasta la salida de la cuenca, incrementando su volumen proporcionalmente al área drenada. Si el volumen de escurrimiento que fluye excede la capacidad de la red de drenaje, se presentan desbordamientos sobre los márgenes del río o arroyo y el agua desalojada puede permanecer horas o días sobre el terreno inundado.

Este efecto se presenta comúnmente en zonas donde la pendiente del cauce es pequeña y, por ende, la capacidad de los ríos disminuye considerablemente provocando desbordamientos que generan inundaciones en las partes aledañas.

#### Inundaciones súbitas

Las inundaciones súbitas son el resultado de lluvias repentinas e intensas que ocurren en áreas específicas, estas lluvias pueden ocasionar que una pequeña corriente se transforme en cuestión de minutos, en violentos torrentes capaces de causar grandes daños.

Este tipo de avenidas intensas son usualmente registradas en zonas urbanas cuya capacidad de drenaje se ve excedido por la poca infiltración, consecuencia de la “cubierta impermeable” formada artificialmente por los edificios y calles, así como por la deforestación, misma que ocasiona un gran volumen de escurrimiento.

Como consecuencia de la urbanización, donde antes una tormenta humedecía la tierra y regaba la hierba y los árboles, ahora bastan unos cuantos minutos para generar una avenida que arrastra todo lo que encuentra a su paso.

El tipo de inundación que se presenta en diferentes cuencas (ya sea súbita o lenta), depende de una característica denominada “tiempo de concentración”<sup>2</sup>. De varios casos registrados, se puede decir que con tiempos de concentración del orden de menos de dos horas, es posible que se presente una avenida súbita.

Las inundaciones súbitas son las responsables de la mayor cantidad de pérdidas humanas y por supuesto, de pérdidas materiales; sin embargo, las consecuencias están en función del tiempo de respuesta de las instituciones de protección civil, ya que, en caso de que el tiempo de concentración sea menor a cinco horas, la avenida será considerada como súbita y las instituciones tendrán poco tiempo de reacción; en caso contrario, la avenida será lenta.

Con esto queda de manifiesto la importancia de llevar a cabo una vigilancia continua de la lluvia y de los niveles en los ríos en toda la cuenca, también se debe de informar y orientar a las autoridades de Protección Civil en estos temas.

Si se identifica la presencia de eventos meteorológicos que pueden generar inundaciones, éstas podrían pronosticarse, por lo que no deberían presentarse daños importantes; sin embargo, la realidad es otra, ya que la falta de instrumentación para monitorear lluvias, en muchos casos no permite anticipar la

---

<sup>2</sup>Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Depende del punto hidrológicamente más alejado. (Ibáñez et al. 2010)

ocurrencia de este tipo de inundación. La falta de información tiene como consecuencia que al llegar la crecida, la gente la perciba como una avenida súbita.

#### 1.4 Efectos

El impacto social y económico de un fenómeno, depende de la exposición (de personas y bienes) y de la vulnerabilidad de la población.

Dentro de los efectos que producen las inundaciones, se encuentran los siguientes:

- Impacto económico por afectación a sector productivo.

Una inundación puede afectar las actividades agrarias, industriales y comerciales, el medio urbanizado en general y la infraestructura (vivienda, caminos, etc.) y servicios públicos, desperfectos en sistemas energéticos o de telecomunicaciones.

- Impacto ambiental

La fuerza del agua arrastra parte del suelo, plantas, vegetación, etc., acción que puede afectar la capacidad de rebrote de la flora y por lo tanto, de colonización de las especies.

La vegetación tiene un papel importante en la reducción de la erosión debido a que frena la velocidad del agua, y si ésta es arrastrada por el flujo, existe mayor posibilidad de erosión.

- Proliferación de microorganismos patógenos
- Pérdida de vidas

Así mismo, las inundaciones dejan un conjunto de efectos secundarios:

- Enfermedades transmisibles
- Escasez de alimentos
- Problemas de eliminación de desechos
- Contaminación de agua potable

## 1.5 Mitigación de daños por inundaciones

Las medidas que pueden llevarse a cabo para contrarrestar los daños causados por inundaciones pueden ser clasificadas de dos formas:

- a) Medidas estructurales
- b) Medidas no estructurales

### 1.5.1 Medidas estructurales

Las medidas estructurales son aquellas para las cuales (como su nombre lo indica) es necesaria la construcción de alguna obra de infraestructura hidráulica cuyo objetivo será evitar o mitigar inundaciones mediante dos criterios:

- Mantener el agua dentro del cauce del río, lago o laguna
- Evitar que el agua que ha salido de los cauces, alcance poblaciones.

Dentro de las obras encontramos las siguientes:

#### Obras de regulación

Son obras que interceptan directamente el agua que escurre y la descargan de manera controlada, evitando inundaciones aguas abajo; dentro de estas obras podemos encontrar las presas de almacenamiento, presas rompe-picos, etc.

#### Obras de rectificación

Su función es facilitar la conducción rápida del agua por su cauce, ya sea mediante el dragado de ríos, rectificación de cauces (canalización o entubamiento) o corte de meandros.

## Obras de protección

Confinan el agua dentro del cauce de los ríos, como los bordos.

### 1.5.2 Medidas no estructurales

Este tipo de medidas son todas aquellas que tienen como base la planeación, organización, coordinación y ejecución de acciones que buscan disminuir los daños ocasionados por las inundaciones. Dentro de estas medidas se encuentran: la vigilancia, alertas, planes de protección civil, elaboración de mapas de riesgo, entre otros.

Los mapas de riesgo ayudan a visualizar de manera gráfica las zonas propensas al riesgo y permiten evaluar el posible daño al que la zona está expuesta; en el caso de riesgo latente de inundación, los mapas pueden ayudar a definir un perímetro inundable y evitar que en esas zonas exista algún asentamiento humano.

## CAPÍTULO II. ZONA DE ESTUDIO

### 2.1 Descripción de la zona de estudio

#### 2.1.1 Ubicación

El municipio de la Antigua (figuras 8 y 9) se encuentra entre las coordenadas 19°22'latitud Norte y 96° 22'longitud Oeste, a una altitud de 20 msnm, y a 29 km de distancia al norte de la Ciudad y Puerto de Veracruz, México (Instituto de Investigaciones Sociales UABC 2011). Tiene una superficie de 130.60 km<sup>2</sup>, lo que representa el 0.2% de la superficie total del Estado de Veracruz.

La división política territorial del Municipio comprende 34 localidades, de las cuales José Cardel (figura 10) se encuentra caracterizada como urbana; de acuerdo al criterio establecido por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2010).

Entre sus principales localidades encontramos: José Cardel (cabecera municipal), Nicolás Bravo, La Antigua, La Pureza y Salmoral.



Figura 8. Ubicación del municipio La Antigua.



Figura 9. Localización de José Cardel en México.



Figura 10. Estructura Urbana de José Cardel

Es importante hacer énfasis en que la localidad urbana de José Cardel se encuentra asentada sobre planicies y hay una importante erosión hídrica causada por el río La Antigua, llamada erosión vertical, culpable de causar daños a puentes, caminos y viviendas.

## 2.2 Fisiografía

El municipio de la Antigua pertenece a la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur (figura 11), que abarca los estados de Veracruz, Tabasco, y Campeche, colinda con las provincias del Eje Neovolcánico, Sierra Madre del Sur, Cordillera Centroamericana, Sierra de Chiapas y Guatemala, así como la Península de Yucatán.



Abundan suelos aluviales profundos, ya que en esta zona tienen su desembocadura al Golfo de México algunos de los mayores ríos de México, como son el sistema Grijalva-Usumacinta, Coatzacoalcos y el Papaloapan.



Figura 11. Regiones fisiográficas

Esta provincia se divide a su vez en dos subprovincias, Llanuras y Pantanos Tabasqueños y la Llanura Costera Veracruzana, el territorio del Municipio de la Antigua se encuentra asentado en ésta última. Finalmente, esta subprovincia se divide en tres grandes regiones: los sistemas de lomeríos del Oeste, la llanura costera aluvial y los sistemas lomeríos del Sur y Sureste (Instituto de Investigaciones Sociales UABC 2011).

### 2.3 Geología

En la región de la costa del Municipio afloran sedimentos no consolidados de origen fluvial y eólico (en forma de dunas, por ejemplo); estos sedimentos son principalmente arenas compuestas de feldespatos, micas y fragmentos de roca.

La zona occidental del Municipio se compone de suelos aluviales, depositados por acción fluvial. La geomorfología de José Cardel está compuesta básicamente por planicies onduladas exógeno acumulativas, de origen sedimentario, formada por el depósito de los materiales aluviales y palustres.

## 2.4 Edafología

El tipo de suelo sobre el que se ubica José Cardel es el Vertisol Pélico de textura fina orientada hacia Oeste; este suelo se expande con la humedad y presenta grietas de contracción cuando están secos.

## 2.5 Hidrología

El Municipio de la Antigua se encuentra en la zona baja de la cuenca hidrológica del Río Jamapa, ubicada en la Región Hidrológica Centro (figura 12). Esta cuenca tiene una superficie de 3,658 km<sup>2</sup> y abarca 28 Municipios que pertenecen al Estado de Veracruz. El escurrimiento principal, río Jamapa, nace en la vertiente del Volcán del Pico de Orizaba y recibe afluentes que escurren desde la Sierra Madre Oriental y desemboca en el Golfo de México.

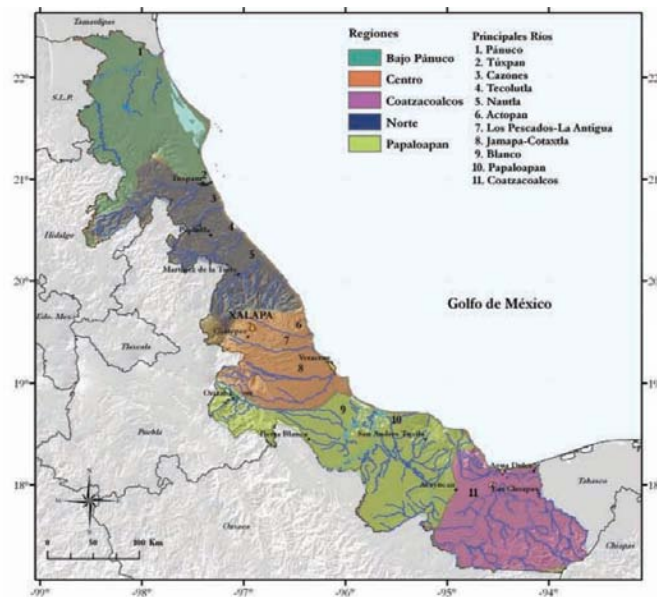


Figura 12. Regiones Hidrológicas de Veracruz CNA (1998) y Conabio (2003)

El Municipio de José Cardel tiene una precipitación normal anual de 1001 a 2000 mm; pertenece a la región hidrológico-administrativa del Golfo Centro (figura 13).

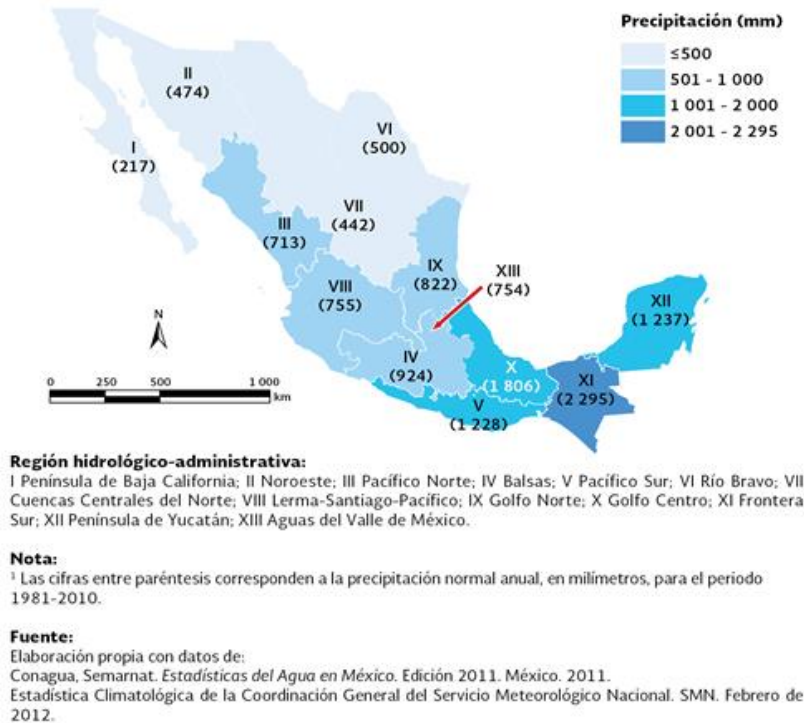


Figura 13. Precipitación normal anual por región hidrológico-administrativa 1981-2010

## 2.6 Clima

En el municipio se localizaron dos tipos de clima, la mayor parte del área se ubica en el clima cálido subhúmedo con una relación Precipitación/Temperatura (P/T) mayor a 55.3 (ésta consiste en una relación inversamente proporcional, a mayor temperatura, menor precipitación y viceversa); en la zona restante se identificó el clima cálido subhúmedo con una relación P/T mayor a 43.2 y menor a 55.3.

En la figura 14 pueden apreciarse ambas zonas, la zona correspondiente al color amarillo corresponde a  $P/T > 55.3$  y la verde a  $43.2 < P/T < 55.3$ .



Figura 14. Climas del municipio La Antigua

La temperatura media en el Municipio de La Antigua se encuentra entre 25.25 °C y 25.6 °C de acuerdo al Sistema de información Climatológica, CLICOM (CONAGUA, 2010), en orden ascendente de Noreste a Suroeste.

La precipitación anual acumulada en el Municipio es considerable debido a que se encuentra por arriba de 1,200 mm de precipitación.

#### 2.4 Riesgos de inundación en José Cardel

Por la ubicación del estado de Veracruz, y específicamente de la ciudad de José Cardel, inciden un gran número de eventos meteorológicos, como es el caso de tormentas tropicales, frentes fríos, huracanes, etc.; los que destacan más por el impacto catastrófico sobre comunidades y asentamientos humanos, son los fenómenos hidrometeorológicos, que causan inundaciones importantes.

La región se ve amenazada por ciclones tropicales que se originan generalmente en el este del Mar Caribe (en el Océano Atlántico), y que viajan hacia el oeste, rumbo al Golfo de México, la Florida, la costa del este de los Estados Unidos de Norteamérica o se disipan al llegar a las frías aguas del Atlántico norte. La mayor parte de estos fenómenos generados en esta zona, adquieren grandes magnitudes debido a que se desplazan grandes distancias sobre las cálidas aguas del Atlántico tropical, que entre otros factores alimentan de energía a dichos fenómenos y sus efectos suelen ser devastadores para las zonas que son alcanzadas (Tobergte y Curtis 2013).

Las principales afecciones para la zona de estudio asociadas a estos eventos ciclónicos, más que el impacto directo de la fuerza de los vientos, son las inundaciones que se presentan; éstas generan un gran riesgo que se magnifica cuando el nivel del mar crece por las tormentas y por el gran volumen de escurrimiento debido a las abundantes precipitaciones que originan en toda la cuenca a la que pertenece la región.

Debido a que el suelo del municipio La Antigua es material no consolidado, hay una gran cantidad de sedimentos de tamaño considerable; y el arrastre de partículas de suelo, es inevitable.

Se determina que el municipio de La Antigua es susceptible a inundaciones debido a los escurrimientos superficiales que afectan principalmente a las ciudades costeras, como es el caso de la localidad de José Cardel, en donde han ocurrido históricamente desastres que provocaron pérdidas humanas y materiales.

## 2.5 Inundaciones en José Cardel

El estado de Veracruz es vulnerable a inundaciones principalmente en sus zonas bajas, éstas se deben principalmente a la deficiencia en la capacidad del drenaje (natural y artificial); son al menos 17 zonas que están en riesgo de inundación,

dentro de las cuales se encuentran los municipios de Tuxpan, Tamiahua, Tecolutla, Nautla, San Andrés Tuxtla, y La Antigua (Larios-Tlali et al. 2015).

El municipio de La Antigua presenta zonas propensas a inundación principalmente hacia las llanuras aluviales formadas por el río La Antigua y sus afluentes, así como la zona costera, las colonias afectadas por desbordes del río La Antigua son principalmente El Cascajal, General Vicente López y Ejidal José Cardel (figura 15).

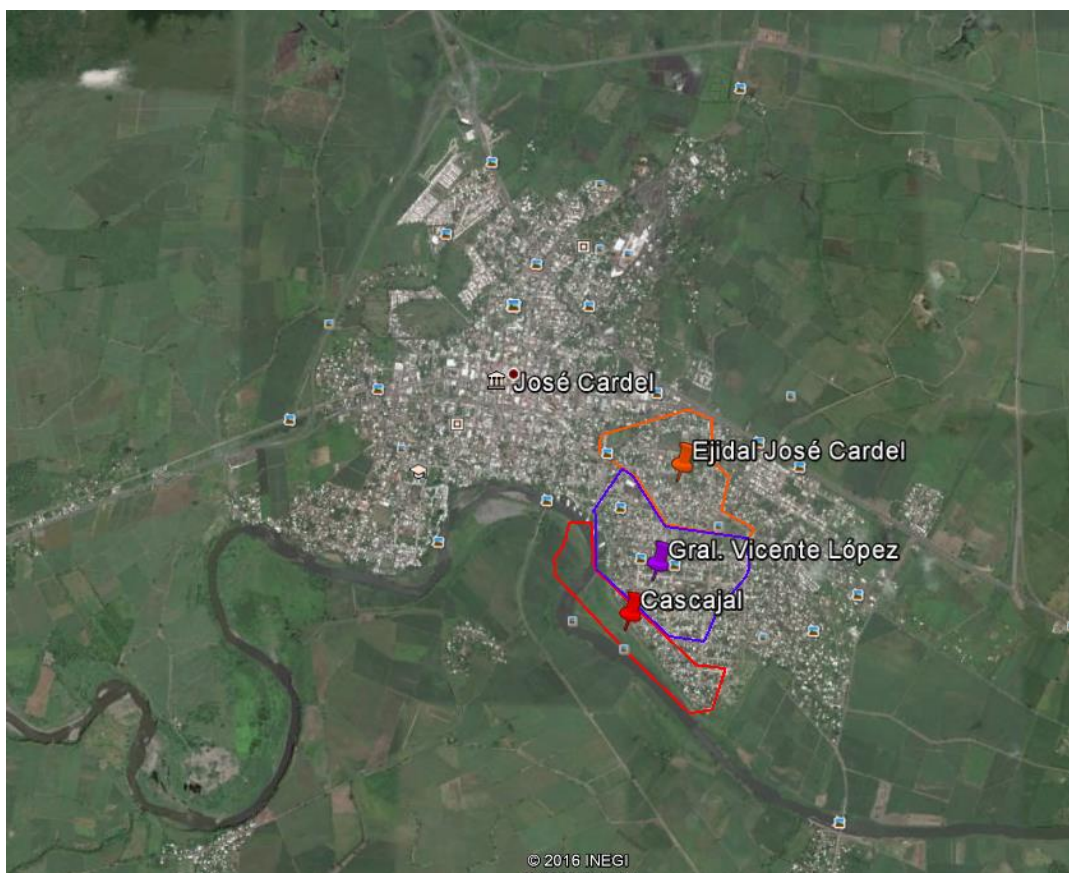


Figura 15. Colonias afectadas por huracán Karl en 2010.

Las inundaciones provocadas por el río La Antigua han estado ligadas al paso de tormentas tropicales y huracanes en el municipio, como sucedió en el 2010 con el devastador efecto de Karl, huracán de categoría 3 en la escala de Saffir-Simpson con vientos de 195 km/h y una presión mínima de 96.1 kPa; Karl ha sido el



huracán más fuerte que ha tocado tierra en la costa del Golfo de México desde el huracán Wilma sobre Florida en 2005.

El municipio de La Antigua siempre ha sido azotado por eventos meteorológicos que han causado inundaciones en diversas localidades. Haciendo un recuento desde hace 13 años, se han presentado los siguientes eventos.

Tabla 1. Últimos eventos meteorológicos que azotaron José Cardel

<b>Fecha</b>	<b>Declaratoria</b>	<b>Tipo de fenómeno</b>	<b>Observaciones</b>
<b>oct-03</b>	Emergencia	Ciclón tropical	Tormenta tropical Larry
<b>ago-05</b>	Emergencia	Ciclón tropical	Tormenta tropical José
<b>oct-05</b>	Emergencia	Ciclón tropical	Tormenta tropical Stan
<b>oct-05</b>	Desastre	Ciclón tropical	Ciclón tropical Stan y Onda tropical No.40
<b>jul-06</b>	Emergencia	Lluvias	Lluvias intensas
<b>ago-06</b>	Desastre	Lluvias	Lluvias extremas
<b>ago-07</b>	Emergencia	Ciclón tropical	Huracán Dean
<b>ago-07</b>	Desastre	Ciclón tropical	Huracán Dean
<b>ago-07</b>	Emergencia	Ciclón tropical	Huracán Lorenzo
<b>sep-10</b>	Desastre	Ciclón tropical	Huracán Karl
<b>jun-13</b>	Desastre	Ciclón tropical	Tormenta tropical Barry
<b>ago-13</b>	Emergencia	Ciclón tropical	Tormenta tropical Fernand
<b>jul-15</b>	Emergencia	Lluvias	Huracán Patricia

### 2.5.1 Descripción del fenómeno hidrometeorológico Karl

El huracán Karl de categoría 3, ha sido uno de los huracanes más fuertes que haya impactado las costas del Golfo de México en los últimos 30 años, en ello radica la importancia de estudiar este fenómeno hidrometeorológico.

El 14 de septiembre de 2010 el Centro Nacional de Huracanes la confirmó como tormenta tropical, cuando ésta se localizaba a aproximadamente 505 kilómetros al este de Yucatán. Debido a las aguas un poco más cálidas ganó fuerza, y el 15 de septiembre tocó tierra en Chetumal como tormenta tropical. Karl se debilitó poco a poco una vez que tocó tierra y pasó sobre Yucatán y Campeche; pero a pesar de esto siempre mantuvo su estructura bien definida y, aun en tierra, seguía teniendo la categoría de tormenta tropical durante la tarde del 15 de septiembre.

La madrugada del 16 de septiembre Karl llegó a las aguas del Golfo de México intensificándose de nuevo. Durante este tiempo pasó de tormenta tropical a huracán, el sexto de la temporada y el tercero de estar activo al mismo tiempo (Huracanes Igor y Julia) manteniendo un crecimiento en su fuerza. Durante la noche alcanzó la Categoría 2 en la Escala Saffir-Simpson. Para entonces, el ojo del huracán era visible desde las imágenes de satélite. El 17 de septiembre pasó a ser categoría 3 con vientos hasta de 195 km/h, encontrándose a escasos 100 km al este de Veracruz.

De esta forma, Karl se convirtió en el huracán más fuerte que ha cruzado sobre la Bahía de Campeche desde hacía 60 años (Huracán Ítem). Karl se debilitó ligeramente después de tocar el Puerto de Veracruz siendo aún categoría 3. Fue el mayor huracán en tocar tierra en el Golfo de México. Para el 18 de septiembre se había debilitado completamente sobre las sierras altas de México.

Los efectos del huracán Karl, que desbordó al río La Antigua, propiciaron que colonias como El Cascajal, Vicente López, Los Carriles, entre otras, fueran arrastradas a lo largo de dos kilómetros; la corriente arrasó con más de 200 viviendas (Explorando México,2010).

El río La Antigua se ensanchó rápidamente a más de 1 km en la noche del 17 de septiembre, mismo día en que el huracán tocó tierra<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> <http://www.jornada.unam.mx/2010/09/23/estados/031n1est>



### **CAPÍTULO III. ANÁLISIS HIDROLÓGICO**

Debido a la naturaleza aleatoria de los fenómenos hidrológicos, es necesario modelarlos a través de un enfoque probabilístico.

Para estimar la probabilidad de ocurrencia de cierto evento se utiliza la técnica estadística del análisis de frecuencias. Esta técnica se emplea como ayuda para advertir desastres, además de soporte para producir diseños eficientes de vertedores de presas, capacidades de drenaje en caminos y poblaciones, el diseño de pilas de puentes, obras de protección, encauzamiento y defensa de ríos (Escalante Sandoval y Reyes Chávez 2002).

El análisis hidrológico se hace con el objetivo de determinar el caudal de diseño. Como primer paso, es necesario localizar la zona de estudio y obtener toda la información hidrológica y topográfica disponible (datos hidrométricos, cartas topográficas, etc.) para realizar un análisis adecuado, que permita predecir de forma acertada posibles eventos futuros.

Un paso muy importante es el de la recopilación y clasificación de la información. La información que se requiere es de varios tipos, como la hidrométrica obtenida del sistema BANDAS (registros de gastos máximos anuales) y meteorológica (pluviométrica y/o pluviográfica).

Para la selección de los datos confiables, estos deberán de contar con las siguientes características:

- Periodo mayor o igual a 30 años de registro
- La estación hidrométrica no debe estar regulada por presas

### 3.1 Estimaciones Preliminares

Para conocer y recopilar toda la información necesaria, es conveniente tener una idea aproximada de la magnitud de la crecida que se estima. El primer acercamiento a la magnitud del gasto de la avenida que se desea conocer es a partir del tamaño de la cuenca, que por sí sólo, conduce a una apreciación del problema (Rivera 2007).

Es necesario estimar el gasto de la avenida para el diseño de diferentes modelos de escurrimiento, para esto se estima el valor del gasto máximo ocasionado por una tormenta extraordinaria. Sin embargo, es común que no siempre se cuente con valores de medición de escurrimiento, o bien, haya cambios en las condiciones de drenaje de la cuenca (urbanización, cambio de uso de suelo, construcción de caminos, erosión) y sea difícil estimar y/o medir los gastos de los cauces.

Para resolver lo mencionado, se cuenta con métodos empíricos que relacionan las condiciones fisiográficas de las cuencas y los datos de precipitación. A éstos métodos se les conoce como modelos de precipitación – escurrimiento.

El método que se empleó para generar el escurrimiento a partir de la precipitación y cuya aceptación en México se debe a su adecuada aproximación, es el que proporciona el gasto pico.

#### Método del hidrograma unitario sintético

A partir de un hidrograma obtenido del registro de lluvias de duración conocida, en un sitio en donde se conocen los valores simultáneos de precipitación y escurrimiento, se genera un hidrograma unitario. Definido como “la relación de gasto contra tiempo del escurrimiento directo producido por 1 mm de lluvia en

exceso, que cae con intensidad uniforme sobre toda la cuenca durante un tiempo conocido como duración en exceso” (Rivera 2007).

El método se basa en la hipótesis de que las lluvias con una misma duración y misma distribución espacial producen hidrogramas unitarios semejantes; así, resulta que las ordenadas del hidrograma son proporcionales al volumen de escurrimiento directo, por lo tanto, el área bajo la curva del hidrograma es el volumen de escurrimiento directo de ese hidrograma.

En caso de que el registro de datos no se encuentre completo, es decir, falte uno o más datos dentro del periodo (mayor a 30 años consecutivos) que se analiza, será necesario realizar un relleno de datos faltantes.

En caso de que sea necesario hacer el relleno de datos, primeramente se procederá a realizar una delimitación regional (para encontrar las estaciones que proveerán de datos para hacer el relleno) que garantice homogeneidad con respecto a las características fisiográficas o hidrológicas. Las regiones homogéneas deberán de ser comunes respecto a sus series de datos en un espacio variable multidimensional antes de ser comunes en un espacio geográfico.

### 3.1.1 Revisión de datos

Es necesario como primer punto revisar la información con que se cuenta.

La estación hidrométrica cercana a la ciudad de José Cardel es la 28003 (tabla 2), de ésta se extrajo la base de datos de gastos máximos mensuales, cuyo registro (perteneciente al periodo 1951-2011) se encuentra completo y, por lo tanto, cumple con las condiciones necesarias para proceder con el análisis de frecuencias con el que se determinará si la información cumple con las condiciones de homogeneidad e independencia para proseguir con el trabajo.

Tabla 2. Estación José Cardel

Estación	Control De Estado	Corriente	Cuenca	Estado	Longitud	Latitud
28003	Cardel	Río la Antigua	Río la Antigua	Veracruz	96.37	19.36

De la base de datos se extrajeron los gastos máximos horarios anuales de la estación 28003, mismos que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Gastos máximos anuales de la estación 28003

Año	Estación 28003 Gasto máximo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Estación 28003 Gasto máximo anual (m <sup>3</sup> /s)	Año	Estación 28003 Gasto máximo anual (m <sup>3</sup> /s)
1951	1018	1972	1420.833	1993	2568
1952	1394	1973	1215	1994	745.5
1953	832	1974	2152	1995	840
1954	699.667	1975	1189.18	1996	574
1955	2026	1976	1335.217	1997	1928
1956	726.627	1977	379.5	1998	1877.011
1957	707.77	1978	901	1999	2279.568
1958	1085	1979	1388	2000	968.522
1959	1388	1980	1519.2	2001	428.906
1960	2847	1981	1580.444	2002	899.678
1961	3378	1982	396	2003	538.786
1962	615.04	1983	1140.882	2004	1599.762
1963	556.44	1984	1923.7	2005	939.191
1964	297.6	1985	511.585	2006	273.047
1965	1081	1986	442.431	2007	933.881
1966	1388.867	1987	405.935	2008	1873.329
1967	1366.2	1988	1696.219	2009	533.968
1968	741.714	1989	829	2010	6482.74
1969	1913.6	1990	550.612	2011	924.035
1970	824.571	1991	1016.499		
1971	508.769	1992	1207.178		

### 3.2 Análisis de frecuencias de eventos extremos

La predicción de eventos extraordinarios para el correcto diseño, construcción, operación y una correcta planeación, requiere del conocimiento de eventos meteorológicos ocurridos en años anteriores, mismos que permitan analizar cómo se comportan dichos eventos.

La complejidad de los procesos físicos de estos eventos hace casi imposible tener estimaciones confiables de diseño basadas en las leyes de la mecánica o la física, ya sea porque estos métodos son insuficientes o porque el modelo matemático resultante es muy complicado; una alternativa en el análisis hidrológico es la aplicación de los conceptos de la teoría de probabilidad y estadística.

El análisis de frecuencias de los gastos máximos anuales se emplea para proveer la magnitud de un evento  $Q_T$ , de cierto periodo de retorno "Tr", para el diseño de una obra hidráulica, para el manejo de las llanuras de inundación, etc.; sirve como ayuda en la planeación y manejo de las cuencas hidrológicas. Sin embargo, el proyectista no sólo debe estimar la magnitud del evento de diseño, sino que también debe proporcionar la probabilidad de excedencia, con el fin de fijar la seguridad del funcionamiento de la obra o bien el riesgo de falla (Escalante Sandoval y Reyes Chávez 2002).

El análisis estadístico de gastos máximos anuales (análisis de frecuencia), tiene como propósito calcular la magnitud de un cierto gasto máximo para un cierto periodo de retorno Tr, por medio del ajuste a una función de distribución de probabilidad que proporcione el mínimo error estándar de ajuste (Anon n.d.).

#### 3.2.1 Pruebas de homogeneidad

La homogeneidad es una condición que se cumple cuando existe una gran semejanza entre las unidades que componen el conjunto; tiene en cuenta variaciones observadas a una cierta escala y según un número limitado de criterios.

La falta de homogeneidad de los datos, es inducida por las actividades humanas como la deforestación, apertura de nuevas áreas al cultivo, rectificación de cauces, construcción de embalses y reforestación. También es producto de los procesos naturales súbitos, como incendios forestales, terremotos, deslizamiento de laderas y erupciones volcánicas.

Para cada una de las pruebas correspondientes al análisis de frecuencias, es necesario que se elija el periodo más largo de datos continuos; en este caso, el periodo más largo es igual al registro completo de datos.

### Prueba estadística de Helmer

La prueba consiste en analizar el número de cambios de signo y el número de secuencias de signos de las desviaciones de cada evento “x” de la serie “j”, con respecto a su valor medio “x̄”.

La serie se considera homogénea si cumple:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad \text{----- Ecuación 1}$$

En donde:

$n_j$ -Número de elementos de la serie “j”

S-Número de secuencias

C-Número de cambios

A continuación se muestran los resultados de la prueba de homogeneidad (tabla 4), en donde se puede apreciar que la estación 28003 sí cumple con la desigualdad (ecuación 1) establecida para la prueba.

Tabla 4. Resultados de prueba estadística de Helmert

<b>Estación 28003</b>	
<b>Cambios=</b>	32
<b>Secuencias=</b>	28
$-\sqrt{n_j - 1}$	-7.746
<b>S-C=</b>	-4
$\sqrt{n_j - 1}$	7.746
<b>Homogénea</b>	SÍ

### Prueba estadística T de Student

La prueba estadística T de Student permite determinar si la pérdida de homogeneidad de la serie que se analiza, es debida a un cambio abrupto en la media. Si se considera una serie de datos  $x^j$  para  $i=1,2,\dots,n_j$ , de la serie "j", misma que se divide en dos conjuntos de tamaño  $\frac{n_j}{2} = n_1 = n_2$  (ver tabla 5).

Tabla 5. Subconjuntos de tamaño n/2.

<b>Número</b>	<b>28003</b>		<b>Número</b>	<b>28003</b>	
	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>1</b>	<b>2</b>
<b>1</b>	564.49	200.6	<b>14</b>	203.02	272.86
<b>2</b>	905.29	429.91	<b>15</b>	505.73	510.5
<b>3</b>	419.15	607.3	<b>16</b>	523.27	710.07
<b>4</b>	479.51	841.87	<b>17</b>	600.33	1110.57
<b>5</b>	841.26	1153.7	<b>18</b>	386.85	323.73
<b>6</b>	431.4	216.92	<b>19</b>	776.88	505.62
<b>7</b>	387.49	501.87	<b>20</b>	534.97	260.27
<b>8</b>	544.27	837.58	<b>21</b>	268.99	831.14
<b>9</b>	511.79	302.87	<b>22</b>	1057.2	755.59
<b>10</b>	1260.78	233.71	<b>23</b>	475.14	1306.72
<b>11</b>	1768.1	288	<b>24</b>	1415.71	447.69
<b>12</b>	430.5	794.4	<b>25</b>	902.17	246.95
<b>13</b>	336.48	355.23	<b>26</b>	753.09	

Entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ \frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \text{ --- Ecuación 2}$$

Donde:

$\bar{x}_{1,2}, S_{1,2}$  Son la media y varianza de la primera parte del registro de tamaño  $n_{1,2}$ .

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas, y con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha=0.05$ .

Únicamente si el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie de datos  $x^j$  se considera no homogénea.

A continuación se presentan los resultados para la prueba estadística “t de Student” (tabla 6), en donde se puede apreciar que la estación 28003 es homogénea debido a que el valor absoluto de  $t_d$  es menor que el valor de la distribución t de Student.

Tabla 6. Resultados de la prueba "T de Student"

Variable	28003
td	-0.003
v	59.000
T de Student	2.001
¿HOMOGÉNEA?	Sí

### Prueba estadística de Cramer

Esta prueba tiene como propósito verificar la homogeneidad en la serie de datos  $x^j$  de la serie “j” para  $i=1,2,\dots, n_j$ , y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se



consideran tres bloques, el primero es del tamaño de la muestra  $n_j$ ; el segundo tiene el 60% de los últimos valores de la muestra  $n_j$  ( $n_{60}$ ); el tercero tiene el 30% de los últimos valores de la muestra  $n_j$  ( $n_{30}$ ) (ver tabla 7).

Tabla 7. Bloques 60% y 30 %

<b>ESTACIÓN 28003</b>	
<b><math>n_{60}</math></b>	<b><math>n_{30}</math></b>
1189.18	745.50
1335.22	840.00
379.50	574.00
901.00	1928.00
1388.00	1877.01
1519.20	2279.57
1580.44	968.52
396.00	428.91
1140.88	899.68
1923.70	538.79
511.59	1599.76
442.43	939.19
405.94	273.05
1696.22	933.88
829.00	1873.33
550.61	533.97
1016.50	6482.74
1207.18	924.04
2568.00	
745.50	
840.00	
574.00	
1928.00	
1877.01	
2279.57	
968.52	
428.91	
899.68	
538.79	
1599.76	
939.19	
273.05	
933.88	
1873.33	
533.97	
6482.74	
924.04	

La prueba compara el valor de  $x^j$  del registro total (tabla 8), con cada una de las medias de los bloques elegidos  $x_{60}^j$  y  $x_{30}^j$  (tabla 9).

Tabla 8. Valores estadísticos de la muestra total

<b>Muestra total</b>	<b>28003</b>
<b>Media</b>	1242.692
<b>S</b>	945.708

Tabla 9. Valores estadísticos de las muestras

<b>BLOQUES</b>	<b>28003</b>	
	<b><math>n_{60}</math></b>	<b><math>n_{30}</math></b>
<b>Media</b>	1232.987	1368.885
<b>S</b>	1063.031	1405.501

Para que la serie analizada sea considerada como serie estacionaria en la media, se deberá cumplir la condición de no existir una diferencia significativa entre las medias de los bloques.

$$\bar{x}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{x_i^j}{n_j} \text{ ----- Ecuación 3}$$

$$S_x^j = \left[ \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{x}^j)^2 \right]^{1/2} \text{ --- Ecuación 4}$$

$$\bar{x}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{x_k^j}{n_{60}} \text{ ----- Ecuación 5}$$

$$\bar{x}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{x_k^j}{n_{30}} \text{ ----- Ecuación 6}$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\ddot{x}_{60}^j - \ddot{x}^j}{S_x^j} \text{ ----- Ecuación 7}$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\ddot{x}_{30}^j - \ddot{x}^j}{S_x^j} \text{ ----- Ecuación 8}$$

$$t_w = \left[ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w(1 + (\tau_w^j)^2)} \right]^{1/2} |\tau_w^j| \quad \text{para } w = 60 \text{ y } w = 30 \text{ -- Ecuación 9}$$

El estadístico  $t_w$  tiene distribución t de Student de dos colas con  $v = n_1 + n_2 - 2$  (ecuación 10) grados de libertad y para un nivel  $\alpha=0.05$ .

La diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie de datos  $x_i^j$  se considera no homogénea únicamente si el valor absoluto de  $t_w$  (para  $w=60$  y  $w=30$ ) es mayor que el de la distribución t de Student.

El resultado de la prueba de Cramer se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de prueba de Cramer

BLOQUES	28003	
	n <sub>60</sub>	n <sub>30</sub>
<b>T</b>	-0.010	0.133
<b>t<sub>w</sub></b>	0.098	0.666
<b>v</b>	53	
<b>T de Student</b>	2.006	
<b>¿Bloque Homogéneo?</b>	SÍ	SÍ
<b>¿Serie homogénea?</b>	SÍ	

### 3.2.2 Prueba de independencia de eventos

La muestra  $x_i^j$  de la serie "j" para  $i=1,2,\dots,n_j$ , debe de estar compuesta por variables aleatorias para poder llevar a cabo el análisis de frecuencias. Para probarlo se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial  $r_k^j$  para diferentes tiempos de retraso k.

La expresión para obtener el coeficiente de autocorrelación serial de retraso (k), es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (x_i^j - \bar{x}^j)(x_{i+k}^j - \bar{x}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{x}^j)^2}; \text{ para } k = 1, 2, \dots, \frac{n_j}{3} \text{ --- Ecuación 10}$$

Donde:

$$\bar{x}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{x_i^j}{n_j} \text{ --- Ecuación 11}$$

Los límites del 95% de confianza para  $r_k^j$  se pueden obtener de la manera siguiente:

$$r_k^j (95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \text{ --- Ecuación 12}$$

La gráfica de los valores estimados para  $r_k^j$  (ordenadas), contra los tiempos de retraso k (abscisas), junto con sus correspondientes límites de confianza, se llama correlograma de la muestra.

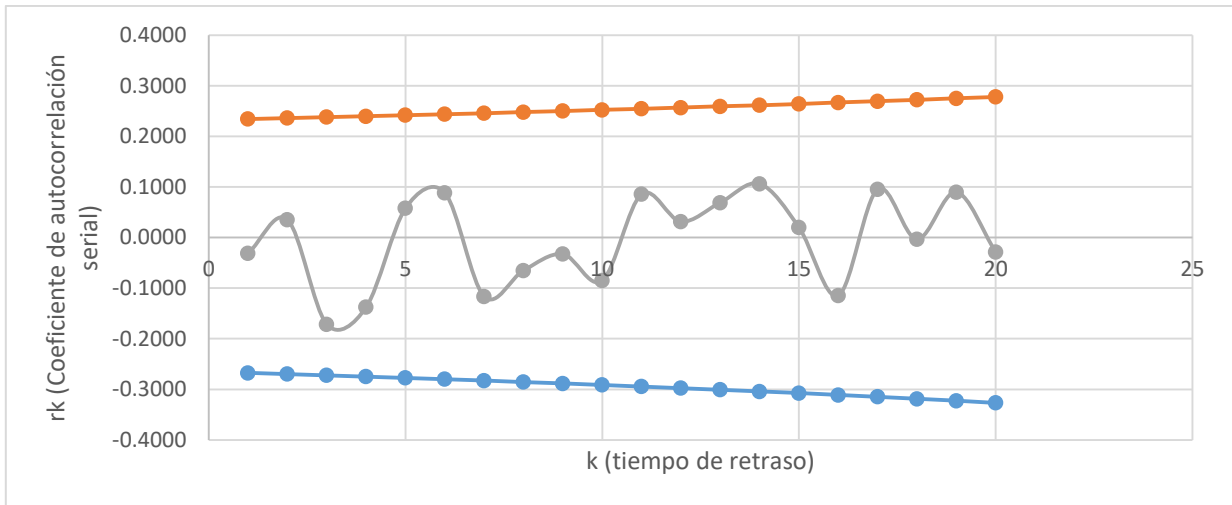
Si sólo el 10% de los valores  $r_k^j$  sobrepasan los límites de confianza, se dice que la serie de datos  $x_i^j$  es independiente y por lo tanto es una variable que sigue las leyes de la probabilidad.

A continuación se muestran los resultados (tabla 11) de la prueba para la estación 28003 (José Cardel).

Tabla 11. Resultados de los coeficientes de la prueba de independencia

<b>Límite inferior</b>	<b>Coefficiente de autocorrelación</b>	<b>Límite superior</b>
-0.2676	-0.0311	0.2343
-0.2699	0.0353	0.2360
-0.2724	-0.1716	0.2379
-0.2749	-0.1376	0.2398
-0.2774	0.0578	0.2417
-0.2801	0.0884	0.2437
-0.2828	-0.1165	0.2457
-0.2855	-0.0651	0.2478
-0.2884	-0.0327	0.2499
-0.2914	-0.0852	0.2521
-0.2944	0.0857	0.2544
-0.2975	0.0317	0.2567
-0.3008	0.0690	0.2591
-0.3041	0.1062	0.2616
-0.3076	0.0202	0.2641
-0.3111	-0.1149	0.2667
-0.3148	0.0955	0.2694
-0.3187	-0.0032	0.2721
-0.3226	0.0898	0.2750
-0.3267	-0.0285	0.2780

El siguiente correlograma de la estación 28003 (gráfica 1), permite observar que, como se estipula anteriormente, la serie de datos es independiente debido a que la curva del coeficiente de correlación queda dentro de los límites establecidos para un 95% de confianza.



Gráfica 1. Correlograma (Estación 28003)

### 3.2.3 Resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia

Para que los resultados del análisis probabilístico de estimación de valores máximos (asociados a una determinada probabilidad de excedencia), sean teóricamente válidos, la serie de datos o muestra debe satisfacer ciertos criterios estadísticos que son: aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad.

Luego de aplicar las pruebas de homogeneidad e independencia a la estación 28003, se concluye que la serie de datos (de la base de datos máximos horarios anuales) cumple con estos dos criterios. Por lo tanto, como la base está completa, es posible proceder al cálculo de las avenidas de diseño.

### 3.3 Teoría distribucional

La planeación y el diseño de obras hidráulicas están relacionados con eventos hidrológicos futuros, cuyo tiempo de ocurrencia o magnitud no pueden predecirse, ya que no están gobernados por leyes físicas o químicas conocidas, sino por las leyes de azar. Es por ello que la probabilidad y la estadística juegan un papel muy importante para pronosticar eventos hidrológicos.

Debido a que en hidrología se cuenta con periodos muy cortos de precipitaciones para poder estimar la lluvia de diseño de una avenida, se requiere buscar entre las distintas funciones de distribución de probabilidad teóricas, la que se ajuste mejor a los datos medidos, y usar esta función para poder extrapolar los eventos de diseño, ya sea por medios gráficos o por medio de la obtención de los parámetros de su función de distribución (Teóricos n.d.).

Una distribución de probabilidad indica toda la gama de valores que pueden representarse como resultado de un experimento si éste se llevase a cabo. Es decir, describe la probabilidad de que un evento se realice en el futuro; además, constituye una herramienta fundamental para la prospectiva, puesto que se puede diseñar un escenario de acontecimientos futuros considerando las tendencias actuales de diversos fenómenos naturales.

Toda distribución de probabilidad es generada por una variable (porque puede tomar diferentes valores) aleatoria  $x$  (porque el valor tomado es totalmente al azar), y puede ser de dos tipos:

- Variable aleatoria discreta (entera, finita).
- Variable aleatoria continua (infinita).

La Teoría de los Valores Extremos tiene como objetivo la extrapolación de la información, ésta tiene aplicación cuando se requiere diseñar estructuras con gastos máximos asociados a diferentes periodos de retorno de diseño.

La interpretación de un valor extremo invoca una excepción, un evento catastrófico, un máximo o un mínimo esperado según las estadísticas.

La población que se analizó es una serie de datos ciclónicos, asociados a gastos mayores producidos por precipitaciones extraordinarias.

### 3.3.1 Metodología

Las probabilidades estimadas, son aproximadas debido a que dependen de valores específicos de las observaciones en una muestra. Es conveniente que después de ajustar la información a una función de distribución de probabilidad se determinen las probabilidades de los eventos utilizando esa función de distribución.

Para determinar la función de densidad de probabilidad, se lleva a cabo el siguiente proceso:

Los valores de la muestra se ordenan para formar un histograma de frecuencias.

La metodología que se empleará para llevar a cabo de forma correcta el análisis de frecuencia, es la siguiente:

- 1) Ordenar la muestra de mayor a menor
- 2) Asignarle un periodo de retorno mediante la ley de Weibull
- 3)

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad \text{--- Ecuación 13}$$

- 4) Asignarle una probabilidad
- 5) Ajustar a la muestra las distintas distribuciones de probabilidad
- 6) Seleccionar la mejor distribución con el criterio del error estándar de ajuste que se muestra a continuación:
- 7)

$$EEa = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\ddot{x}_T^j - x_T^j)^2}{n_j - m_p} \right]^{1/2} \quad \text{--- Ecuación 14}$$

En donde:

$\ddot{x}_T^j$ - Son los eventos  $\ddot{x}_i^j$  ordenados de mayor a menor para un periodo de retorno asignado y una probabilidad de no excedencia.

$n_j$ - Número de datos de la muestra

$m_p$ - Número de parámetros de la distribución de probabilidad

$x_T^j$ -Evento estimado por cierta distribución de probabilidad



- 8) Con la mejor distribución se obtienen los eventos de diseño para  $T= 2, 5, 10, 20, 50, 100$  y  $200$  años.

El ajuste de un conjunto de datos hidrológicos a una distribución permite que una gran cantidad de información probabilística en la muestra pueda ser representada por una función dentro de ciertos parámetros. El ajuste requiere de un método de estimación de parámetros, mismo que permita relacionar la información muestral con la de la población.

Existen diversos métodos de estimación, dentro de los cuales encontramos:

- Método de momentos
- Máxima verosimilitud
- Mínimos cuadrados

El método dependerá del tipo de distribución que se seleccione, pues algunas requieren un tipo de método en específico, como la distribución Gumbel de dos poblaciones (Doble Gumbel), en donde se necesita calcular los parámetros por mínimos cuadrados.

### 3.3.2 Distribución de probabilidad

En los estudios realizados para eventos hidrológicos extremos se incluye la selección de una secuencia de observación de un conjunto de datos, por ejemplo en el estudio de los gastos picos en una estación hidrométrica se utilizan solamente los valores máximos registrado cada año, entre todos los valores registrados. Es por ello que se utiliza la función de valores extremos o también llamada Gumbel Doble en hidrología, ya que esta función de distribución se utiliza para determinar la probabilidad de que se presenten grandes avenidas, debido a que se ha demostrado teóricamente que se ajusta a los valores máximos.

La distribución de probabilidad Gumbel se utiliza para el estudio de los gastos máximos anuales en un río o de precipitaciones máximas anuales en un sitio, y por lo tanto para la determinación de avenidas de diseño.

### Doble Gumbel

En nuestro país, existen diversos lugares donde los gastos máximos anuales pertenecen a dos poblaciones diferentes; la primera población está conformada por los gastos producidos por ciclones que se presentan en la zona y la segunda por las precipitaciones relacionadas con los fenómenos meteorológicos dominantes de la región. También existen zonas en donde se tienen datos de gastos producidos por las precipitaciones y otros gastos provenientes de deshielos. En estas situaciones se dice que llegamos a tener dos poblaciones para una misma zona en estudio.

Es por ello que fue necesario desarrollar la función de distribución Doble Gumbel, dada por la siguiente expresión (ecuación. 15):

$$F(x) = p \left[ e^{-e^{-\alpha_1(x-\beta_1)}} \right] + \left[ (1-p)e^{-e^{\alpha_2(x-\beta_2)}} \right] \text{ --- Ecuación 15}$$

$\alpha_1$ : Parámetro de forma de la primera población

$\beta_1$ : Parámetro de forma de la primera población

$\alpha_2$ : Parámetro de escala de la segunda población

$\beta_2$ : Parámetro de escala de la segunda población

$p$ : Parámetro de asociación

Los valores  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  se obtienen ajustando por mínimos cuadrados una función Gumbel a los datos de la primera población y los valores de  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  ajustando otra función de Gumbel a los datos de la segunda población.

Los parámetros  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  definen una cierta inclinación de las curvas, entre más pequeñas más fuerte es la inclinación. Y  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  son parámetros de escala, el valor

más grande que pueden tomar es el máximo valor de la muestra obtenido para las poblaciones 1 y la 2.

No es posible determinar una ecuación para el cálculo de gastos máximos debido a que la función de distribución de probabilidad de Gumbel de dos poblaciones es implícita, eso implica que la solución de dicha ecuación debe realizarse a través de algún método para determinar raíces en una función (Teóricos n.d.).

### 3.3.2.1 Software AX.EXE

El programa AX.EXE ajusta distintas funciones de probabilidad a series de datos, calcula el error estándar de cada una de ellas y estima valores para diferentes periodos de retorno.

Las funciones de probabilidad que contempla el programa, son:

- Normal
- Log-Normal
- Gumbel
- Exponencial
- Gamma
- Doble Gumbel

Los métodos para calcular los parámetros de funciones de probabilidad son:

- Momentos

Consiste en igualar los valores de los parámetros estadísticos de la muestra con los de la población, es decir, que la media, variancia y asimetría (primero, segundo y tercer momento respectivamente) de la muestra sean iguales a los de la función de distribución de probabilidad.

$$a = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \text{ --- Ecuación 16}$$

$$v = \bar{x} - 0.45 S \text{ --- Ecuación 17}$$

- Máxima verosimilitud

Supone que los mejores parámetros de una función deben ser aquellos que maximizan la probabilidad conjunta de ocurrencia de la muestra observada también llamada verosimilitud.

- Mínimos cuadrados

Minimiza la suma de los cuadrados de todas las desviaciones entre los valores calculados y observados. Para el ajuste con el criterio de mínimos cuadrados se establece la función:

$$Z = \sum_{i=1}^n (P(x_i) - F(x_i))^2 \text{ --- Ecuación 18}$$

Donde:

$x_i$ -valores de los datos de la muestra

$P(x_i)$  es la frecuencia relativa acumulada correspondiente a cada valor  $x_i$ -

$F(x_i)$  es el valor de la función de distribución asociada a  $x_i$  (este valor depende de los parámetros que se busca ajustar).

Definida Z, se encuentran los valores de los parámetros que la hacen mínima, mediante un proceso iterativo.

### Cálculo de la distribución doble gumbel

El método usado en la función Doble Gumbel es de mínimos cuadrados. La función de probabilidad Doble Gumbel permite analizar muestras de datos

formadas por dos poblaciones distintas (por ejemplo gastos máximos provocados por ciclones o los debidos a tormentas de invierno).

El procedimiento consiste en escoger arbitrariamente un valor de  $P$  igual a 0.8, con lo que la población con gastos grandes sería el 20% del número total de ellos; después se ajusta a cada población una función Gumbel sencilla, de esta manera los parámetros que resulten de estos dos ajustes serán los de la función Doble Gumbel y se calcula con ellos el error estándar.

Existen varias reglas para modificar el ajuste de esta función de manera satisfactoria y se basa en la similitud que existe entre la función Gumbel sencilla con una recta, la función Gumbel sencilla ha sido transformada previamente con logaritmos:

$$F = e^{-e^{-a(x-\beta)}} \text{ --- Ecuación 19}$$

$$\ln \frac{1}{F} = e^{-e^{-a(x-\beta)}} \text{ --- Ecuación 20}$$

$$-\ln \ln \frac{1}{F} = e^{-e^{-a(x-\beta)}} \text{ --- Ecuación 21}$$

$$x = -\frac{1}{a} \ln \ln \frac{1}{F} + \beta \text{ --- Ecuación 22}$$

Si

$$x = -\ln \ln \frac{1}{F} \text{ --- Ecuación 23}$$

$$m = -\frac{1}{a} \text{ --- Ecuación 24}$$

$$b = \beta \text{ --- Ecuación 25}$$

$$y = x - - - Ecuación 26$$

Entonces:

$$y = mx + b - - - Ecuación 27$$

Es decir, si se desea tener una pendiente más pronunciada en alguna de las dos poblaciones, su correspondiente parámetro “ $\alpha$ ” deberá disminuir.

El ajuste puede mejorarse cambiando la variable  $P$ .

Finalmente al haber obtenido un error cuadrático menor, se pueden extrapolar los gastos con los parámetros obtenidos anteriormente, el resultado de la extrapolación se muestra en la tabla 12:

Tabla 12. Gastos calculados

Número de evento	Tr (años)	Gasto calculado (m <sup>3</sup> /s)	Número de evento	Tr (años)	Gasto calculado (m <sup>3</sup> /s)
1	2	1027.23	7	200	7906.8
2	5	1641.53	8	500	9657.67
3	10	2214.21	9	1000	10968.93
4	20	3210.92	10	2000	12275.17
5	50	5151.76	11	5000	14003.43
6	100	6556.6	12	10000	15369.96

### 3.4 Análisis conjunto de eventos hidrológicos

El análisis hidrológico consiste de manera general en la estimación de ciertas variables como lluvia, escurrimiento o crecientes, que son necesarias para el dimensionamiento y diseño mismo de diversas obras hidráulicas, así como de la demarcación de planicies de inundación; de las áreas de riesgo o de la factibilidad de zonas de aprovechamiento y del pronóstico de niveles o gastos a tiempo real.

El gasto de diseño de la avenida extraordinaria sirve como gasto de diseño de operación de cualquier obra hidráulica.

En ocasiones es difícil medir los gastos que se presentan en los cauces de la cuenca, pero actualmente existe una solución al problema mencionado; se cuenta con métodos empíricos que relacionan las condiciones fisiográficas de las cuencas y los datos de precipitación. A estos métodos se les conoce como modelos de precipitación-escorrimento (Rivera, 2007).

En México se usan métodos que proporcionan el gasto pico. A partir de un hidrograma obtenido del registro de lluvias de duración conocida, en un sitio en donde se conocen valores simultáneos de precipitación y escurrimiento, se puede generar un hidrograma unitario<sup>4</sup>.

El método del hidrograma unitario se basa en la hipótesis de que las lluvias con la misma duración y misma distribución espacial producen hidrogramas unitarios semejantes. Así, resulta que las ordenadas del hidrograma son proporcionales al volumen de escurrimiento directo. Por lo tanto, el área bajo la curva del hidrograma es el volumen de escurrimiento directo de ese hidrograma.

#### 3.4.1 Estimación de avenidas de diseño

Los eventos hidrológicos extremos generan efectos de diferentes magnitudes, algunos pueden ocasionar una pequeña sobre elevación en el nivel normal del agua (mar o río), mientras que otros pueden tener efectos catastróficos, es por ello que las características de los gastos máximos anuales tienen diversos usos en el diseño y planeación.

---

<sup>4</sup> Hidrograma unitario es definido como “la relación de gasto contra tiempo del escurrimiento directo producido por 1 mm de lluvia en exceso, que cae con intensidad uniforme sobre toda la cuenca durante un tiempo conocido como duración en exceso”.

La práctica hidráulica se ha basado en el ajuste de funciones univariadas de probabilidad para las series de máximos o mínimos anuales. Sin embargo, algunos problemas hidrológicos involucran la ocurrencia simultánea de eventos. Por ejemplo, en el diseño de una presa, la descarga máxima sobre el vertedor no sólo depende del gasto de pico de entrada a la presa, sino también del volumen, la duración y la forma del hidrograma de entrada.

La literatura disponible le da mayor importancia al análisis de la distribución marginal de los gastos pico  $Q_p$  y menos a los volúmenes totales  $V_t$  de dichas avenidas, sin embargo, existen algunos métodos que pretenden reducir las incertidumbres inherentes al proceso de estimación de las avenidas de diseño. Estos métodos pueden dividirse en tres grupos (Escalante Sandoval y Reyes Chávez 2002):

- Aquellos que se basan en la construcción de curvas de reducción.
- Los que usan la relación gasto-volumen.
- Los que realizan un análisis multivariado de las componentes de los hidrogramas a través de las distribuciones de probabilidad.

#### 3.4.2 Técnica de mayoración de la avenida más adversa registrada

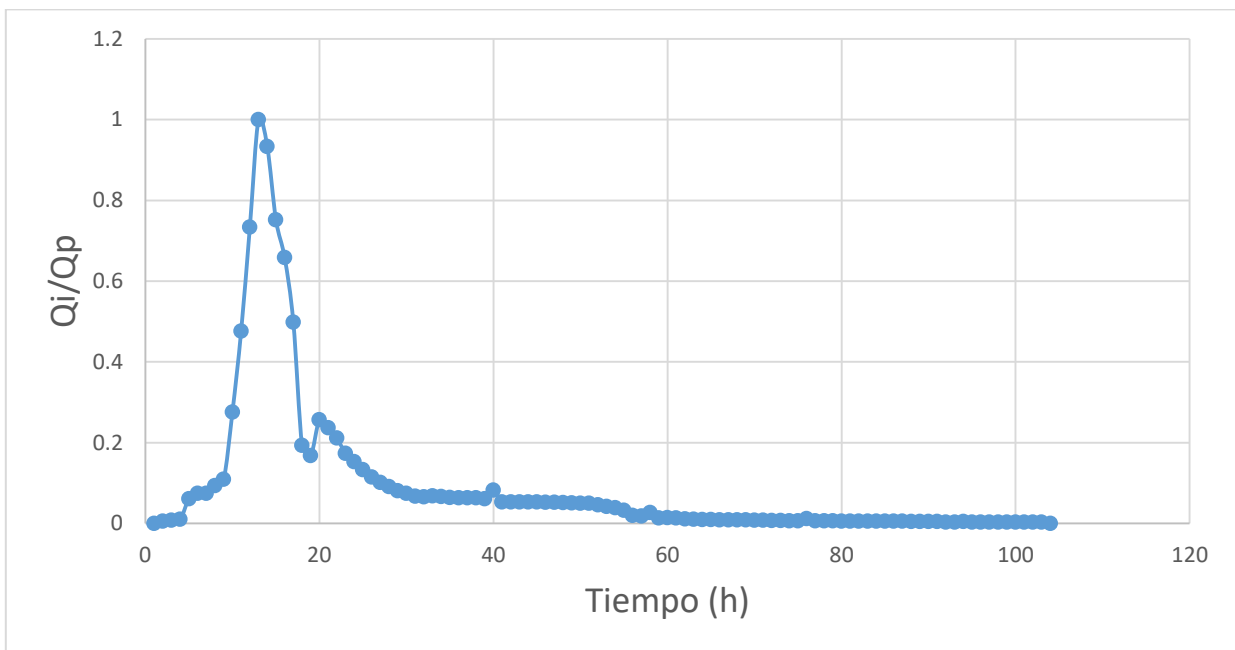
Este método es uno de los más populares y de mayor arraigo en México, debido a la rapidez y facilidad en su aplicación. Se basa en estimar el gasto de pico ( $Q_p$ ) y con algún procedimiento adimensional se construye el hidrograma correspondiente, con lo que se deja como variable secundaria al volumen total. Esta consideración no siempre es la mejor, pues en ocasiones es más importante conocer el volumen total que el gasto pico.

El primer paso de esta técnica consiste en seleccionar la avenida máxima registrada, misma que puede ser considerada como la más adversa (bajo cierto criterio). Una vez elegida se debe de construir un hidrograma adimensional, en



donde cada ordenada se obtiene como  $y_i = \frac{Q_i}{Q_p}$  para  $i=1,2,\dots,n$  hasta la duración del evento (días u horas); en donde  $Q_i$  es un dato del registro de gastos y  $Q_p$  es el dato mayor de la serie de datos. Y  $x_i$  es el tiempo correspondiente a cada dato, en horas, días, etc.; dependiendo de la unidad de tiempo que tenga el registro. En este caso los datos son horarios, por lo tanto  $x_i$  representa el tiempo en horas que dura el evento.

A continuación se presenta en la tabla 13 los valores de las ordenadas del hidrograma unitario adimensional. Así mismo, se presenta la gráfica del hidrograma adimensional (gráfica 2) seleccionado con la técnica de la mayor avenida (volumen/gasto).



Gráfica 2. Hidrograma unitario adimensional

Tabla 13. Valores de las abscisas (horas) y ordenadas ( $Q_i/Q_p$ ), en donde  $Q$  ( $\frac{m^3}{s}$ )

Horas	$Q_i$	$Q_i/Q_p$	Horas	$Q_i$	$Q_i/Q_p$	Horas	$Q_i$	$Q_i/Q_p$
1	0	0	38	402.8	0.064	75	39.7	0.006
2	32.2	0.005	39	387	0.061	76	73.4	0.012
3	50	0.008	40	519.5	0.082	77	37.2	0.006
4	63.4	0.01	41	336.8	0.053	78	37.2	0.006
5	387	0.061	42	336.8	0.053	79	37.2	0.006
6	468.9	0.074	43	336.8	0.053	80	34.7	0.005
7	468.9	0.074	44	336.8	0.053	81	34.7	0.005
8	590.9	0.093	45	336.8	0.053	82	34.7	0.005
9	692.6	0.109	46	332	0.052	83	34.7	0.005
10	1748.1	0.276	47	332	0.052	84	32.2	0.005
11	3013.6	0.476	48	327.2	0.052	85	32.2	0.005
12	4645.1	0.733	49	322.4	0.051	86	32.2	0.005
13	6335.5	1	50	317.7	0.05	87	32.2	0.005
14	5914.1	0.933	51	317.7	0.05	88	29.8	0.005
15	4763	0.752	52	289.9	0.046	89	27.3	0.004
16	4171.4	0.658	53	267.7	0.042	90	27.3	0.004
17	3156.3	0.498	54	246.2	0.039	91	27.3	0.004
18	1225.4	0.193	55	205.6	0.032	92	20.2	0.003
19	1063.8	0.168	56	123.3	0.019	93	20.2	0.003
20	1627.1	0.257	57	116.9	0.018	94	29.3	0.005
21	1500.3	0.237	58	171	0.027	95	20.2	0.003
22	1337.5	0.211	59	86.2	0.014	96	20.2	0.003
23	1100.6	0.174	60	92.1	0.015	97	20.2	0.003
24	966.5	0.153	61	86.2	0.014	98	20.2	0.003
25	842.6	0.133	62	71.8	0.011	99	20.2	0.003
26	728.5	0.115	63	66.2	0.01	100	20.2	0.003
27	644	0.102	64	60.7	0.01	101	20.2	0.003
28	578	0.091	65	58	0.009	102	17.9	0.003
29	512.9	0.081	66	55.3	0.009	103	17.9	0.003
30	468.9	0.074	67	55.3	0.009	104	0	0
31	424.2	0.067	68	55.3	0.009			
32	413.4	0.065	69	52.6	0.008			
33	429.7	0.068	70	50	0.008			
34	418.8	0.066	71	47.4	0.007			
35	408.1	0.064	72	44.8	0.007			
36	402.8	0.064	73	44.8	0.007			
37	402.8	0.064	74	39.7	0.006			

Finalmente, para obtener la avenida de diseño solo se requiere multiplicar las ordenadas  $\frac{Q_i}{Q_p}$  del hidrograma adimensional por el valor estimado de  $Q_T$  (obtenido para diferentes periodos de retorno, con la distribución Doble Gumbel (tabla 14), obteniendo así una avenida con las mismas características de la más adversa registrada, sólo que más grande (Escalante Sandoval y Reyes Chávez 2002).

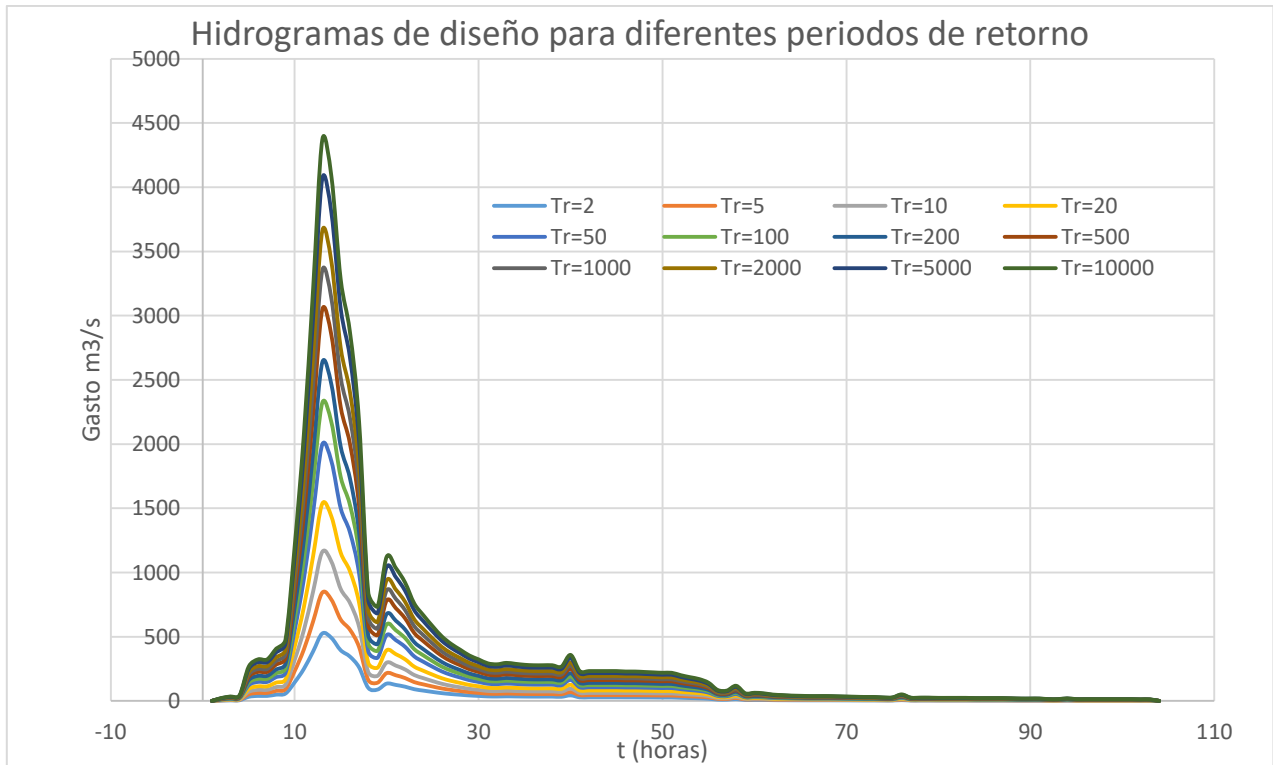
Tabla 14. Avenidas de diseño

Q <sub>r</sub>	1027.23	1641.53	2214.21	3210.92	5151.76	6556.6	7906.8	9657.67	10968.93	12275.17	14003.43	15369.96	
Horas	Q <sub>i</sub> /Q <sub>p</sub>	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000	Q2000	Q5000	Q10000
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.005	5.222	8.345	11.257	16.324	26.191	33.333	40.197	49.098	55.765	62.406	71.192	78.139
3	0.008	8.105	12.953	17.471	25.336	40.65	51.735	62.389	76.204	86.551	96.858	110.495	121.278
4	0.01	10.281	16.429	22.16	32.136	51.56	65.62	79.133	96.656	109.779	122.853	140.149	153.826
5	0.061	62.753	100.28	135.265	196.154	314.719	400.54	483.023	589.983	670.087	749.884	855.463	938.944
6	0.074	76.028	121.494	163.88	237.649	381.295	485.271	585.203	714.79	811.84	908.518	1036.431	1137.571
7	0.074	76.028	121.494	163.88	237.649	381.295	485.271	585.203	714.79	811.84	908.518	1036.431	1137.571
8	0.093	95.811	153.108	206.522	299.486	480.511	611.542	737.477	900.783	1023.086	1144.92	1306.117	1433.575
9	0.109	112.3	179.458	242.065	351.029	563.208	716.79	864.398	1055.809	1199.161	1341.963	1530.902	1680.296
10	0.276	283.433	452.931	610.944	885.956	1421.473	1809.096	2181.643	2664.742	3026.545	3386.962	3863.823	4240.876
11	0.476	488.624	780.829	1053.236	1527.343	2450.545	3118.787	3761.039	4593.878	5217.607	5838.948	6661.032	7311.051
12	0.733	753.15	1203.546	1623.427	2354.201	3777.197	4807.205	5797.153	7080.866	8042.263	8999.979	10267.115	11269.035
13	1	1027.23	1641.53	2214.21	3210.92	5151.76	6556.6	7906.8	9657.67	10968.93	12275.17	14003.43	15369.96
14	0.933	958.901	1532.339	2066.925	2997.336	4809.075	6120.468	7380.856	9015.261	10239.299	11458.65	13071.95	14347.581
15	0.752	772.253	1234.073	1664.604	2413.912	3873.001	4929.135	5944.191	7260.464	8246.246	9228.254	10527.529	11554.862
16	0.658	676.342	1080.805	1457.865	2114.112	3391.987	4316.952	5205.942	6358.738	7222.089	8082.135	9220.044	10119.785
17	0.498	511.761	817.802	1103.109	1599.665	2566.581	3266.466	3939.129	4811.404	5464.667	6115.429	6976.44	7657.238
18	0.193	198.686	317.504	428.272	621.055	996.451	1268.175	1529.33	1867.983	2121.606	2374.259	2708.538	2972.852
19	0.168	172.483	275.63	371.789	539.148	865.035	1100.923	1327.636	1621.625	1841.8	2061.132	2351.325	2580.78
20	0.257	263.817	421.584	568.662	824.641	1323.095	1683.892	2030.655	2480.32	2817.083	3152.557	3596.415	3947.373
21	0.237	243.251	388.718	524.33	760.354	1219.95	1552.619	1872.35	2286.961	2597.47	2906.791	3316.047	3639.645
22	0.211	216.862	346.548	467.449	677.867	1087.604	1384.184	1669.228	2038.86	2315.684	2591.448	2956.306	3244.799
23	0.174	178.447	285.161	384.645	557.79	894.946	1138.99	1373.542	1677.697	1905.484	2132.4	2432.627	2670.016
24	0.153	156.705	250.417	337.78	489.829	785.906	1000.215	1206.189	1473.286	1673.32	1872.588	2136.236	2344.701
25	0.133	136.621	218.323	294.489	427.051	685.183	872.026	1051.602	1284.467	1458.864	1632.594	1862.452	2044.2
26	0.115	118.125	188.766	254.62	369.236	592.42	753.968	909.233	1110.572	1261.359	1411.568	1610.307	1767.45
27	0.102	104.424	166.871	225.087	326.408	523.705	666.515	803.77	981.756	1115.053	1247.84	1423.527	1562.442
28	0.091	93.722	149.769	202.018	292.955	470.032	598.205	721.394	881.138	1000.774	1119.951	1277.633	1402.311
29	0.081	83.16	132.892	179.254	259.943	417.066	530.796	640.103	781.847	888.001	993.749	1133.662	1244.291
30	0.074	76.028	121.494	163.88	237.649	381.295	485.271	585.203	714.79	811.84	908.518	1036.431	1137.571
31	0.067	68.787	109.922	148.271	215.014	344.979	439.051	529.465	646.709	734.515	821.985	937.715	1029.223
32	0.065	67.034	107.122	144.493	209.536	336.19	427.866	515.977	630.234	715.803	801.045	913.827	1003.003
33	0.068	69.671	111.336	150.178	217.779	349.416	444.699	536.276	655.028	743.964	832.559	949.778	1042.462
34	0.066	67.908	108.517	146.376	212.266	340.57	433.441	522.699	638.445	725.129	811.481	925.732	1016.07
35	0.064	66.167	105.735	142.623	206.824	331.839	422.329	509.299	622.077	706.539	790.677	901.999	990.021
36	0.064	65.305	104.358	140.765	204.13	327.516	416.827	502.664	613.973	697.335	780.377	890.249	977.125
37	0.064	65.305	104.358	140.765	204.13	327.516	416.827	502.664	613.973	697.335	780.377	890.249	977.125
38	0.064	65.305	104.358	140.765	204.13	327.516	416.827	502.664	613.973	697.335	780.377	890.249	977.125
39	0.061	62.753	100.28	135.265	196.154	314.719	400.54	483.023	589.983	670.087	749.884	855.463	938.944
40	0.082	84.231	134.603	181.562	263.291	422.437	537.632	648.346	791.915	899.436	1006.546	1148.261	1260.314
41	0.053	54.609	87.266	117.71	170.696	273.874	348.557	420.335	513.413	583.122	652.563	744.439	817.086
42	0.053	54.609	87.266	117.71	170.696	273.874	348.557	420.335	513.413	583.122	652.563	744.439	817.086
43	0.053	54.609	87.266	117.71	170.696	273.874	348.557	420.335	513.413	583.122	652.563	744.439	817.086
44	0.053	54.609	87.266	117.71	170.696	273.874	348.557	420.335	513.413	583.122	652.563	744.439	817.086
45	0.053	54.609	87.266	117.71	170.696	273.874	348.557	420.335	513.413	583.122	652.563	744.439	817.086
46	0.052	53.824	86.012	116.019	168.245	269.94	343.55	414.298	506.039	574.746	643.19	733.747	805.35
47	0.052	53.824	86.012	116.019	168.245	269.94	343.55	414.298	506.039	574.746	643.19	733.747	805.35
48	0.052	53.046	84.768	114.34	165.81	266.034	338.579	408.302	498.716	566.429	633.882	723.129	793.695
49	0.051	52.272	83.531	112.673	163.392	262.154	333.641	402.348	491.443	558.168	624.638	712.583	782.12
50	0.05	51.504	82.304	111.017	160.991	258.301	328.738	396.435	484.221	549.965	615.458	702.111	770.626
51	0.05	51.504	82.304	111.017	160.991	258.301	328.738	396.435	484.221	549.965	615.458	702.111	770.626
52	0.046	47.006	75.116	101.321	146.93	235.742	300.027	361.812	441.931	501.934	561.707	640.791	703.323
53	0.042	43.401	69.355	93.551	135.662	217.663	277.018	334.064	408.039	463.44	518.628	591.648	649.384
54	0.039	39.923	63.798	86.056	124.793	200.224	254.823	307.299	375.347	426.309	477.076	544.246	597.356
55	0.032	33.342	53.282	71.87	104.222	167.218	212.817	256.643	313.473	356.035	398.434	454.53	498.886
56	0.019	20	31.96	43.109	62.515	100.302	127.653	153.941	188.029	213.558	238.99	272.638	299.244
57	0.018	18.952	30.285	40.851	59.239	95.047	120.965	145.875	178.178	202.37	226.469	258.354	283.566
58	0.027	27.726	44.307	59.765	86.667	139.053	176.972	213.416	260.674	296.067	331.324	377.973	414.857
59	0.014	13.969	22.323	30.11	43.664	70.057	89.161	107.521	131.331	149.162	166.925	190.427	209.01

Continuación tabla 14

Q <sub>r</sub>	1027.23	1641.53	2214.21	3210.92	5151.76	6556.6	7906.8	9657.67	10968.93	12275.17	14003.43	15369.96	
Horas	Qi/Qp	Q2	Q5	Q10	Q20	Q50	Q100	Q200	Q500	Q1000	Q2000	Q5000	Q10000
60	0.015	14.932	23.861	32.186	46.674	74.886	95.307	114.933	140.384	159.444	178.432	203.554	223.418
61	0.014	13.969	22.323	30.11	43.664	70.057	89.161	107.521	131.331	149.162	166.925	190.427	209.01
62	0.011	11.633	18.59	25.076	36.364	58.344	74.254	89.545	109.374	124.224	139.017	158.59	174.066
63	0.01	10.728	17.143	23.124	33.533	53.801	68.472	82.573	100.858	114.552	128.193	146.242	160.513
64	0.01	9.838	15.721	21.206	30.751	49.339	62.793	75.724	92.492	105.05	117.56	134.111	147.198
65	0.009	9.399	15.019	20.259	29.379	47.137	59.991	72.345	88.365	100.362	112.314	128.127	140.63
66	0.009	8.964	14.324	19.322	28.019	44.955	57.214	68.996	84.274	95.717	107.115	122.196	134.121
67	0.009	8.964	14.324	19.322	28.019	44.955	57.214	68.996	84.274	95.717	107.115	122.196	134.121
68	0.009	8.964	14.324	19.322	28.019	44.955	57.214	68.996	84.274	95.717	107.115	122.196	134.121
69	0.008	8.533	13.635	18.392	26.671	42.793	54.462	65.678	80.221	91.113	101.963	116.319	127.67
70	0.008	8.105	12.953	17.471	25.336	40.65	51.735	62.389	76.204	86.551	96.858	110.495	121.278
71	0.007	7.682	12.276	16.559	24.013	38.527	49.033	59.13	72.224	82.03	91.799	104.724	114.943
72	0.007	7.263	11.606	15.655	22.701	36.423	46.356	55.902	68.28	77.551	86.786	99.005	108.666
73	0.007	7.263	11.606	15.655	22.701	36.423	46.356	55.902	68.28	77.551	86.786	99.005	108.666
74	0.006	6.435	10.283	13.871	20.115	32.273	41.074	49.532	60.501	68.715	76.898	87.725	96.285
75	0.006	6.435	10.283	13.871	20.115	32.273	41.074	49.532	60.501	68.715	76.898	87.725	96.285
76	0.012	11.902	19.019	25.654	37.203	59.69	75.967	91.61	111.897	127.089	142.224	162.248	178.081
77	0.006	6.027	9.631	12.991	18.839	30.227	38.469	46.391	56.664	64.358	72.022	82.162	90.18
78	0.006	6.027	9.631	12.991	18.839	30.227	38.469	46.391	56.664	64.358	72.022	82.162	90.18
79	0.006	6.027	9.631	12.991	18.839	30.227	38.469	46.391	56.664	64.358	72.022	82.162	90.18
80	0.005	5.623	8.985	12.12	17.576	28.199	35.889	43.28	52.864	60.041	67.191	76.651	84.131
81	0.005	5.623	8.985	12.12	17.576	28.199	35.889	43.28	52.864	60.041	67.191	76.651	84.131
82	0.005	5.623	8.985	12.12	17.576	28.199	35.889	43.28	52.864	60.041	67.191	76.651	84.131
83	0.005	5.623	8.985	12.12	17.576	28.199	35.889	43.28	52.864	60.041	67.191	76.651	84.131
84	0.005	5.222	8.345	11.257	16.324	26.191	33.333	40.197	49.098	55.765	62.406	71.192	78.139
85	0.005	5.222	8.345	11.257	16.324	26.191	33.333	40.197	49.098	55.765	62.406	71.192	78.139
86	0.005	5.222	8.345	11.257	16.324	26.191	33.333	40.197	49.098	55.765	62.406	71.192	78.139
87	0.005	5.222	8.345	11.257	16.324	26.191	33.333	40.197	49.098	55.765	62.406	71.192	78.139
88	0.005	4.826	7.711	10.402	15.084	24.201	30.801	37.143	45.368	51.528	57.665	65.783	72.203
89	0.004	4.433	7.083	9.554	13.855	22.23	28.292	34.118	41.673	47.332	52.968	60.426	66.322
90	0.004	4.433	7.083	9.554	13.855	22.23	28.292	34.118	41.673	47.332	52.968	60.426	66.322
91	0.004	4.433	7.083	9.554	13.855	22.23	28.292	34.118	41.673	47.332	52.968	60.426	66.322
92	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
93	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
94	0.005	4.752	7.593	10.242	14.852	23.83	30.328	36.573	44.672	50.737	56.78	64.774	71.095
95	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
96	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
97	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
98	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
99	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
100	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
101	0.003	3.276	5.235	7.061	10.239	16.428	20.908	25.213	30.797	34.978	39.143	44.655	49.012
102	0.003	2.897	4.63	6.245	9.057	14.531	18.493	22.302	27.24	30.938	34.623	39.497	43.352
103	0.003	2.897	4.63	6.245	9.057	14.531	18.493	22.302	27.24	30.938	34.623	39.497	43.352
104	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Finalmente, la gráfica del hidrograma de las avenidas de diseño, se presenta a continuación en la gráfica 3:



Gráfica 3. Hidrogramas de diseño

Las avenidas calculadas para diferentes periodos de retorno son el componente hidrométrico que se necesita para alimentar el modelo hidrodinámico; por lo tanto se prosigue a crear el modelo hidrodinámico para generar las condiciones que se presentarán por los eventos calculados.

Los hidrogramas de diseño se obtuvieron haciendo la respectiva gráfica de las columnas “horas” y “Qi”.

## CAPÍTULO IV. MODELO HIDRODINÁMICO

Durante la década de los 90's el auge computacional llegó a revolucionar la ingeniería hidráulica mediante el desarrollo de diferentes programas numéricos con los cuáles es posible representar condiciones hidráulicas de diferentes sucesos (modelación de vertedores, ríos, inundaciones, etc.).

Al contar con las ecuaciones de Saint Venant bidimensionales de aguas someras, las ecuaciones unidimensionales para el análisis de los sistemas de drenaje pluvial y las herramientas computacionales actuales (sistemas de información geográfica, levantamientos topográficas de alta resolución, equipos de medición de caudales y accesibilidad a equipos de cómputo), se han generado las condiciones necesarias para representar el fenómeno lluvia escurrimiento en zonas urbanas y así ofertar soluciones ingenieriles viables ante diversos escenarios de riesgo para diversos periodos de retorno (Llaguno Guilberto, Ó. y Rodríguez Varela, J.M., 2015).

La dinámica ligada a los escurrimientos directos, adquiere especial importancia en espacios potencialmente vulnerables a inundación como los que conforman la zona costera del Golfo de México debido a la ocurrencia de eventos meteorológicos comunes en esa zona, por lo que su caracterización representa un aspecto básico para la prevención de riesgos a la población.

Conocer el alcance que pudiera tener este tipo de eventos proporcionaría una gran ventaja para la prevención de desastres naturales y la mitigación de los riesgos que estos pudieran ocasionar. Uno de los efectos hidrodinámicos de mayor interés es el de la velocidad de arrastre que tiene el flujo y la fuerza (capacidad de arrastre) con que éste fluye.

## 4.1 Descripción del modelo

Para este trabajo y considerando la complejidad de los fenómenos hidrodinámicos, se implementó el modelo matemático bidimensional MIKE 21, ideal para simulaciones en zonas costeras.

El modelo resuelve las ecuaciones promediadas de Reynolds (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes), mismas que están sujetas a hipótesis de incompresibilidad, presión hidrostática, consideran la aproximación de Boussinesq y se sirven de la solución de Riemann para manejar cualquier discontinuidad en la solución (Dhi 2013).

El motor de cálculo del modelo, es una malla flexible (máxima flexibilidad en la resolución de la malla de cálculo), el módulo hidrodinámico calcula variaciones de nivel del agua y flujo en respuesta a fuerzas externas (Dhi 2013).

### 4.1.1 Ecuaciones de gobierno

El comportamiento de un fluido viscoso está gobernado por las Ecuaciones de Navier Stokes. Estas ecuaciones fueron deducidas en 1821 por Claude Navier y años más tarde, de modo independiente, por George Stokes en 1845. Las ecuaciones de Navier Stokes forman un sistema hiperbólico de leyes de conservación no lineales y, debido a su complejidad, no poseen solución analítica.

En muchos flujos existentes en la naturaleza, las dimensiones horizontales son claramente predominantes; si además la variación en la vertical de las componentes horizontales de la velocidad es pequeña y apenas existen aceleraciones verticales, con frecuencia puede describirse satisfactoriamente el flujo por medio de unas ecuaciones en dos dimensiones, resultado de integrar en la vertical las ecuaciones 3D para flujo incompresible; las nuevas ecuaciones en dos dimensiones (conocidas como ecuaciones de aguas someras o de Saint

Venant) estudiarán flujos en superficie libre, turbulentos y no permanentes en los que la profundidad del fluido es pequeña en relación a las dimensiones horizontales.

A pesar de las fuertes hipótesis empleadas en la obtención de las ecuaciones de aguas someras, al resolverlas se obtienen resultados muy próximos a la realidad, incluso en casos en que no se cumplen algunas de esas hipótesis. En particular, la versión para flujos unidimensionales de estas ecuaciones simplificadas es de uso habitual en el estudio del flujo en canales abiertos.

Las hipótesis que consideran en las ecuaciones de aguas someras son:

- a) La pendiente del fondo es pequeña
- b) La curvatura de las líneas de corriente es pequeña, por lo que la distribución de presiones puede considerarse hidrostática.
- c) El movimiento principal de las partículas ocurre en planos horizontales.
- d) La distribución en la vertical de las componentes en x,y de la velocidad (u,v), es prácticamente uniforme. Esto permite, al integrar en la vertical, sustituir u y v por sus valores medios.
- e) Las fuerzas de masa que actúan son la gravedad en dirección vertical y la fuerza de Coriolis, en el plano horizontal, por lo que  $F=(f_v,-f_u,-g)$ , siendo  $f=2\Omega\sin\theta$ .
- f) La aceleración vertical de las partículas se considera despreciable frente a g.
- g) La pérdida de energía por fricción en los contornos, en flujo no permanente, puede evaluarse mediante fórmulas empíricas válidas para flujo permanente, como las de Chézy o Manning.
- h) Se considera despreciable la variación de  $v_t$  con la profundidad.



El modelo Mike 21 está basado en la solución del sistema de ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones, que consiste en tres ecuaciones (Dhi 2013):

- Ecuación de continuidad
- Dos ecuaciones de conservación de momentum en dos direcciones ortogonales

La ecuación local de continuidad (ecuación 28):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \text{ --- Ecuación 28}$$

Las ecuaciones de momentum para las componentes “x” y “y”, son (ecuación 29 y 30):

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = f v - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( V_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \text{ --- Ecuación 29} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -f u - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( V_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \text{ --- Ecuación 30} \end{aligned}$$

En donde:

x,y,z- coordenadas cartesianas

$\eta$ -elevación de la superficie

u,v,w- componentes de la velocidad en dirección x,y,z

f = 2  $\Omega$  sin $\varnothing$  parámetro de Coriolis ( $\Omega$ - velocidad angular de la Tierra y  $\varnothing$ - latitud)

g-aceleración gravitacional

$\rho_0$ -densidad del agua

S-Magnitud de la descarga en los puntos fuente

$u_s, v_s$ -velocidad de descarga hacia el cuerpo de agua

## 4.2 Solución numérica

Las ecuaciones de Saint Venant de continuidad y cantidad de movimiento representan el comportamiento del flujo a superficie libre.

Pese a su notable simplificación respecto a las de Navier Stokes, ni siquiera las ecuaciones unidimensionales de Saint Venant tienen solución analítica sino que han de resolverse por métodos aproximados como el método volumen finito (Marqués, 2005), por lo que el programa usa el método de volumen finito centrado en la celda, el método es estable para regímenes sub y supercríticos por lo que es el más adecuado en flujos tierra adentro.

### 4.2.1 Discretización espacial

La discretización es un proceso matemático mediante el cual vamos a obtener resultados aproximados de la ecuación diferencial del problema, es la aproximación de una variable continua a un número finito de puntos.

Existen muchos métodos para la discretización del problema, en el caso del Modelo de Flujo Mike 21, el método es de volúmenes finitos, mismo que se basa en la discretización directa de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía.

La principal ventaja del método de volúmenes finitos, es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema, por lo que no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas. Este método es el más empleado para la solución de flujos con geometrías complejas (Sánchez 2004).

El método requiere un mallado no estructurado de puntos en los que se guardan las variables de flujo, precisamente es en esos vértices donde se guardan las variables en los vértices de las celdas.

Un mallado no estructurado ofrece una gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas, los triángulos se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio.

La solución obtenida depende del refinamiento que se realice a la malla.

#### 4.3 Implementación y calibración del modelo

La topografía del modelo se construyó con un modelo digital de alta resolución (DEM) tipo superficie con resolución de 5m (Figuras 16,17 y 18), el cual es un registro de las elevaciones existentes sobre el nivel del mar, derivado de la obtención de puntos (mediante tecnología LiDAR) ajustada al terreno mediante procesos geodésicos, de la que se seleccionan aquellos puntos que corresponden únicamente al terreno, generando una "nube de puntos clasificada" a la que se le aplica una interpolación a los puntos clasificados del último retorno y habiendo eliminado aquellos puntos que no pertenecen al terreno como los reflejados por infraestructura, vegetación y objetos aéreos como nubes o pájaros.



Figura 16. Carta LIDAR



Figura 17. LIDAR, se puede apreciar el detallado de la ciudad José Cardel

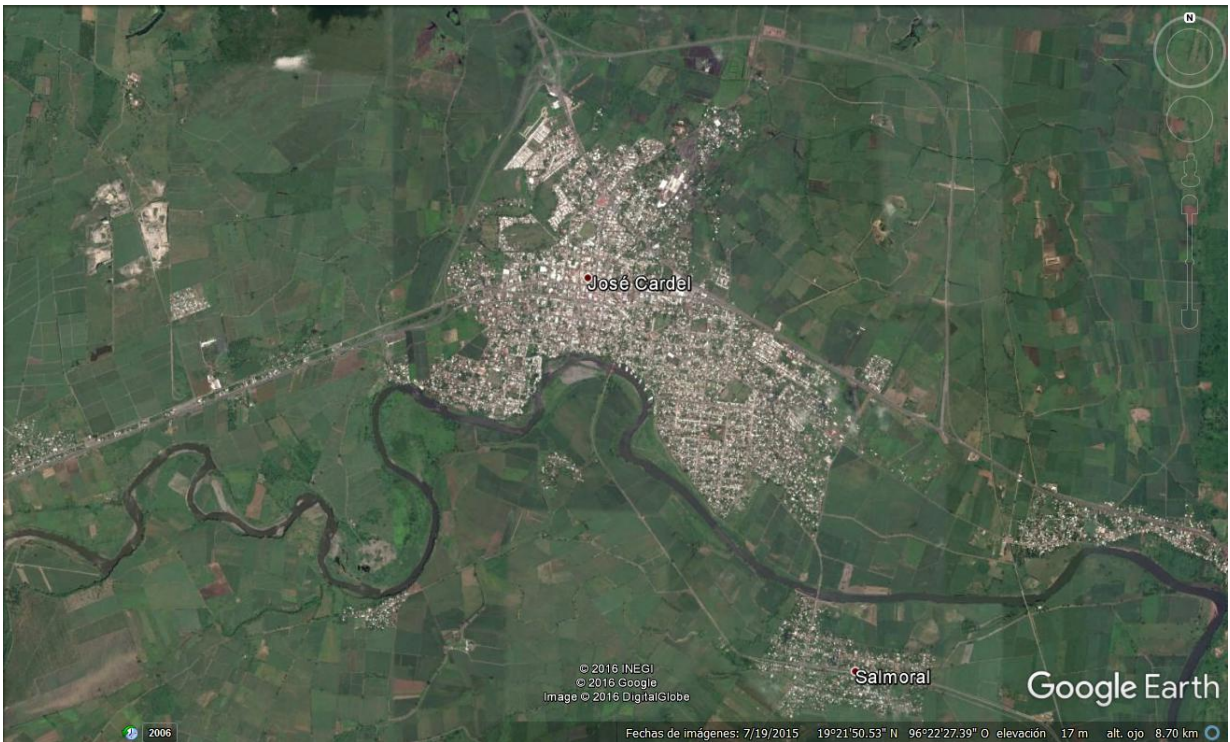


Figura 18. Vista aérea de José Cardel. Puede compararse el detalle con la carta LIDAR.

## Condiciones de frontera

Para el dominio numérico se determinaron cuatro fronteras, la primera es una frontera abierta en donde se pone la entrada del flujo, otra es la salida del río La Antigua en su desembocadura al mar, dos más que indican una frontera abierta por toda la zona costera y finalmente la frontera correspondiente al dominio de análisis (figura 19).

Las fronteras que encierran la zona urbana de José Cardel y el trazo del río fueron obtenidas a través de trazos en Google Earth y posteriormente transformados a formato shape (.shp), este tipo de formatos son archivos vectoriales, compuestos por entidades de tipo punto, línea y área; en los cuales se almacena información geométrica y alfanumérica.

Estos archivos pueden utilizarse con paquetes que manejen información vectorial para sistemas de información geográfica.

Tanto la información LiDAR como los Shapes se encuentran geo-referenciados en coordenadas UTM.

### 1. Frontera de entrada

Es el punto en donde se superpone el hidrograma de entrada correspondiente a los diferentes periodos de retorno.

### 2. Frontera de salida

La salida fue definida como una frontera abierta y corresponde a la desembocadura del río sobre el mar del Golfo de México.

### 3. Frontera terrestre

Es la línea de frontera que define el dominio de análisis para el área de estudio.

#### 4. Frontera abierta

Se estableció como frontera abierta a la zona costera aledaña a la desembocadura del río sobre el Golfo de México.

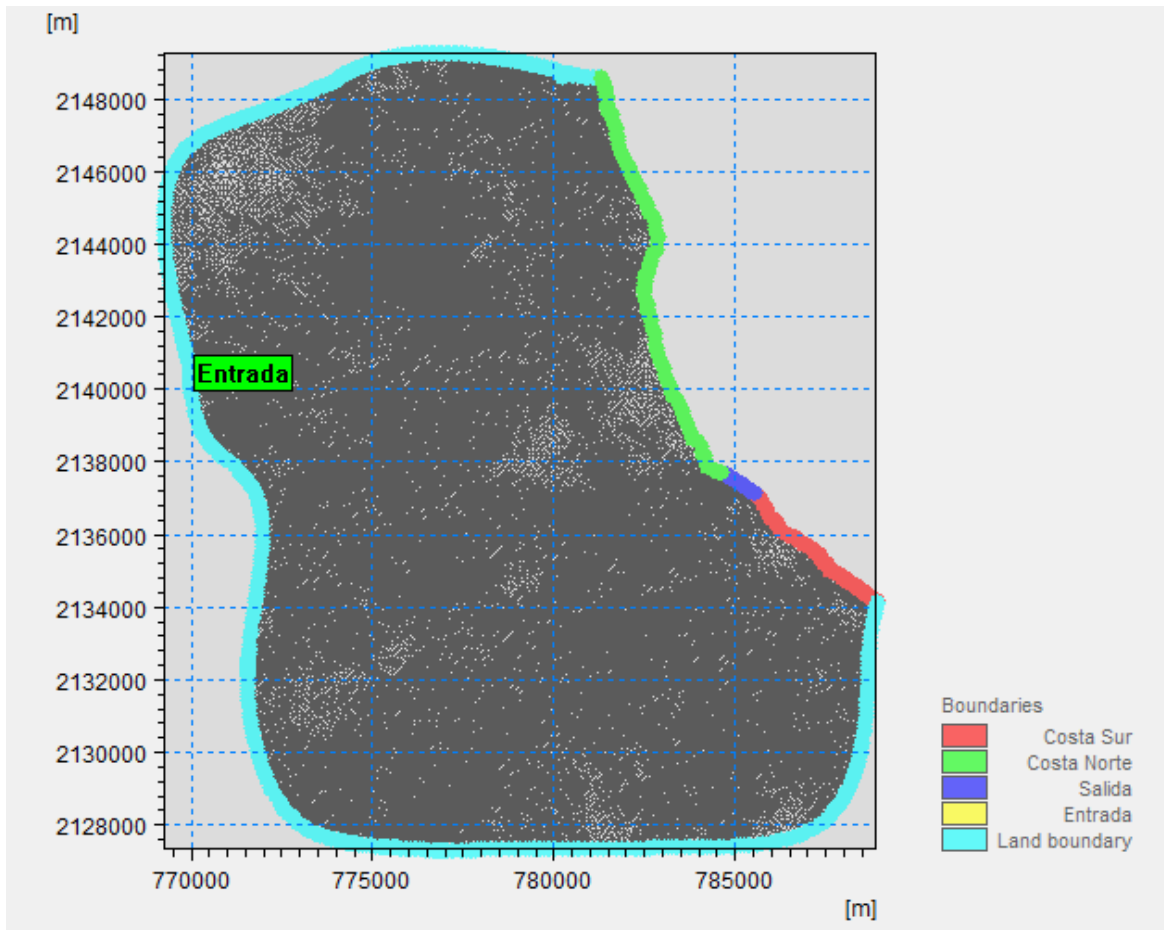


Figura 19. Condiciones de frontera

#### Condiciones iniciales

Como condición inicial se asignó un nivel de superficie libre del agua menor al nivel de desborde (tomando como referencia el nivel normal de agua que lleva el río), para el instante  $t=0$ .

Orientación de la malla: dirección principal de las líneas de flujo perpendiculares a la frontera de mar, eliminando los posibles errores en el patrón de flujo en las fronteras abiertas, principalmente en la frontera de mar.



## Malla de cálculo

Se dieron diferentes resoluciones con base en la calidad que se requiere en puntos específicos, la mayor resolución de la triangulación es para la zona urbana de José Cardel ( $25 \text{ m}^2$ ) y para el río ( $300 \text{ m}^2$ ), y menor resolución para zonas más alejadas del área de interés ( $900 \text{ m}^2$ ) pues en el primer caso se necesita tener una buena representación de la batimetría y mejores detalles del patrón de flujo (figura 20).

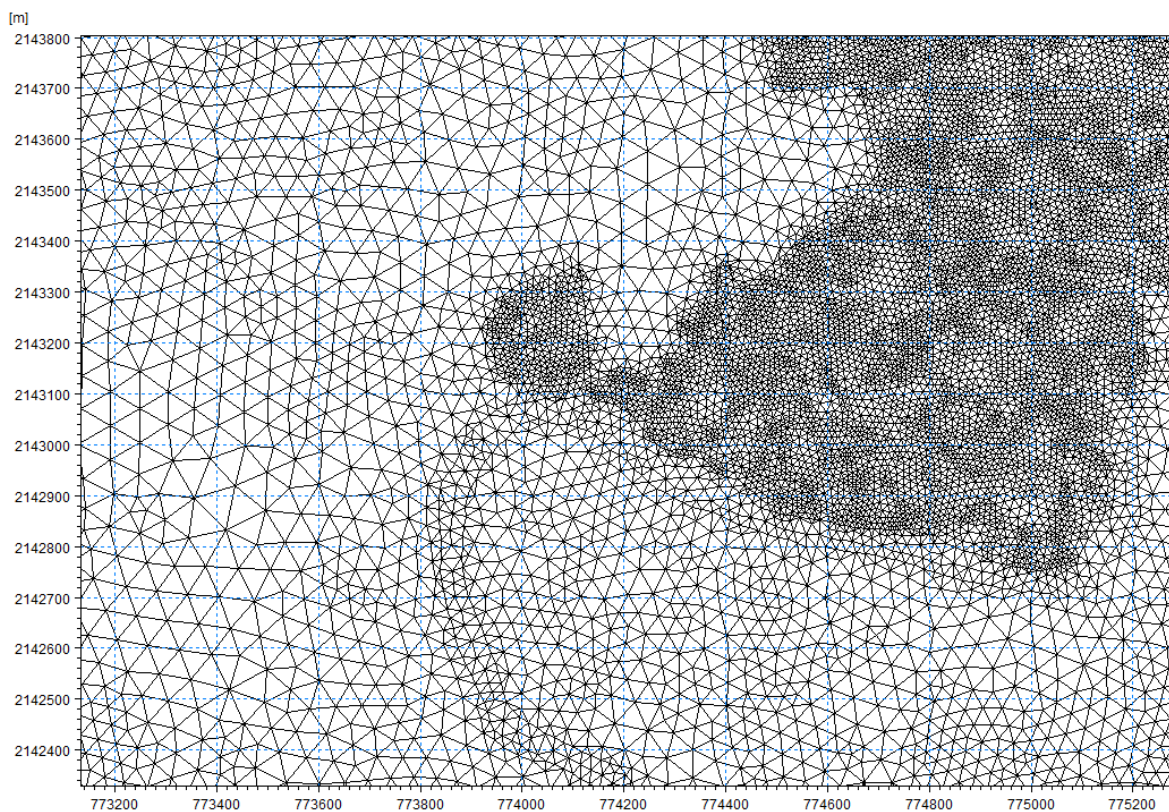


Figura 20. Triangulación de la malla

## Coefficiente de rugosidad

El modelo recomienda valores para el número de Manning ( $1/n$ ) en el intervalo de 20-40  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$  usados normalmente, sugiriendo principalmente el valor de 32  $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ .

El valor del coeficiente de Manning para corrientes naturales con vegetación oscila entre 0.027 a 0.05, por lo que se usó el valor recomendado por el modelo, que es  $n=0.03125 \text{ s/m}^{1/3}$ ; el valor de “ $n$ ” fue constante en todo el dominio.

### Tiempo de simulación

El tiempo de la simulación corresponde a la duración total del hidrograma de diseño, es de 104 horas (4.3 días) con un intervalo de tiempo de 60 segundos para obtención de resultados.



## CAPÍTULO V. RESULTADOS

Finalmente como parte de la evaluación del modelo realizado, es necesaria la interpretación de los distintos escenarios que arrojaron las simulaciones.

Con el modelo de flujo se simuló el comportamiento hidráulico de una parte de la subcuenca del río La Antigua, esto con el propósito de predecir el comportamiento de avenidas extraordinarias y su efecto sobre la ciudad José Cardel en Veracruz, para delimitar las áreas con riesgo a inundación.

Para este trabajo de tesis se realizaron 6 simulaciones para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100 y 200 años; los parámetros que se obtuvieron fueron los siguientes:

- Profundidad total del agua (m)
- Gasto ( $m^3/s$ )
- Velocidad (m/s)
- Nivel superficial del agua (m)

El parámetro importante para determinar los niveles de inundación es la profundidad total del agua (Total water depth), para los resultados se muestran los valores máximos de profundidad del agua en cada uno de los escenarios de la simulación.

### 5.1 Validación del modelo

Validar un modelo es obtener un grado de confianza en el mismo, la validez se confirma con resultados positivos en un conjunto de test que proporcionan esa confianza, esta validez puede perderse por un solo test negativo. La validez puede hacerse con la realización de un conjunto de pruebas que se hacen a lo largo de la construcción del modelo:

- Hipótesis
- Formulación
- Resolución numérica
- Aplicación

Para tener un margen de comparación y poder establecer un análisis más objetivo de los resultados obtenidos, es necesario calibrar los resultados del modelo; la calibración de modelos de flujos radica en lograr la reproducción de las condiciones reales del sistema.

El procedimiento que se determinó para calibrar el modelo de flujo de inundación, fue construir el modelo y simular con el hidrograma del huracán Karl, de cuyo evento se tienen registros medidos en la estación 28003 de José Cardel sobre el río La Antigua.

Para llevar a cabo este proceso, primeramente se hicieron pruebas con un gasto constante de  $500 \text{ m}^3/\text{s}$  para determinar las condiciones iniciales del río (sin desbordamiento), posteriormente se añadió al modelo el hidrograma de diseño.

Con ayuda de la información y testimonios existentes, así como un mapa de riesgo de inundación del Atlas de Riesgos de La Antigua, se procede a determinar si los resultados obtenidos de la simulación del evento del huracán Karl (acontecido en septiembre del 2010), son semejantes a la inundación ocurrida en José Cardel debido al huracán.

Las zonas que se inundaron la madrugada del 18 de Septiembre del 2010 se definieron con ayuda de noticias, testimonios y registros fotográficos, como se enuncia a continuación.

Según el “Atlas de Riesgos del Municipio de La Antigua 2011” las zonas inundables se encuentran principalmente hacia los márgenes del río La Antigua, hacia la calle Pino al Sureste de la zona urbana y Juan Rodríguez Cara, al Suroeste de la ciudad. El Atlas de riesgos define un mapa de riesgos de

inundación, mismo que se puede observar en la figura 21; en donde se aprecia la zona propensa a inundación con un color azul.

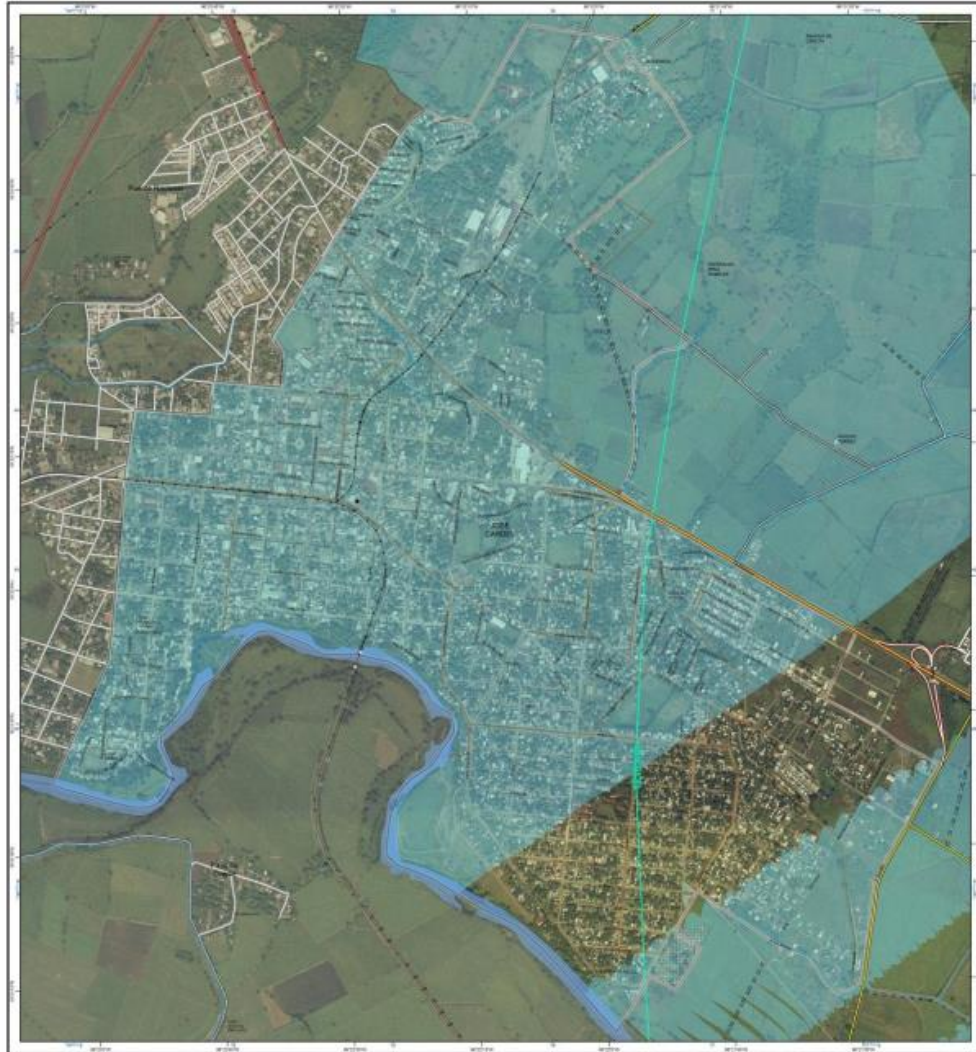


Figura 21. Zona de inundación del mapa de riesgos de La Antigua

Algunas de las colonias más afectadas fueron El Cascajal y Vicente López (figuras 22,23 y 24), aquí es en donde se concentraba la mayor parte de la población marginada del municipio.

Testimonios recopilados de distintos noticieros, principalmente locales, cuentan la desesperación que se vivió en la zona cercana a la margen del río y de aquí se

obtiene la información de los niveles y las zonas alcanzadas por el río, misma que ayudará con la validación del modelo.



Figura 22. Afectaciones en Vicente López



Figura 23. Afectaciones en El Cascajal



Figura 24. Cementerio en la colonia Vicente López

“El restaurante María Félix, ubicado a orillas del río, fue uno de los que perdieron todo. La marca llegó a los dos metros” (Imagen del Golfo, 2011)<sup>5</sup>.

"En la madrugada fue que sentimos todo esto. Estábamos dormidos y de repente sentimos que el agua nos llegó a los tobillos. En 15 minutos nos llegó ya a las rodillas. Ya ni pudimos sacar nuestras cosas, eran las cosas o nosotros, además mi esposa está embarazada, es lo que más me preocupaba", comentó a Univision.com Isaac Trujillo Acosta, uno de los cientos de afectados.

"La gente no sabía qué hacer. Se subió a los techos de sus casas porque el agua les llegaba hasta el cuello. Yo trate de ayudar a mi tía para que saliera pero no pude y sigue desaparecida. También sé de una vecina, una anciana ciega que se quedó atrapada con cuatro niños. La policía no ha podido ir a ver si están por ahí flotando sus cuerpos", atestiguó Trujillo.

Las pocas casas que la corriente no se llevó, quedaron sepultadas por toneladas de lodo. El río La Antigua se ensanchó rápidamente a más de un kilómetro entre la noche del viernes 17 y la madrugada del sábado 18 de septiembre, por lo que los pobladores cercanos abandonaron sus cosas para lograr salir con vida (figuras 25, 26 y 27).

---

<sup>5</sup> <http://imagendelgolfo.mx/resumen.php?id=269683>





Figura 25. Puente de ferrocarril que une a La Antigua y Paso de Ovejas, el río creció 10 metros y casi llegó al ras de la base.



Figura 26. Casa habitación en colonia El Cascajal

“Nadie nos avisó, nunca hubo alertamiento, las autoridades no dijeron nada, nos dejaron solos”, aseguraron pobladores de El Cascajal y otras colonias de Cardel, como Vicente López y Los Carriles. (La Jornada, 2010)<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> <http://www.jornada.unam.mx/2010/09/23/estados/031n1est>



Figura 27. Colonia El Cascajal

De acuerdo con la información recopilada, se tienen los datos necesarios para hacer una comparación de los resultados de la simulación contra los datos reales. Aquí se prestará total atención en la similitud de las áreas urbanas afectadas por el desbordamiento del río (datos modelados y reales).

Haciendo una recopilación de los datos obtenidos por los testimonios, se crea un croquis con las zonas afectadas. Posteriormente con los resultados de la simulación, se puede proceder a realizar una comparación de las zonas de inundación reales contra simuladas.

Los resultados de la simulación del huracán Karl se muestran en la figura 28, en donde se puede apreciar el nivel de profundidad de agua máximo calculado por el modelo. Como se observa, a orillas del río se alcanzaron niveles mayores a dos metros y conforme la mancha se adentra en la ciudad, los niveles son más bajos.

Según los testimonios recopilados, a orillas del río se alcanzaron niveles mayores a los dos metros, en las colonias cercanas al río (El Cascajal y Vicente López) el agua les llegó hasta las rodillas; mientras que a la altura del puente de ferrocarril llegó casi a la altura de su base (10 metros sobre el río). El río se ensanchó a 1

kilómetro en el transcurso de unas horas entre la noche del 17 y la madrugada del 18 de septiembre.

Por otra parte, la simulación arroja que el río se mantuvo con niveles mayores a tres metros, se ensanchó entre 150-200 metros y la mancha alcanzó un grosor de casi 1 kilómetro. Los niveles en la orilla fluctúan entre los 2.1 y 5 metros, y a medida que la mancha se adentra en la ciudad, los niveles son menores, de 1.51 a 2 metros y finalmente de 0.11 a 1.5 metros conforme el agua se aleja del río.

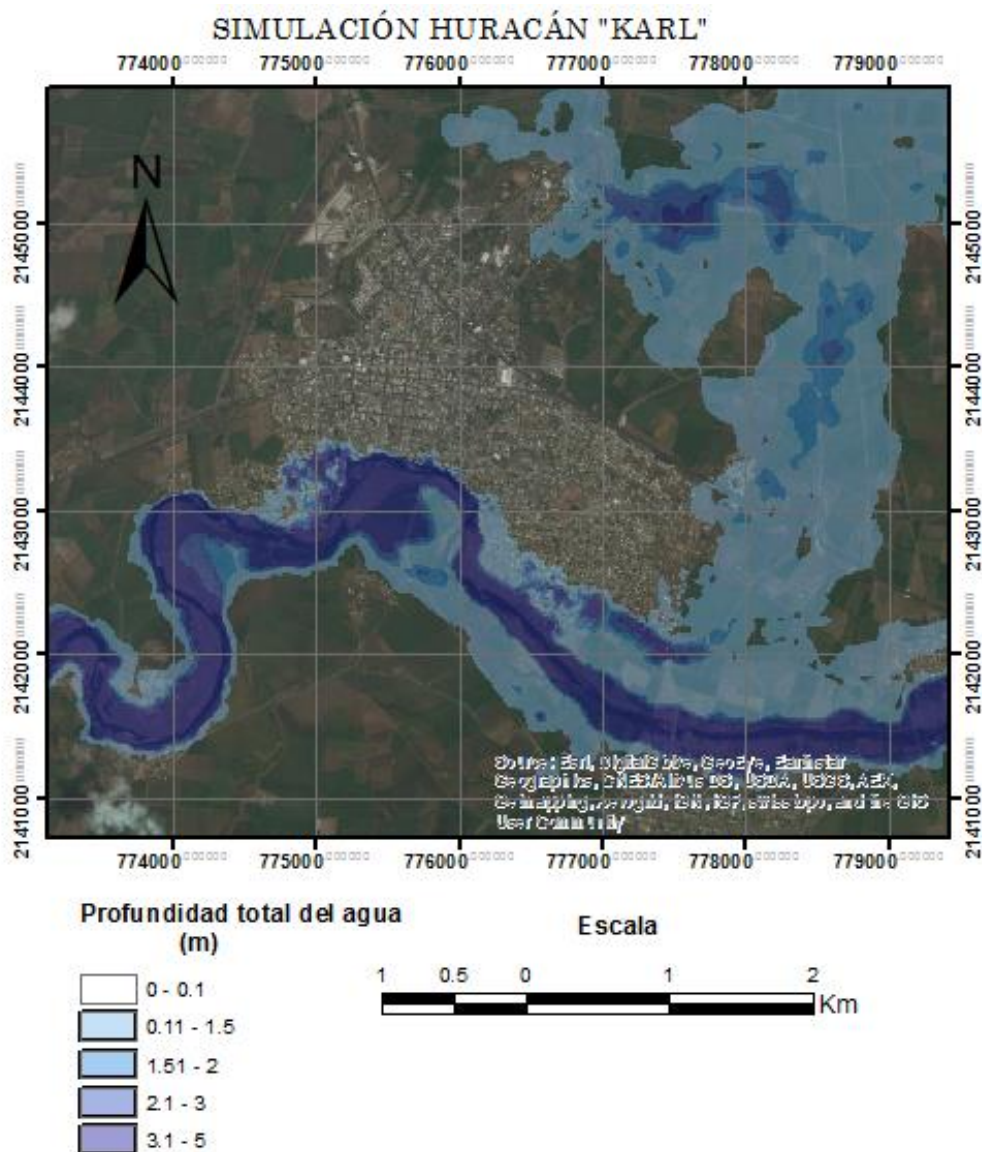


Figura 28. Resultados de la simulación del huracán Karl



Posterior al análisis de los resultados de la simulación, se puede realizar la comparación de manera gráfica. En la figura 29 se observan los polígonos de las colonias más afectadas (El Cascajal y Vicente López), un par de puntos de viviendas afectadas, las calles que marca el “Atlas de Riesgos de La Antigua” como zonas en donde se desarrolla la inundación y también el polígono de la mancha de inundación obtenida con el modelo desarrollado.

Se puede observar superponiendo todos los datos, que la mancha abarca las dos colonias afectadas, también al suroeste de la ciudad sobre la calle Juan Rodríguez se observa la mancha.

Con este análisis es posible validar los resultados de la simulación y se confirma que el modelo es aceptable considerando los resultados obtenidos y también tomando en cuenta que todo el proceso se ha realizado procurando la mayor precisión posible, desde la realización de pruebas estadísticas de homogeneidad e independencia y un análisis de sensibilidad para determinar un menor error

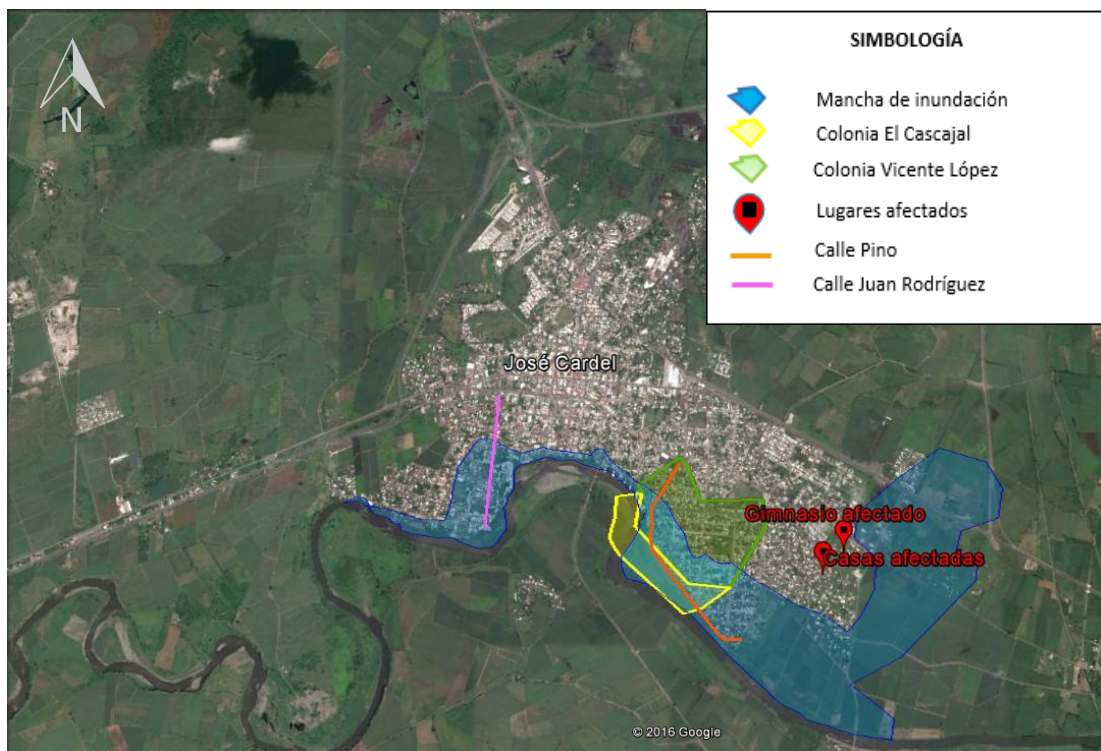


Figura 29. Zonas inundadas vs mancha simulada

En conclusión, el modelo de simulación representa adecuadamente el modelo conceptual; esto ayudará a identificar las zonas con mayor riesgo de inundación.

## 5.2 Mapas de inundación

Para fines de protección civil, el riesgo según la ONU es “el grado de pérdida previsto en un sistema determinado, debido a un fenómeno natural definido y en función tanto del peligro natural como de la vulnerabilidad”.

De acuerdo con la definición anterior, mapas de riesgo son aquellos que representan gráficamente en una base cartográfica, la probabilidad de incidencia de un fenómeno o de varios, sus características e intensidades, y de qué manera influyen en los diferentes tipos de ámbitos, sean estos geográficos (localidad o región) geopolíticos (municipio, estado, país), fisiográficos (tipo de suelo, vegetación) o aquellos caracterizados por la actividad humana (población, vivienda, infraestructura y agricultura).

Para la estimación del riesgo se necesita determinar las consecuencias potenciales de un fenómeno destructivo. Esto implica, entre otras cosas, conocer las características físicas de la infraestructura existente, así como las condiciones sociales y económicas de la región de estudio, donde el análisis y la clasificación pueden ser complejos, esto se realiza habitualmente para zonas con un área determinada, (zonas definidas donde se establezcan parámetros de control). No obstante, con la incorporación de nuevas tecnologías para el manejo y análisis de la información, se tenderá a integrar estimaciones que podrán abarcar coberturas geográficas más extensas.

Se pueden lograr aproximaciones con mapas de índices de riesgo, donde sin llegar a cuantificar el costo esperado de un fenómeno se determina a través de un modelo físico-matemático la probabilidad del riesgo, involucrando al peligro, a la vulnerabilidad y al sistema estudiado, mediante simplificaciones que requieren

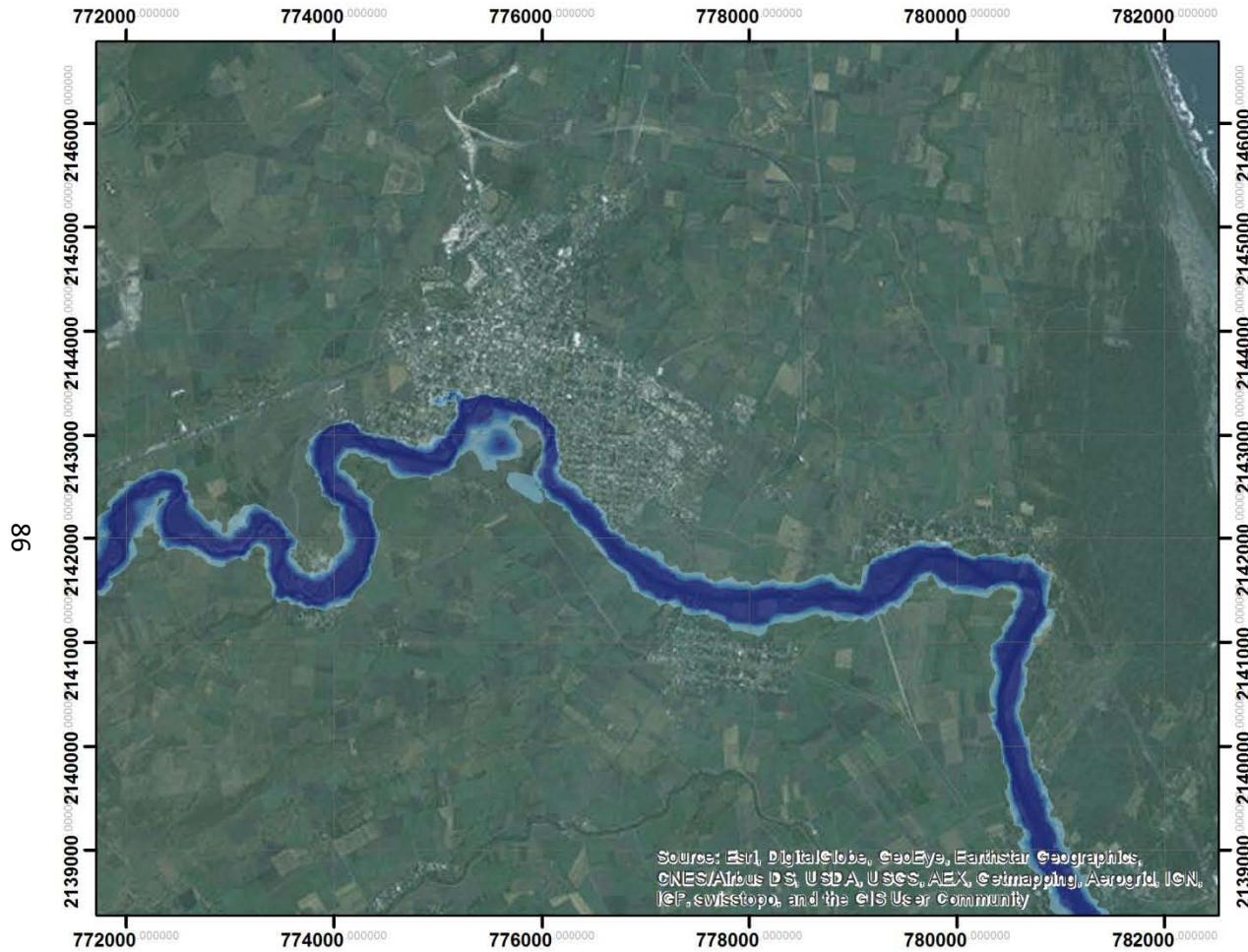
validación y calibración previas. Estos modelos son desarrollados por instituciones de investigación del país, entre las que se encuentra el Instituto de Ingeniería de la UNAM y otros, quienes han desarrollado diversas investigaciones sobre estos temas; sin embargo, la calibración de los mismos se deberá hacer tras evaluar los daños y pérdidas ocasionados por un fenómeno y compararlos con los resultados obtenidos de escenarios previos, con el resultado de estas comparaciones, los modelos serán mejorados y se acercarán más a la realidad (Melorose et al. 2015).

El Municipio de La Antigua presenta amplias zonas propensas a inundación, principalmente hacia las llanuras aluviales formadas por el río La Antigua y sus afluentes, así como hacia la zona costera.

Las inundaciones provocadas por el río La Antigua han estado ligadas al paso de tormentas tropicales y huracanes en el municipio.

A continuación se muestran los mapas de profundidad total máxima del agua, en el mapa puede apreciarse la mancha de inundación (llanura de inundación).

# SIMULACIÓN TR=5 AÑOS



## LOCALIZACIÓN

## REFERENCIA ESPACIAL

WGS\_1984\_UTM\_Zone\_14N  
 WKID: 32614 Authority: EPSG

Projection: Transverse\_Mercator  
 False\_Easting: 500000.0  
 False\_Northing: 0.0  
 Central\_Meridian: -99.0  
 Scale\_Factor: 0.9996  
 Latitude\_Of\_Origin: 0.0  
 Linear Unit: Meter (1.0)

### Profundidad total del agua (m)

0 - 0.1	0.75 - 1	2.1 - 2.5
0.11 - 0.5	1.1 - 1.5	2.51 - 3
0.5 - 0.75	1.51 - 2	

## ESCALA

0 0.5 1 2 3 Kilometers

**JOSÉ CARDEL**  
 (Cabecera Municipal)

**País: México**  
**Estado: Veracruz de Ignacio de la Llave**  
**Municipio: La Antigua**



# SIMULACIÓN TR=10 AÑOS



### LOCALIZACIÓN

### REFERENCIA ESPACIAL

WGS\_1984\_UTM\_Zone\_14N  
 WKID: 32614 Authority: EPSG

Projection: Transverse\_Mercator  
 False\_Easting: 500000.0  
 False\_Northing: 0.0  
 Central\_Meridian: -99.0  
 Scale\_Factor: 0.9996  
 Latitude\_Of\_Origin: 0.0  
 Linear Unit: Meter (1.0)

### Profundidad total del agua (m)

0 - 0.1	0.5 - 0.75	1.51 - 2
0.11 - 0.25	0.75 - 1	2.1 - 3
0.25 - 0.5	1.1 - 1.5	

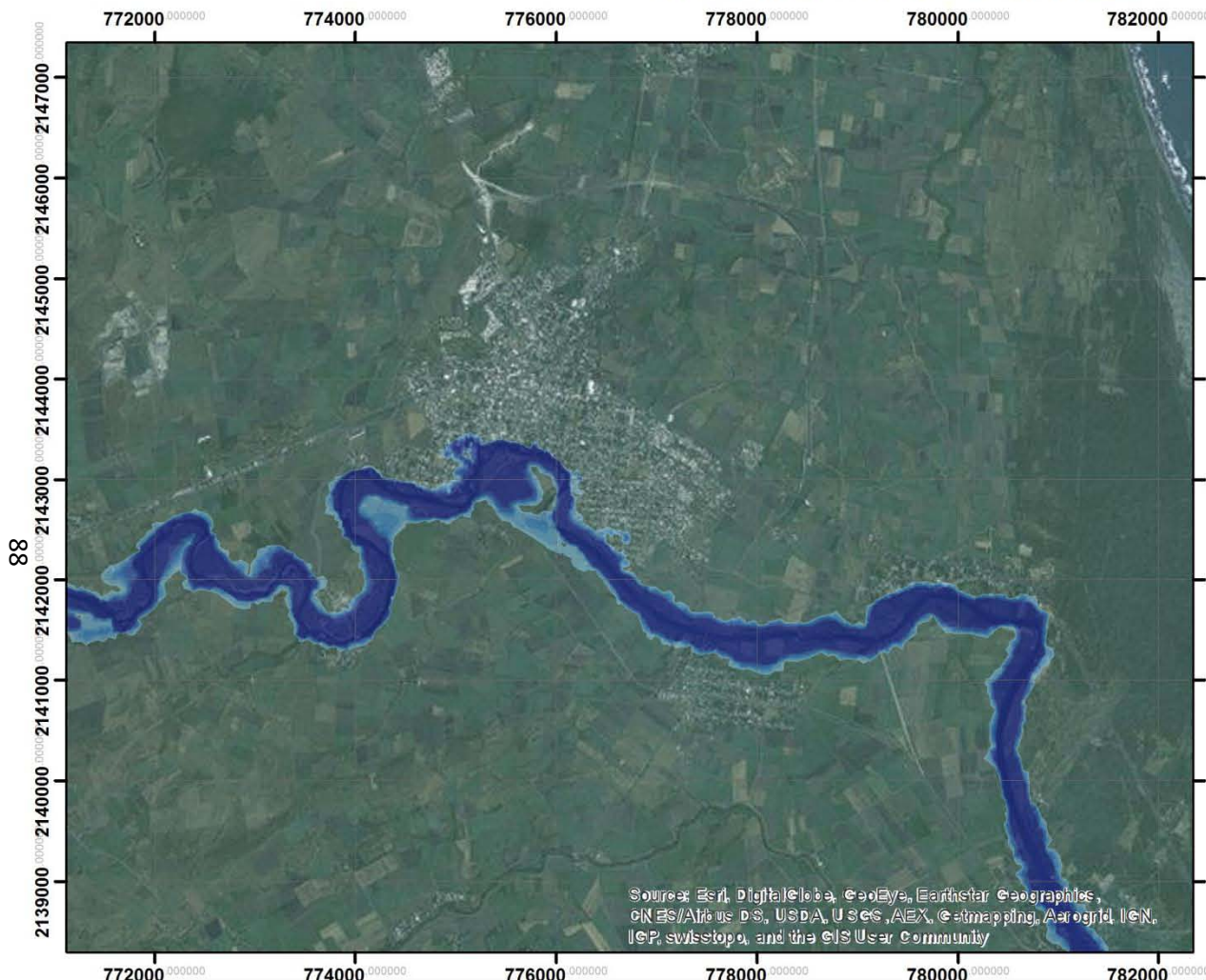
### ESCALA

**JOSÉ CARDEL**  
 (Cabecera Municipal)

**País: México**  
**Estado: Veracruz de Ignacio de la Llave**  
**Municipio: La Antigua**



# SIMULACIÓN TR=20 AÑOS



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

## LOCALIZACIÓN

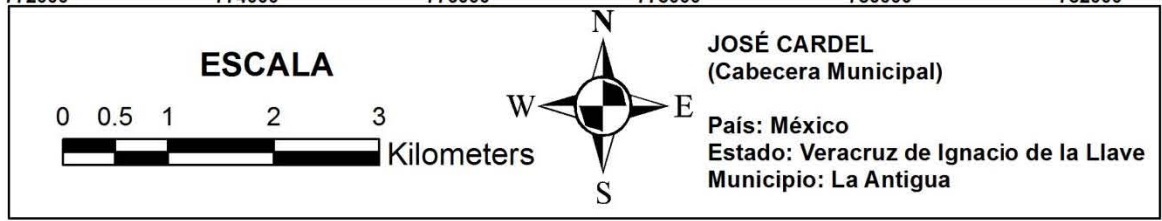
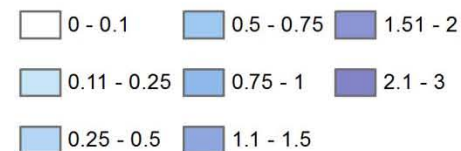


## REFERENCIA ESPACIAL

WGS\_1984\_UTM\_Zone\_14N  
WKID: 32614 Authority: EPSG

Projection: Transverse\_Mercator  
False\_Easting: 500000.0  
False\_Northing: 0.0  
Central\_Meridian: -99.0  
Scale\_Factor: 0.9996  
Latitude\_Of\_Origin: 0.0  
Linear Unit: Meter (1.0)

## Profundidad total del agua (m)



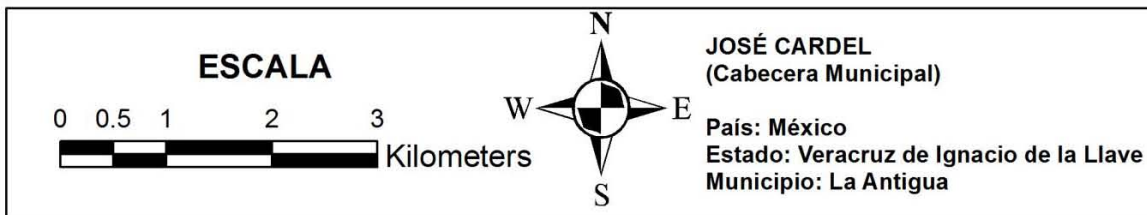
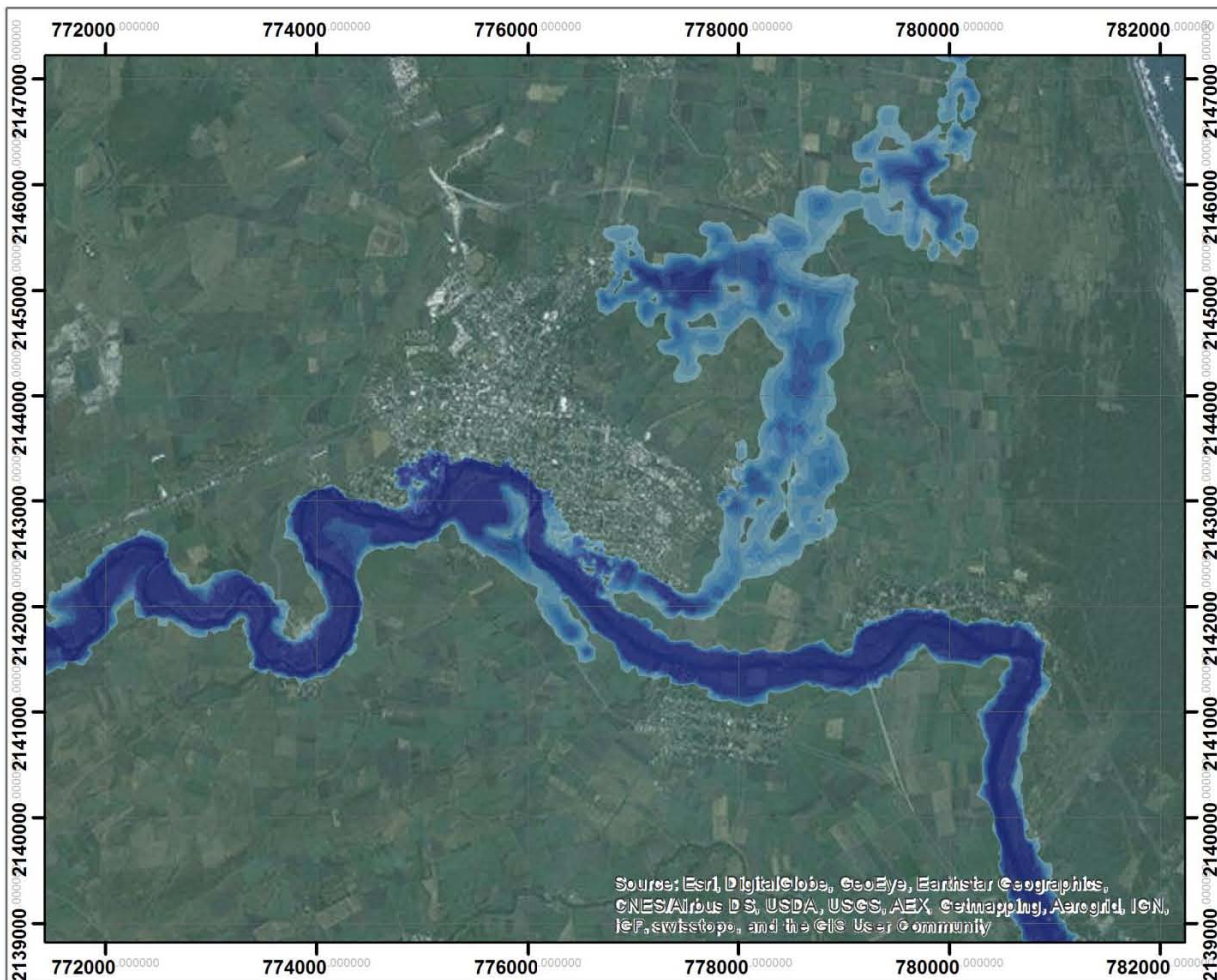
**JOSÉ CARDEL**  
(Cabecera Municipal)

**País: México**  
**Estado: Veracruz de Ignacio de la Llave**  
**Municipio: La Antigua**



# SIMULACIÓN TR=50 AÑOS

68



## LOCALIZACIÓN

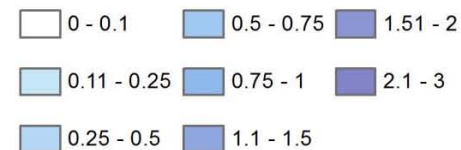


## REFERENCIA ESPACIAL

WGS\_1984\_UTM\_Zone\_14N  
WKID: 32614 Authority: EPSG

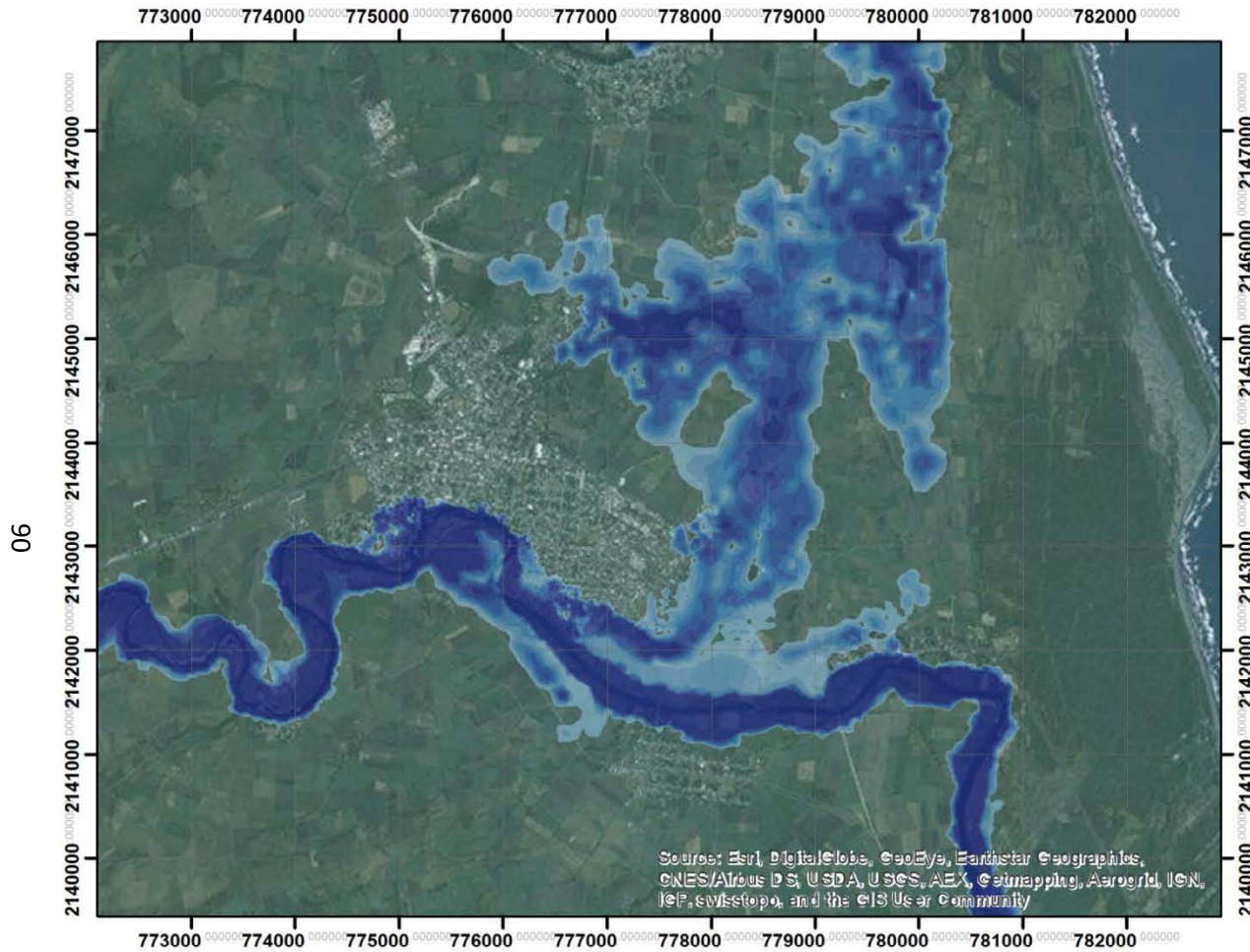
Projection: Transverse\_Mercator  
False\_Easting: 500000.0  
False\_Northing: 0.0  
Central\_Meridian: -99.0  
Scale\_Factor: 0.9996  
Latitude\_Of\_Origin: 0.0  
Linear Unit: Meter (1.0)

## Profundidad total del agua (m)





# SIMULACIÓN TR=100 AÑOS



## LOCALIZACIÓN

## REFERENCIA ESPACIAL

WGS\_1984\_UTM\_Zone\_14N  
 WKID: 32614 Authority: EPSG

Projection: Transverse\_Mercator  
 False\_Easting: 500000.0  
 False\_Northing: 0.0  
 Central\_Meridian: -99.0  
 Scale\_Factor: 0.9996  
 Latitude\_Of\_Origin: 0.0  
 Linear Unit: Meter (1.0)

### Profundidad total del agua (m)

0 - 0.1	0.5 - 0.75	1.51 - 2
0.11 - 0.25	0.75 - 1	2.1 - 3
0.25 - 0.5	1.1 - 1.5	

## ESCALA

0 0.5 1 2 3 Kilometers

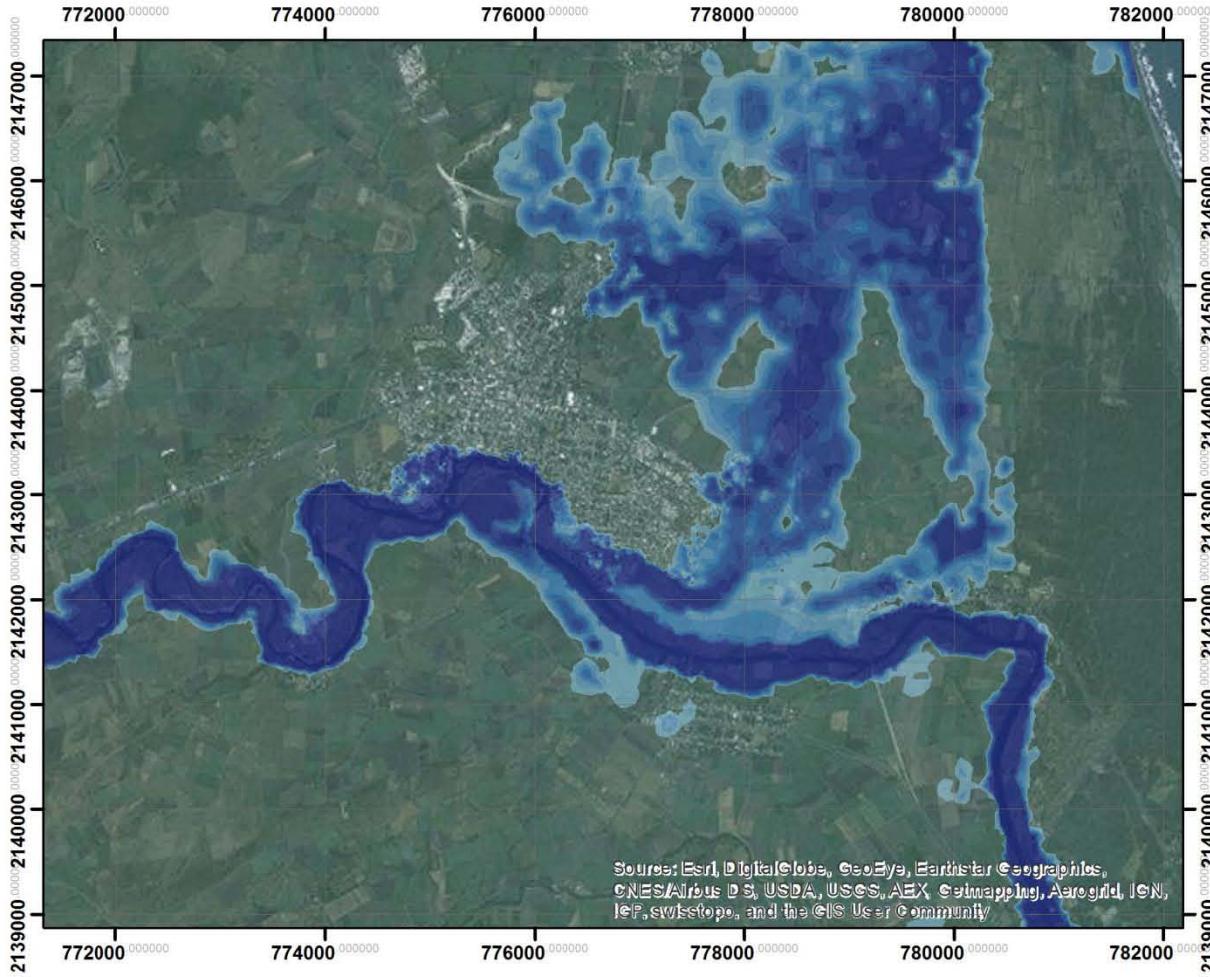
**JOSÉ CARDEL**  
 (Cabecera Municipal)

**País: México**  
**Estado: Veracruz de Ignacio de la Llave**  
**Municipio: La Antigua**



# SIMULACIÓN TR=200 AÑOS

91



## LOCALIZACIÓN

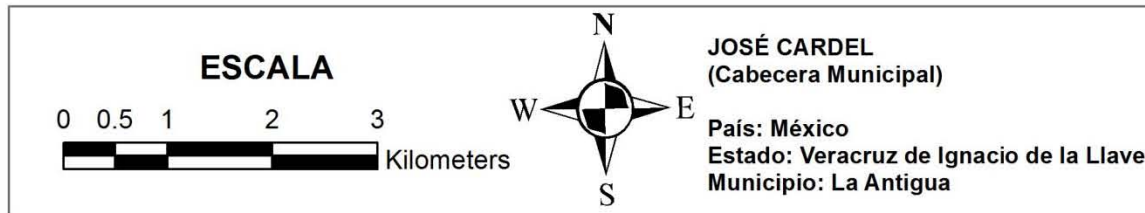
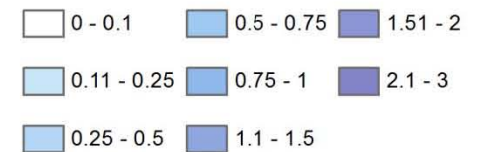


## REFERENCIA ESPACIA

WGS\_1984\_UTM\_Zone\_14N  
WKID: 32614 Authority: EPSG

Projection: Transverse\_Mercator  
False\_Easting: 500000.0  
False\_Northing: 0.0  
Central\_Meridian: -99.0  
Scale\_Factor: 0.9996  
Latitude\_Of\_Origin: 0.0  
Linear Unit: Meter (1.0)

## Profundidades total del agua (m)



### 5.3 Recomendaciones

Contar con una imagen satelital de la mancha de inundación, ayudaría a obtener mejores resultados con la calibración, además, hubiera sido muy útil el contar con información de las secciones transversales del río para conocer la profundidad exacta y determinar las condiciones iniciales con mayor exactitud para obtener una mancha de inundación más precisa.

El modelo digital de elevaciones se elaboró antes del evento de Karl (septiembre del 2010); posterior al evento hubo un dragado del río (figuras 30), también se levantó en la margen de José Cardel un pequeño bordo, por lo que el DEM no tiene las condiciones actuales del terreno que ayuden a la predicción de eventos futuros. Para poder generar las nuevas condiciones hace falta tener conocimiento de los cambios que se hacen sobre la topografía, los nuevos datos se pueden obtener con ayuda de un DEM actualizado o con ayuda de la información satelital existente.



Figura 30. Antes y después de Karl



Los resultados obtenidos arrojaron una mancha de inundación que abarca colonias en las zonas bajas de la ciudad, una manera de mitigar el daño provocado por el desbordamiento del río La Antigua, pudo ser mediante la creación de bordos perimetrales, sin embargo, el ayuntamiento autorizó la creación de muros de contención, además de campañas de concientización y prevención con la finalidad de que la gente sepa actuar en caso de una contingencia similar y la creación de albergues que operan en temporada de huracanes.

La protección física debía de considerar para el trazo la mancha de inundación calculada, esto con el propósito de proteger principalmente las colonias Vicente López y Cascajal, pues son las afectadas directamente. Y efectivamente, la solución que realizaron para evitar nuevos problemas futuros fue reubicar a los habitantes que estaban asentados en la orilla del río, en la colonia El Cascajal y crear una protección que separa el río de la zona habitable desde la calle Pino. Como puede apreciarse en la Figura 31, la comparación de la zona habitable permite observar cómo antes del huracán Karl había casas a la izquierda de la calle Pino (la imagen de la calle mencionada anteriormente, a la izquierda) y actualmente esa zona está deshabitada (derecha).

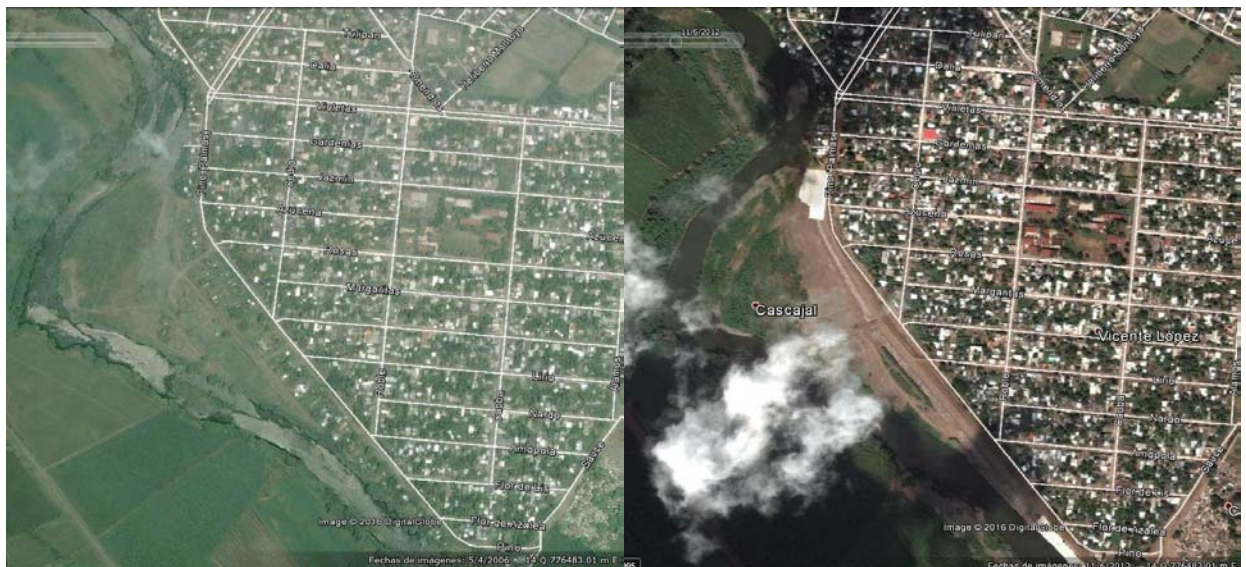


Figura 31. Desalojo de calles de El Cascajal

Es indispensable analizar los gastos, observar los puntos en donde éste es máximo y en donde es mínimo; de esa forma se pueden determinar los puntos de posible fuga del agua, los puntos en donde se presenta el desbordamiento del río.

Como puede observarse en la figura 32, las zonas con valores menores a cero (color magenta) representan los puntos en donde existe una fuga de gasto, por lo tanto, estas zonas indican la zona por la que se presenta el desborde del río; conocer el tramo de desborde permitirá tomar medidas pertinentes sobre el punto específico.

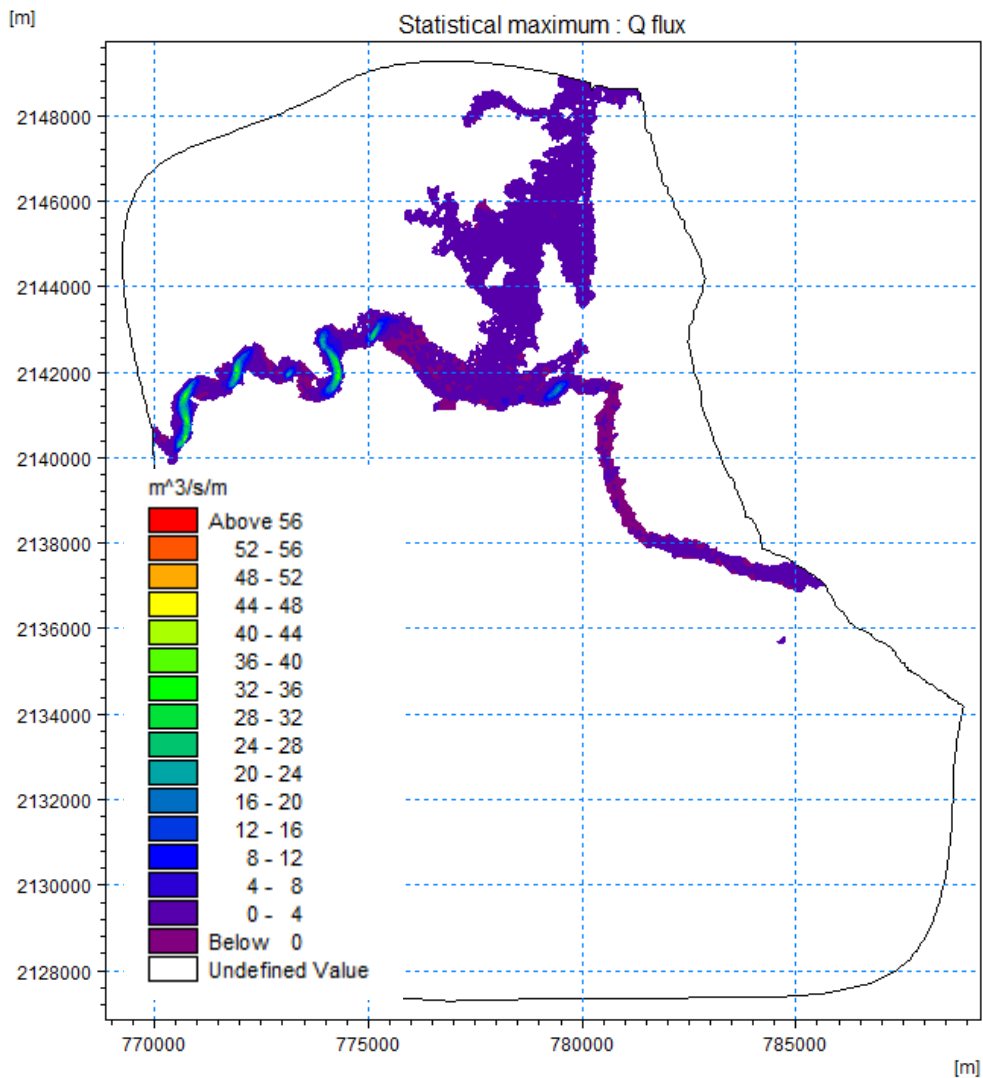


Figura 32. Niveles de gasto unitario para simulación de Karl

Es importante hacer énfasis en que la localidad urbana de José Cardel se encuentra asentada sobre planicies y hay una importante forma de erosión hídrica causada por cauces, llamada erosión vertical, culpable de causar daños a puentes, caminos y viviendas (Instituto de Investigaciones Sociales UABC 2011).

## CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Las inundaciones representan el fenómeno natural que genera el mayor número de devastaciones y pérdidas económicas a nivel mundial. De acuerdo con el Centro de Investigación en Epidemiología de Desastres (CRED, por sus siglas en inglés) tan solo en 2012 las inundaciones afectaron a 178 millones de personas, lo que las cataloga como los eventos extremos más frecuentes<sup>7</sup>.

Actualmente se pueden predecir las inundaciones; existen modelos numéricos, ecuaciones que resuelven y pueden proporcionar una idea del periodo en que puede presentarse un evento (periodo de retorno) y qué magnitud puede llegar a alcanzar. Sin embargo, el conocimiento no está acabado, ya que estas herramientas no son 100 % precisas. Es necesario comunicarle a la sociedad que existe un margen de error en nuestras predicciones y que debemos aprender a vivir con cierta incertidumbre. La hidrología es una disciplina en desarrollo.

La aplicación de modelos bidimensionales se hace indispensable cuando es necesario generar mapas de inundación, desbordamiento de ríos, flujos de agua en una llanura, entre otras cosas; debido a que estos permitirán calcular la dirección, el tirante y la velocidad en las direcciones “x” y “y”.

Sin embargo, los modelos tienen ciertas limitaciones:

- Los efectos de las erosiones, deslizamientos, sedimentación, etc., solamente se tienen en cuenta como criterio geomorfológico; sin embargo, estos pueden diferir más de lo previsto.

---

<sup>7</sup> La importancia del manejo adecuado de las inundaciones. Gaceta Instituto de Ingeniería. Febrero, 2013.

- El modelo no toma en cuenta elementos que puedan producir obstrucciones en el flujo, como es el caso de árboles, vehículos, postes, y cualquier otro elemento que desvíe el flujo en una dirección diferente.
- En áreas con asentamientos urbanos resulta complicado representar todos los elementos del paisaje que tienen influencia en el flujo de la avenida, las limitaciones computacionales derivadas de la gran cantidad de datos procesados, pueden hacer que los resultados difieran de las previsiones del modelo.

La información disponible para el cálculo de la avenida de diseño presenta limitaciones debido a la falta de organización de las bases de datos, en muchas ocasiones nos encontramos con datos faltantes y en el peor de los casos, datos mal medidos.

Estas limitaciones en conjunto, hacen que los resultados simulados puedan tener una variación significativa con respecto a lo que ocurre en la realidad. No obstante, siempre se hicieron consideraciones y pruebas para disminuir el error en la medida de lo posible. Por otra parte, contar con esta herramienta nos ayuda en la prevención de inundaciones y las consecuencias que se derivan de éstas.

Es factible usar el modelo numérico para evaluar la estrategia a usar para mitigar los daños por desbordamiento, los resultados permiten establecer las áreas con riesgo potencial de inundación.

También, contar con un mapa de riesgo zonificado, permitirá realizar un ordenamiento territorial mediante cambios en el uso de suelo (Pedrozo-Acuña, A., y Breña-Naranjo, J. A. (2014a). "Respuestas ante el incremento del riesgo por inundación en México". Revista H2O).

Existe evidencia (figura 33) de que hay un incremento en la intensidad de tormentas en los últimos años, por lo que es de vital importancia unir esfuerzos en la prevención de desastres.

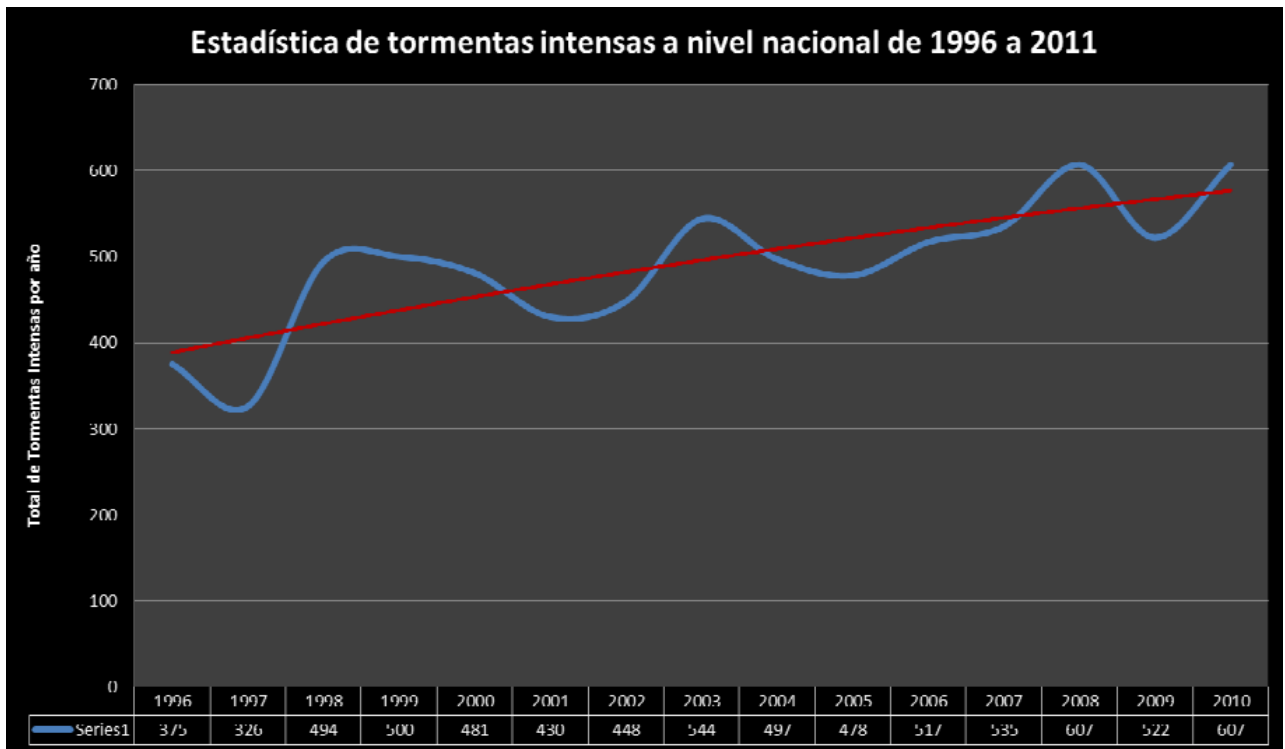


Figura 33. Estadística de últimas tormentas registradas

No debemos de esperar a que suceda un evento como el de Karl en Veracruz (2010), Ingrid y Manuel en Acapulco (2013), y muchos otros que han sucedido en el pasado; con la tecnología y las bases de datos de las estaciones que se operan actualmente, es posible determinar actualmente una planeación territorial oportuna y evitar riesgos futuros; en caso contrario, hay medidas de prevención en caso de alertas de riesgo de desbordamiento. Es necesario tomar conciencia y contribuir con las medidas que emite Protección Civil, evacuar y anteponer la vida por encima de cualquier otra cosa.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Mapa de precipitaciones del país (Fuente: Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional)</i> .....	8
<i>Figura 2. Inundaciones registradas entre 1950 y 2000. (Fuente: Base de datos del área de riesgos)</i> .....	10
<i>Figura 3. Pluviómetro y pluviógrafo</i> .....	11
<i>Figura 4. Registro de lluvia (cm/h)</i> .....	11
<i>Figura 5. Esquema del efecto orográfico</i> .....	13
<i>Figura 6. Esquema de fenómeno de lluvia convectiva</i> .....	14
<i>Figura 7. Componentes de la cuenca hidrográfica</i> .....	15
<i>Figura 8. Ubicación del municipio La Antigua.      Figura 9. Localización de José Cardel en México.</i> .....	25
<i>Figura 10. Estructura Urbana de José Cardel</i> .....	26
<i>Figura 11. Regiones fisiográficas</i> .....	27
<i>Figura 12. Regiones Hidrológicas de Veracruz CNA (1998) y Conabio (2003)</i> .....	28
<i>Figura 13. Precipitación normal anual por región hidrológico-administrativa 1981-2010</i> .....	29
<i>Figura 14. Climas del municipio La Antigua</i> .....	30
<i>Figura 15. Colonias afectadas por huracán Karl en 2010.</i> .....	32
<i>Figura 16. Carta LIDAR</i> .....	69
<i>Figura 17. LIDAR, se puede apreciar el detallado de la ciudad José Cardel</i> .....	70
<i>Figura 18. Vista aérea de José Cardel. Puede compararse el detalle con la carta LIDAR.</i> .....	70
<i>Figura 19. Condiciones de frontera</i> .....	72
<i>Figura 20. Triangulación de la malla</i> .....	73
<i>Figura 21. Zona de inundación del mapa de riesgos de La Antigua</i> .....	77
<i>Figura 22. Afectaciones en Vicente López</i> .....	78
<i>Figura 23. Afectaciones en El Cascajal</i> .....	78
<i>Figura 24. Cementerio en la colonia Vicente López</i> .....	78
<i>Figura 25. Puente de ferrocarril que une a La Antigua y Paso de Ovejas, el río creció 10 metros y casi llegó al ras de la base.</i> .....	80
<i>Figura 26. Casa habitación en colonia El Cascajal</i> .....	80
<i>Figura 27. Colonia El Cascajal</i> .....	81
<i>Figura 28. Resultados de la simulación del huracán Karl</i> .....	82
<i>Figura 29. Zonas inundadas vs mancha simulada</i> .....	83
<i>Figura 30. Antes y después de Karl</i> .....	92
<i>Figura 31. Desalojo de calles de El Cascajal</i> .....	93
<i>Figura 32. Niveles de gasto unitario para simulación de Karl</i> .....	94
<i>Figura 33. Estadística de últimas tormentas registradas</i> .....	97

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Últimos eventos meteorológicos que azotaron José Cardel</i> .....	33
<i>Tabla 2. Estación José Cardel</i> .....	38
<i>Tabla 3. Gastos máximos anuales de la estación 28003</i> .....	38
<i>Tabla 4. Resultados de prueba estadística de Helmert</i> .....	41
<i>Tabla 5. Subconjuntos de tamaño <math>n/2</math></i> .....	41



Tabla 6. Resultados de la prueba "T de Student".....	42
Tabla 7. Bloques 60% y 30 %.....	43
Tabla 8. Valores estadísticos de la muestra total.....	44
Tabla 9. Valores estadísticos de las muestras.....	44
Tabla 10. Resultados de prueba de Cramer.....	45
Tabla 11. Resultados de los coeficientes de la prueba de independencia.....	47
Tabla 12. Gastos calculados.....	56
Tabla 13. Valores de las abscisas (horas) y ordenadas (Qi/Qp).....	60
Tabla 14. Avenidas de diseño.....	61

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Correlograma (Estación 28003).....	48
Gráfica 2. Hidrograma unitario adimensional.....	59
Gráfica 3. Hidrogramas de diseño.....	63

## REFERENCIAS

Anon, Cálculo de Avenidas de Diseño.

CENAPRED/IMTA, 2002. *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México*, Available at:  
[http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/descargas/atlas\\_ciclones.pdf](http://cambioclimatico.inecc.gob.mx/descargas/atlas_ciclones.pdf).

Dhi, 2013. MIKE 21 y MIKE 3 Flow Model FM Hydrodynamic Module. , p.14.

Escalante Sandoval, C.A. y Reyes Chávez, L., 2002. *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. , p.298.

Ibáñez, S., Moreno, H. y Gisbert, J., 2010. Métodos para la determinación del tiempo de concentración (  $t_c$  ) de una cuenca hidrográfica. , p.9. Available at:  
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo\\_de\\_concentraci?n.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10779/Tiempo_de_concentraci?n.pdf).

Impacto, C.D.E.L. et al., 1980. *Daniel Bitrán Bitrán COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN*,

Instituto de Investigaciones Sociales UABC, 2011. Atlas de Riesgos del Municipio de Mexicali, B.C.

Jiménez-Espinosa, M., Matías-Ramírez, L. y Prieto-González, R., 2003. *Ciclones tropicales*,

Larios-Tlali, H. et al., 2015. Riesgo de inundación en la subcuenca del río La Antigua, Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6, pp.39–56.

Melrose, J., Perroy, R. y Careas, S., 2015. *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos* 1a edición., México, D.F.

Rivera, S.D., 2007. Metodología para el análisis hidrológico de cuencas rurales de pequeñas dimensiones.

Salas, M.A. y Jiménez, M., 2014. *Inundaciones*, Available at:  
[http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/183201446.\\_FASCICULO\\_INUNDACIONES.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/183201446._FASCICULO_INUNDACIONES.pdf).

Sánchez, J., 2004. Dinámica de fluidos computacional. *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujo con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas*, pp.65–72.

Teóricos, A., Antecedentes teóricos. , pp.3–24.

Tobergte, D.R. y Curtis, S., 2013. No Title No Title. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp.1689–1699.

WMO, W.M.O. y UNESCO, U.N.E. and S.O., 1998. *International Glossary of Hydrology*, Available at:  
[http://www.wmo.int/pages/prog/hwarp/publications/international\\_glossary/385\\_I\\_GH\\_2012.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwarp/publications/international_glossary/385_I_GH_2012.pdf).

17. Pedrozo-Acuña, A., y Breña-Naranjo, J. A. (2014a). “Respuestas ante el incremento del riesgo por inundación en México”. *Revista H2O*.