



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

REVISIÓN DE EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS EXTREMOS  
EN ZONA CONTINENTAL MEXICANA  
DURANTE EL SIGLO XXI

TESIS  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:  
ARIADNE SOFIA DRUST NACARINO

DIRECTOR DE TESIS:  
DRA. MARITZA LILIANA ARGANIS JUÁREZ



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. 2013.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, por su apoyo decidido, generoso y desinteresado durante mis estudios de licenciatura.

Al Instituto de Ingeniería en especial a la Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez por su paciencia, tiempo y dedicación durante mi estancia en el Instituto, por sus comentarios y apoyo para la realización de este trabajo.

A mi madre, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias de opiniones, porque gracias a su apoyo y consejo he llegado a realizar la más grande de mis metas, la cual es la herencia más valiosa que pudiera recibir. Gracias por soportar tanto, por creer en mí, gracias por ayudarme.

Al jurado del examen profesional integrado por: Dr. Ramón Domínguez Mora, Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez, M.I. Eliseo Carrizosa Elizondo, Ing. Héctor Legorreta Cuevas e Ing. Rodrigo Sepúlveda Takashi.

A mis amigas y personas muy importantes en mi vida: Elsa, Tere, Maty, Pris, Wen, Oscar, Gerard y Roland por acompañarme en este gran logro, gracias por todos estos años a mi lado, por creer en mí, por la motivación, por su cariño, por siempre levantarme el ánimo, por los buenos momentos vividos, mis locuras y mis errores. Gracias.

## ÍNDICE

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Antecedentes .....</b>	<b>5</b>
1.1 Introducción .....	5
1.2 Planteamiento del problema.....	6
1.3 Objetivo.....	9
1.4. Estudios internacionales sobre eventos extremos.....	9
1.5. Referencias.....	16
<b>Capítulo 2. Eventos Hidrometeorológicos extremos.....</b>	<b>19</b>
2.1. Introducción.....	19
2.2. Eventos Extremos.....	19
2.2.1 Huracanes.....	20
2.2.2 Precipitaciones .....	22
2.2.3 Inundaciones .....	23
2.2.4 Sequías.....	24
2.3 Referencias.....	27
<b>Capítulo 3 Disponibilidad de datos en México.....</b>	<b>29</b>
3.1 Introducción.....	29
3.2 Datos hidrométricos y climatológicos disponibles.....	30
3.2.1 Datos de la Comisión Nacional del Agua.....	33
3.2.1.1 Software y bases de datos disponibles .....	35
3.2.2 Datos del Servicio Meteorológico Nacional.....	37
3.2.2.1 Software y bases de datos disponibles. ....	39
3.3 Referencias.....	42
<b>Capítulo 4 Metodologías para su estudio .....</b>	<b>43</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>43</b>

4.1 Huracanes.....	43
4.2 Precipitaciones.....	62
4.3 Inundaciones.....	75
4.4. Sequías .....	84
4.5 Referencias.....	93
<b>Capítulo 5. Estudio de caso .....</b>	<b>98</b>
5.1 Introducción.....	98
5.2.2 Estudio de caso en Champotón, Campeche.....	101
5.5 Referencias .....	115
<b>Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>117</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>129</b>

## Introducción

En la última década los eventos hidrometeorológicos extremos han causado grandes estragos en el mundo. El informe del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) proyecta que el aumento en la temperatura debido al incremento de gases de efecto invernadero, producirá un gran impacto en los recursos hídricos, acortando la duración del periodo de lluvias, reduciendo la cubierta de nieve, incrementando el nivel del mar y aumentando la frecuencia de los eventos extremos como inundaciones y sequías (IPCC, 2007). Según el IPCC, si se mantiene la tendencia actual los daños mundiales serían catastróficos dado que el nivel del mar podría subir de 15 a 95 cm para el año 2100. El incremento de un metro desplazaría a 70 millones de personas en Bangladesh, sumergiría el 80 por ciento de las Islas Marshall y amenazaría las costas sur atlánticas de los Estados Unidos y la zona costera de Japón. El derretimiento en el Ártico afectaría los pueblos nativos del Norte de Canadá, y sería uno de los peores escenarios de desastre para el hemisferio norte.

México no es la excepción, debido a su ubicación geográfica está expuesto a huracanes, sequías, precipitaciones intensas, deslaves, heladas, inundaciones y olas de calor; los efectos del cambio climático se han manifestado con una secuencia de desastres de origen hidrometeorológico con graves daños para la sociedad mexicana. Por un lado se han presentado sequías como las de 1997, 1998 y 2005 que provocaron incendios forestales y la pérdida de cosechas. Por otro lado, los eventos de lluvias extremas se han intensificado desde 1999, ocasionando grandes pérdidas humanas y económicas en todo el país sobre todo en el sureste mexicano. (Soto et al, 2009)

Los eventos extremos afectan el centro y sur del país donde se encuentra la zona de mayor marginación social. Los desastres se incrementan en México por factores como el incremento de la población que hace que la demanda de agua también se incremente haciendo más vulnerables aquellas comunidades y ciudades cuyo suministro de agua es limitado. Existe el reconocimiento de la ONU sobre la inequidad en la distribución del servicio de abasto de agua potable. Es bien sabido que el acceso inadecuado al agua constituye una parte esencial de la pobreza de la población, afectando a sus necesidades básicas de salud, seguridad alimentaria y sustento (ONU, 2003).

Otro factor es el crecimiento relativo de la pobreza, los sectores más desprotegidos de la población resultan vulnerables a los desastres de origen meteorológico. Las zonas más expuestas a huracanes, lluvias e inundaciones son los estados de Guerrero, Veracruz, Oaxaca y Chiapas debido a la concentración de pobreza y marginación. (CONAPO 2003, 2006). Las comunidades pobres sufren más dado que su capacidad de adaptación es muy limitada, los procesos de recuperación ante los desastres son muy prolongados y muchas veces no recuperan su patrimonio ni sus fuentes de subsistencia.

Dichos fenómenos han traído consigo históricamente, implicaciones de carácter socioeconómico, como es el caso de los eventos de sequía (Endfield et al., 2004), el peligro de deslaves se ha asociado a eventos de precipitación (Alcántara-Ayala, 2004); además de que recientemente se analiza la posibilidad de que algunos de ellos, en particular los ciclones tropicales, puedan ser fuentes de selección natural de algunas especies (Luja y Rodríguez, 2010). Por otro lado, las sequías, aunque generalmente de desarrollo más lento, provocan la disminución en la producción agrícola y ganadera, y con ello el desabasto para la población y pérdidas económicas que pueden llegar a ser muy significativas (Jiménez et al., 2010). De acuerdo con el documento especial de riesgos hidrometeorológicos, desarrollado en mayo del 2011 en Oaxaca por el Centro de Información Estadística y Documental para el Desarrollo, teniendo como fuente el Centro Nacional de Prevención de desastres, en los años 2003, 2005 y 2010 se han presentado las mayores declaratorias asociadas a eventos hidrometeorológicos, siendo de 200,570 y 200,516 declaratorias, respectivamente.

Los fenómenos de el Niño y la Niña han causado condiciones extremas en el clima de nuestro país; el Niño provoca condiciones de sequía en el verano en el centro de México, las lluvias en el invierno se intensifican en el noroeste del país y en verano se debilitan, en la zona centro y norte del país se incrementan los frentes fríos en invierno. En el caso de la Niña provoca lluvias excesivas en el centro y sur del país, sequías en el norte de México, e inviernos con marcada ausencia de lluvias.

Los huracanes que se presentan principalmente durante la temporada de lluvias se resienten en las zonas costeras del Pacífico, Golfo y Caribe; se asocian lluvias intensas a este fenómeno las cuales pueden causar inundaciones y deslaves no solamente en las costas, sino también en el interior del territorio nacional. En promedio llegan unos 25 ciclones cada año, de éstos, 4 o 5 llegan a penetrar a territorio mexicano y a causar graves daños.

En los 2 espacios marítimos que rodean a la República Mexicana, océanos Pacífico y Atlántico, hay 4 regiones matrices de generación de ciclones (CENAPRED, 2007).

La primera se ubica en el Golfo de Tehuantepec, inicia la actividad ciclónica durante la última semana de mayo y por lo regular los ciclones tienden a irse al Oeste y se alejan de México. Los que se generan de julio en adelante describen una parábola paralela a la costa del Pacífico y a veces llegan a introducirse a tierra.

La segunda región está en el sur del Golfo de México, en la denominada Sonda de Campeche. Los ciclones aparecen a partir de junio con ruta norte-noroeste y afectan los estados de Veracruz y Tamaulipas.

La tercera región matriz está localizada en la región oriental del Mar Caribe y sus ciclones surgen en julio y mayormente entre agosto y octubre. Estos ciclones son intensos y de largo recorrido, afectan los estados de Yucatán y la península de Florida en Estados Unidos.

La cuarta región está en la zona tropical del Atlántico. Los ciclones de esta matriz se activan en agosto y se dirigen al oeste penetrando en el Mar Caribe, Yucatán, Tamaulipas y Veracruz.

Estas regiones no son estables debido a su ubicación geográfica, ya que ésta obedece a la posición de los centros de máximo calentamiento marítimo, que está influido por las corrientes frías de California, la contracorriente cálida ecuatorial en el Pacífico y a la corriente cálida del Golfo.

En nuestro país existen grandes variaciones en la disponibilidad de agua a lo largo del año. Algunas regiones del país tienen precipitación abundante y baja densidad de población, mientras que en otras ocurre exactamente lo contrario. El 68 % de la precipitación normal mensual ocurre entre los meses de junio y septiembre. En la mayor parte del territorio la lluvia es más intensa en verano y principalmente es de tipo torrencial (Ortiz et al., 2010).

Tabasco es la entidad más lluviosa, mientras que Baja California Sur es la más seca. En la mayor parte de las entidades federativas, la precipitación ocurre predominantemente entre junio y septiembre, con excepción de la península de Baja California, donde se presenta principalmente en el invierno. (CONAGUA, 2008).

Al 31 de diciembre del 2009, la precipitación acumulada ocurrida en la República Mexicana alcanzó una lámina de 649 mm, que fue 14.6 % inferior a la media histórica normal del periodo 1971 al 2000. (CONAGUA, 2011)

Las tormentas de granizo también llegan a causar daños severos tanto a la población como a diversos sectores de la producción; en particular a la agricultura. Las zonas más afectadas de México por tormentas de granizo son el altiplano de México y algunas regiones de Chiapas, Guanajuato, Durango y Sonora. En el periodo comprendido de 1979 a 1988 el CENAPRED reportó que, según registros de la Comisión Nacional del Agua, los estados que sufrieron más daños en la agricultura fueron: Guanajuato (109, 767 ha), Chihuahua (56,355 ha), Tlaxcala (51,616 ha), Nuevo León (37,837 ha) y Durango, (35,393 ha). Asimismo, dentro de estos registros se estimó una población expuesta mayor a los 6 millones de habitantes, lo cual representa cerca del 5% de la población total del país.

Los deslizamientos de masa de tierra pueden tener causas geológicas, dependiendo del tipo de recubrimiento y pendiente del terreno, pero también se asocian o se ven favorecidos por eventos de precipitación en un sitio dado por la infiltración de una parte del agua precipitada. En México históricamente se han presentado deslaves que han ocasionado un número cuantioso de pérdidas humanas, ejemplos de ellos fueron los deslizamientos ocurridos en los estados de Hidalgo ( en el poblado de Meztlán en el año 1991), En Guerrero (Deslizamientos de tierra afectaron la bahía de Acapulco, tras el huracán Paulina en 1997) Puebla (Eventos de precipitación provocaron enormes deslizamientos de tierra en la Sierra Norte, en 1999, 263 personas perdieron la vida y 1.5 millones de habitantes fueron afectados, lo cual representó al



30% de la población total del estado (Alcántara-Ayala,2004) y Chiapas (El Caído de Juan de Grijalva, que sepultó a un poblado completo, en el año 2007). Es importante contar con planes de prevención y protección civil que permitan mitigar los posibles impactos ante eventos de esta naturaleza.

### **Contenido de los capítulos**

En el capítulo 1 se plantea el problema motivo de este trabajo; se habla de los eventos hidrometeorológicos extremos que ha sufrido el país a lo largo de la última década, el problema al que se enfrenta México debido a su orografía, al cambio climático y meteorológico. Se hace también una reseña de eventos de esta naturaleza que han ocurrido a nivel internacional y la forma en que se han estudiado.

El capítulo 2 trata de las definiciones de cada uno de los eventos hidrometeorológicos que existen: huracanes, precipitaciones, inundaciones y sequías, dadas por diversos autores nacionales e internacionales.

En el capítulo 3 se habla de los datos hidrométricos y climatológicos, las estaciones de medición que están ubicadas en el territorio nacional y la base de datos y el software ocupados por la Comisión Nacional del Agua y el Servicio Meteorológico Nacional.

En el cuarto capítulo se plantean algunas de las metodologías que se ocupan para el estudio de huracanes, precipitaciones, inundaciones y sequías, y su utilidad práctica.

En el capítulo 5 se presenta un estudio de caso que se realiza en la ciudad de Campeche donde se identifican los peligros hidrometeorológicos y que forma parte de un estudio de doctorado realizado en el posgrado UNAM, un análisis de la marea de tormenta asociada a huracanes e inundaciones fluviales. Se describe brevemente el sistema de información geográfica útil y de fácil consulta realizado para las autoridades estatales.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este estudio.

## Capítulo 1. Antecedentes

### 1.1 Introducción

La ubicación geográfica y las características físicas de México favorecen la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos que influyen a más del 60% del territorio nacional. México es uno de los países más propensos a padecer afectaciones atmosféricas y climáticas que causan inundaciones en el territorio.

En octubre de 2001, el huracán Juliette ocasionó lluvias atípicas en Sonora y pérdidas de 905.15 millones de pesos. (Bitran et al., 2002).

En el 2005, el huracán Stan provocó el desbordamiento del río Coatán en Chiapas e inundó los municipios de Tapachula y Motozintla, con un saldo de 100 mil personas afectadas. (Murcia - Macia, 2005).

En las inundaciones del 2005 se estimaron daños con un valor de cuatro mil millones de pesos y para el 2010 hubo un gasto de más de 50 mil millones por daños causados debido a las inundaciones para el estado de Veracruz que concentra el mayor volumen de agua superficial; sus ríos descargan al mar más del 30% del caudal de todos los ríos del país. Las características de relieve, la ubicación geográfica, el clima y la precipitación hacen de Veracruz una zona vulnerable a inundaciones. Así, tenemos que 27% del territorio veracruzano presenta una topografía accidentada y además 73% del territorio estatal yace por debajo de los 200 msnm, en una planicie surcada de ríos e influenciada por sistemas meteorológicos tropicales en verano y extra-tropicales en invierno, ello ocasiona que 40% de los días del año sean lluviosos.

En el Atlántico, la presencia de Helene y Gordon solo generaron alertas pero ninguno llegó a las costas mexicanas (CONAGUA, 2009).

Las lluvias, inundaciones y ciclones tropicales ocasionaron daños por 13,580 millones de pesos, afectando a más de 778 mil personas y destruyendo más de 455 mil hectáreas de diferentes cultivos. Entre Tabasco, Veracruz y Oaxaca concentraron cerca del 70% de las pérdidas económicas (CENAPRED, 2009).

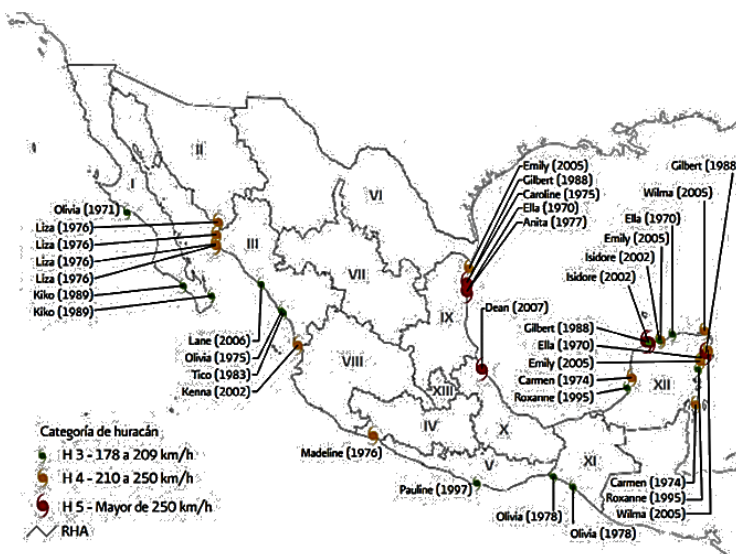
En 2007, se vive uno de los desastres hidrometeorológicos más impactantes en México con las inundaciones en el Estado de Tabasco. La cantidad de damnificados y las pérdidas materiales fueron inmensas. Las intensas lluvias, alimentadas por los efectos del cambio climático, hicieron que los ríos Grijalva, Usumacinta, Carrizal y Mazcalapa se desbordaran. Las lluvias torrenciales también provocaron que la presa Peñitas llegara a su máxima capacidad el 29 de Octubre, lo que obligó a abrir las compuertas y desfogar 2 millones de litros por segundo, desencadenando la inundación. En el mismo período se genera una tragedia en el Estado de Chiapas por el desdajamiento de un cerro que sepultó al Pueblo de Juan de Grijalva.

## 1.2 Planteamiento del problema

Nuestro país se sitúa en el Cinturón de Fuego, sobre las placas tectónicas del Pacífico, de Cocos, la Norteamericana y del Caribe, siendo en esta zona en donde ocurre el 80% de la actividad sísmica y volcánica a nivel mundial. Además nos ubicamos dentro de cuatro de las seis regiones generatrices de ciclones del mundo, las cuales influyen en el territorio de Tehuantepec, Región Oriental del Mar Caribe, Sonda de Campeche y Región Oriental del Atlántico. En total, son 17 entidades las ubicadas en zonas de peligro, donde habita casi la mitad de la población mexicana (FIODM, 2011).

México está situado cerca de la zona intertropical de convergencia, la cual es una banda de baja presión que se forma sobre las regiones de masas de aguas más cálidas en los trópicos, donde las masas de aire están forzadas a ascender por el calentamiento, esto provoca una abundante formación de nubes y fuertes lluvias.

Entre 1970 y 2010, 186 ciclones tropicales impactaron las costas de México. A continuación se presenta su ocurrencia en el Océano Atlántico y Pacífico, donde se observa que a pesar que han impactado un mayor número de ciclones en el Pacífico, los huracanes intensos se han presentado en mayor proporción en el Atlántico. Figura 2.2.1.

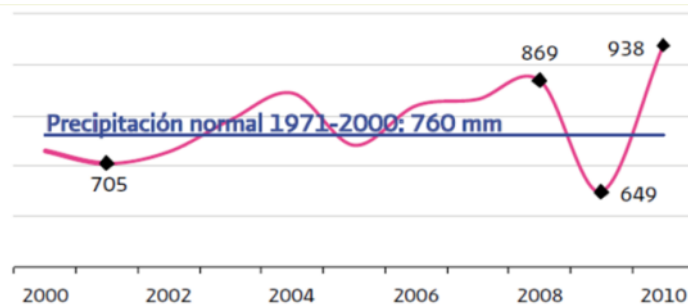


**Figura 1.2.1.** Huracanes intensos categorías H3-H5, CONAGUA 2009.

Los factores geográficos y geofísicos determinan las condiciones del clima y lluvia en las diversas regiones de la República Mexicana. México está entre los paralelos 14° 31' y 32° 43' de latitud norte, toda esta extensión se ubica dentro de las fajas de desiertos; se salva de esta fatalidad geográfica gracias a otros factores que propician la ocurrencia de la precipitación pluvial. Existen diferencias en la distribución de la lluvia. La zona más lluviosa con

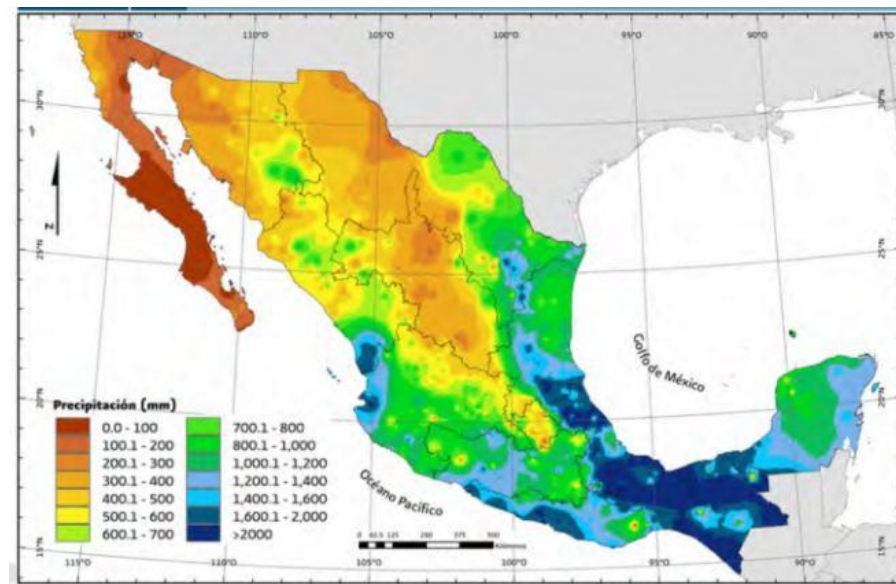
precipitaciones superiores a 1500mm, se encuentra al sur del paralelo 22° de latitud norte y comprende las pendientes montañosas de las porciones central y sur del país que se inclinan al golfo de México y se encuentran directamente expuestas a los vientos húmedos del mar, asociados con los vientos Alisios, los nortes y los ciclones tropicales. (Breña, 2004).

La precipitación acumulada ocurrida en la República Mexicana del 1° de enero al 31 de diciembre del año 2010 alcanzó una lámina de 938 mm, lo cual fue 23.4% superior a la normal del período de 1971 a 2000 (760 mm). Figura 1.2.2.



**Figura 1.2.2.** Precipitación pluvial anual 2010.

Se observa que la región Sureste del país es la que tiene precipitaciones mayores, mientras que el Norte y Noroeste de la República son regiones de escasa precipitación. En la Figura 1.2.3 se muestra la distribución pluvial anual de la República Mexicana en el 2010.



**Figura 1.2.3.** Distribución de la precipitación pluvial anual 2010.

Bajo consideraciones de tipo termodinámico, a mayor temperatura aumenta la capacidad de la atmósfera de contener vapor de agua por lo que la cantidad de agua precipitable es mayor. Adicionalmente, es posible que el cambio de uso de suelo que ha experimentado el Valle de México en los últimos cien años haya llevado a un calentamiento más intenso de la superficie,

por lo que las condiciones atmosféricas se vuelven más inestables y se incrementa el potencial de nubes profundas y tormentas más intensas.

Se puede considerar que los eventos hidrometeorológicos más peligrosos en el Valle de México son las lluvias intensas. Dichos meteoros producen daños que han ido en aumento al existir más asentamientos humanos en zonas propensas a inundaciones. Desafortunadamente, no se emiten pronósticos de precipitaciones intensas o de ocurrencia de tormentas severas en las escalas espaciales necesarias para implementar programas de prevención (por ejemplo, evacuaciones).

Aunque se trabaja en elevar este grado de acierto, se piensa que es mejor trabajar con pronósticos a corto plazo (2 horas) utilizando el radar meteorológico. Desafortunadamente, estos instrumentos no han sido explotados adecuadamente para apoyar las acciones de prevención de desastres. El radar ubicado en el Cerro de la Catedral, cerca de la Ciudad de México, rara vez proporciona estimaciones de lluvias intensas y menos de previsiones a corto plazo. La situación es similar con el resto de los radares del país. (Magaña-Neri, 2007)

El noroeste, norte y noreste están sometido a variaciones en el régimen pluviométrico y las lluvias más importantes están relacionadas con la influencia de estos ciclones, por lo que su prolongada ausencia en el verano es una posible causa de la sequía en esta región.

Estos períodos de poca precipitación y de disminución en los caudales de ríos llevan a eventos de sequía, sobre todo entre los meses de noviembre y finales de abril, y en especial en la región norte y centro del país, con sus efectos reflejados en la baja producción agrícola, pérdidas de cabezas de ganado, problemas de abastecimiento de agua potable, etcétera (CENAPRED, 2004).

Los problemas de escasez de agua que se presentan en el norte y centro del país se deben a que la demanda ya sobrepasó a la disponibilidad, lo que ocasiona competencia por el agua entre los diferentes usos, principalmente entre el agrícola y el público. La agricultura de riego utiliza 77% del agua en el país; los métodos aplicados son tradicionales en más del 80% de la superficie, y se estiman eficiencias en el uso del agua del orden de 46% (Esquivel, 2005), por lo que un enorme reto es el desarrollo de nuevas tecnologías aplicables a esta problemática.

En México, la mayoría de los sistemas agropecuarios y forestales son críticamente dependientes del clima. El cambio climático es una de las amenazas más serias que actualmente enfrenta nuestro planeta y de acuerdo a los modelos climáticos, esta situación se verá exacerbada para finales del siglo XXI cuando se espera un aumento en la temperatura global del planeta de entre 1.1 y 6.4 °C (Solomon et al., 2007).

Durante las dos últimas décadas, alrededor del 80% de las pérdidas totales económicas debidas a desastres relacionados con el clima, ocurrieron en el sector agrícola. (INE-SEMARNAT, 2009).

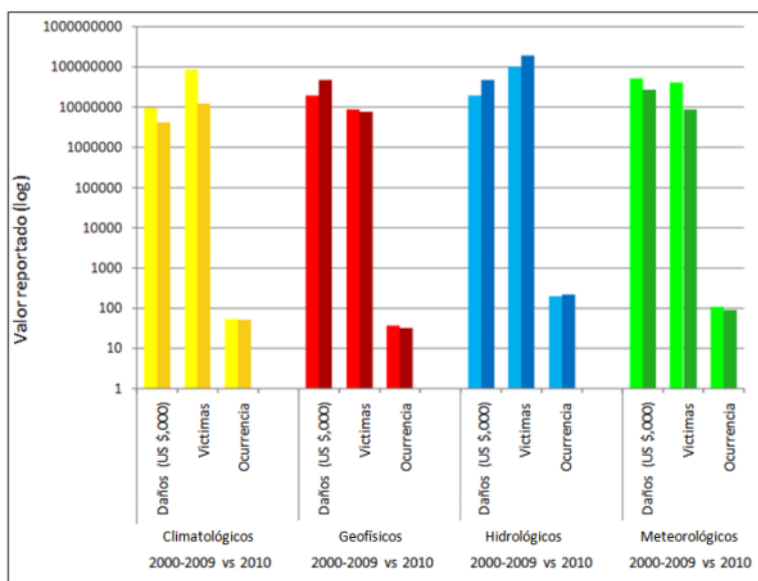
La problemática que enfrenta el país, expuesta con anterioridad, hace ver la importancia de contar con herramientas para el análisis de eventos extremos que sean de utilidad al ingeniero civil o en estudios multidisciplinarios, por dicho motivo en este trabajo se hace esta revisión amplia de metodologías.

### 1.3 Objetivo

El objetivo de este trabajo es hacer una revisión de los principales eventos hidrometeorológicos extremos existentes en el mundo y en particular en la zona continental mexicana, así como las diversas herramientas para la posible prevención o mitigación de sus daños, relacionados con la protección civil y, dar sugerencias y recomendaciones de utilidad práctica para el ingeniero civil.

### 1.4. Estudios internacionales sobre eventos extremos

En el 2010 se reportaron 42 desastres más que en el 2009 a nivel mundial. El número de desastres reportados fue de 385, aproximado al promedio anual de eventos ocurridos entre el 2000 y el 2009. Se observó un incremento en la ocurrencia de desastres hidrológicos y una disminución en los eventos meteorológicos. (CRED, 2010). Figura 1.4.1



**Figura 1.4.1.** Clasificación de Impactos de Desastres Naturales. Promedio anual 2000-2009 vs año 2010.

El número de víctimas se incrementó de 198.7 millones a 217.3 millones en el 2010, pero permaneció bajo el promedio anual (2000-2009) de 227.5 millones. El número de víctimas por eventos meteorológicos se incrementó un 98.9% comparado con el promedio anual de la última década. (CRED, 2011).

Los impactos de inundaciones catastróficas en Pakistán en julio del 2010 mostraron que la pobreza y el riesgo a los desastres están relacionados. El fenómeno de la Niña en el 2010 provocó en el verano incendios y temperaturas extremas en Rusia y en diciembre de 2010, inundaciones en Australia.

En la siguiente tabla se muestra una comparación del promedio de eventos ocurridos del 2000 al 2009 vs 2010. El Continente con mayor cantidad de desastres es Asia, seguido por América, África, Europa y Oceanía. (Tabla 1.4.1)

**Tabla 1.4.1. Desastres ocurridos a nivel mundial**

Cantidad de Desastres ocurridos	África	América	Asia	Europa	Oceanía	Total
Climatológicos 2010	6	16	6	22	0	50
Prom. Climatológicos 2000-2009	9	13	13	18	1	54
Geofísicos 2010	1	6	20	2	2	31
Prom. Geofísicos 2000-2009	3	7	21	3	2	31
Hidrológicos 2010	57	40	81	32	6	216
Prom. Hidrológicos 2000-2009	43	39	80	25	5	192
Meteorológicos 2010	5	35	27	14	7	88
Prom. Meteorológicos 2000-2009	9	33	42	14	6	105
Total 2010	69	97	134	70	15	385
Prom. Total 2000-2009	64	92	156	59	15	387

El número de víctimas en Asia es el mayor de todos los continentes; la mayoría ocasionado por eventos hidrológicos en el 2010. (CRED, 2010). (Tabla 1.4.2).

**Tabla 1.4.2. Número de Víctimas a nivel mundial**

Cantidad de víctimas (millones)	África	América	Asia	Europa	Oceanía	Total
Climatológicos 2010	5.44	0.18	6.52	0.06	0	12.21
Prom. Climatológicos 2000-2009	12.21	1.21	70.57	0.26	0	84.25
Geofísicos 2010	0	6.62	0.38	0.03	0.3	7.33
Prom. Geofísicos 2000-2009	0.08	0.37	7.98	0.01	0.01	8.45
Hidrológicos 2010	4.23	4.18	180.1	0.28	0.23	189.03
Prom. Hidrológicos 2000-2009	2.34	2.9	89.42	0.34	0.02	95.01
Meteorológicos 2010	0.2	1.11	6.88	0.5	0.05	8.73
Prom. Meteorológicos 2000-2009	0.45	2.62	36.31	0.32	0.04	39.74
Total 2010	9.87	12.1	193.9	0.87	0.57	217.3
Prom. Total 2000-2009	15.07	7.09	204.3	0.94	0.06	227.46

América es el continente que ha tenido que invertir mayor cantidad de dinero en la reparación de daños; esto debido a la mayor cantidad de desastres meteorológicos entre el 2000 y el 2009 y, geofísicos en el 2010. Le sigue Asia con daños económicos en el 2010 debido a eventos hidrometeorológicos. (CRED, 2010). (Tabla 1.4.3)

Tabla 1.4.3. Daños en billones de dólares provocados por desastres naturales en el mundo.

Daños ( 2009 US\$ bn)	África	América	Asia	Europa	Oceanía	Total
Climatológicos 2010	0	0.11	0.27	3.6	0	3.98
Prom.Climatologicos 2000-2009	0.04	2.29	3.56	2.9	0.47	9.26
Geofísicos 2010	0	38.01	1.51	0.13	6.5	46.15
Prom. Geofísicos 2000-2009	0.67	0.69	16.73	0.54	0.02	18.65
Hidrológicos 2010	0.06	2.49	32.08	7.02	5.24	46.89
Prom. Hidrológicos 2000-2009	0.35	2.89	8.86	6.53	0.5	19.13
Meteorológicos 2010	0	16.22	0.9	6.95	2.77	26.84
Prom. Meteorológicos 2000-2009	0.08	37.82	10.21	3.44	0.29	51.83
Total 2010	0.06	56.84	34.76	17.7	14.51	123.86
Prom. Total 2000-2009	1.15	43.69	39.36	13.41	1.27	98.87

### África

En 2002 Kenia se vió afectada por la peor sequía en 37 años. En junio se estimaban 1,700 000 personas que requerían asistencia alimentaria. En diciembre, la cifra se había elevado a los 4 millones.

La franja de Sahel, que se extiende desde el Océano Atlántico hasta el Mar Rojo, con el paso de los años ha sufrido extensas sequías. En el 2005, 9 millones de personas fueron afectadas padeciendo de epidemias, hambruna y desnutrición; para 2007 la sequía causada por el fenómeno de El Niño afectó los cultivos de Sudáfrica, Botswana, Lesoto, Sur de Mozambique y Zimbabwe.

En el este de África ecuatorial se originó una sequía en el 2005, ocasionado por las "lluvias cortas", en el período Octubre - Noviembre. (Hastenrath et al., 2007).

En 2005, estudios realizados con una serie climática en NOAA, indicaban que la vigésima sequía de Sahel del siglo era una probable respuesta climática a los patrones de la temperatura superficial del mar que cambiaban, y podría ser vista como combinación de la variabilidad natural. Estas simulaciones indicaron que eran tardíamente atribuibles a los factores humano-inducidos; en gran parte debido a un aumento en gases de invernadero y en parte debido a un aumento en aerosoles atmosféricos. Los estudios indican que el cambio del clima podría conducir a una reducción del 25% en la precipitación de Sahel por el año 2100 (Held et al., 2005)

En 2009 durante el período de lluvias, las precipitaciones fueron casi nulas en regiones como Kenia, Somalí, Uganda, Yibuti y Tanzania.

### América

En el océano Pacífico los huracanes más intensos en el año 2006 fueron Daniel y John de categoría IV con vientos máximos de 240 Km/h y 215 Km/h. El huracán John se presentó en



El Saucito, Baja California Sur. El huracán Lane en Sinaloa con vientos de 205Km/h. En el Atlántico la presencia de Helene y Gordon solo generaron alertas pero ninguno llego a las costas mexicanas. (CONAGUA, 2009).

En 2007 las precipitaciones e inundaciones ocasionaron daños en 483 245 ha sembradas, 718 142 damnificados, 128 307 deterioros en viviendas. Destacan las inundaciones ocasionadas por desbordamiento de los ríos Grijalva, La Sierra, Samaria y Carrizal debidas a lluvias extraordinarias en la cuenca media del Grijalva que inundó el 70% del Estado de Tabasco, (CONAGUA, 2008).

En 2008 México fue impactado por 6 ciclones tropicales, solo dos tocaron tierra con categoría de huracán: Dolly en Tamaulipas y Norbert en Baja California Sur y Sonora. (CONAGUA, 2009).

En 2009, Venezuela sufrió de una fuerte sequía ocasionada por las bajas precipitaciones en el país con sólo 600 milímetros de lluvia. Las afectaciones se ven reflejadas en el sector agrícola, en el equilibrio ecológico y en el sector hidroeléctrico. (Paredes, 2010).

La distribución de las lluvias en Venezuela está afectada por factores como la orografía, la orientación con respecto a los vientos Alisios y la cercanía con las masas de agua. La temporada seca en Venezuela es condicionada por el movimiento de la Alta Presión del Atlántico Norte (APAN), que inhibe la formación de nubes de gran desarrollo vertical entre mediados de noviembre y finales de marzo.

El huracán Karl, decimotercer ciclón tropical de la temporada de huracanes en el Atlántico de 2010, se originó en el mar Caribe e impactó en la península de Yucatán como una tormenta tropical fuerte, hasta emerger al golfo de México donde se reorganizó gradualmente hasta alcanzar la categoría 3 (huracán mayor) en la escala de Saffir-Simpson e impactó la costa oriental de México el 17 de septiembre del año 2010. (Cruz, 2010).

Jova fue un ciclón cuya trayectoria se inició a más de 1,000 km al Sur de la costa de Colima, de allí se desplazó hacia el Noroeste y posteriormente recurvó hacia el Noreste con rumbo a la costa occidental de México a donde llegó en las primeras horas del día 12 de octubre del 2011, tocando tierra a las 01:00 horas a 8 km al Sur de la población de La Fortuna, Jal. Como huracán de categoría II, con vientos máximos sostenidos de 160 km/h y rachas de 195 km/h. Su duración fue de 168 horas, tiempo en el que recorrió una distancia aproximada de 2,000 km a una velocidad promedio de 12 km/h. Se reportaron lluvias máximas puntuales en 24 horas de 374.4 mm en Coquimatlán, Col (siendo la mayor cantidad de lluvia a nivel nacional durante el año 2011); 115.0 mm en Melchor Ocampo, Mich. y 91.0 mm en Ciudad Guzmán, Jal., el día 11 de octubre. (Bravo et al., 2011).

En relación a las sequías se realizan anualmente 2 estimaciones a nivel Norteamérica en el marco del proyecto Monitor de Sequía para América del Norte (NADM). (CONAGUA, 2010).

Para la primera estimación de sequía, correspondiente al final de la temporada estival, en mayo del 2009, la península de Baja California permaneció con condición de anormalmente seca a severa, en tanto que el noreste de México presentó un incremento en la intensidad, de anormalmente seca a sequía extrema.

En Sonora y Chihuahua la condición de sequía continuó sin cambios a pesar de las precipitaciones, en tanto que se registró la condición de sequía con impacto hidrológico en el centro del país con intensidades de anormalmente seca a severa, destacando la intensidad de sequía severa para Michoacán, México y el Distrito Federal.

Para la segunda estimación de sequía, al finalizar la temporada de lluvia, en noviembre del 2009 se reportaron lluvias superiores a la normal, originada por frentes fríos y el huracán Ida, que afectó a la península de Yucatán, con anomalías positivas en Nayarit, Quintana Roo, Nuevo León y Campeche, en tanto que Baja California Sur, Estado de México, Querétaro y Morelos presentaron anomalías negativas.

En 2009, Venezuela sufrió de una fuerte sequía ocasionada por las bajas precipitaciones en el país con solo 600 milímetros de lluvia. Las afectaciones se ven reflejadas en el sector agrícola, en el equilibrio ecológico y en el sector hidroeléctrico.

La distribución de las lluvias en Venezuela está afectada por factores como la orografía, la orientación con respecto a los vientos Alisios y la cercanía con las masas de agua. La temporada seca en Venezuela es condicionada por el movimiento de la alta presión del Atlántico Norte (APAN), que inhibe la formación de nubes de gran desarrollo vertical entre mediados de noviembre y finales de marzo.

El fenómeno de las sequías en los llanos ha sido escasamente estudiado, debido en parte, a las pocas estaciones pluviométricas disponibles y su gran dispersión espacial (Ovalles et al., 2008).

### **Asia**

La disponibilidad de agua en China se encuentra mal distribuida; en el noreste se consume mayor cantidad de agua que la disponible, mientras que en el sur se cuenta con un 80% del total de agua y no es ocupada en su totalidad. El agua proviene de acuíferos subterráneos y de ríos como el Yangtsé (6.300 Km), el río Amarillo, el río de las Perlas, el río Huai (Tong et al, 2006).

En 2002 en la India se presentó una de las sequías más severas afectando al 56% de su área geográfica. Las sequías se deben mayormente a la reducción de precipitaciones y a la demanda de agua en el país y se observa que una sola temporada de lluvias monzónicas anormales puede tener gran impacto en la población; el subcontinente indio sufrió una de las sequías más severas en su historia, lo que resulta en una caída importante en la producción de alimentos y el PIB (Gadgil et al., 2004).

Esta amenaza se puede agudizar en las próximas décadas, dado que los suministros de agua subterránea en la India, que ofrecen una protección contra las precipitaciones, están cada vez más empobrecidos (Rodell et al., 2009).

### *Europa*

Entre 1998 - 2009 Europa tuvo desastres naturales ocasionados por eventos hidrometeorológicos extremos. Predominan las inundaciones con una cifra de 213 tormentas con un total de 155 y un registro de 8 sequías durante este período. En el período de 2003 a 2009, se registraron 26 grandes inundaciones. Los países más afectados Rumania (2005), Turquía (2006) e Italia (2009). (EEA, 2010).

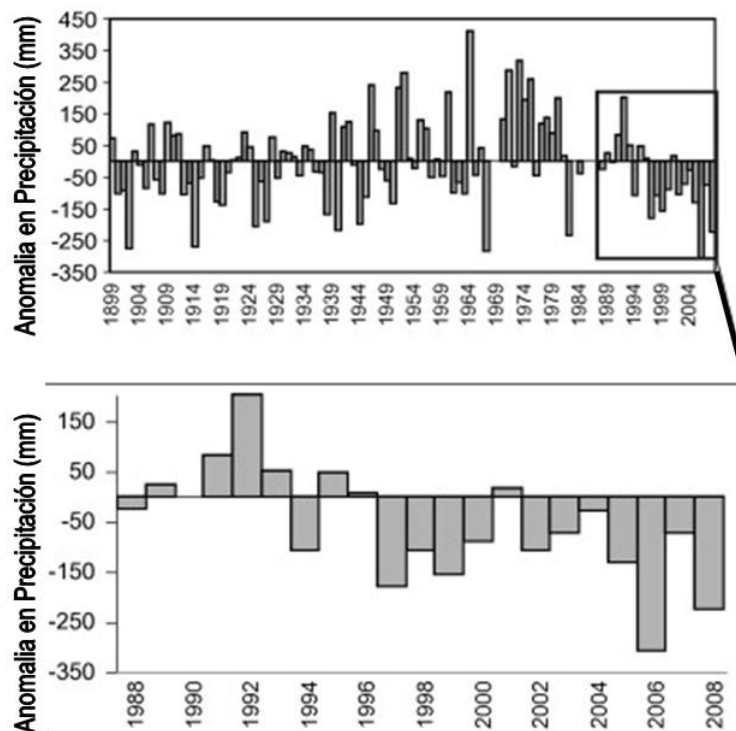
Las tormentas abarcaron desde Escocia hasta el sur de los Alpes del Sur y del Atlántico hacia la planicie Rusa. Las tormentas registradas en la última década fueron: Jeanett (octubre 2002) afectando Austria, Bélgica, Dinamarca, Francia, Alemania, Reino Unido; Gudrun y Erwin (enero 2005) en Reino Unido, Suiza, Alemania, Polonia, Finlandia, Suiza; Kyrill (enero 2007) en Alemania, Austria, Reino Unido, Francia; Hilal (mayo-junio 2008) en Alemania; Klaus (enero 2009) en Francia, España e Italia; Wolfgang (julio 2009) en Austria, Polonia, República Checa y Alemania. (Puyol, 2006).

En España la mayoría de las inundaciones son por avenidas súbitas en pequeñas cuencas. Las causas de que España sea afectada por las inundaciones son: su orografía, el clima y la gran densidad demográfica en su periferia. (Ayala et al, 2002)

En la Península Ibérica El Ebro es el río más grande del Mediterráneo, con una cuenca de 85 000 Km<sup>2</sup> y una longitud del canal de 930 Km. En el tramo medio tiene 739 km<sup>2</sup> en llanuras de inundación, el más extenso de la Península Ibérica. Esta planicie de inundación se cubre de agua con frecuencia con un daño económico significativo. Las inundaciones en circulación ocurrieron por última vez en noviembre de 1966, febrero de 1978, diciembre de 1980, y enero de 1981. En las últimas décadas, el número de pequeñas inundaciones moderadas ha disminuido debido a los sistemas de regulación. (Ollero, 2010).

### *Oceanía*

La mayor parte del sureste de Australia ha experimentado una sequía prolongada desde 1997-2008. La cuenca Corangamite, ubicada a 40 km desde el océano en una región sub-húmeda del sureste de Australia cubre un área de 13.300 kilómetros<sup>2</sup>. La región tiene una larga duración promedio anual de precipitaciones de 730 mm. Un 60% de las precipitaciones se produce durante los meses de invierno / primavera de junio a noviembre (1899-2008). Se observa un déficit en las precipitaciones de la media a largo plazo durante el año 1994, y luego por 11 de los 12 años transcurridos entre 1997 y 2008. En la Figura 8 se aprecia que la región experimentó una sequía meteorológica severa en ese periodo. (Ortiz et al., 2010).



**Figura 1.4.2.** Desviación de largo plazo promedio anual de precipitaciones para los datos de la estación de Colac durante 1899-2008, y una sección ampliada destacando el déficit de las últimas como resultado de la sequía de varios años (Oficina Australiana de Meteorología, 2008).

## 1.5. Referencias

1. Acevedo F... Diaz-Peon Antonio Luna. Principales fenómenos meteorológicos que afectaron el estado de Veracruz en el año 2005
2. Alcantara-Ayala I. Hazard assessment of rainfall-induced land sliding in Mexico. *Geomorphology* 61, 2004, pp. 19-40.
3. Ayala Carcedo FJ. El sofisma de la imprevisibilidad de las inundaciones y la responsabilidad social de los expertos. Un análisis del caso español y sus alternativas. *Boletín*, ISSN 0212-9426, N°. 33, 2002 , págs. 79-92
4. BitranBitran Daniel, Lorena Acosta Colsa, Héctor Eslava Morales, Carlos Gutiérrez Martínez, Marco Antonio Salas Salinas, María Teresa Vázquez Conde. Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2001. CENAPRED, 2002.
5. Bravo Lujano Cirilo e Ing. Hdz Unzón Alberto. Reseña del huracán "Jova" del Océano Pacífico. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional Gerencia de Meteorología y Climatología. / Subgerencia de Pronóstico Meteorológico Temporada 2011 de Ciclones Tropicales.
6. Breña Puyol Agustín Felipe, Precipitación y Recursos Hidráulicos en México. Universidad autónoma Metropolitana, 2006. Libro en línea: [http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/precipitacion/PRHM\\_04-libro.pdf](http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/precipitacion/PRHM_04-libro.pdf)
7. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Sistema Nacional de Protección Civil. Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos. México, 2006, 140 pp
8. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación. Ciclones Tropicales. Serie Fascículos, México. 2007. [http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc.\\_Ciclones\\_2007.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc._Ciclones_2007.pdf).
9. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2008. Septiembre, 2009. 264 pp
10. CENAPRED, 2011. <http://www.cenapred.unam.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/Inundaciones/>
11. CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2007. CONAGUA-SEMARNAT, Diciembre, 28-30.
12. CONAGUA. Inventario Nacional de Obras de Protección contra inundaciones en cauces naturales. Capítulo 2. Zonas inundables en México. CONAGUA 2008. 29-42.
13. CONAGUA. Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2006, 2007 y 2008. CONAGUA-SEMARNAT, 2009. 75- 258.
14. CONAGUA. Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2006, 2007 y 2008. CONAGUA-SEMARNAT, 2009, pp75- 258.
15. CONAGUA. Estadísticas del agua 2010. Capítulo 2 Situación de los recursos hídricos. 32-33.

16. CONAGUA, 2010. Atlas digital del agua México. <http://www.conagua.gob.mx/atlas>
17. Comisión Nacional del Agua. .Estadísticas del Agua en México, Edición 2011. CONAGUA-SEMARNAT, Marzo. 185 pp.
18. CONAPO. La Situación demográfica de México 2002. Consejo Nacional de Población, Secretaría de Gobernación, México 2003, 182 pp
19. CONAPO. La Situación demográfica de México 2006. Consejo Nacional de Población, Secretaría de Gobernación, México, 2006
20. Cruz Flores P. Impacto Socioeconómico Del "Huracán Karl" Sobre Instalaciones De Salud En Veracruz, México Con Una Población De 7 Millones 600 Mil Habitantes En Septiembre Del Año 2010. Escuela De Medicina, Sta. Catarina Mártir. Cholula, México. Abstracts - 17th World Congress on Disaster and Emergency Medicine. Prehospital and Disaster Medicine Vol. 26, Supplement 1
21. Endfield, G. H., I. Fernández- Tejedo and S. L... O'Hara. Drought and disputes, deluge and dearth: climatic variability and human response in colonial Oaxaca, Mexico. *Journal of Historical Geography* 30, 2004, pp. 249-276.
22. Esquivel G., G. Prospectiva de la demanda de agua en México. Tesis de Maestría. Posgrado de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 200, pp. 79.
23. Guha-Sapir D, Vos F, Below R, with Ponsérre S. Annual Disaster Statistical Review 2010: The Numbers and Trends. Brussels: CRED; 2011. [http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR\\_2010.pdf](http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf)
24. Hastenrath, Stefan, Dierk Polzin, Charles Mutai: Diagnosing the 2005 drought in equatorial east Africa. *J. Climate*, 20,2007, pp. 4628-4637.
25. Held I.M., Delworth T.L., Lu J ,Findell K.L., and Knutson T.R. .Simulación de la sequía de Sahel en el vigésimo y siglo XXI - llevado a cabo y otros. 102 (50): 17891 - Procedimientos de la National Academy of Sciences. October 17, 2005.
26. IMTA. 2001. Página del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://www.imta.gob.mx/>
27. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. , INE-SEMARNAT. Cuarta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, México lo gris ponerlo en las referencias completas abajo, 2009.
28. IPCC. Climate change 2007: synthesis report summary for policymakers. Assessment of Working groups I, II and III to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
29. Jiménez, B., Torregrosa, M.L, Aboitez A, L.. El Agua en México: Cauces y Encauces. CONAGUA-Academia Mexicana de Ciencias, 2010, pp. 702.
30. Luja, V. H., R. Rodríguez-Estrella. 2010. Are tropical cyclones sources of natural selection? Observations on the abundance and behavior of frogs affected by extreme climatic events in the Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of Arid Environments* 74, 2010, pp.1345-1347.
31. Magaña, V. y C. Neri. Eventos Hidrometeorológicos Extremos en el Valle de México. Publicado en Revista Ciudades. Num. 74, 2007, pp. 26-30.

32. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in Europe — An overview of the last decade. European Environment Agency. 2010. 25-32.
33. Murcia H. Fermano y Macía José Luis. Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México.
34. Ollero Alfredo. Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology* Volume 117, Issues 3-4, 1 May 2010, Pages 247-260
35. ONU. Agua para todos, agua para la vida: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. ONU. NY: UNESCO, Berghahn Books, 2003.
36. Ortiz Gómez, R., Zúñiga Alvarado C., Barragán Barrios C., Wagner Gómez, A.I. (2010). Análisis de la red de estaciones climatológicas de la República Mexicana. Memorias del Congreso Nacional de Hidráulica, AMH, Guadalajara, Jal., octubre del 2010.
37. Ovalles, F., A. Cortez, M. Rodríguez, J. Rey y E. Cabrera-Bisbal. Variación geográfica del impacto del cambio climático en el sector agrícola en Venezuela. *Agronomía Tropical* 58(1), 2008, pp. 37-40.
38. Paredes, Franklin y Guevara, Edilberto. Desarrollo y evaluación de un modelo para predecir sequías meteorológicas en los Llanos de Venezuela. *Bioagro*, abr. 2010, vol.22, no.1, p.03-10. ISSN 1316-3361
39. Pérez, J. B. Pronóstico Numérico del tiempo para el Valle de México. Tesis de Maestría. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM, 2004. 70 pp.
40. Servicio Meteorológico Nacional de Honduras, 2012. <http://www.smn.gob.hn/web/glosario>
41. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., & Chen, Z. Technical summary. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: University Press, 2007
42. Soto Montes de Oca, Gloria, Herrera Pantoja Marina. Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Agosto 2009. [http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua\\_Soto\\_abast\\_cc\\_RepFinal.pdf](http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua_Soto_abast_cc_RepFinal.pdf)
43. Tong J. · Zhang Qiang · Zhu Deming ,Wu Yijin . Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470-2003). *Quaternary International*.144 (1). February 2006, 29-37.

## Capítulo 2. Eventos Hidrometeorológicos extremos

### 2.1. Introducción

En los últimos años los fenómenos naturales han demostrado al ser humano que conllevan grandes desastres tanto a nivel poblacional como económico; la naturaleza afecta de forma fuerte e imprevisible a los países, es por ello que es urgente tomar medidas de prevención y mitigación a nivel mundial. La mayor parte de los eventos extremos se ha intensificado con el calentamiento global y han surgido nuevas zonas de riesgos meteorológicas.

Durante 2007, 234 millones de personas de 117 países fueron afectados, 73,946 murieron y los daños se calcularon en 81.86 mil millones de US\$ (MMD) por eventos naturales extremos. En 2008, 36 millones de personas fueron evacuadas de sus hogares por desastres ambientales y los eventos hidrometeorológicos extremos se han casi duplicado a partir de 2005, si se comparan con el quinquenio anterior (Arreguín et al., 2011).

En 2010, los eventos climáticos extremos aumentaron en todos los continentes, destacando por su gravedad: Pakistán, Bangladesh, Indonesia, Fiji, Australia, Andhra Pradesh (India), China, Brasil, Venezuela, Perú, México y Polonia (EMDAT, 2011)

### 2.2. Eventos Extremos

Un evento extremo puede definirse como un evento de magnitud tal que el grupo social afectado no está preparado para evitar que produzca graves daños, la definición se relaciona con la magnitud del fenómeno natural y con las condiciones específicas de la zona expuesta. Los riesgos hidrometeorológicos dependen de la intensidad y frecuencia de la amenaza y de la medida en que llega a afectar la zona. En meteorología se trata de fenómenos con mayor o menos predictibilidad. (Magaña- Neri, 2007).

Una definición, descrita por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático, IIPC 2008 por sus siglas en inglés, define un evento extremo como "aquél evento que es raro en un lugar y en un instante en un año". Por lo cual, la interpretación de esta definición nos habla de valores máximos dentro de un conjunto de datos; el efecto del calentamiento global es que los eventos extremos están variando, es decir, los eventos extremos crecen en magnitud y en frecuencia. Asimismo, los estudios de costos y aseguramiento en los Estados Unidos en las últimas temporadas indican que los eventos que ocurren en una rápida sucesión, generan mayores daños que la suma simple e individual de los daños de eventos aislados.

Los eventos hidrometeorológicos extremos dañan los bienes y la integridad física de la población. En México, el fenómeno de El Niño nos muestra la variabilidad climática al



relacionar la ocurrencia de sequías severas en verano en el norte del país; o con lluvias intensas de invierno en el noroeste. Cerca de 8 millones de personas están expuestas a los efectos adversos de huracanes, aproximadamente 6 millones a lluvias intensas y más de 8 millones pueden sufrir daños por sequías; cerca del 80% de esta población vive bajo condiciones de alta y muy alta marginación. (Landa, 2011). Los eventos hidrometeorológicos relacionados con los cambios en la atmósfera y con el ciclo del agua, tales como las lluvias, los huracanes y las sequías meteorológicas, son procesos naturales del sistema climático; al presentarse de manera severa se vuelven amenazas que llegan a generar desastres. En la Tabla 2.2.1 se muestra la distribución de eventos en México.

Tabla 2.2.1. Eventos en regiones y entidades federativas del país.

EVENTO / ZONA	NORTE	CENTRO	COSTA DEL PACIFICO	SURESTE
Inundaciones	Aguascalientes Baja california Durango, Sinaloa	Distrito Federal	Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca	Chiapas Tabasco Veracruz
Sequía Meteorológica	Aguascalientes, Baja california, Chihuahua, Coahuila, Durango, Nuevo leon, Sinaloa, Tamaulipas	Estado de México , Guanajuato Hidalgo, Morelos Puebla, Querétaro Tlaxcala, Zacatecas	Colima, Jalisco,  Michoacán Oaxaca	Campeche  Veracruz Yucatán
Olas de calor	Aguascalientes Chihuahua Sonora	Distrito federal		
Olas de frío	Chihuahua, Durango Coahuila, Sonora, Nuevo león			
Eventos extremos de precipitación	Baja california sur  Nuevo Leon	Estado de México  San Luis Potosí Puebla	Guerrero	Quintana Roo, Chiapas Tabasco Veracruz
Huracanes	Baja california sur  tamaulipas		Guerrero, Colima, Jalisco  Michoacan, Nayarit, Oaxaca.	Campeche, Chiapas  Tabasco, Veracruz, Yucatán, Quintana Roo
Incendios forestales			Guerrero Jalisco Oaxaca	Chiapas

Fuente INE 2008.

### 2.2.1 Huracanes

En la última década se han registrado una gran cantidad de eventos hidrometeorológicos extremos, los cuales ocurren a diferente nivel geográfico y en escalas de tiempo variables.

Huracán es un término que se asigna a lo que genéricamente se denomina ciclón tropical, pero cuando éste ya presenta vientos mayores a 120 Km/h. (Rosengaus, 2000).

Un huracán es un conjunto de centros de depresión atmosférica que operan como centros de atracción de masas de aire caliente y húmedo con trayectorias parabólicas, provocando fuertes lluvias y vientos; en México se generan en el Caribe, Golfo de México y Océano Pacífico, con movimientos generalmente de sureste a noreste. (Ovsei, 1996).

Los ciclones tropicales son depresiones meteorológicas, o sistemas de baja presión, sobre aguas abiertas en el trópico, usualmente entre las latitudes 30° al norte y 30° al sur. (NRC, 1994; Alexander, 1993). Se originan en lugares donde una atmósfera inestable causa diferencias en la cantidad de energía recibida por los polos terrestres. Un disturbio giratorio se forma alrededor de un centro de atmósfera en calma, un ojo usualmente de 30 a 50 kilómetros de diámetro, con aire circulante que gira en la dirección contraria de las manecillas del reloj en el hemisferio norte y a la inversa en el sur. Con la energía obtenida a través de la evaporación oceánica, los ciclones pueden moverse a velocidades entre 10 y 50 km/h en la zona de los vientos alisios. (Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator, 1991; Noji, 2000).

Por definición, un ciclón tropical es un término asignado a circulaciones ciclónicas originadas sobre aguas tropicales (OAS, 1991).

Huracán es el nombre de un ciclón tropical con vientos sostenidos de 65 nudos (117 km/h) o más que se desarrolla en el Atlántico Norte, Mar Caribe, Golfo de México y al este del Pacífico Norte. Este mismo ciclón tropical es conocido como tifón en el Pacífico Occidental y como ciclón en el Océano Índico. (SMNH, 2012).

Un ciclón tropical es un remolino gigantesco que cubre cientos de miles de kilómetros cuadrados y tiene lugar, primordialmente sobre los espacios oceánicos tropicales. Cuando las condiciones oceánicas y atmosféricas propician que se genere un ciclón tropical, su evolución y desarrollo puede llegar a convertirlo en huracán. Los ciclones tropicales en los océanos presentan áreas de formación y éstas se ven favorecidas cuando la temperatura de la capa superficial de agua supera los 26.5°C, aunada a la presencia de una zona de baja presión atmosférica, hacia la cual convergen vientos de todas direcciones. (Acevedo et al., 2005).

Huracán es un ciclón tropical en el cual los vientos máximos sostenidos alcanzan o superan los 119 Km/h. El área nubosa cubre una extensión entre los 500 y 900 Km de diámetro, produciendo lluvias intensas. El ojo del huracán alcanza normalmente un diámetro de 24 a 40 Km, pero puede llegar hasta cerca de 100 Km. (Acevedo et al., 2005).

Los huracanes o ciclones tropicales son las tormentas más devastadoras que ocurren en los trópicos. Tanto la violencia de los vientos que arrasa construcciones y derriba árboles y postes,

como la subsecuente inundación que ocasiona la marejada, redundan en enormes pérdidas - humanas y materiales- en la economía de los países expuestos a este fenómeno.

Un huracán es un viento muy fuerte que se origina en el mar, gira en forma de remolino acarreando humedad, posee características únicas de circulación de latitudes medias, se intensifican cuando están situados sobre océanos tropicales o subtropicales en ambos hemisferios. (Salinas, 2006).

Un ciclón tropical es un remolino gigantesco que cubre cientos de miles de kilómetros cuadrados y tiene lugar, primordialmente, sobre los espacios oceánicos tropicales. Cuando las condiciones oceánicas y atmosféricas propician que se genere un ciclón tropical, su evolución y desarrollo puede llegar a convertirlo en huracán. (Acevedo et al., 2005).

Los huracanes han causado miles de pérdidas humanas y severos daños materiales valuados en millones de dólares: Bangladesh, Honduras, Nicaragua, México y Estados Unidos han sido víctima de estos eventos. Pero los huracanes también tienen un punto de vista positivo, pues el agua de lluvia se podría distribuir a las zonas áridas a través de lluvias excedentes recargando así los acuíferos. (CENAPRED, 2007).

Según la región donde se presentan estos fenómenos se le conocen con distintos nombres: En el océano Atlántico, Golfo de México, Mar Caribe, Océano Pacífico, Pacífico sur, este de Australia y Samoa se les conoce como huracanes. En el Mar de Arabia, Bahía de Bengala, Océano Índico y Madagascar son ciclones. En China y costa de Japón se les da el nombre de tifones. (CENAPRED, 2007).

## 2.2.2 Precipitaciones

Las precipitaciones pluviales intensas, que pueden estar asociadas a los ciclones tropicales, aunadas a factores como la topografía, el uso del suelo y el estado de la cubierta vegetal, pueden generar intensas corrientes de agua en ríos, flujos con sedimentos en las laderas de las montañas, movimientos de masa que transportan lodo, rocas, árboles, y otros objetos que pueden destruir casas, dañar puentes o tramos de carreteras (CENAPRED, 2001).

Los factores determinantes para una precipitación pluvial son la humedad atmosférica y la temperatura de condensación. (Breña, 2006).

Una precipitación es un hidrometeoro constituido por un conjunto de partículas acuosas, líquidas o sólidas, cristalizadas o amorfas, que caen de una nube o de un conjunto de nubes y que alcanzan el suelo. (SMNH, 2012).

Se define como precipitación a toda forma de humedad, que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre. De acuerdo a esta definición, las lluvias, las granizadas y las nevadas son formas distintas del mismo fenómeno de la precipitación. (Wendor, 1989).

Precipitación. Partículas de agua líquida o sólida que caen desde la atmósfera hacia la superficie terrestre. (CONAGUA-SMN, 2010-2011).

En México existen grandes variaciones de la disponibilidad de agua a lo largo del año. Algunas regiones del país tienen precipitación abundante y baja densidad de población, mientras que en otras ocurre exactamente lo contrario.

Anualmente, México recibe del orden de 1.51 billones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos (IMTA, 2009).

Existen también las avenidas súbitas que ocurren cuando se origina una precipitación intensa en una cuenca con respuesta hidrológica muy rápida. Pueden presentarse en zonas montañosas con fuerte pendiente, en abanicos aluviales, en ciudades, al romperse una presa, dique o bordo, incluso en cavernas donde circule algún arroyo subterráneo. Las avenidas son peligrosas por los cambios rápidos en los niveles de escurrimiento; en minutos el agua puede elevarse drásticamente desde niveles virtualmente nulos hasta 10 metros. (CENAPRED, 2010).

Las avenidas súbitas se presentan generalmente en cuencas ubicadas en zonas con montaña de fuerte pendiente, donde existen pequeños valles, barrancas, y abanicos aluviales al pie de éstas. También pueden presentarse debido al rompimiento de un bordo, presa o represa, o en ciudades cuyo suelo, o piso, presenta un alto coeficiente de escurrimiento, es decir, son muy impermeables. Su característica y peligrosidad más importante es que ocurren de manera imprevista, lo que dificulta alertar con antelación. Como consecuencia de ello, este fenómeno puede cobrar una mayor cantidad de vidas humanas, en comparación con una inundación lenta. (CENAPRED, 2006)

### 2.2.3 Inundaciones

Las inundaciones pueden ocurrir por lluvias en la región, por desbordamiento de ríos, ascenso del nivel medio del mar, por la rotura de bordos, diques y presas, o bien, por las descargas de agua de los embalses. Entre los factores importantes que condicionan las inundaciones están: la distribución espacial de la lluvia, la topografía, las características físicas de los arroyos y ríos, las formas y longitudes de los cauces, el tipo de suelo, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal, el uso del suelo, ubicación de presas y las elevaciones de los bordos de los ríos. (CENAPRED, 2001).

Inundación es un flujo o encubrimiento de agua que se origina por lluvias, desbordamientos de ríos, ruptura de presas y otros eventos que resultan en grandes cantidades de agua, agravados por la deficiencia de la capacidad del drenaje, acumulación de basura en la red de atarjeas y condiciones topográficas del lugar. (Ovsei, 1996).

Las inundaciones ocurren conforme los fuertes vientos y mareas empujan, con fuerza destructiva, las ondas marinas creadas por un ciclón hacia las líneas costeras. Las marejadas son diferentes a los tsunamis, los cuales son ondas marinas sísmicas producidas por terremotos en el piso del océano. Los ciclones también impulsan tierra adentro de las aguas de los pantanos. (NRC, 1994).

Inundación es la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada. (Aparicio, 2003).

Inundaciones por precipitaciones in situ: se producen por la acumulación de agua de lluvia en un determinado lugar o área geográfica sin que ese fenómeno coincida necesariamente con el desbordamiento de un cauce fluvial. Este tipo de inundación se genera por la concentración de un elevado volumen de lluvia en un intervalo de tiempo muy breve o por la incidencia de una precipitación moderada y persistente durante un amplio periodo de tiempo. (Aparicio, 2003).

Inundaciones por desbordamientos de los ríos: se deben en primera instancia a un excedente de agua. El aumento brusco del volumen de agua que un lecho o cauce es capaz de transportar sin desbordarse produce lo que se denomina como avenida o riada. Una avenida es el paso por tramos de un río, de caudales superiores a los normales, que dan lugar a elevaciones de los niveles de agua. (Aparicio, 2003).

De todos los riesgos naturales, las inundaciones ocurren con más frecuencia y son las más extendidas en espacio y severidad (Alexander, 1993; WMO, 1990).

Otros factores que potencian o intensifican las inundaciones son: la pendiente de la cuenca hidrográfica y de las corrientes fluviales, el aumento de nivel freático, el tamaño y forma de la cuenca, el tipo de suelo, su geometría y la cubierta vegetal del terreno. (Herrero et al., 2008).

#### 2.2.4 Sequías

La sequía se define como un conjunto de condiciones ambientales atmosféricas de muy poca humedad que se extienden durante un periodo suficientemente prolongado como para que la falta de lluvias cause un grave desequilibrio hidrológico y ecológico. El agua deja de fluir en ríos que normalmente no se secan y los lagos y lagunas se convierten en valles áridos (IMTA, 2009).

La sequía en una zona corresponde a un período prolongado de tiempo seco, es decir con poca lluvia (CENAPRED, 2001).

Sequía es la carencia de agua en el suelo, que se origina por el agotamiento. Cuando es grande y prolongada, perjudica el bienestar y las actividades humanas. (Ovsei, 1996).

Palmer define sequía meteorológica como el intervalo de tiempo, generalmente con una duración del orden de meses o años, durante el cual el aporte de humedad en un determinado lugar cae consistentemente por debajo de lo climatológicamente esperado o del aporte de humedad climatológicamente apropiado, Russell et al. son más concisos: falta prolongada de precipitación, inferior a la media. (Palmer, 1965; Russell et al., 1970).

La sequía es una condición climática anormalmente seca en un área específica que se prolonga debido a la falta de agua y causa un serio desbalance hidrológico. (SMNH, 2012).

Una sequía se define como un déficit significativo en la disponibilidad de agua debido a lluvias menores que lo normal. (Bravo y Salinas, 2006).

Se puede hablar de sequía meteorológica, como una situación caracterizada por la ausencia prolongada de lluvias en periodos que normalmente serían lluviosos (Núñez et al., 2007). Dicha sequía puede convertirse en sequía hidrológica cuando se abaten los escurrimientos superficiales, los embalses y los acuíferos (Marcos, 2001).

La sequía meteorológica suele definirse a partir de un umbral de déficit de precipitación que se alcanza durante un periodo de tiempo previamente determinado.

La sequía agrícola se define habitualmente en términos de disponibilidad de agua en los suelos para el sostenimiento de los cultivos y para el crecimiento de las especies forrajeras y, menos habitualmente, como una desviación de los regímenes de precipitación normales durante cierto periodo de tiempo.

La sequía hidrológica es un concepto todavía más independiente del déficit de precipitación ya que suele definirse como la desviación de las pautas de aflujo de agua en la superficie y en el subsuelo, tomando como referencia valores promediados en distintas fechas cronológicas.

La sequía socioeconómica refleja la relación entre la oferta y la demanda de mercancías básicas, como lo son el agua, los piensos o la energía hidroeléctrica, que dependen de las precipitaciones. (OMM, 2006).

México tiene gran parte de su territorio en la franja de alta presión de latitud norte, por lo que tiene zonas áridas y semiáridas; ellas coinciden en latitud con las regiones de los grandes desiertos africanos, asiáticos y australianos. (CENAPRED, 2008).

En 2002 se empezó con un proyecto para el monitoreo de eventos climáticos extremos sobre el territorio de Canadá, México y Estados Unidos llamado El Monitor de Sequía de América del Norte (North American Drought Monitor, NA-DM). (CONAGUA,2003)

Las sequías presentan 3 rasgos distintivos: intensidad, duración y extensión. La magnitud de los efectos de una sequía está estrechamente relacionada con el momento en que comienza la escasez de precipitación y con la intensidad y duración del fenómeno. (OMM, 2006).

La sequía es un fenómeno que causa estragos en las actividades económicas, en especial las referidas a las del sector primario como es la agricultura y la ganadería. En este tipo de fenómeno las consecuencias pueden ser prolongadas desde meses hasta años por sus efectos en las condiciones de la tierra que no permite el desarrollo de la producción agrícola ni ganadera. (Bitran et al., 2003)

## 2.3 Referencias

1. Acevedo Federico, Antonio Luna Diaz-Peon. Principales fenómenos meteorológicos que afectaron el estado de Veracruz en el año 2005
2. Alexander D. Natural disasters. New York: Chapman & Hall, Inc.; 1993
3. Aparicio Florido José Antonio. LLUVIAS E INUNDACIONES Máster en Protección Civil y Emergencias - Universidad Politécnica de Valencia @ Octubre, 2003 libro en línea <http://www.iaem.es>
4. Arreguín, Felipe; Lopez Pérez, Mario; Marengo Mogollón, Humberto, 2011: in: Oswald Spring, Úrsula (Ed.): Water Resources in Mexico. Scarcity, Degradation, Stress, Conflicts, Management, and Policy. Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace, vol. 7 (Berlin - Heidelberg - New York: SpringerVerlag): in press.
5. Bitran B, L. Domínguez M., R. Durán H., Ó. Fuentes M., N. García A., M. Jiménez E., Ó. López B., L.G. Matías R., C. Reyes S., M. A. Salas. S., Ó. Zepeda R. Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2002. Centro Nacional de Prevención de Desastres1ª edición, noviembre 2003.
6. Bravo, A. y H. Salinas (2006) "Introducción, conceptos y definiciones de sequía" en Bravo, A., H. Salinas y A. Sotomayor (comp.) Sequía: vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el norte de México. Zacatecas, INIFAP-SAGARPA.
7. Breña Puyol, A.G. Precipitación y Recursos Hidráulicos en México. UAM, 2006, 5 -20.
8. CENAPRED. Diagnóstico de Peligros e identificación de Riesgos de Desastres en México, Capítulo 3 Riesgos hidrometeorológicos CENAPRED, 2001, 105-148
9. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación. Ciclones Tropicales. Serie Fascículos, México. 2007. [http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc\\_Ciclones\\_2007.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc_Ciclones_2007.pdf).
10. CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2007. CONAGUA-SEMARNAT, Diciembre, 28-30.
11. CONAGUA. Análisis Climático Noviembre 2010 - Marzo 2011 Otoño - Invierno Servicio Meteorológico Nacional Gerencia de Meteorología y Climatología Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo. CONAGUA-SMN, 2010-2011)
12. EMDAT, 2011 (14 de abril, 2011): en: <<http://www.emdat.be/database>>.
13. IMTA. 2009. Página del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://www.imta.gob.mx/>
14. INE. Instituto Nacional de Ecología. 2008 [http://www.ine.gob.mx/oclimático/edo\\_sector/estados/estados.html](http://www.ine.gob.mx/oclimático/edo_sector/estados/estados.html)
15. IPCC .Panel intergubernamental del Cambio Climático. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-annex-sp.pdf>
16. Jáuregui, E. Los huracanes prefieren a México. Información científica y Tecnológica 11. 1989. (155): 32-39.
17. Landa Rosalba. Amenazas del clima: Ciudades Vulnerables. México social. CEIDAS, 2011.
18. Magaña, V. y C. Neri. Eventos Hidrometeorológicos Extremos en el Valle de México. Publicado en Revista Ciudades. Núm. 74, 2007, pp. 26-30.



19. Marcos, O. (2001) "Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación" en *Investigaciones Geográficas*. (26), pp 59-80
20. Ovsei Gelman Muravchik, *Desastres y protección civil. Fundamentos de investigación interdisciplinaria*. UNAM. México 1996. Pag 41-44
21. National Research Council. *The U.S. national report. Facing the challenge*. Washington, D.C.: National Academy Press; 1994.
22. Noji Eric K. *Impacto de los desastres en la salud publica*. Organización panamericana de la salud. Bogota Colombia 2000. 461 pp.
23. Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator. *Mitigating natural disasters: phenomena, effects and options*. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator; 1991
24. Organización Meteorológica Mundial (OMM). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: Conceptos progresos y desafíos futuros*. Ginebra OMM 2006, 28pp Sección a
25. Organization of American States. *Primer on natural hazard management in integrated regional development planning*. Washington, D.C.: Organization of American States; 1991.
26. Ortiz Gómez, R., Zúñiga Alvarado C., Barragán Barrios C., Wagner Gómez, A.I. (2010). *Análisis de la red de estaciones climatológicas de la República Mexicana*. Memorias del Congreso Nacional de Hidráulica, AMH, Guadalajara, Jal., octubre del 2010
27. Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought*. Research Paper N. 45, US. Department of commerce Weather Bureau, Washington DC, 58pp.
28. Russell, C.S, Arey, D.G y Kates, R.W. (1970). *Drought and water supply*. Johns Hopkins University Press. Baltimore (EEUU) 232 pp.
29. Salinas Zuñiga, Moises *La vulnerabilidad social de los grupos afectados por el ciclón Isidoro en dos comunidades de Yucatán ¿reubicación o proceso de exclusión?* Tesis UNAM.
30. Servicio Meteorológico Nacional de Honduras, 2012. <http://www.smn.gob.hn/web/glosario>
31. World Meteorological Organization. *The role of the World Meteorological Organization in the International Decade for Natural Disaster Reduction*. Report No.WMO-745. Geneva: World Meteorological Organization; 1990.

## Capítulo 3 Disponibilidad de datos en México

### 3.1 Introducción

En México existen diversas fuentes de información oficial y alterna de datos estadísticos del agua, mapas, coberturas digitales y base de datos. Los organismos públicos oficiales que proporcionan estadísticas e informes a nivel internacional son:

La Organización de las Naciones Unidas para la Educación (UNESCO); El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUND); la comisión Económica para América Latina; a nivel federal se encuentra el Servicio Meteorológico Nacional; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); Comisión Nacional del Agua (CONAGUA); Instituto Nacional de Ecología (INE); la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT); Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); a nivel regional están: Regiones Hidrológicas-Administrativas, Organismos de cuenca, CONAGUA y a nivel estatal, CONAGUA, INEGI y Gobierno Estatal. (Perevochtchikova, 2008).

La CONAGUA contiene gráficas, tablas y textos que reflejan la disponibilidad del agua en el país, el abastecimiento de agua potable, alcantarillado, tratamiento del agua municipal e industrial. El INEGI maneja estadísticas ambientales y sintetiza la información geográfica por estado. (Perevochtchikova, 2008).

EL INEGI y la CONAGUA están encargados de la elaboración de mapas oficiales; los del INEGI en escala de 1:1000000 contienen información para aguas superficiales y agua subterránea. Se dispone del cubrimiento nacional en un total de 11 cartas topográficas en formato individual, que corresponde al mismo número de archivos imagen digital (raster). La información de la carta ha sido derivada del cubrimiento topográfico a la escala de 1:250 000, su actualización se realizó a partir de información de campo de 1996. En el caso de las aguas superficiales existen los datos de cuencas, coeficientes de escurrimiento, estaciones meteorológicas, estaciones hidrométricas, red fluvial, presas, zonas inundables, suelo salino, zonas de riego, y relieves. (INEGI, 2011).

Para agua subterránea están disponibles los acuíferos, permeabilidad del suelo, dirección del agua subterránea, zonas de veda, zonas de intrusión salina, aguas termales y relieve. También existen mapas escala 1:250000 en formato impreso y digital que contienen lo mismo que los de escala 1:1000000 anexando datos de sub-cuencas, suelo alcalino e isolíneas de temperatura y precipitación para el caso de agua superficial y puntos de monitoreo de la calidad del agua en el caso de las subterráneas. (Perevochtchikova, 2008).

Otros datos disponibles son las coberturas digitales; Subgerencia de información Geográfica del agua (SIGA-CONAGUA) muestra las cuencas, sub-cuencas, RHA, red fluvial, el INEGI contiene la hidrología subterránea y superficial y el INE las cuencas hidrográficas.

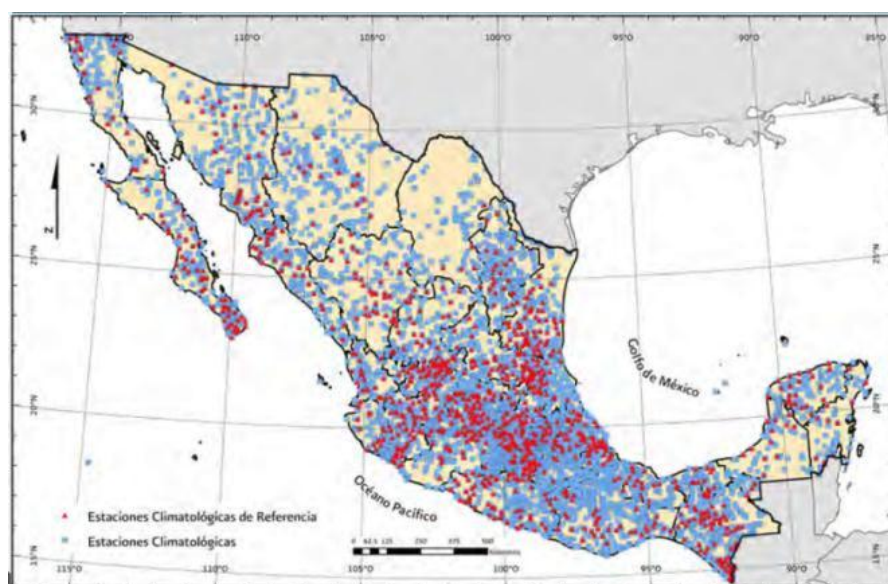
A nivel oficial se tiene acceso a bases de datos como el CLICOM (2000), ERIC I, II y III, BANDAS (1999), INEGI (1983). (Perevochtchikova, 2008).

A nivel de la cuenca de México se tienen registradas 193 estaciones climatológicas y en partículas para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMCM), 99 estaciones. El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) tiene 78 estaciones con la finalidad de atender la problemática de las inundaciones en la ZMCM; La Red de Meteorología y Radiación Solar (REDMET) del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) tiene 15 estaciones. (Perevochtchikova, 2008).

El sistema de observación hidrológica (SOH), ofrece datos de observación hidrométrica, volúmenes, caudales, niveles, calidad, sedimentación etc., los cuales son útiles para el cálculo de la disponibilidad del agua, pronosticar hidrológicos, proyectos hidroeléctricos, infraestructura para llevar agua potable. La desventaja de el SOH es la falta de continuidad de los datos en las series del tiempo, ausencia de informes hidrológicos integrales de las estadísticas generadas a nivel local, considerando la información de todos los organismos que realizan la observación, falta de cartografía oficial ecualizada. (Perevochtchikova, 2008).

### 3.2 Datos hidrométricos y climatológicos disponibles

La CONAGUA cuenta con 4,008 estaciones en operación para medir las variables climatológicas mostradas en la figura 3.2.1 y las hidrométricas mostrados en la figura 3.2.2. De ellas 1,064 se consideran como estaciones de referencia de las cuales se obtiene la información para calcular la precipitación media de 30 años. Las estaciones climatológicas miden la temperatura, precipitación pluvial, evaporación, velocidad y dirección del viento. (CONAGUA, 2010).



**Figura 3.2.1.** Red de estaciones climatológicas 2009. Fuente CONAGUA.

El SMN cuenta con un registro de cerca de 4500 estaciones climatológicas, 94 estaciones automáticas, 12 radares y 80 estaciones tipo observatorio.

La Gerencia de aguas superficiales e ingeniería de Riso (GASIR) dependiente también de la CONAGUA cuenta con 84 estaciones hidroclimatológicas automáticas (EHCA), 248 hidroclimatológicas, 3700 climatológicas y 600 hidrométricas a cuya información el SMN tiene acceso y parcialmente incorpora su base de datos climatológicos.

Las estaciones hidrométricas miden el caudal de agua de los ríos, así como la extracción por obra de toma de las presas. Las estaciones hidroclimatológicas miden algunos parámetros climatológicos e hidrométricos.

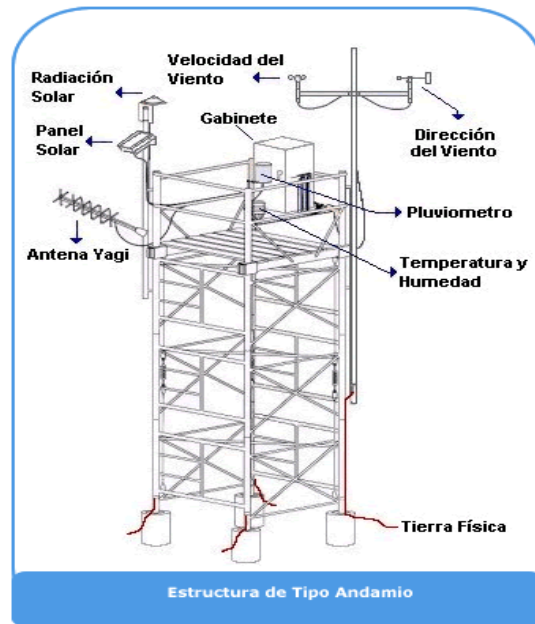


**Figura 3.2.2.** Estaciones hidrométricas 2010, Fuente CONAGUA.

Una estación meteorológica automática mostrada en la figura 3.2.3 está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten la información, recopilan y monitorean algunas variables meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, la información es enviada vía satelital en intervalos de 1 a 3 hrs por estación.

La estación cuenta con sensores de:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura y humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación



**Figura 3.2.3 Estructura de estación (Tipo andamio).**

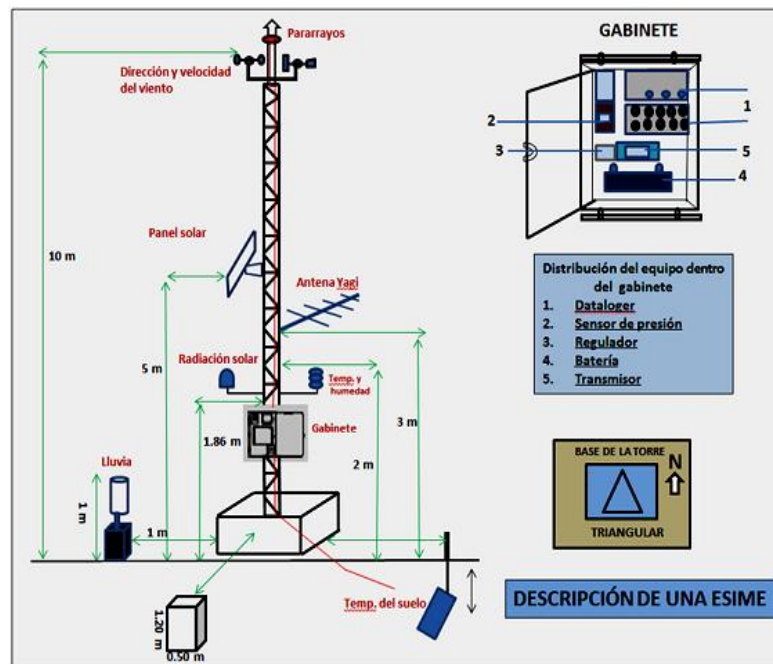
Una Estación Sinóptica Meteorológica como la de la figura 3.2.4 consiste en varios dispositivos eléctricos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática; están ubicadas exclusivamente en los observatorios meteorológicos. Generan una base de datos y generan un mensaje sinóptico cada tres horas.

Los mensajes sinópticos son reportes que se generan simultáneamente en todos los observatorios cada tres horas y presentan información meteorológica de tiempo presente y pasado de manera codificada los mensajes sinópticos se rigen por el Tiempo Universal Coordinado (UTC).

Actualmente, la Red Nacional de Estaciones Sinópticas Meteorológicas cuenta con 30 sitios.

Los sensores de las ESIME's son:

- Temperatura y Humedad Relativa
- Presión Atmosférica
- Dirección del Viento y Velocidad del Viento
- Radiación Solar
- Precipitación
- Visibilidad
- Temperatura a 10 cm de la superficie



**Figura 3.2.4.** Estación sinóptica Meteorológica.

### 3.2.1 Datos de la Comisión Nacional de Agua.

La CONAGUA, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha venido actualizando el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y la cantidad de agua que pasa a una determinada hora (aforos) en los principales ríos de la República Mexicana; cuenta con los datos de 2,070 estaciones hidrométricas, las cuales son el resultado de una depuración al catálogo BANDAS hecho en 2008 por la CONAGUA y el IMTA. Aproximadamente 480 estaciones fueron actualizadas hasta el año 2006 y tiene registradas aproximadamente 180 presas.

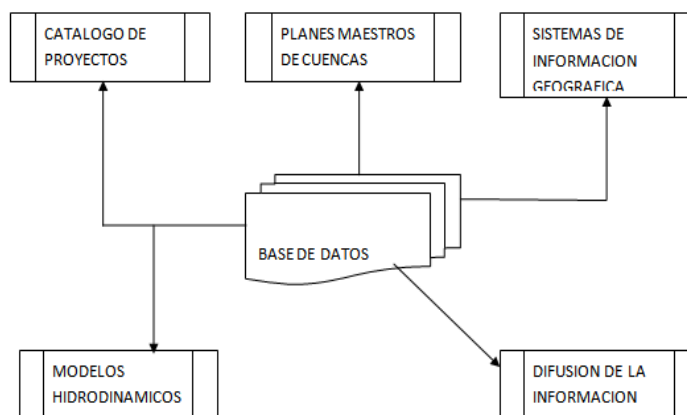
La información que se puede encontrar de cada estación hidrométrica es:

- Valores diarios: Gasto medio diario ( $m^3/s$ ) día 1 a día 29-31.
- Valores mensuales: Se incluyen la hora y el día del gasto máximo y el gasto mínimo ( $m^3/s$ ). Además de la lectura de volumen máximo y medio de escurrimientos (miles de  $m^3$ ), sedimentos (miles de  $m^3$ ) y la lectura del día y hora de las escalas para el gasto mínimo, medio y máximo.
- Valores anuales: Menciona el mes, día y hora en que ocurre el gasto máximo y gasto mínimo ( $m^3/s$ ). La lectura de escala para el gasto máximo y mínimo (m), además del volumen anual de escurrimientos (miles de  $m^3$ ), gasto medio anual ( $m^3/s$ ) y volumen anual de sedimentos (miles de  $m^3$ ).

- Hidrograma: Incluye la fecha en que ocurre el gasto, Hora en que ocurre el gasto y Gasto instantáneo ( $m^3/s$ ).
- Limnigrama: Muestra la fecha de lectura, hora de lectura y lectura de escala (m).
- Sedimentos: Se incluye la fecha de lectura, hora de lectura y porcentaje de sedimento.

La CONAGUA cuenta con un inventario digital que fue planeado para servir de herramienta dinámica y flexible que puede crecer conforme se disponga de información más completa, para esto se tuvo que definir la estructura de la unidad básica del inventario, se le denominó ficha de captura, la cual sintetiza información y se puede modificar. Con la ayuda de esta unidad básica se construye una base de datos donde queda almacenada la información capturada textual y gráfica, esta información podrá usarse después para explotar la información en Sistemas de Información Geográfica (SIG'S) como en modelos hidrodinámicos.

La base de datos está en lenguaje SQL para poder aplicarlos en las actividades y plataformas informáticas de la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la CONAGUA. La aplicación de la base de datos se muestra en el siguiente esquema (Figura 3.2.1.):



**Figura 3.2.1. Aprovechamiento y aplicación de la base de datos**

El Sistema de Información Geográfica fue diseñado como un sistema computacional para el desarrollo de análisis gráficos, los SIGS están compuestos por 4 subsistemas: uno de ingreso para convertir mapas y datos espaciales en formatos digitales, un subsistema de almacenamiento y recuperación, de análisis y uno de resultados para la elaboración de mapas, tablas y respuestas a preguntas geográficas.

Con el SIG se logran construir mapas dinámicos e inteligentes que permiten visualizar patrones, tendencias y singularidades en los datos. El SIG para la ficha de inventario nacional de obras de protección contra inundaciones en cauces naturales en Arcview se genera integrando un conjunto de datos geográficos dentro de un proyecto. Cada conjunto constituye un tema y se le asigna una tabla de atributos que en realidad es una base de datos con

características específicas almacenadas. Con estos temas es posible generar una vista que ilustra el mapa con la información deseada.

Para el inventario se construyeron dos SIG, uno desarrollado en la plataforma que usa la CONAGUA "Arcview" en el SIGA y otro que emplea el manejador de información de mapas satelitales Google Earth.

### 3.2.1.1 Software y bases de datos disponibles

A finales de los 90's las bases de datos relacionadas con el clima estaban disponibles en discos compactos; tal es el caso del extractor rápido de información climatológica (ERIC I y ERIC II), por su facilidad de distribución fueron de gran utilidad hasta el año 2002 por su falta de actualización por las instituciones emisoras lo que limitó la información.

Actualmente, existe ERIC III un programa que cuenta con la información del banco de datos histórico nacional del SMN de la Comisión Nacional del Agua. Algunas estaciones contienen información desde 1900; el 88.4 % de los datos corresponden al período de 1960 a 2007. Para algunas pocas estaciones se tiene información hasta el 2008.

La Comisión Nacional del Agua ha estado actualizando la información hidrométrica nacional que generan los Organismos de cuenca y las direcciones locales con el apoyo del IMTA.

El contenido del Banco Nacional de Datos de Aguas superficiales (BANDAS) actualizado hasta el 2006 está a disposición del público en general, en la página de la CONAGUA; los archivos se encuentran con extensión DBF tal como se generan con el SIAS (sistema de información de aguas superficiales) y otros con extensión MDB tal como los maneja el SIAS v2. Los primeros son visibles en Visual Fox Pro y los segundos en Microsoft Access.

La información histórica para hidrometría consiste en datos diarios, mensuales, anuales, limnigramas, hidrogramas y sedimentos.

La información de régimen de funcionamiento contiene los gastos medios diarios, datos horarios, gastos, volúmenes, lecturas de escala extremos mensuales y datos especiales de vasos de almacenamiento.

Se cuenta con un inventario de estaciones hidrométricas, inventarios de presas, descripción de la estructura de los archivos bandas y banco de datos.

El inventario de estaciones hidrométricas contiene la relación de las estaciones existentes en un archivo de Excel que consiste en:

- Clave de la estación
- Periodo de datos registrados



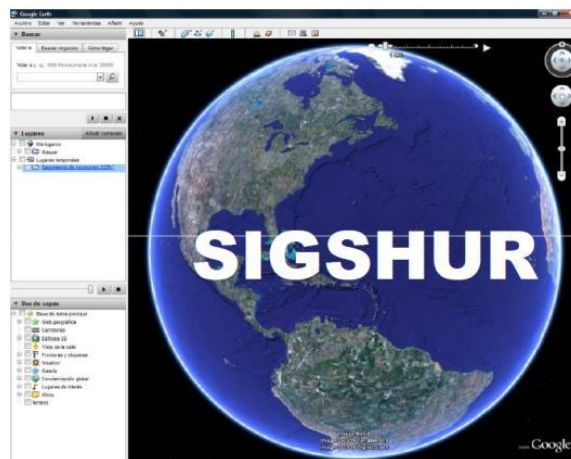
- Nombre de la estación
- Nombre de la corriente a la que pertenece la estación
- Nombre de la cuenca a la que pertenece la estación
- Nombre del estado al que pertenece la estación
- Región hidrológica a la que pertenece la estación
- Descripción de la estación
- Longitud en grados, minutos y segundos
- Latitud en grados, minutos y segundos
- Descripción de la corriente
- Nombre del colector general
- Nombre del afluente, del canal, de la corriente y sub-afluente
- Latitud en décimas de grados
- Longitud en décimas de grado

El inventario de presas contiene la clave de la presa, período de años registrados, nombre, elevación de cresta del vertedor, áreas de embalse, etc.

El Sistema de Información Geográfica para el Seguimiento de Huracanes (SIGSHUR), fue diseñado con la intención de contar con una herramienta para la planeación y la toma de decisiones en situaciones de emergencia. (Figura 3.2.2.1.1). El sistema tiene la capacidad de mostrar en tiempo real la trayectoria, la posición actual y la trayectoria pronóstico de los ciclones tropicales en sus diferentes fases que van desde una Depresión Tropical, Tormenta Tropical hasta Huracán (Con sus diferentes categorías).

Adicionalmente muestra imágenes de satélite en tiempo real de los sensores Infrarrojo, Visible y Vapor de Agua, con resolución de 8 km y 12 km, así como sus respectivas animaciones de las últimas 10 imágenes, además de imágenes fijas con resolución de 4 km.

Se debe de contemplar que para acceder al SIGSHUR es indispensable una conexión a internet y tener instalado el programa Google Earth,



**Figura 3.2.2.1.1.** Programa de Seguimiento de huracanes

Utilizando el programa de Google Earth se puede abrir un módulo de Trayectoria de huracanes el cual incluye la posición en vivo de los huracanes y Productos oficiales NHC en el cual se despliegan las capas de información del fenómeno meteorológico que está afectando en el momento. La información mostrada deja ver la posición actual, cono de incertidumbre, ruta pronóstico y trayectoria del fenómeno. Si se le da click en algún punto de la información mostrada aparece una ventana con la base de datos del tema, por ejemplo la posición actual del fenómeno con las coordenadas geográficas, vientos máximos registrados y presión.

Los temas que se pueden desplegar en el módulo de capas son : estaciones convencionales, localidades con SAP ( sistemas de agua potable) divididos por estado y municipio, reporte de seguimiento y avisos.

### 3.2.2 Datos del Servicio Meteorológico Nacional.

El Servicio Meteorológico Nacional de México dispone de una red de observación de superficie y altura de cobertura nacional, de una red de radares meteorológicos y de estaciones de recepción de información procedente de los satélites meteorológicos geoestacionarios GOES y polares TIROS.

La red actual de observación de superficie del SMNM cuenta con 212 estaciones, 79 forman la red sinóptica de superficie y las 133 restantes constituyen la red de estaciones meteorológicas (EMAS).

La red sinóptica de superficie del SMNM estaba constituida por 72 observatorios sinópticos de los cuales solo 13 estaban operando plenamente. A finales del 2003 eran 79 observatorios y solo 31 cumplían con su función.

En la tabla 3.2.2.1 se indica el número de observatorios existentes.

Tabla 3.2.2.1. Observatorios existentes y distribución geográfica.

OBS	ESTADO	Km <sup>2</sup>	OBS	ESTADO	Km <sup>2</sup>	OBS	ESTADO	Km <sup>2</sup>
1	Aguas calientes	5471	2	Baja California	69921	4	Baja California Sur	73475
1	Campeche	50812	5	Chiapas	74211	4	Chihuahua	247938
4	Coahuila	149982	3	Colima	5191	2	Durango	123181
1	Guanajuato	30491	1	Guerrero	64281	2	Hidalgo	20813
4	Jalisco	80386	1	México	21355	2	Michoacán	59928
1	Morelos	4950	2	Nayarit	26979	1	Nuevo León	64942
4	Oaxaca	93952	1	Puebla	33902	4	Querétaro	11499
1	Quintana Roo	50212	4	S. Luis Potosí	63068	3	Sinaloa	58328
6	Sonora	182052	1	Tabasco	25267	3	Tamaulipas	79384
1	Tlaxcala	4016	5	Veracruz	71699	3	Yucatán	38402
2	Zacatecas	73252	1	Distrito Federal	1479	---	---	---

La red de radares meteorológicos cuenta con 13 radares, 7 de ellos suministrados por las empresas Ericsson y el resto por EEC los cuales permiten una cobertura nacional del 70%. Cada radar genera una imagen cada 15 minutos y se transmite via FTP a las oficinas de SMNM donde se difunden a los diferentes departamentos para su utilización operativa. Figura 3.2.2.1

## RADARES EN MÉXICO



**Figura 3.2.2.1. Ubicación de radares en la República Mexicana.**

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN), cuenta con una red de 80 observatorios meteorológicos, los cuales generan información meteorológica y climatológica del país, para dar servicio tanto a instituciones Nacionales Gubernamentales y Privadas, como a Organismos Internacionales como es la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

La información se ocupa para el análisis y elaboración de pronósticos del tiempo, estudios hidrológicos, climatológicos, agro meteorológicos, etc.

Estos observatorios meteorológicos deben trabajar las 24 horas del día los 365 días del año ininterrumpidamente; solamente el 27 % labora de esta forma debido a la falta de personal. En esta red se realizan mediciones de los elementos del tiempo atmosférico de la siguiente forma:

- Cada 3 horas, a tiempo real y por acuerdos internacionales, para ser transmitidas por diversos medios de comunicación al Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas (CNTM), para su posterior retransmisión al Centro Meteorológico Mundial de Washington (CMMW) para su difusión mundial, así como a todos los usuarios nacionales.
- Mensualmente. con los registros horarios, se realiza un reporte de acuerdo a la normatividad de la OMM, el cual es transmitido al CNTM a más tardar a los 4 días siguientes de concluido el mes, para su retransmisión al CMMW para ser difundida mundialmente.

Como se comentaba anteriormente la transmisión de la información se realiza cada 3 horas a tiempo real (mensajes sinópticos), es decir se deben recibir 8 mensajes por día por cada observatorio y de acuerdo al Tiempo del Meridiano de Greenwich (GMT).

Actualmente, se está modernizando la recepción de información meteorológica, acorde con las tecnologías disponibles que permitan su operación, manejo adecuado y en los tiempos establecidos por el Sistema Mundial de Telecomunicaciones Meteorológicas. Así también se está trabajando mucho para que esta información sea más oportuna, de mejor calidad y en bases de datos administrables para consultas rápidas y flexibles de información histórica para atender las solicitudes de los distintos usuarios.

### 3.2.2.1 Software y bases de datos disponibles.

La base de datos climatológica nacional (BDCN) administrada en la unidad del servicio meteorológico nacional (USMN) que es una dependencia de la CONAGUA maneja el programa CLICOM proporcionado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) el cual es una base de datos históricos; el proyecto CLICOM es considerado por la Organización Meteorológica Mundial la mejor manera de obtener una capacidad para controlar la calidad, recuperación y análisis de los datos climatológicos procedentes de los Servicios Meteorológicos. El CLICOM es un sistema computarizado que contiene la información registrada en la red de estaciones climatológicas convencionales. (Miranda, 2003).

El CLICOM es una cooperación voluntaria de los Estados Unidos al programa voluntario de cooperación en apoyo a la base de datos climática mundial y fue programado en el National Climatic Data Center en Ashville, North Carolina y National Weather Service en Silver Spring, Maryland, en el año de 1992. El CLICOM versión 3.0 es un programa para computadoras PC que sirve en el manejo de bases de datos y realiza una amplia variedad de tareas relacionadas con el procesamiento de datos climatológicos. En general CLICOM se maneja en forma de menú, en un sistema de despliegue pantalla por pantalla, con un menú principal de ocho opciones a escoger, cada opción es un módulo que realiza tareas diferentes. Los principales módulos para el manejo de los datos son el módulo de administración de datos, el módulo de ingreso de datos del clima y control de calidad y el módulo de producto de datos climáticos. Este programa cuenta con una base de datos en la cual se encuentran capturados aproximadamente 300 diferentes parámetros a nivel mundial. En conjunto se puede obtener información de todos los parámetros en una estación seleccionada, así como gráficas, aplicaciones personalizadas y programas estadísticos. (Salinas 1998).

El sistema CLICOM trabaja con aplicaciones ejecutables en lenguaje Fortran versión 5.0, los archivos controladores son de tipo BATCH. La versión de CLICOM que se utiliza es la 3.0 que

data desde 1992 y el manejador de la base de datos es el programa Data Easy Versión 4.0 del 2000.

Con este programa se obtiene un acceso rápido a la información, con su manejo confiable y seguro y con los datos obtenidos se cuenta con una estadística climatológica para la toma de decisiones a futuro.

El SMN podrá elaborar pronósticos más precisos y oportunos con datos recabados por aeronaves civiles y comerciales durante sus operaciones cotidianas a partir del 2012 a través de una red de observación conocida como AMDAR (Sistema de transmisión de datos meteorológicos desde aeronaves) que transmitirá los datos meteorológicos para el enriquecimiento del sistema de predicción climática.

El recabar los datos del AMDAR que ya transmiten los aviones comerciales en su despegue, trayecto y aterrizaje, permitirá tener una mayor cobertura geográfica y monitorear mejor las condiciones meteorológicas. Para el mejor aprovechamiento de estos datos habrá que instalar un software que codifique la información obtenida para que sea accesible al servicio meteorológico.

Con datos de Satélite GOES en México se puede estimar la precipitación con el Proyecto Hydroestimator PROMMA - NWS - SMN. El cual ha sido una herramienta de bastante utilidad para monitorear la distribución de la precipitación en zonas alejadas y en donde no existe infraestructura adecuada para medir la precipitación. El Servicio Meteorológico Nacional de México, SMN y de los Estados Unidos, NWS, han implementado en forma conjunta la operación del sistema.(SMN, 2012).

El sistema permite un monitoreo continuo, y por ende, observar y prever zonas potenciales de inundaciones. El antecedente de este sistema es el Autoestimator, el cual fué desarrollado varios años atrás como un proceso automático que asiste a los meteorólogos para monitorear la precipitación a escalas pequeñas, particularmente en regiones donde no existen datos de radar o datos pluviométricos.

Los datos de precipitación que se presentan en forma diaria, es el resultado de un promedio de las imágenes de satélite recibidas en un lapso de 24 horas. La acumulación se inicia a partir de las 7:00 de la mañana del día anterior, hasta las 7:00hrs del día actual. Los datos que se presentan en la línea con los nombres de los días de la semana, corresponden a los datos de precipitación acumulados en los últimos 7 días.

El Centro Nacional de Telecomunicaciones Meteorológicas (CNTM) del SMN es responsable de la validación, integración, control y archivos de información meteorológicas enviada por los observatorios, de los boletines y de su envío al CMM de Washington. Para el envío de la información se cuenta con enlaces terrestres ADSL/FTP a 1Mbps. Existen del orden de 24 observatorios sinópticos de superficie que transmiten información vía teléfono al CNTM y También existe un enlace con la CNA a 2Mbps.

Se tiene una conexión con el Centro Meteorológico Mundial de Washington a través del WAFS (World Area Forecast System) para lo que se cuenta con una estación terrena de transmisión y recepción ubicado en la sede central del SMN.

Para la información procedente de la red EMAS se utilizan satélites geostacionarios (GOES); se tiene otra conexión satélite para la recepción del canal de información meteorológica Weather Channel.

Con todos los datos disponibles a nivel nacional se han logrado realizar investigaciones de mayor calidad sustentadas con datos del CLICOM, BANDAS u otras bases de datos digitales dependiendo de la zona de estudio. La información también ha servido para pronosticar temporadas de huracanes. Con la ayuda del SIGSHUR, la CONAGUA emite boletines que ayudan a alertar a la población de un posible evento extremo y así poder planear y tomar decisiones en emergencias.

### 3.3 Referencias

1. Comisión Nacional del Agua. Banco nacional de datos de aguas superficiales (bandas). consulta de datos hidrométricos, de sedimentos y vasos [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDA S.htm](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDA%20S.htm)
2. Comisión Nacional del Agua 2010. <http://www.conagua.gob.mx/>
3. Comisión Nacional del agua. CONAGUA 2011. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/>
4. Instituto Mexicano de tecnología del agua [http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com\\_wrapper&view=wrapper](http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com_wrapper&view=wrapper)
5. Inventario Nacional de Obras de protección contra inundaciones en cauces naturales. CONAGUA 2010. <http://sgh.conagua.gob.mx/>
6. Miranda Alonso S, Benítez Pensado V., Flores Zamudio R. Una herramienta para el manejo de los datos climatológicos del país. IMTA 2003.
7. Perevochtchikova María, Simposio: Desarrollo de las estadísticas del medio ambiente; fuentes, alcances y usos. Centro de Estudios Demográficos Urbanos y Ambientales. Octubre 2008.
8. Proyecto de Modernización del Servicio Meteorológico Nacional de México Diagnóstico Institucional y Plan Estratégico de Desarrollo 2010-2019 Consultoría realizada con la asistencia técnica de la OMM. (octubre 2009-enero 2010)
9. Salinas V.M. Actualización y manejo de la base de datos de precipitación y temperatura para el estado de Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis, 1998.
10. Servicio Meteorológico Nacional. Información sinóptica de los observatorios [http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=22&Itemid=90](http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=22&Itemid=90). 2012
11. Servicio Meteorológico Nacional <http://smn.conagua.gob.mx/emas/>
12. Vázquez Aguirre J.L. Datos climáticos de la República Mexicana: panorama actual y requerimiento inmediato. Primer foro del medio ambiente atmosférico en el estado de Veracruz, Febrero 2006.

## Capítulo 4 Metodologías para su estudio

### Introducción

En este capítulo se presentan algunas metodologías actualmente aplicadas en México y otros países para el análisis de fenómenos meteorológicos extremos.

### 4.1 Huracanes

El Método gráfico para el pronóstico de oleaje durante huracanes en el Caribe por Lizano, (1996), se basa en gráficas sencillas para calcular dirección y altura de la ola en cualquier región del huracán. Para generar las condiciones de oleaje se utiliza un modelo numérico de segunda generación (Recio, 1981), adaptado para el pronóstico de oleaje ante huracanes (Lizano, 1988). Este método utiliza un modelo de viento cuyo perfil está dado por (Lizano, 1990):

$$V(r) = V_{max} \frac{2Rr}{r^2 + R^2} \quad r < R \quad (1)$$

$$V(r) = \frac{V_{max}}{c_1 + r^k} \log C_2 r \quad r > R \quad (2)$$

Si hacemos:

$$A = 0.447 \left[ 14.5 \sqrt{P_n - P_\emptyset} - R(0.31)f \right] + \frac{Vf}{2} \quad (3)$$

Entonces:

$$V_{max} = A \left[ 1 - 0.5V_f \frac{1 - \cos\emptyset}{A} \right] \quad (4)$$

Donde:

**r**: distancia desde el ojo del huracán (Km).

**R**: radio del ojo del huracán (Km).

**Pa**: presión atmosférica ambiente (1013 hPa).

**P $\emptyset$** : presión atmosférica en el ojo ( hPa).

**A**: Área en estudio (m<sup>2</sup>).

**Vf**: velocidad de avance del huracán (m/s).

**$\emptyset$** : Ángulo entre el vector local del viento y la dirección de la tormenta (rad).

**Vmax**: velocidad máxima del viento alrededor del ojo del huracán en (m/s).

**f**: parámetro de Coriolis (2 $\omega$ Sen $\theta$ , donde  $\theta$  es la latitud en radianes);

**C<sub>1</sub>**= 3.354, **C<sub>2</sub>** =1.265x10<sup>-3</sup>

**k**: 0.095; m= 1.575. Valores ajustados según Lizano (1988,1990).



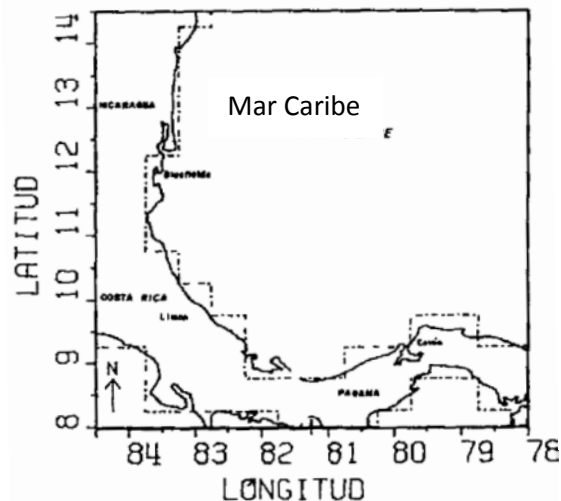
Los rangos de los parámetros  $P_a$ ,  $V_f$  fueron extraídos del análisis estadístico realizado por Lizano y Fernández (1995) del registro de la Administración Oceánica y Atmosférica Nacional (NOAA). El radio de viento máximo es un valor poco reportado que se determina con aviones de reconocimiento e imágenes satelitales. Lizano y Fernández realizaron un estudio para determinar su importancia en generación de olas para el modelo del área en estudio.

Simplificando la ecuación (3) se tiene:

$$A = 6.482 (P_n - P_a)^{\frac{1}{2}} - 0.073 R \sin \theta \quad (5)$$

El modelo de generación de olas es discreto espectral (Recio, 1981; Recio y Tracy, 1983) que necesita gran capacidad de memoria por lo que debe establecerse una relación entre el tamaño del área de simulación y el tamaño de malla utilizado para resolver las ecuaciones.

El área que se muestra en la Figura 4.1.1 fue seleccionada de manera que el tamaño de rejillas resuelva el ojo del huracán y el modelo numérico utilizará el máximo de la memoria expandida de una PC compatible.



**Figura 4.1.1.** Área de aplicación del método manual de pronóstico de oleaje.

La simulación para cada característica del huracán llevada a cabo por Lizano y Fernández, se realizó por un periodo de al menos 30 horas para que el huracán alcanzara su estado de maduración.

Este método sirve para hacer un pronóstico aproximado del oleaje ante la amenaza de un huracán, es un método gráfico sencillo que utiliza los parámetros básicos proporcionados por los servicios de información meteorológica.

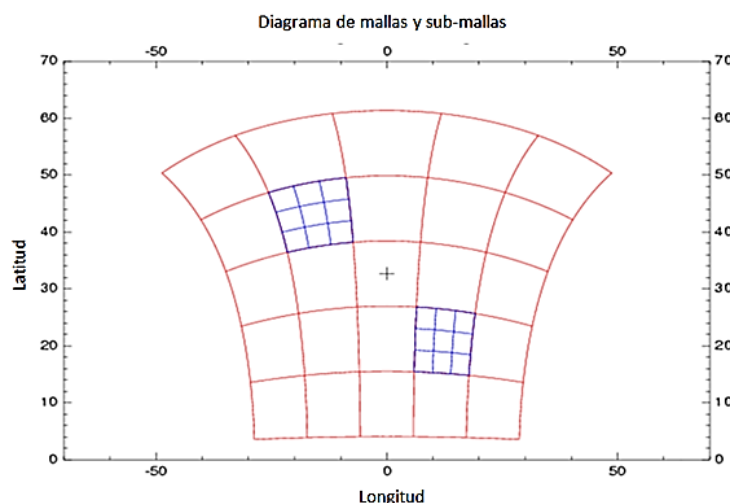
Gopalakrishnan et al, (2006), explican brevemente la técnica de anidación, el algoritmo del movimiento nido y algunos resultados de la trayectoria del vórtice del huracán para casos ideales y reales.

Un nuevo enfoque (Janjic et al, 2001; Janjic, 2003) se aplicó en el mesomodelo no hidrostático (NMM) que es actualmente una opción principal dentro de la iniciativa modelo del WRF (Weather Research and Forecasting); con este enfoque, en lugar de extender los modelos de nubes de grandes escalas espaciales y temporales, la aproximación hidrostática está atenuada a un sistema hidrostático de ecuaciones con el fin de ampliar la aplicación del modelo a movimientos no hidrostáticos, y al mismo tiempo las características favorables de la formulación hidrostática se conservan dentro el rango de validez de la aproximación hidrostática.

El sistema de ecuaciones no hidrostático NMM es formulado considerando una alternación de latitud-longitud, malla-E y en la vertical, se utiliza la coordenada híbrida de presión-sigma. La coordenada de latitud y longitud simplemente se transforma de tal manera que el origen de coordenadas está situado en el centro del dominio de integración.

Este tipo de transformación ofrece un tamaño de malla más uniforme en todo el dominio, y por consiguiente, evita la necesidad de paso de tiempo excesivamente pequeño cuando nos acercamos a las latitudes del norte / sur. El sistema dinámico de ecuaciones y las técnicas numéricas se describen para un dominio uniforme en Janjic et al., 2001 y Janjic, 2003. Con el fin de hacer frente a múltiples escalas pronósticos, una capacidad horizontal refinamiento de malla fue desarrollado para este núcleo dinámico y está siendo probado para el problema de pronóstico de huracanes.

La capacidad de refinamiento comúnmente conocida como malla telescópica soporta de una a dos vías de interacción entre un dominio fuente de baja resolución y uno o más nidos de alta resolución y también controla el movimiento de malla de nidos de alta resolución.

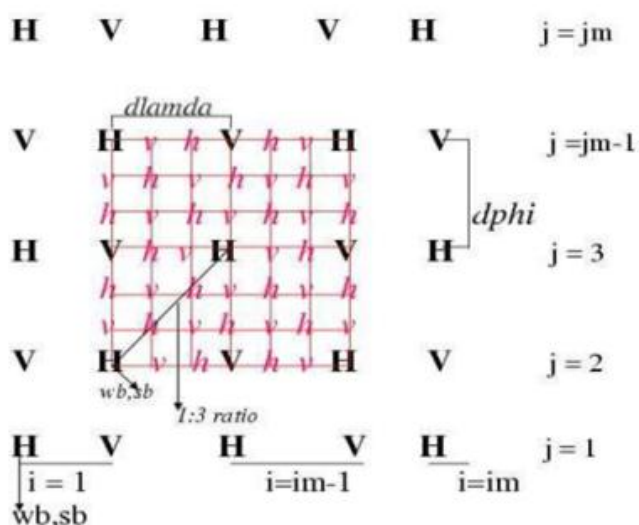


**Figura 4.1.2.** El nido NMM telescópica tal como aparece en un verdadero sistema de coordenadas de latitud y longitud.

Todas las interpolaciones de la fuente hacia el dominio anidado se realizan con una alternación de latitud-longitud de la malla-E con la referencia de latitud y longitud localizada en el centro

del dominio de la fuente (Figura 4.1.2). En consecuencia, el dominio anidado puede moverse libremente en cualquier lugar dentro de los puntos de la malla del dominio principal, sin embargo, el dominio anidado de las líneas de latitud y longitud coinciden con las líneas de latitud y longitud del dominio principal en el número entero del radio dominio al nido del tamaño de malla. (Figura 4.1.3).

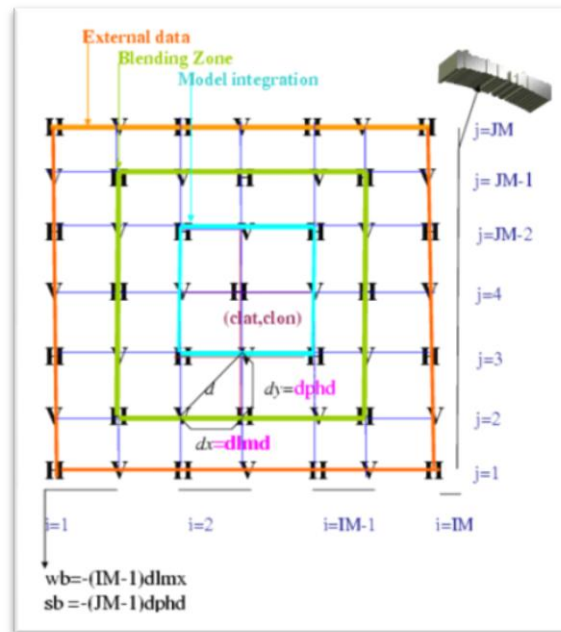
Para ser coherente con los valores numéricos de modelos NMM, se lleva a cabo el balance de masas cuasi-hidrostático después de introducir la topografía de la alta resolución. Se utilizan interpolaciones cúbicas segmentaria para la interpolación de datos de ida y vuelta de las superficies de presión estándar hacia las superficies híbridas.



**Figura 4.1.3.** Configuración anidada de la malla-E para una relación 3:1 del dominio al radio del nido. Wb y sb son los límites al oeste y al sur.

La Figura 4.1.4 ilustra una muestra de la estructura de la malla con filas más al exterior y columnas que representan la interfaz de entrada. Los datos externos se describen en esta interfaz. El modelo de integración comienza desde la tercera columna/fila interna que llamamos interfaz dinámica. Los datos en las penúltimas filas y columnas son una mezcla de los datos de entrada y la interfaz dinámica. Debido a la estructura de la malla-E y al hecho de que la interfaz de entrada está bien separada de la interfaz dinámica, los límites anidados son actualizados cada cierto tiempo del dominio principal exactamente del mismo modo que el dominio principal es actualizado con los datos de la fuente exterior.

Este enfoque parece ser simple, y sin embargo produce una forma eficaz de actualización de la interfaz sin distorsiones excesivas. Sin embargo, la interpolación Bi-lineal desde la fuente al dominio anidado se utiliza para predecir el viento, la humedad y condensación sobre las superficies híbridas de presión híbridas, mientras que los campos de altura geopotencial se interpolan en los niveles de presión.



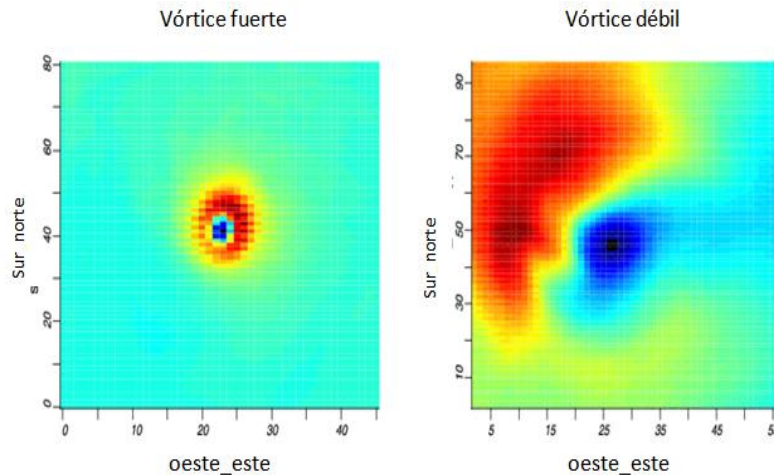
**Figura 4.1.4.** Condiciones límites del nido.

Usando la información extrapolada de los campos más altos del dominio principal y la topografía de alta resolución sobre el dominio anidado se lleva a cabo un balance de masas pseudo-hidrostático para determinar las condiciones de frontera en cada paso del tiempo en las columnas y filas más exteriores del dominio anidado. La presión de la superficie, la presión de la interfaz, la presión de la superficie hidrostática y la temperatura se recuperan en las superficies híbridas usando la interpolación cúbica segmentaria. El enfoque parece ser simple, produce un camino efectivo para la actualización de la interfaz sin provocar muchas distorsiones mientras el nido se mueve.

La realimentación, es decir, la interacción anidada de dos vías es una característica reciente que está siendo constantemente actualizada y probada. Para la técnica interactiva de 2 vías, una masa por medio de 13 puntos, campos escalares y el momento del nido de alta resolución se ponderan y alimentan en el dominio principal.

Un llamado "punto de estancamiento" es elegido como el centro de la tormenta. Al final de cada paso de tiempo del dominio anidado, se determina la presión dinámica dentro de este dominio.

El movimiento de nido para huracanes y depresiones tropicales está basado en el concepto de presión dinámica (Gopalakrishnan et al., 2002). Por lo tanto, en la figura 4.1.5. Se muestra la variación de la presión dinámica dentro del dominio anidado.

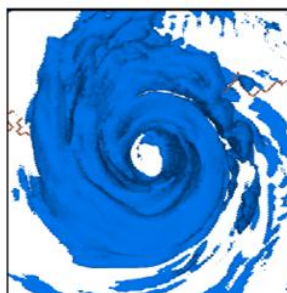


**Figura 4.1.5.** Presión dinámica sobre el dominio anidado para un vórtice fuerte y uno débil.

El llamado punto de estancamiento es elegido como el centro de la tormenta. Al final de cada paso del tiempo del dominio anidado se determina la presión dinámica dentro del dominio. Si el centro de la tormenta se transporta más allá de un punto de la malla del dominio principal (3 puntos de la malla desde el centro del dominio anidado para un dominio 3:1 del radio de la malla del nido), el dominio anidado se mueve a una nueva posición para mantener la tormenta en el centro del dominio del nido. La diferencia de presiones entre el centro y el punto de la presión dinámica máxima es menor a 2mb, con lo que el movimiento de la malla se termina.

Cabe señalar que, mientras los datos están siendo intercambiados en un paso de tiempo dado, antes y después del movimiento de la malla en la mayor parte del dominio, la interpolación y el balance pseudo-hidrostático son aplicados en la región cubierta del borde principal del nido móvil (donde no hay intercambio de datos).

El algoritmo de movimiento del nido fue probado en una base semi-operativa para la temporada de huracanes del 2005 que incluye una serie de tormentas y algunas depresiones tropicales. Si una tormenta es localizada inicialmente con éxito, es decir, al comienzo del pronóstico, en algún lugar dentro del dominio anidado, el algoritmo es suficientemente enérgico para proporcionar un movimiento de malla automático en tiempos posteriores. El sistema de malla anidada de NMM ha sido probado y evaluado por su desempeño. La simulación es capaz de producir perfectamente la estructura de la tormenta. Figura 4.1.6.



**Figura 4.1.6.** Simulación del nido anidado de 2 vías a 4 kilómetros del Huracán Katrina antes de tocar tierra.

Córdova y Lamazares, (2012), utilizan modelos numéricos de oleaje, con el objetivo de simular huracanes hipotéticos o determinar cuál podría ser la trayectoria y características más desfavorables para una región determinada, además de dotar a esa población de una base de datos que contribuya a minimizar los daños que pueden ocurrir frente a la presencia de un fenómeno de este tipo.

Para la calibración del campo de viento paramétrico fue utilizado como plataforma principal el modelo matemático de tercera generación SWAN (Simulating Waves Nearshore) que sirve para simular la altura, el período y la dirección de las olas en el área seleccionada y también se utiliza para obtener estimados reales de parámetros de olas en áreas costeras y lagos, a partir de vientos y condiciones de corriente (Booij et al. 1999).

Los principales procesos que tiene en cuenta el modelo (Booij et al. 2004) son: Procesos de generación y disipación de oleaje:

- Generación por viento.
- Disipación por corte de la zona de espuma de la cresta por el viento.
- Disipación por rompiente de la ola debido al fondo.
- Disipación por fricción con el fondo.
- Interacción ola-ola tanto en aguas profundas como en aguas poco profundas.

Procesos de propagación de oleaje:

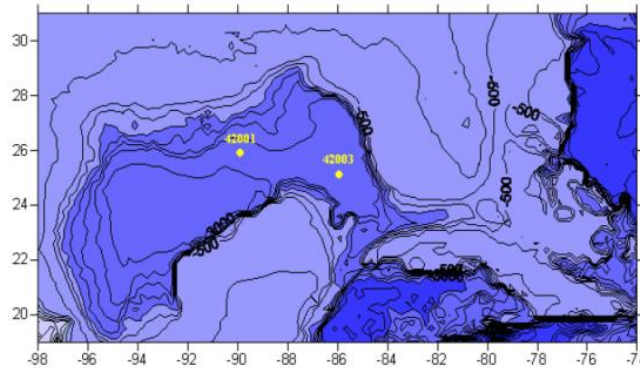
- Propagación a través de un espacio geográfico.
- Refracción debida a variaciones espaciales en el fondo y las corrientes.
- Desviación.
- Pérdidas de profundidad debida a variaciones espaciales en el fondo y las corrientes

Para que la similitud entre la simulación y las mediciones de las boyas y satélites se garantice, se trabajó en coordenadas náuticas, las corridas se realizaron en modo NO estacionario debido a que los huracanes siempre están en movimiento.

Córdova y Lamazares, (2012), realizaron simulaciones para el huracán Wilma (25 de octubre del 2005) con un total de 97 horas de cálculo y del huracán Iván, (16 de septiembre del 2004) con un modelado de 85 horas.

Para la modelación se seleccionó un amplio dominio que abarca desde el Golfo de México hasta la parte más oriental de Cuba y desde la parte central de la Florida hasta la latitud de 19°. Esto fue necesario para tener una estabilidad numérica y resultados con mayor precisión, en el modelo fue necesario comenzar los cálculos con tiempo suficiente de antelación antes de que alcanzara la región de interés.

La batimetría para el área de estudio tiene  $24^\circ$  por las abscisas y  $12^\circ$  por las ordenadas. Se decidió construir la malla de cálculo igual a la malla de cómputo con un tamaño de cuadrícula de 0.05 grados; se obtuvieron 480 cuadrículas en X y 240 en Y, al igual que en la generación de la malla sobre la elevación del mar y la malla creada para la generación de vientos. Figura 4.1.7.



**Figura 4.1.7** Batimetría seleccionada para la simulación de los huracanes Wilma e Iván, obtenida de National Geophysical Data Center (NGDC 2011).

El valor máximo establecido por SWAN para la frecuencia máxima es uno, pero el utilizado en la modelación fue de 0.35 debido a que las boyas tienen dicha frecuencia máxima de según Dykes et al. (2002).

El modo físico empleado para la modelación fue el KOMEN. Dentro de la gran cantidad de fenómenos físicos soportados por SWAN, se tuvieron en cuenta solamente la fricción con el fondo y el efecto cuádruple entre las olas.

Para realizar la comparación con las fuentes de medición, en el caso de los satélites, se crearon la misma cantidad de ficheros que de las mediciones del satélite seleccionado, que contenían los mismos puntos donde éste había realizado la medición y se procuró obtener las salidas de SWAN también en la misma fecha, con el objetivo de realizar una exacta sincronización para obtener buenos resultados.

Las salidas del SWAN arrojaron las coordenadas de cada punto, la altura de la ola significativa y la velocidad del viento, los datos fueron en forma de tablas. Para realizar la comparación con las fuentes de medición en el caso de los satélites, se crearon la misma cantidad de ficheros que de los tracks del satélite seleccionado, los que contenían los mismos puntos donde éste había realizado la medición y se procuró obtener las salidas de SWAN también en la misma fecha, con el objetivo de realizar una exacta sincronización para obtener buenos resultados.

A través de un modelo paramétrico se generan los campos de viento y de presión de un huracán, el modelo se basa en círculos concéntricos, donde la velocidad del viento es de cero en el ojo del huracán y aumenta radialmente hasta alcanzar al radio máximo de vientos (Rmv) y disminuye al alejarse.

La presión del huracán es más baja en el núcleo del huracán y aumenta exponencialmente a medida que se aleja del centro hasta llegar a la presión atmosférica; este campo de presión del modelo es computado como una distribución exponencial. Se utilizó un script en Matlab 7.0 para la generación de los campos de viento a partir de 2 formulaciones diferentes: Modified Rankine Vortex (RVM) (Hughes 1952), y el modelo propuesto por Holland (Holland 1980).

El modelo Rvm sigue una distribución de velocidad en la dirección radial, la velocidad del viento a una distancia determinada del centro del huracán se calcula con las ecuaciones 1 y 2, que dependen de la distancia entre el centro del huracán y el punto de interés.

$$V(r) = V_{max} \left( \frac{r}{R_{vm}} \right)^x \text{ para } r < R_{vm} \quad (6)$$

$$V(r) = V_{max} \left( \frac{R_{vm}}{r} \right)^x \text{ para } r > R_{vm} \quad (7)$$

Donde:

$r$ : es la distancia desde el centro del huracán hasta el punto de análisis (m).

$R_{vm}$ : es el radio de máximos vientos (m).

$V_{max}$ : es la máxima velocidad de los vientos (m/s)

Las ecuaciones (6) y (7) se ajustan variando el parámetro de forma  $X$ , el cual tiene un rango entre 0,4 y 0,6 (Hughes 1952). El coeficiente  $X$  es una de las dos variables a calibrar en el estudio de Córdova y Lamazares, (2012), para establecer un valor único de ajuste a todas las situaciones.

El  $V_{max}$  es determinado mediante la ecuación (8):

$$V_{max} = 3.44(dp^{0.644}) \quad (8)$$

Donde:

$dp$  (mbar) es la variación de presión en el punto de análisis

El modelo de Holland (1980) contiene también dentro de su fórmula principal los parámetros de  $R_{vm}$  y  $V_{max}$ , y adiciona un coeficiente  $B$  que varía el perfil de la distribución de vientos de un huracán. Este coeficiente se encuentra en un rango entre 0.75 y 1.5. Este coeficiente es la segunda variable a calibrar. En la figura 4.1.8. se muestra la variación de los perfiles de viento a partir de cada valor  $B$ .

La ecuación (9) describe el modelo de Holland:

$$V(r) = V_{max} \sqrt{\left( \frac{R_{vm}}{r} \right)^B \exp \left[ 1 - \left( \frac{R_{vm}}{r} \right)^B \right]} \quad (9)$$



En este modelo la  $V_{max}$  se define con la ecuación (10):

$$V_{max} = \sqrt{\left(\frac{B(P_n - P_c)}{\rho^e}\right)} \quad (10)$$

Dónde:

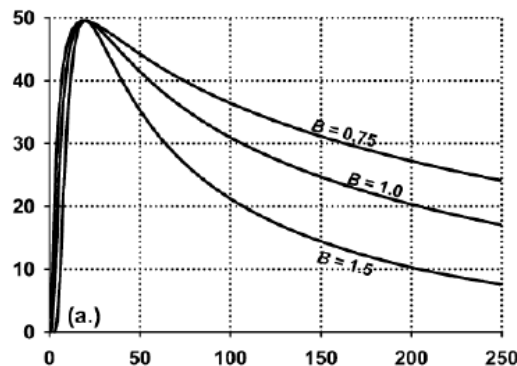
$B$ : parámetro de Holland (alim.).

$\rho$ : densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ).

$P_n$ : presión en el punto de evaluación (mbar).

$P_c$ : presión central del huracán (mbar).

$E$ : número de Euler (base logaritmos neperianos)



**Figura 4.1.8.** Variación de los perfiles de viento para cada valor de  $B$ . (Willoughby y Rahn 2004).

En ambos métodos el radio de vientos máximos ( $R_{mv}$ ) se calcula utilizando la ecuación (11) siguiente (Lizano 2001):

$$R_{mv} = 46.29 \exp(0.0153 V_{max} + 0.0166 \lambda) \quad (11)$$

Donde:

$\lambda$ : latitud del punto en cuestión.

$V_{max}$ : velocidad máxima del viento (m/s)

Las velocidades de viento calculadas anteriormente por cada uno de los métodos, se ajustan a la velocidad estándar de 10m sobre el NMM multiplicándola por un factor de corrección  $K_m$ , el cual varía en dependencia del modelo utilizado, ecuación (12).

$$V_{10} = V(r) K_m \quad (12)$$

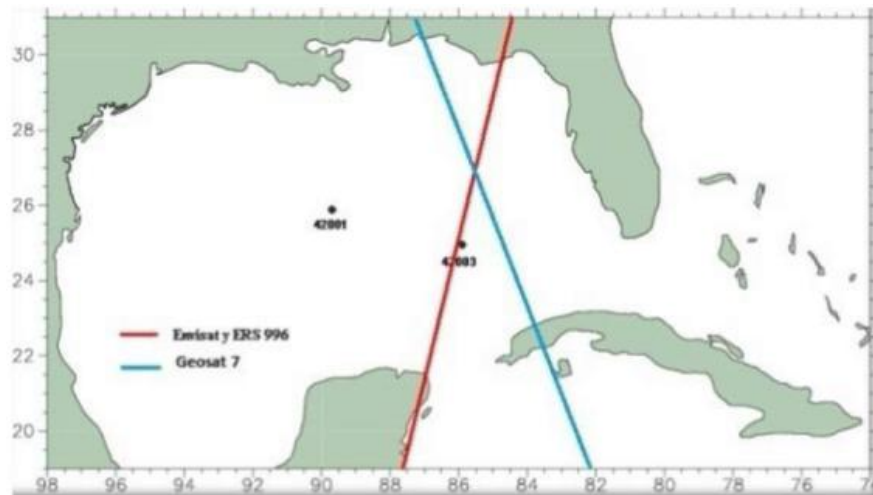
Para la metodología, las boyas fueron seleccionadas lo más cercanas posible a la trayectoria del huracán, una un poco al Oeste (42001) y la otra al Este (42003) de la posición donde el huracán tuvo su mayor intensidad y sus datos fueron obtenidos de National Data Buoy Center (NDBC 2011).

La información satelital utilizada para realizar la comprobación de los valores obtenidos durante la calibración de los campos de viento, se obtuvo a partir de la colaboración del Profesor Eugenio Pugliese Carratelli y del Dr. Ferdinando Reales de la Universidad de Salerno, Italia. Esta información consta de datos altimétricos procesados, de alturas de ola significativas y velocidad de vientos agrupados en cuatro satélites:

- 146 mediciones (tracks) del satélite Envisat 1, divididas en dos ciclos, 41 y 42.
- 71 mediciones del satélite ERS 2, divididas en dos ciclos, 109 y 110.
- 49 mediciones del satélite Geosat 1, divididas en dos ciclos, 160 y 161.
- 15 mediciones del satélite Jason 1, divididas en dos ciclos.

El proceso de selección de los satélites se basó fundamentalmente en la fecha de la medición, es decir, para que un satélite fuera seleccionado tendría que haber realizado su medición en la fecha de simulación del huracán Wilma (del 21 de octubre al 25 de octubre del 2005).

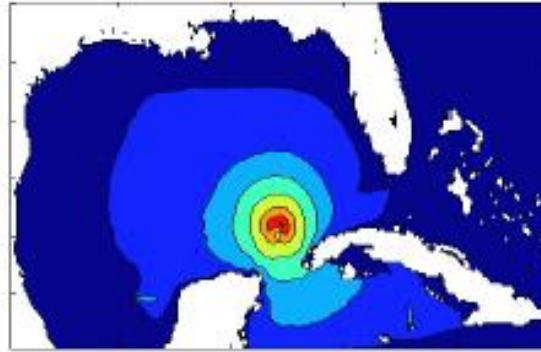
Después de analizar todas las mediciones satelitales se decidió utilizar tres trayectorias de tres satélites, el Envisat 1 (trayectoria 996), el ERS 2 (trayectoria 996) y el Geosat 1 (trayectoria 7), como se muestra en la figura 4.1.9.



**Figura 4.1.9.** Trayectorias de satélites utilizadas para la comprobación de la calibración.

Utilizando SWAN como plataforma principal, se realizó la calibración de dos modelos empíricos de viento, Holland (1980) y Modified Rankine Vortex (RVM) (Hughes 1952).

Se realizaron simulaciones del huracán Iván obteniendo como resultados las características del viento como son: su velocidad y dirección y del oleaje provocado por éste como son la altura de ola, su período asociado, y su dirección. En la figura 4.1.10 se muestra una imagen que representa una hora de la simulación.



**Figura 4.1.10.** Posición del ojo del huracán Iván el día 14 de septiembre a las 13 horas.

A partir de la página web del National Data Buoy Center (NDBC 2011) se obtuvieron de dos de sus boyas (42001 y 42003) los mismos datos anteriormente explicados y se realizó la comparación para determinar el mejor valor de  $X$  en el caso de Modified Rankine Vortex (RVM) y el mejor valor de  $B$  en el caso de Holland.

Para obtener el valor óptimo de las variables indicadas anteriormente se aplicó la variable estadística "Skill" calculada con la expresión (13):

$$Skill = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (medición - modelación)^2}{\sum_{i=1}^N (medición)^2} \quad (13)$$

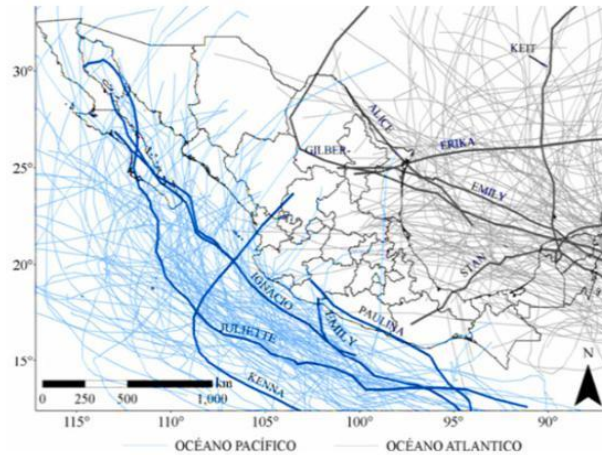
Donde  $N$  es el número de mediciones realizadas.

Si el Skill es igual a uno, la modelación es perfecta y si es igual o cercana a cero es una mala simulación. Este estudio ayuda a desarrollar los conocimientos, procedimientos y metodologías para predecir niveles de inundación costera y cómo se comporta en tiempo y espacio.

Una estimación prospectiva del riesgo presentado por Reynoso et al., (2009), anticipando eventos científicamente creíbles que podrían ocurrir en el futuro, como en el caso de un huracán, fue calculada con modelos probabilistas, que pueden utilizar la información disponible para predecir, de la mejor manera, futuros escenarios y considerar la incertidumbre que se involucra en el análisis.

En el caso de huracán, la manera de obtener pérdidas es a través de perturbaciones de las trayectorias de los huracanes históricos, o de la simulación de eventos para el caso de inundación. Estos huracanes perturbados o eventos simulados generan mapas de amenaza que, junto con la evaluación de la vulnerabilidad de cada una de las construcciones de la cartera, permite obtener el valor de las pérdidas (Avelar, 2007).

En la figura 4.1.11 se presenta una imagen con la ruta de los ciclones tropicales que han afectado a México en su vertiente atlántica y pacífica.



**Figura 4.1.11.** Ruta de huracanes que han afectado al país, provenientes del Pacífico y el Atlántico.

Durante el paso de un huracán se producen dos tipos de pérdidas: las debidas al efecto del viento y las debidas a la marea de tormenta y la de inundación. Para poder realizar correctamente los cálculos de las distribuciones de probabilidad de estas pérdidas por huracán, se recurre, como en el caso de otras amenazas, al concepto de "evento".

La base de datos útiles de huracanes es limitada. Por tal razón, es necesario extenderla por la vía de la generación de huracanes artificiales; se utiliza la estrategia de perturbar las trayectorias y los valores de presión barométrica en el ojo de huracanes reales que hayan sido correctamente registrados.

Para la República Mexicana, las máximas velocidades de viento ocurren cuando se presenta un ciclón tropical. Es por ello que se emplean modelos de huracán para el cálculo de este peligro. Los modelos paramétricos de presión y viento dependen de la posición del ojo del huracán, presión central, velocidad máxima de viento sostenida en el ojo del huracán y radio ciclostrofico, conocido también como radio de máximo gradiente (Avelar *et al.*, 2007).

La marea de tormenta es uno de los peligros asociados a la ocurrencia de huracanes que más daño causa a inmuebles en la primera línea de costa. Se usa un modelo simplificado cuya descripción se indica en Huerta *et al.* (2007). Los autores suponen que la marea de tormenta depende del gradiente de presiones y de los esfuerzos tangenciales ejercidos por el viento y la fricción de fondo.

Debido a la información con que se cuenta, a la disponibilidad de datos aproximados y el nivel de resolución requerida (nivel país), se aplicó una metodología que consiste en determinar la distribución de la precipitación máxima en 24 horas en todo el país, afectándola por coeficientes que involucran la topografía y la hidrografía. Esta metodología se calibra con los datos obtenidos con el modelo matemático y los leídos en campo (Huerta *et al.*, 2006; Torres *et al.*, 2007).

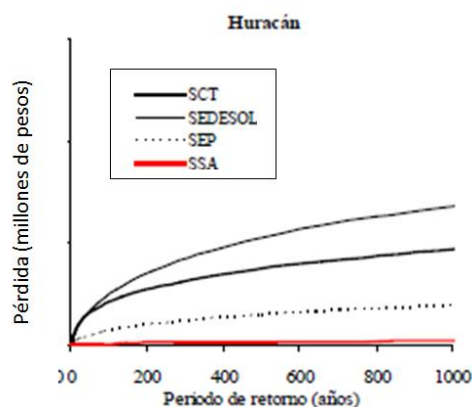
En la vulnerabilidad se cuantifica el daño causado en cada tipo de activo por la ocurrencia de un evento de cierta intensidad (Miranda, 1999).

La estimación del daño se mide en términos del nivel de daño medio, que es la relación entre el costo de reparación esperado y el costo de reemplazo de la estructura. Una curva de vulnerabilidad se puede obtener de relacionar el viento, de la velocidad máxima del viento, y en el de inundación, en función del tirante que se presente en cada sitio.

Las funciones de vulnerabilidad para el sector salud por viento e inundación en México; en el caso de las funciones de vulnerabilidad de inundación, no se consideran los daños provocados por socavación, falta de resistencia por reblandecimiento del suelo o deficiencia de la cimentación, que pueden producir el colapso de las estructuras.

Para calcular las pérdidas, la tasa de daño obtenida en la modelación de la vulnerabilidad se transforma en pérdidas económicas, multiplicando dicha tasa por el valor en riesgo. Las medidas de riesgo obtenidas por el modelo, es la pérdida anual promedio y la curva de excedencia de pérdidas. La pérdida anual promedio (PAP) es la pérdida anual esperada. Matemáticamente, la PAP es la suma de los productos de las pérdidas esperadas para todos los eventos estocásticos considerados en los modelos de pérdida. En términos probabilistas la PAP es la esperanza matemática de la pérdida anual.

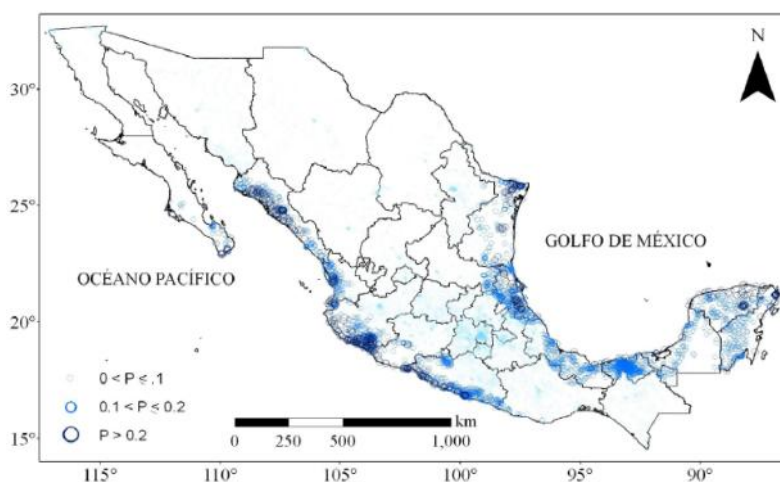
La curva de excedencia de pérdida (CEP) representa la frecuencia anual con la cual una pérdida de una cantidad monetaria específica puede ser excedida. Ésta es la medida de riesgo catastrófico más importante para los encargados del riesgo, dado que estima la cantidad de fondos requeridos para alcanzar los objetivos de la gestión del riesgo. La CEP se puede calcular para el mayor evento en un año o para todos los eventos (en forma acumulativa) en un año. En la figura 4.1.12 se presentan resultados de CEP para la infraestructura del país para inundaciones.



**Figura 4.1.12.** Curva de excedencia de pérdida para la infraestructura en México: Huracán

En la figura 4.1.13 se presenta el mapa con las pérdidas anuales esperadas por peligros de viento, marea de tormenta e inundación (estos tres peligros son los que incluye un huracán, pero en distinta intensidad se presentan en todo el país), solamente para dos infraestructuras, de la SSA.

Los valores máximos corresponden a Cozumel y Cancún; sin embargo, existen también valores de daños similares en el norte de Tamaulipas y en el sur de Jalisco y Baja California, de sitios donde han impactado los huracanes más intensos. Por otro lado, existen estados cuya costa no está en gran riesgo, como Veracruz, Oaxaca y algunos en el noroeste. El caso de Tijuana es interesante, ya que presenta valores de pérdida relativamente altos y no es por los huracanes, sino por los frentes fríos húmedos de invierno, que también están incluidos en el sistema de cálculo de pérdidas.



**Figura 4.1.13** Pérdida anual esperada por huracán dividida por el valor de reemplazo en porcentaje: SSA

Se presentan mapas de la relación entre la pérdida anual esperada y el valor de reemplazo en porcentaje ante huracanes, que se refieren a la suma de los productos de las pérdidas esperadas para todos los eventos estocásticos considerados para la infraestructura de salud, de educación, de comunicaciones y transportes y de vivienda en pobreza patrimonial en México.

Para estimar el riesgo, se hace uso de un sistema que emplea para el cálculo, eventos de huracanes y funciones de vulnerabilidad específicas para los distintos sistemas estructurales.

Se visualizan así el riesgo y las amenazas; el sistema permite calcular pérdidas en función de un período de retorno o tasa de excedencia, lo que es fundamental para administrar el riesgo de carteras y negociar con el sector financiero. Esto permitirá mejorar la estrategia federal de administración de riesgos y optimizar los recursos asignados para hacer frente a los daños derivados de eventos naturales de gran impacto.

Coles y Casson, (1998), que estimaron los niveles de retorno de velocidades de viento extremas debida a huracanes, presentan dificultades prácticas y analíticas. La dificultad práctica de la recolección de datos se ha resuelto mediante la modelación de datos simulados; las dificultades analíticas se refieren a la estimación de la probabilidad de los eventos que son más extremos que los simulados. En primer lugar, se utiliza un modelo de parametrización que permite ajustar modelos a diferentes umbrales o diferentes sitios para ser comparados fácilmente. En segundo lugar, se utiliza el método de máxima verosimilitud como método de inferencia. Esto permite el desarrollo de un análisis espacial que explota similitudes en el comportamiento de los datos de un sitio a otro con el fin de mejorar la precisión de la estimación y facilita la predicción en zonas costeras en comparación con otros con datos simulados. En el modelo de Coles y Casson (1998), se analizaron velocidades del viento en la costa del Golfo de Estados Unidos y Atlántico. Figura 4.1.14.



**Figura 4.1.14. Mapa de Estados Unidos, indicando localizaciones de datos de huracanes simulados**

La rareza de los acontecimientos del huracán en un determinado lugar y la dificultad de precisar la velocidad exacta del viento durante los eventos de este tipo significa que el análisis basado directamente en los datos de viento huracanado observado no es factible. Russell (1971) y Batts et al. (2001) adoptaron un modelo aproximado de la estimación de características extremas de datos de huracán simulados. El modelo de simulación de huracanes consta de 2 componentes: un modelo estocástico para las características principales del huracán: su defecto de presión, radio de vientos máximos, velocidad de traslación y dirección; y un modelo determinista de la velocidad máxima del viento en cualquier punto en el lapso de un huracán debido a sus características principales. Para cualquier lugar dado las distribuciones elegidas para diversas características principales

Un gran número de eventos de huracán son simulados con trayectorias en las proximidades del lugar deseado, y el modelo determinista es utilizado para calcular la velocidad máxima hipotética del viento que pudo haber surgido durante el evento en ese lugar.

Este procedimiento se repite entonces independientemente en cada uno de 55 lugares a lo largo de la costa atlántica y el Golfo de México (ver figura 4.1.14), seguido por un promedio local a través de los sitios vecinos para suavizar las estimaciones. Una descripción más detallada de los diversos componentes de este modelo se da por Batts et al. (2001) y Simiu y Scanlan (1996). El análisis empírico en el que se calibra el modelo de simulación se describe en HUR 7-120 (1972). La información proporcionada por los datos simulados se resumieron y se extrapolaron a través de modelos estadísticos para obtener una estimación de las probabilidades de velocidades del viento más extremas debido a los huracanes.

Hay limitaciones de este procedimiento. En primer lugar, el análisis está condicionado a la calidad de ambos componentes estocásticos y deterministas del modelo de huracanes. En segundo lugar, los datos simulados constan de 999 velocidades de vientos de los huracanes en cada puesto de millas, que para el modelado de los valores extremos representa una cantidad relativamente pequeña de datos. Otros autores, Vickery y Twisdale (1995) por ejemplo, han utilizado series cronológicas más largas simuladas. Por último, a pesar de la dimensión espacial obvia del proceso de huracán, el esquema de simulación ha generado velocidades de viento de huracanes de punto a punto en cada uno de los puestos de milla respectivos.

Lo principal es describir el comportamiento estocástico del proceso de huracán en niveles extremos, incluidos niveles que son más extremos que los datos simulados. Suponemos que la velocidad máxima del viento en un lugar específico dentro de un huracán constituye una realización de una variable aleatoria de una función de distribución  $F$ , y las realizaciones de los huracanes por separado son independientes.

Basándose en la teoría del valor extremo para proporcionar una caracterización del extremo final de  $F$ , existen varias alternativas de representaciones, véase Smith (1989) para una completa visión general del campo. La representación clásica es

$$M_n = \max X_1, X_2, \dots, X_n \quad (14)$$

Donde  $X_1, X_2, \dots, X_n$  es una secuencia de variables aleatorias independientes con función de distribución  $F$ .

Bajo condiciones de generales, tomando como límite  $n \rightarrow \infty$ , la función de distribución  $M_n$  se aproxima a:

$$G(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \xi \left( \frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (15)$$



Definido en  $\{x: 1 + \xi(x - \mu) / \sigma > 0\}$ . Esta es la distribución del valor extremo generalizado (GEV). El parámetro  $\xi$  es un parámetro de forma tal que determina el ponderado de  $F$ ,  $(\mu)$  y  $(\sigma) > 0$  son la ubicación y los parámetros de escala respectivamente.

Inferencia sobre la base de la distribución GVE, o versiones de reparametrizadas, forman la base de la teoría del valor extremo clásico. La distribución GVE es ajustada a series de datos de observaciones máximas anuales. La limitación de la GEV para el modelado de bloques máximos restringe su aplicación si otros datos están disponibles. Este es el caso, por ejemplo, con los datos de huracanes simulados. Caracterizaciones alternativas de los procesos del extremo han llevado a procedimientos de inferencia que puede modelar más datos que el de bloque de máximos. Se utiliza la siguiente caracterización de cola de F, representada por:

$$\Pr(X_i > u + x | X_i > u) \approx \left[ 1 + \xi * \frac{x}{\sigma^*} \right]^{-\frac{1}{\xi^*}} \quad (16)$$

Para grandes umbrales  $u$ . Esto se conoce como la distribución de Pareto Generalizadas (GPD). Tomando el límite  $\xi \rightarrow 0$  da la distribución exponencial como un caso especial. La ventaja de esta representación es que la inferencia puede estar basada en todos los datos que son grandes en el sentido de que se supere el máxima umbral  $u$ .

Existe una consistencia entre las representaciones GEV Y GPD: si se aplica la ecuación 3 para los parámetros  $\sigma^*$  y  $\xi^*$ , y un "año" consiste en N observaciones independientes  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$ , de tal modo que  $M_N = \max\{Y_1, Y_2, \dots, Y_N\}$ , entonces la distribución límite de  $M_N$  es GEV,  $(\mu, \sigma, \xi)$ , con los siguientes parámetros:

$$\sigma^* = \sigma + \xi (u - \mu) \quad (17)$$

$$\xi^* = \xi \quad (18)$$

Un tercer parámetro en la especificación del modelo GPD es la tasa de excedencia de  $u$ ,  $\lambda = (P X_i > u)$ , que está relacionado con los parámetros del GEV

$$\lambda = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{N} \left[ 1 + \xi \left( \frac{u - \mu}{\mu} \right) \right]^{-\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (19)$$

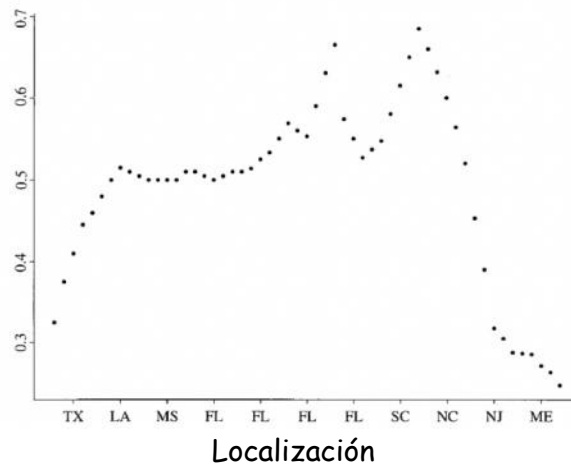
Desde que las huracanes son simulados, el cálculo de probabilidad de eventos extremos en un periodo determinado, requiere estimaciones de la tasa anual de ocurrencia de huracanes a. Batts et al., obtuvo esta estimación para cada puesto de milla estudiado mediante el cálculo de frecuencia de tormentas observadas en un segmento de 470 Km costa arriba y a 370 km costa abajo desde la ubicación de interés de los registros empíricos. Un diagrama de estas estimaciones y su localización se muestra en la figura 4.1.15.

La tasa de intersección media de cualquier nivel  $x(>u)$  está dado por  $\lambda \alpha \left\{ 1 + \xi^* \frac{x-u}{\sigma^*} \right\}^{-\frac{1}{\xi^*}}$ . Haciendo esto igual a  $1/n$  obtenemos el nivel del año de retorno "n" con:

$$q_n = u + \frac{\sigma^*}{\xi^*} \{ (\lambda \alpha n)^{\xi^*} - 1 \} \quad (20)$$

Hay una gran variedad de métodos para ajustar el modelo GPD a los datos. Simiu et al. (1996) utiliza un método basado en estadísticas de orden así como Haan (1994). Aquí se utiliza la similitud máxima, un procedimiento óptimo para una serie de datos grandes. De la ecuación (16) para cualquier  $X$  que siga un umbral  $u$  arriba de GPD con parámetros  $\sigma^*$  y  $\xi^*$ :

$$Pr\{X < x\} = 1 - \lambda \left[ 1 + \xi^* \frac{x}{\sigma^*} \right]^{-\frac{1}{\xi^*}} \quad (x < u) \quad (21)$$



**Figura 4.1.15.** Tasa anual de ocurrencia de huracanes,  $\alpha$ , contra localización  
Con densidad

$$h(x) = \frac{\lambda}{\sigma^*} \left[ 1 + \xi^* \frac{x}{\sigma^*} \right]^{-1 \left( 1 + \frac{1}{\xi^*} \right)} \quad (22)$$

Si los datos  $X_1, \dots, X_u$  exceden "u", la similitud de los parámetros  $\sigma^*$  y  $\xi^*$  están dados por:

$$L(\sigma^*, \xi^*) = \prod_{i=1}^{n_u} h(x_i) \quad (23)$$

con  $h$  definida en la ecuación (22). Maximizando (23) respecto a  $\sigma^*$  y  $\xi^*$  se obtiene el estimado de similitud máximo de estos parámetros. Al sustituir los estimados de  $\lambda$ ,  $\sigma^*$  y  $\xi^*$  en la ecuación (20) obtenemos el estimado de similitud máximo para un nivel de retorno "n".

Este procedimiento asume que un umbral "u" se ha identificado y que para la excedencia de "u" se ha modelado correctamente con la distribución GPD. La determinación de "u" debe ser lo

suficientemente alta para que los argumentos asintóticos del modelo (20) tengan fundamento, pero lo suficientemente bajo para permitir que la mayor cantidad de datos posibles sean incluidos en la inferencia. Si el modelo (20) es válido, entonces:

$$E(X - u | X > u) = \frac{\sigma^* + \xi^* u}{1 - \xi^*} \quad (24)$$

con  $\xi^* < 1$ .

Si el modelo GPD es válido en un umbral "u", entonces debería ser válido para cualquier umbral V mayor a "u", un diagrama de la muestra media de excedencias de "u" contra "u" debería ser lineal a mayor nivel de donde el argumento asintótico es válido. La inclinación e intercepción de esa línea da estimaciones simples de  $\xi^* / ((1 - \xi^*))$  y  $\sigma^* / (1 - \xi^*)$  respectivamente. Este es un diagrama residual de vida media (Davidson y Smith, 1990).

## 4.2 Precipitaciones

### Método media aritmética

Es el método más simple para obtener la precipitación media sobre una cuenca; consiste en efectuar un promedio aritmético de las cantidades de lluvia medidas en dichas áreas. Este método se recomienda en: regiones planas, con estaciones distribuidas uniformemente, con elevado número de pluviómetros y donde el gradiente de precipitación tenga una variación menor al 10% con respecto a la media.

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (25)$$

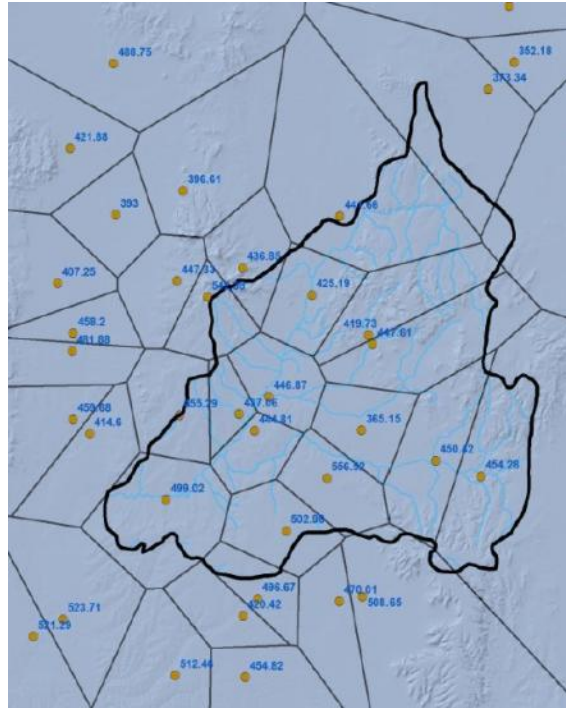
"n" donde  $P_i$  es la precipitación puntual en la estación "i" y "n" el número de estaciones dentro de los límites de la cuenca en estudio.

### Polígonos de Thiessen

El método asigna a cada estación un peso proporcional a su área de influencia, la cual se define para cada estación de la siguiente manera:

- Todas las estaciones contiguas se conectan mediante líneas rectas en tal forma que no hayan líneas interceptadas, es decir conformando triángulos
- En cada una de las líneas previamente dibujadas se trazarán mediatrices perpendiculares, las cuales se prolongarán hasta que se corten con otras mediatrices vecinas

Los puntos de cruce o intersección entre las mediatrices representan los puntos del polígono cuya superficie constituye el área de influencia de la estación que queda dentro de dicho polígono (figura 4.2.1).



**Figura 4.2.1. Polígonos de Thiessen**

El procedimiento supone que en el área de influencia, definida por la poligonal, ocurre el mismo valor de lluvia de aquel observado en la estación meteorológica más cercana. Los polígonos de Thiessen tienen la desventaja de proporcionar una distribución discontinua de la lluvia sobre la cuenca y de considerar una distribución homogénea dentro de cada polígono. Sin embargo, se considera que la ponderación que propone proporciona resultados rápidos y aceptables. La ponderación se determina como:

$$D = \frac{\sum_i a_i D_i}{A} \quad (26)$$

Donde:

$D$  = altura de precipitación media, mm.

$A_i$  = área de influencia de la estación, km<sup>2</sup>.

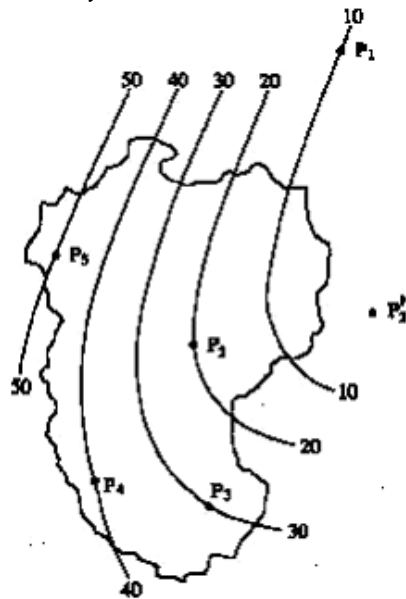
$D_i$  = precipitación media en la estación  $i$ , mm.

$A$  = área total de la cuenca, km<sup>2</sup>.

### Método de las isoyetas

Consiste en obtener, a partir de los datos de las estaciones meteorológicas, las líneas que unen los puntos con igual valor de precipitación (isoyetas). Este método, hasta donde la red de estaciones meteorológicas lo permita, proporciona un plano con la distribución real de la precipitación dentro de la cuenca.

Es el método más preciso, pues permite la consideración de los efectos orográficos en el cálculo de la lluvia media sobre la cuenca en estudio. Se basa en el trazado de curvas de igual precipitación, de la misma forma que se hace para estimar las curvas de nivel de un levantamiento topográfico (figura 4.2.2).



**Figura 4.2.2. Curvas de nivel**

Este método promedia la precipitación de dos isoyetas consecutivas y se le asigna un peso o ponderación proporcional a la sub-área entre las dos isoyetas.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) A_{i,i+1}}{\sum_{i=1}^n A_{i,i+1}} \quad (27)$$

Donde:

n = Número de curvas de igual precipitación

$P_i$  = Precipitación correspondiente a la curva de igual precipitación  $i$

$P_{i+1}$  = Precipitación correspondiente a la curva de igual precipitación  $i+1$

$A_{i,i+1}$  = Área entre las curvas de igual precipitación  $i$  e  $i+1$

### Método de Kriging

La utilización de kriging se conoce en el caso particular de las precipitaciones interpolación [28]. El supuesto básico es que los datos son un logro parcial de una función al azar. Otra premisa básica de Kriging, en su versión más sencilla, es la estacionalidad, en el sentido de que la media de se supone que debe ser el proceso constante e invariable con la ubicación espacial (Ecuación 28) y la varianza de la diferencia entre dos valores se supone que sólo depende de la distancia entre los puntos y no en la posición  $x$  (Ecuación 29). Estas hipótesis pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$E(Z(x+h) - Z(x)) = 0 \quad (28)$$

$$\text{Var}(Z(x+h) - Z(x)) = 2\gamma(h) \quad (29)$$

La función  $\gamma(h)$  se llama semivariograma y es de suponer que se conoce o bien se ha estimado a partir de los datos experimentales:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}(E[\{Z(x+h) - Z(x)\}^2]). \quad (30)$$

El objetivo de Kriging es para estimar los valores de la variable en algunos lugares ( $\vec{X}_0$ ) usando la información disponible de la variable ( $\vec{X}_i$ ) en otros lugares del dominio D. Para eso, tenemos que expresar  $\hat{Z}(\vec{X}_0)$  como una combinación lineal de los datos disponibles  $\hat{Z}(\vec{X}_i)$  (Ecuación 31).

El resultado óptimo se calcula con coeficientes de ponderación de tal forma que la estimación  $\hat{Z}(\vec{X}_0)$  de  $Z(\vec{X}_0)$  es imparcial, y la suma de cuadrados errores es minimizado. En la práctica, La aplicación del proceso de Kriging se realiza por medio de los siguientes pasos:

- la construcción del semivariograma experimental, haciendo uso de los datos disponibles muestra.
- colocación de un modelo teórico para el semivariograma, puntos obtenidos gracias a la optimización de la modelo a través de validación cruzada o de otro procedimiento alternativo.
- la determinación de los coeficientes a ser utilizados para resolver las ecuaciones Kriging resultan de la reducción al mínimo de la estimación de las varianzas:  $\text{Var}(\hat{Z}(\vec{X}_0) - Z(\vec{X}_0))$

Al reducir al mínimo la varianza y estimación de la media de error en la estimación a cero, se produciría el conjunto de la ecuación (32). Al resolver este sistema de ecuaciones,  $n + 1$  incógnitas ( $n$  de  $\lambda_i$  y  $\mu$ , se encuentran los multiplicadores de Lagrange), y de la ecuación (31),  $\hat{Z}(\vec{X}_0)$  se perfilarían:

$$\hat{Z}(\vec{X}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\vec{X}_i) \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i R(\vec{X}_i, \vec{X}_j) + \mu = R(\vec{X}_i, \vec{X}_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (32)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i R(\vec{X}_i, \vec{X}_j) + \mu = R(\vec{X}_i, \vec{X}_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (33)$$

En la ecuación (32) la  $R(\vec{X}_i, \vec{X}_j)$  es la función de covarianza Z en lugar  $(\vec{X}_i, \vec{X}_j)$  y se calcula a partir de la ecuación (33) de la siguiente manera:

$$R(\vec{X}_i, \vec{X}_j) = E \left[ Z(\vec{X}_i - m(\vec{X}_i)) (Z(\vec{X}_j) - m(\vec{X}_j)) \right] \quad (33)$$

En el que la media de las funciones  $\vec{X}_i, \vec{X}_j$  se definen como expectativas de Z en  $\vec{X}_i, \vec{X}_j$ , respectivamente (29).

$$m(\vec{X}_j) = E[Z(\vec{X}_j)], \quad m(\vec{X}_i) = E[Z(\vec{X}_i)], \quad (34)$$

Y, en un tipo de función estacionaria, tenemos:

$$\gamma(\vec{X}_i, \vec{X}_j) = \sigma^2 - R(\vec{X}_i, \vec{X}_j), \quad (35)$$

Donde:

$$\sigma^2 = R(0) \quad (36)$$

### Método de Cokriging

Este método es el más versátil y de rigurosa técnica estadística espacial de estimación de punto cuando tantos atributos primarios como secundarios (covariante) están disponibles en el conjunto de datos. Un análisis de Cokriging intenta mejorar la estimación de la primaria dependiente espacialmente, atributo al incorporar uno o más correlacionadas covariables.

Cuando queremos estimar un atributo  $Z_1(\vec{x}_0)$ , sabiendo  $Z_1(\vec{x})$  como el principal parámetro con la ayuda de otra variable auxiliar  $Z_2(\vec{x})$ , usamos el sistema Cokriging de ecuaciones. En Cokriging, la estimación de  $\hat{Z}_1(\vec{X}_0)$  se encuentra en la expresión :

$$\hat{Z}_1(\vec{X}_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} Z_1(\vec{X}_{1i}) + \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} Z_2(\vec{X}_{2j}) + \quad (37)$$

Donde  $Z_2(\vec{X}_{2j})$  son los valores experimentales de las variables auxiliares. Las variables  $\lambda_{1i}$  y  $\lambda_{2j}$  se obtienen como soluciones del sistema de ecuaciones Cokriging que resultan de la mejor estimación lineal imparcial en la que tenemos n puntos desde el parámetro principal y m puntos desde el auxiliar. Por lo que :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} = 1 \\ \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} = 0 \end{cases} \quad (38)$$

Donde  $i$  y  $j$  son variables falsas.

$$\begin{cases} 2 \sum_{i=1}^n \lambda_{1j} R_{11}(\vec{X}_{1i}, \vec{X}_{1j}) + 2 \sum_{j=1}^m \lambda_{2j} R_{12}(\vec{X}_{1i}, \vec{X}_{2j}) - 2R_{11}(\vec{X}_{1i}, \vec{X}_0) + 2\mu_1 = 0; & i = 1, 2, \dots, n. \\ 2 \sum_{i=1}^m \lambda_{2i} R_{22}(\vec{X}_{2i}, \vec{X}_{2j}) + 2 \sum_{i=1}^m \lambda_{1j} R_{12}(\vec{X}_{1i}, \vec{X}_{2j}) - 2R_{21}(\vec{X}_{2j}, \vec{X}_0) + 2\mu_2 = 0; & i = 1, 2, \dots, n. \end{cases} \quad (39)$$

Donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  son multiplicadores de Lagrange,  $R_{11}(h)$  es la función de covarianza la variable principal (precipitaciones),  $R_{22}(h)$  es la covarianza de la variable auxiliar, y  $R_{12}(h)$  es la varianza media de ambas variables. La solución de los  $n + m + 2$  sistemas de ecuaciones, obtendríamos  $n$  veces de  $\lambda_1$ ,  $m$  veces de  $\lambda_2$ ,  $\mu_1$  y  $\mu_2$ ; La ecuación (38) da la cantidad  $\hat{Z}_1(\vec{X}_0)$ .

### Método Gumbel

La función de valores extremos o también llamada función de distribución de Gumbel en hidrología, 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 función de distribución de probabilidad se representa con la siguiente ecuación (40) :

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (40)$$

La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \alpha e^{-\alpha(x-\beta)-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (41)$$

Donde:

$\alpha$ : parámetro de forma

$\beta$ : parámetro de escala

$x$ : variable aleatoria

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se estiman por el método de momentos:

$$\alpha = \frac{1.2825}{s} \quad (42)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45s \quad (43)$$

Donde:

$s$ : desviación estándar que se calcula con la ecuación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (44)$$

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



Calculada con la ecuación:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (45)$$

La distribución Gumbel se ocupa para estudiar gastos máximos anuales en un río o precipitaciones máximas anuales en un sitio; y por lo tanto para la determinación de avenidas de diseño.

Se puede definir una variable reducida "y" como se muestra en la ecuación :

$$y = -\alpha(x - \beta) \quad (46)$$

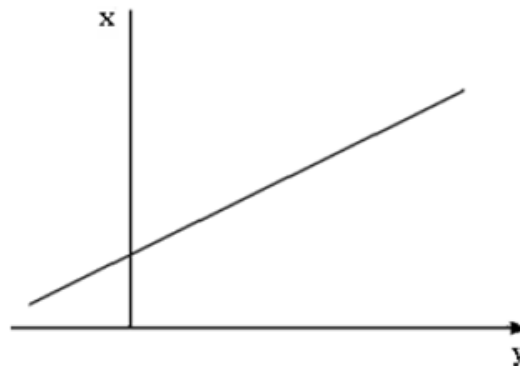
Si se sustituye la variable reducida en la función de distribución de probabilidad se tiene:

$$F(x) = e^{-e^y} \quad (47)$$

Despejando la y anterior, y aplicando el logaritmo natural en 2 ocasiones se obtiene:

$$y = -\text{Ln} \left[ \text{Ln} \left( \frac{1}{F(x)} \right) \right] \quad (48)$$

Los valores x y y se pueden graficar como una recta, como se muestra en la figura 4.2.3:



**Figura 4.2.3.** Distribucion Gumbel, variable x contra variable reducida y.

El estudio de Campos-Aranda, (2008), aplica el método Racional y la estrategia necesaria para identificar su coeficiente de escurrimiento asociado al periodo de retorno. En todo sistema hidrológico se conjugan o interrelacionan la entrada, el funcionamiento del sistema y su salida (Dooge,1973):

$$y(t) = h(t)\psi x(t) \quad (49)$$

Donde:

$\Psi$  indica que la función de operación  $h(t)$  y la función de entrada  $x(t)$  son combinadas para producir la función de salida  $y(t)$ .

Cuando se conocen dos de las tres funciones citadas, se puede obtener la desconocida; si es la salida, el problema es de predicción; si la función buscada es el funcionamiento del sistema se llama calibración o identificación; si es la entrada, el problema se conoce como detección.

El objetivo del estudio de Campos, 2008 fue identificar los coeficientes de escurrimiento para aplicar el método Racional en México, a partir del análisis probabilístico de las respuestas de ocho cuencas rurales de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), menores de 1,650 km<sup>2</sup> y de la estimación de sus probables tormentas de diseño, basadas en información pluviográfica y pluviométrica, así como en la estimación de su tiempo de concentración. El procesamiento de los coeficientes de escurrimiento identificados, permitió establecer un método regional, el cual se validó realizando predicciones en tres cuencas aforadas no usadas en la calibración previa, debido a que sus datos hidrométricos fueron considerados poco confiables

Para el método racional se utiliza la fórmula:

$$Q = FU * Ci * A \quad (50)$$

donde,  $Q$  es el gasto máximo,  $C$  el coeficiente de escurrimiento que es adimensional y equivalente al cociente del escurrimiento entre la lluvia,  $i$  la intensidad de la lluvia y  $A$  el área de cuenca. Cuando se utilizaban las unidades del sistema inglés: ft<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, in h<sup>-1</sup> y acres para  $Q$ ,  $i$  y  $A$ , el factor de unidades FU resultaba igual a 1.008 y se omite de la fórmula. En cambio en el sistema métrico con m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, mm h<sup>-1</sup> y km<sup>2</sup>, FU es igual a 0.278, es decir el recíproco de 3.6.

La intensidad de lluvia ( $i$ ) tiene una duración igual a la asignada a la tormenta de diseño, comúnmente el tiempo de concentración ( $T_c$ ) y un periodo de retorno igual al seleccionado para el gasto máximo calculado.

El  $T_c$  es un concepto idealizado definido como el lapso que requiere una gota de agua, que cae en el punto más lejano de la cuenca, para alcanzar la salida de ésta. Una definición mejor indica que es el tiempo desde que comenzó la lluvia en exceso hasta que todas las porciones de la cuenca de drenaje están contribuyendo simultáneamente al gasto en la salida (Pilgrim y Cordery, 1993).

Cuando una intensidad de lluvia  $i$  ocurre, durante un cierto lapso  $t$ , una parte  $a$  de cuenca contribuye con escurrimiento, la más cercana a su salida y en una proporción  $C$  de la lluvia. Al avanzar el tiempo  $t$  hasta llegar al  $T_c$ ,  $a$  se convierte en  $A$  y se llega al gasto máximo  $Q = C \cdot i \cdot A$ . Se considera que para duraciones menores del  $T_c$ , el efecto en la reducción del área de cuenca es mayor que el debido al aumento en la intensidad de la lluvia.

Para este propósito la fórmula del método Racional se expresa más explícitamente para un periodo de retorno  $T_r$  en años

$$Q_{Tr} = FU * C_{Tr} * i_{Tc}^{Tr} * A \quad (51)$$

Por lo cual:

$$C_{Tr} = \frac{Q_{Tr}}{FU * i_{Tc}^{Tr} * A} \quad (52)$$

El procedimiento para aplicar la ecuación (52) es:

- 1) En cada cuenca aforada seleccionada, se hace un análisis probabilístico de su registro de gastos máximos anual, para obtener los valores del  $T_r$  correspondientes a periodos de retorno ( $T_r$ ) de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.
- 2) Se estima el tiempo de concentración ( $T_c$ ) de cada cuenca, usando fórmulas empíricas (Kirpich, Témez, Giandotti, etc.). De ser posible, contrastar los resultados de tales fórmulas contra valores observados en las cuencas de la región, para adoptar un criterio a seguir.
- 3) Para cada cuenca se estiman sus valores correspondientes de la intensidad de lluvia de diseño, con base en la información pluviográfica o pluviométrica disponible.
- 4) Teniendo como dato el área de cuenca ( $A$ ) y los resultados de los pasos 1 y 3, se aplica la ecuación 4 para obtener los valores identificados de  $C_{Tr}$  en cada cuenca estudiada.
- 5) Se selecciona un valor base de  $C_{Tr}$  para relacionarlo con las características físicas y climáticas de las cuencas, o bien para formar mapas de curvas de isovalores a través de la región analizada.

Los valores de  $C_2$  o  $C_{10}$  son generalmente más convenientes porque presentan menor dispersión. Estos valores también pueden servir para obtener relaciones promedio [ $C_{Tr}/C_{10}$ ] aplicables únicamente en la región estudiada.

Escalante (1999), presentó las siguientes características físicas de las cuencas de las 42 estaciones hidrométricas de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa):

- 1) área de cuenca ( $A$ ) en  $km^2$ ;
- 2) longitud del colector principal ( $L_c$ ) en  $km$ ;
- 3) pendiente promedio del colector principal ( $S_c$ ), adimensional;
- 4) tiempo de concentración ( $T_c$ ) en horas, estimado con base en la fórmula de Kirpich.

Para la estimación del  $T_c$  se usó una recopilación de fórmulas empíricas (Campos, 2007) y algunas requieren el desnivel total ( $H$ ) en metros del colector principal. En este caso, para obtener una estimación de ese valor no reportado por Escalante (1999), el desnivel ( $h$ ) que

origina la pendiente  $Sc$  al ser aplicada a la longitud  $Lc$ , se multiplicó por un factor correctivo ( $Fc$ ):

$$H = Fc * (1000 * Lc) * Sc \quad (53)$$

El valor de  $Fc$  fue 1.90 que corresponde al promedio de los encontrados por Martínez (2000) y Campos (2007). Los valores de  $H$  estimados con la ecuación 54 y las magnitudes adoptadas para el  $Tc$  de las 11 cuencas seleccionadas (Cuadro 5.2.1), son muy similares a los obtenidos por Escalante (1999).

Las 11 series de gastos máximos anuales, correspondientes a las estaciones hidrométricas procesadas, proceden del CD No. 1 del sistema BANDAS (IMTA, 2003). Con base en el plano general de la Región Hidrológica No. 10 (SRH, 1975) se eligieron las estaciones pluviométricas base para cada cuenca seleccionada. La estación base debiera localizarse dentro de la cuenca, pero sólo ocurrió en la cuenca de Zopilote, de Badiraguato y de Guamuchil; las demás están cercanas o en el sitio de la estación hidrométrica. Para cada estación pluviométrica base se obtuvieron del sistema ERIC II (IMTA, 2000)

Se consideraron valores medianos obtenidos con la aplicación de 5 criterios del análisis probabilístico:

- 1) la transformación MIMEMA (Bethlahmy, 1977);
- 2) la transformación potencial (Chander *et al.*, 1978)
- 3) la distribución Log-Normal (Stedinger *et al.*, 1993);
- 4) la distribución Log-Pearson tipo III (Bobée y Ashkar, 1991);
- 5) la distribución GVE (Stedinger *et al.*, 1993), reportadas también por Campos 2006).

El procedimiento propuesto (Campos, 2000) para estimar la intensidad  $iTr Tc$  usa los mapas de curvas isoyetas disponibles para los Estados en México (SCT, 1990), en duraciones de 10, 30, 60, 120 y 240 min y periodos de retorno de 10, 25 y 50 años. Además se usa la información pluviométrica disponible en la forma de precipitación máxima diaria anual ( $PD$ ), conocida en la Comisión Nacional del Agua (IMTA, 2000) como precipitación máxima en 24 h ( $P24$ ).

En las páginas 385, 390 y 395 de SCT (1990) están los mapas de isoyetas de Sinaloa correspondientes a la intensidad en 60 min y periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, es decir,  $P1 10$ ,  $P1 25$  y  $P1 50$ . En el Cuadro 5.2.1 se presentan los valores de las lluvias de 1 h de duración y periodos de retorno 10, 25 y 50 años (de los mapas citados), correspondientes a los centros de gravedad de cada cuenca...

El procedimiento consiste en analizar probabilísticamente el registro disponible de  $PD$  para obtener las lluvias asociadas a periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, que al ser multiplicadas por 1.13 (Weiss, 1964) se convierten en  $PTr24$ , con las cuales se obtienen los cocientes  $R$  y  $F$  necesarios para aplicar la fórmula de Chen (1983):

$$R = P_1^{Tr} / P_{24}^{Tr} \quad (54)$$

$$R = P_1^{100} / P_{24}^{10} \quad (55)$$

Con el valor promedio de los tres cocientes  $R$  que se pueden evaluar para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, obtenemos los parámetros  $a, b, c$  de la fórmula de Chen para  $R < 0.60$  (Campos, 2000):

$$a = -2.297536 + 100.0389 \cdot R - 432.5438 \cdot R^2 + 1256.228 \cdot R^3 - 1028.902 \cdot R^4 \quad (56)$$

$$b = -9.845761 + 96.94864 \cdot R - 341.4349 \cdot R^2 + 757.9172 \cdot R^3 - 598.7461 \cdot R^4 \quad (57)$$

$$c = -0.06498345 + 5.069294 \cdot R - 16.08111 \cdot R^2 + 29.09596 \cdot R^3 - 20.06288 \cdot R^4 \quad (58)$$

La fórmula de Chen es:

$$P_t^{Tr} = \frac{aP_1^{10} \log(10^{2-F} Tr^{F-1})t}{60(t+b)^c} \quad (59)$$

Con  $P_t^{Tr}$  y  $P_1^{10}$  en mm,  $t$  en min ( $5 < t < 1440$ ) y  $Tr$  ( $2 < Tr < 100$ ) en años. Se hace  $t = Tc$  y se calcula  $P_t^{Tr}$  el cual se transforma a intensidad en  $mmh^{-1}t$  así obtener la intensidad buscada.

Aplicando la ecuación 53, se obtuvieron los valores del coeficiente de escurrimiento para cada periodo de retorno analizado.

Es común adoptar el valor del  $C_{10}$  para establecer relaciones adimensionales, ya que es muy estable. Para su estimación se calibró la fórmula de Témez (1991) para el coeficiente de escurrimiento del método Racional

$$C = \frac{(P_d - P_0) \cdot (P_d + 28 \cdot P_0)}{(P_d + 11 \cdot P_0)^2} \quad (60)$$

donde,  $P_d$  es la precipitación diaria (mm) con igual periodo de retorno que  $C$ , y  $P_0$  es la precipitación que no produce escurrimiento (según este autor varía de 24 a 35 mm).

A partir de los ocho valores de la  $Pd$  del Cuadro 3 y de  $C$  del Cuadro 5.2.4, ambos de periodo de retorno de 10 años ( $Pd_{10}$ ,  $C_{10}$ ), se despejaron las magnitudes de  $Po$ , necesarias para cumplir la ecuación 12 y éstas variaron de 31.7 a 62.5 mm. Tales magnitudes se relacionaron con los respectivos tiempos de concentración ( $Tc$ ) en horas y con  $Pd \neq Pd_{10}$  en milímetros para obtener la siguiente regresión lineal múltiple:

$$Po = -11.815 + 0.0768 \cdot Tc + 0.443 \cdot Pd_{10} \quad (61)$$

cuyo coeficiente de determinación fue 0.752, con un error estándar de la estimación de 7.6 mm. Entonces, con el  $Tc$  estimado y la precipitación diaria de periodo de retorno de 10 años ( $Pd_{10}$ ) en la estación pluviométrica base, se aplica la ecuación 13 para obtener la  $Po$  y con tal valor y  $Pd_{10}$  se estima  $C_{10}$  con la ecuación 59.

El método se demuestra aplicando las estaciones hidrométricas citadas con el siguiente procedimiento:

- 1) Localizar y cuantificar su área de cuenca ( $A$ ) en  $\text{km}^2$  y su tiempo de concentración ( $Tc$ ) en horas.
- 2) Localizar su centro de gravedad en los mapas de isoyetas de duración 1 h y periodos de retorno 10, 25 y 50 años, para obtener los valores respectivos.
- 3) Seleccionar una estación pluviométrica base y obtener su registro de lluvias máximas diarias anuales, para obtener las intensidades  $ir$   $Tc$  necesarias con base en la fórmula de Chen y el procedimiento expuesto, aplicando las ecuaciones 6 a 61
- 4) Estimar el valor de  $C_{10}$  y con ese valor y las relaciones regionales o finales del Cuadro 5.4 estimar los coeficientes de escurrimiento correspondientes a los periodos de retorno de 2, 5, 25, 50 y 100 años.

La uniformidad o consistencia numérica que muestran los coeficientes de escurrimiento del método Racional identificados para la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa; México), demuestran la aplicabilidad del procedimiento propuesto en cuencas rurales de hasta 1650  $\text{km}^2$ . La calibración mostrada para el método Racional y su aplicación para obtener predicciones en cuencas sin aforos o con registros cortos o poco confiables, puede ser considerada un método regional de estimación de crecientes, eficiente y confiable, en regiones donde la lluvia es el factor determinante en la génesis de las avenidas máximas. (Aranda 2008).

Pizarro y Gutiérrez, (2006), realizaron un estudio en la cuenca del río Guatapé, Colombia; desarrollaron un modelo en ArcGIS para el análisis de la distribución espacial de la precipitación para hacer la interpolación gráfica de la precipitación sobre la cuenca del río hasta el sitio de presa del proyecto hidroeléctrico utilizando datos puntuales de precipitación registrados en las estaciones pluviométricas.

Se realizaron 18 mapas para los eventos discretizados cada media hora con el análisis propuesto y se construyeron mapas con la cantidad de precipitación registrada cada media hora; combinándolos permite ver como se mueve el foco de precipitación tanto espacial como temporalmente. Con los datos se realizó un análisis estadístico para saber qué estación se comporta como punto de máxima precipitación y cuáles son las horas del día donde los eventos son más frecuentes.

Para la interpolación se llevaron a cabo los siguientes pasos:

Consultar y extraer de la base de datos los registros de precipitación y pasarlos a tablas en formato .txt.; esta información luego se convirtió a un formato .dbf para poderla cargar en ArcMap.

Mediante una herramienta de modelamiento asistido se construyó el modelo para realizar la interpolación de datos. Figura 4.2.4

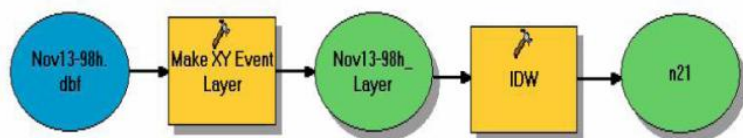


Figura 4.2.4

Se procedió a cargar en ArcMap los datos de precipitación desde la tabla .dbf, creando una capa con la ubicación de las estaciones pluviográficas una vez que se les asignaron las coordenadas X,Y.

Con el layer se realizó el método de interpolación IDW (inverse distance weighted) el resultado de la interpolación es un raster que posee los valores interpolados de la precipitación cada media hora. Figura 4.2.5

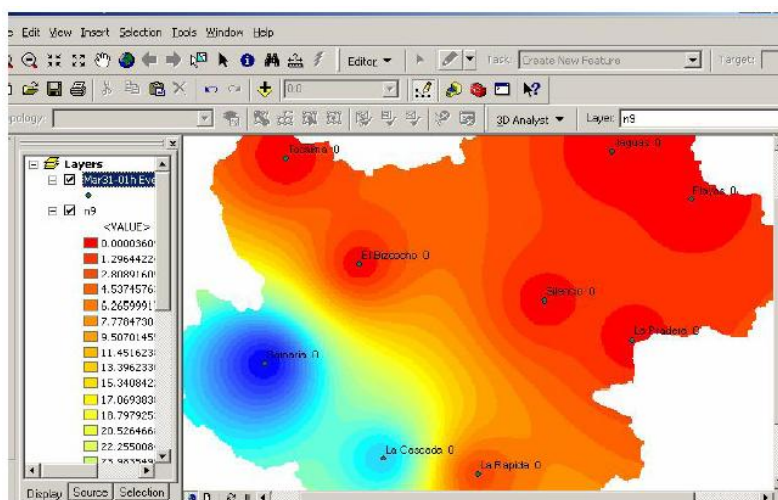


Figura 4.2.5 Imagen raster con valores de la interpolación.

Con los datos de las estaciones se realiza una base de datos que incluye la fecha del evento, hora inicial y final, duración, foco horario, foco total y foco inicial.

El estudio de Pizarro y Gutiérrez, (2006) sirve para analizar las precipitaciones que originan crecientes máximas en una cuenca y ver si existe algún patrón de distribución temporal y espacial.

### 4.3 Inundaciones

Baro et al., 2011, proponen un nuevo método para la definición de curvas de daños por inundación en función de la altura de lámina de agua con base en una función de distribución beta como modelo probabilístico. Las curvas fueron empleadas para la cuantificación de daños tangibles directos en zonas habitacionales de México. Las zonas se caracterizaron en función del índice de marginación urbana IM del Área Geo estadística Básica (AGEB), definiendo 5 tipos: IM muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

El estudio realizado por Baro et al. (2011) muestra que las inundaciones en esta cuenca están asociadas a los huracanes del océano Atlántico y del Pacífico, se consideran repentinas pues no existe la capacidad instalada para dar respuesta en el tiempo de la cota máxima del tirante de agua (Kobiyama y Fasbris- Goerl, 2007).

Para el método estudiado por Baro et al, 2011), se requirió primero de una base de datos para soportar el análisis de determinación de los tipos, severidad y localización de daños causados por la inundación. Los datos incluyen la magnitud de los caudales del río para diferentes periodos de retorno y las alturas de lámina de agua alcanzados; con la ayuda de un modelo de elevación digital del terreno y con los tirantes de agua, se logra delimitar las zonas inundadas.

Para la caracterización de zonas habitacionales inundadas se tomaron los datos proporcionados por el INEGI, CONAPO y AGEB; con los datos estadísticos se hace un reconocimiento de campo, número de viviendas, tipo de bienes y tipo de AGEB según índice de marginación.

Para calcular los daños por pérdidas producidas por el contacto físico con el agua, Bero et al, 2011, construyeron curvas de daños potenciales, que muestran la relación de la altura de lámina de agua (o profundidad de la inundación) con los daños económicos provocados.

Para cada vivienda ubicada en un AGEB con un IM dado se le asignaron bienes con valores promedio estimados, con esto se podrá analizar el porcentaje de afectación en cada uno de los bienes como una función de la altura de la lámina de agua potencialmente alcanzada.

Baro et al, 2006 definieron para cada tipo AGEB una familia de curvas de daños por inundación; las curvas de costo máximo y mínimo fueron construidas con modelos matemáticos



de tipo regresivo como función del IM del AGEB donde se ubica la vivienda para el tirante de agua alcanzado; su empleo brinda la estimación de los daños económicos.

En el estudio se identificaron 125 AGEB'S con un IM muy alto, 126 con nivel alto, 106 de nivel medio, 65 de IM bajo y 29 con nivel muy bajo. En base a esto se elaboró una base de datos en función del IM, donde se incluyó número de identificación del AGEB y el número de viviendas habitadas, así como los bienes existentes.

Al definir los bienes existentes en la vivienda para un AGEB dado, así como su valor monetario, se determinó el porcentaje de afectación de los bienes en función del nivel alcanzado del agua dentro de la vivienda. Este análisis ayuda a tener una cuantificación más realista del valor del daño producido por el contacto directo con el agua.

Posteriormente se grafican los costos estimados versus la altura de lámina de agua, y se obtienen 3 curvas: la de costo máximo, costo mínimo y costo probable.

Para el caso de una vivienda en un AGEB de IM muy alto, primero se identificó las AGEBS que se encuentran en zonas inundables de la cuenca en estudio, se determinó el número de viviendas habitadas y número de bienes existentes y se agregó un precio unitario a cada bien; este precio se multiplicó por el número de bienes existente en cada AGEB y el valor obtenido representó el valor total del bien para cada AGEB identificada.

A continuación se establecieron los intervalos de altura de lámina de agua para definir así el porcentaje de afectación que pudiera tener cada uno de los bienes. En el caso de electrodomésticos se consideró la altura de ubicación del motor, en el caso de los muebles, sus dimensiones promedio. Las alturas utilizadas fueron de 0.10, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 y 2.5m.

Al tener asignados los porcentajes de afectación, se calculó el valor del daño en base al costo de cada bien, obteniendo el valor en pesos de los daños económicos para cada altura de lámina de agua alcanzada y para cada AGEB identificada. Los daños se convirtieron en número de salarios mínimos, tomando en cuenta que el promedio nacional de este salario equivale a \$53.19 pesos para el año 2009. El monto obtenido se dividió por el número de viviendas habitadas en cada AGEB para obtener el valor de daños para una vivienda.

Con la información obtenida, se construyó un modelo matemático de tipo regresivo, el modelo elegido fue el que presentó el valor más alto de coeficiente de determinación  $R^2$  que correspondió a un ajuste logarítmico, con un coeficiente de determinación de 0.82 para el caso de costo máximo, 0.72 para el costo mínimo y 0.74 para un costo probable. La ecuación del modelo logarítmico permite calcular los daños potenciales directos en número de salarios mínimos para una altura de lámina dada.

La gráfica utiliza como unidades de medida el número de salarios mínimo, de esta manera no pierde su validez con el tiempo y se puede aplicar en cualquier año así al actualizar el valor del

salario mínimo se actualizan de forma automática las curvas encontradas. A partir de una altura de 0.5 m los bienes son afectados prácticamente en un 100%.

Este método ayuda a evaluar el impacto económico tangible directo causado por una inundación; es considerado de utilidad para instituciones públicas y privadas que intervienen en la gestión de eventos hidrometeorológicos extremos, en la toma de decisiones para las etapas de prevención, emergencia y reconstrucción.

Sánchez y Martínez, (2012) aplican una metodología para estimar la peligrosidad pluvial a través de un índice cuantitativo distribuido espacialmente y calculado a partir de un análisis de multi-criterio y de la ponderación de diversos factores que permitan una evaluación objetiva de la cuenca urbana mediante la comparación entre áreas críticas y la valoración de escenarios sobre la misma región.

La zona de estudio fue una cuenca en la Ciudad de Coro, capital de Estado de Falcón; se implementó un modelo de simulación integrado y calibrado para obtener las profundidades y velocidades máximas de inundación en la red de calles, se tomó en cuenta la metodología propuesta por Zonensein et al., (2008).

El dominio del Índice de peligrosidad (PI) y la escala afectan directamente a cada indicador debido a sus distintas naturaleza y unidades, por eso es indispensable que sean estandarizados o convertidos a una escala común, de allí la importancia del proceso de normalización. Se plantearon modificaciones en las escalas de normalización del índice de profundidad denominado (ICot) manteniendo intactos los criterios de normalización para el resto de los indicadores de peligrosidad y se lograron mejores niveles de bondad en los ajustes propuestos por el mencionado autor para la normalización del índice (IFP). Posteriormente, se definieron los pesos para cada indicador a partir de 3 escenarios críticos, que fueron analizados en función de los objetivos propuestos.

Se optó por implementar un método basado en la ponderación mixta y fundamentada en las técnicas de análisis multicriterio propuestas por Zonensein et al. (2008)

$$PI = \sum_{i=1}^n I_i P_i \quad (62)$$

Donde:

$I_i$ , representa el indicador previamente normalizado, que compone el índice  $PI$ , varía en un rango de 0 como extremo mínimo y 100 como extremo máximo. En este caso se consideraron 3 índices:  $ICot$  (Índice de Profundidad de inundación),  $IFV$  (Índice de velocidad),  $IFP$  (Índice de Permanencia),  $n$ : número total de indicadores que componen el índice  $PI$ ; y  $P_i$  peso asociado al índice  $I_i$ , asignado en función de la importancia relativa. Por razones prácticas et al, variaron algunas de las nomenclaturas utilizadas por (Zonensein et al. 2008),

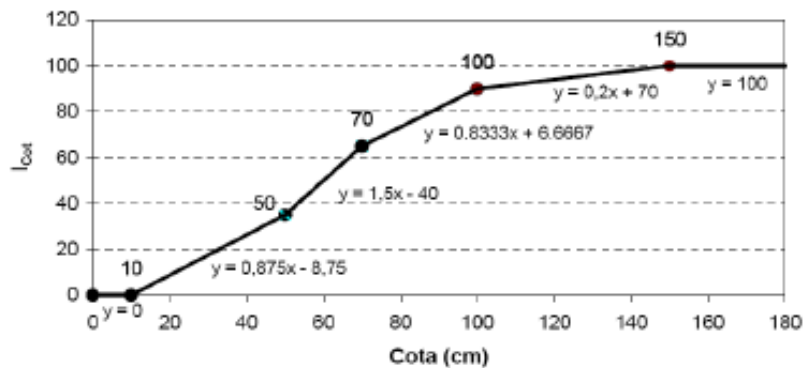
La peligrosidad pluvial depende de tres factores, la profundidad del flujo o lámina de agua en la calle, la velocidad y la duración de la inundación por encima de cierto calado. Esta hipótesis fue probada analizando 3 escenarios y asignándole pesos diferentes a los indicadores correspondientes. La ecuación formulada por Zonensein et al. (2008) para el cálculo de la peligrosidad es la siguiente:

$$PI = I_{Cot}P_{Cot} + I_{FV}P_{FV} + I_{FP}P_{FP} \quad (63)$$

Estimación del indicador de profundidad ( $I_{Cot}$ ): el criterio más utilizado para definir si en una determinada calle, no existe peligrosidad asociada al flujo de aguas pluviales para una probabilidad de ocurrencia dada, es el siguiente: tirante en calle  $y <$  altura de la acera (Dawson et al. 2008). La normalización de este indicador se fundamenta en criterio de expertos y observaciones de campo, simplificada por franjas sobre la base de un análisis detallado de daños posibles (absoluto y relativo) solamente en el intervalo  $y < 1$  m.

$$I_{Cot}(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } y \leq 10 \text{ cm} \\ 2.5y - 25 & \text{si } 10 \leq y \leq 50 \text{ cm} \\ 100 & \text{si } y > 50 \text{ cm} \end{cases} \quad (64)$$

El límite superior de la primera función está definida por la altura de la acera, luego la siguiente función cubre la franja que va desde 10 cm hasta 50 cm, en este nivel ya la inundación en la calle es total, y el flujo es capaz de afectar patios de fachada y estacionamientos, además en este nivel se comienza a interrumpir el tráfico regular de vehículos y sobre todo de personas. Se asume que de allí en adelante, cualquier lámina de agua superior a 50 cm invade completamente las viviendas y edificaciones con los respectivos daños que esto conlleva. En definitiva, se calculó este indicador comparando la función mostrada en la ecuación (70) con la curva normalizada propuesta por Zonensein et al. (2008) en la figura 4.3.1.



**Figura 4.3.1.** Curva de normalización para el índice de profundidad con interpolación lineal entre límites. (Zonensein et al. 2008)

Estimación del indicador de velocidad o número del producto ( $I_{FV}$ ): los criterios de peligrosidad basados en la consideración conjunta de calados y velocidades están ampliamente

reportados en (FEMA 1979). Desde el punto de vista experimental, destacan los estudios experimentales publicados por ARMC (2000), Belleudy (2004) y el de Russo et al. (2011).

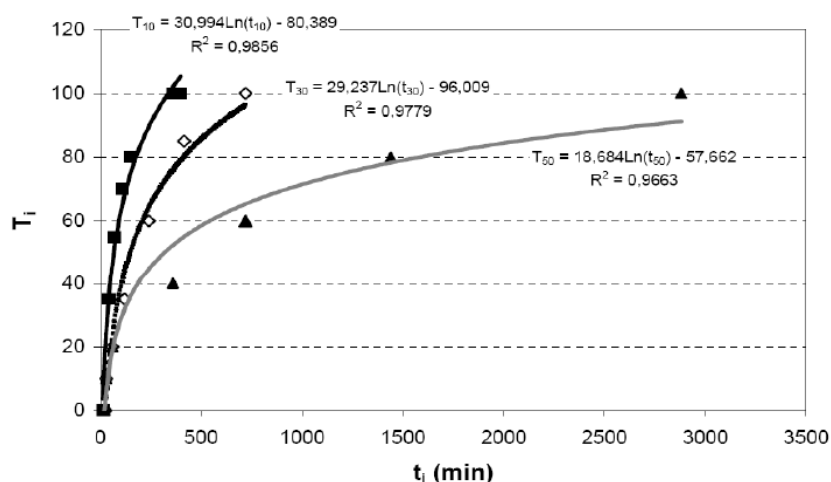
Sin embargo, el primero que utilizó el término "número del producto" fueron Abt y Wittler (1989), para incluir el efecto combinado de las fuerzas hidrodinámicas ejercidas por el vector velocidad y la profundidad ( $v.y$ ) sobre la estabilidad en los individuos. En base a estos estudios y a la normalización de este indicador, propuestos por Zonensein et al. (2008) se elaboró la función de normalización por franjas con interpolación lineal para este indicador:

$$\begin{array}{ll}
 0 & \text{si } vy \leq 0.10m^2/s \\
 266.67vy - 26.67 & \text{si } 0.10m^2/s \leq vy \leq 0.25m^2/s \\
 44.4vy + 28.29 & \text{si } 0.25m^2/s \leq vy \leq 0.70m^2/s \\
 I_{FV}(y) = 25vy + 42.5 & \text{si } 0.70m^2/s \leq vy \leq 1.50 m^2/s \\
 15vy + 57.5 & \text{si } 1.50m^2/s \leq vy \leq 2.50m^2/s \\
 1.1vy + 92.2 & \text{si } 2.50m^2/s \leq vy \leq 7.0 m^2/s \\
 100 & \text{si } vy > 7.0 m^2/s
 \end{array} \quad (65)$$

Estimación del indicador de duración de inundación ( $I_{FP}$ ): considera los minutos / horas / días/ que una calle permanece inundada al menos ciertos cm de profundidad, considerando 3 elementos en riesgo: los peatones, que son los primeros en verse afectados ya que las zonas inundadas con pequeñas láminas de agua son suficientes para dificultar o impedir su tránsito regular por las aceras, en segundo lugar los vehículos que al circular por zonas de encharcamiento causan tranques en el tráfico e incrementan el peligro de que se presente el fenómeno de "hidroplaneo", y por último las viviendas o edificaciones expuestas frontalmente a la calle. Para obtener el valor de este indicador se definen los tiempos indicativos de efectos potenciales sobre peatones ( $t_{10}$ ), el tráfico ( $t_{30}$ ) y las viviendas ( $t_{50}$ ). Éstos se refieren al tiempo en minutos durante el cual un área permanece inundada con una lámina mayor de 10 cm, 30 cm y 50 cm respectivamente. Se destaca que para un hidrograma característico (modelo campana) transitando en cualquier calle de la cuenca, e incluso para cualquier lámina superior a 50 cm, se cumple que  $t_{10} > t_{30} > t_{50}$ . La normalización formulada por Zonensein et al. (2008), en este caso fue por franjas de tipo logarítmicas (figura 4.3.2).

Los parámetros sugeridos por Zonensein et al. (2008) para cada función ajustada se muestran en la gráfica:

$$I_{FP} = \alpha_1(\alpha_1 \ln(t_{10}) - b_1) + \alpha_2(\alpha_2 \ln(t_{30}) - b_2) + \alpha_3(\alpha_3 \ln(t_{50}) - b_3) \quad (66)$$

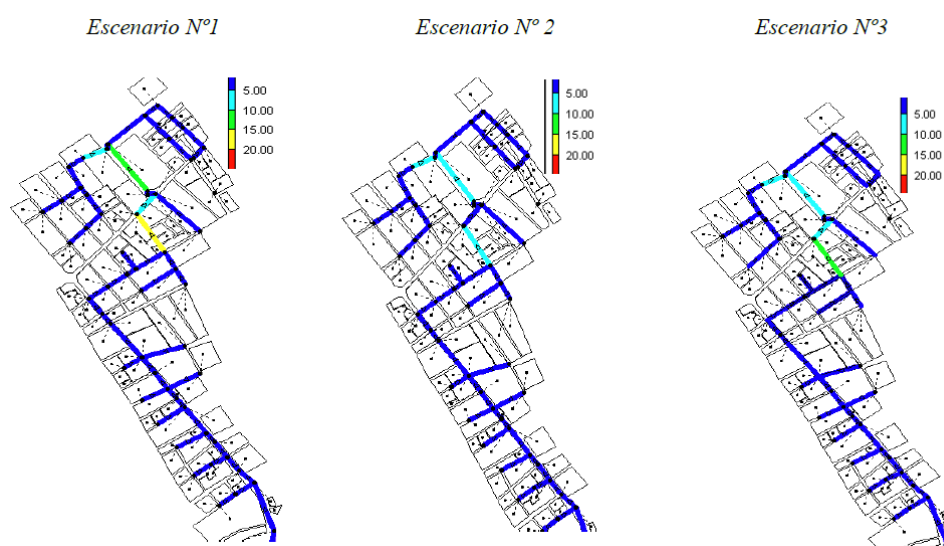


**Figura 4.3.2. Normalización de Zonensen**

Sánchez y Méndez 2009, construyeron el modelo digital de elevaciones de la subcuenca seleccionada. Se elaboraron mapas temáticos para cada indicador y así lograr obtener la distribución espacial.

En el primer escenario, se supone que *ICot* es extremadamente más importante que *IFP* pero un poco menos importante que *IFV*, que a su vez se considera más importante que *IFP*. Para el segundo escenario, se acepta que *ICot* es un poco más importante que *IFP* y un poco menos importante que *IFV*, que a su vez se considera más importante que *IFP*. Finalmente, para el tercer escenario se adjudica igual importancia a los tres indicadores.

Se observa que en los mapas de peligrosidad para los tres escenarios (figura 4.3.3), existe coincidencia en la identificación de zonas con mayor peligro



**Figura 4.3.3. Mapas de peligrosidad**

Con la metodología se puede conocer la distribución espacial del indicador de peligrosidad pluvial asociada al flujo superficial en las calles de la zona de estudio. Esto les sirve a los gestores del sistema de drenaje pluvial urbano para el diseño estructural.

Posada y Vega (2010), también realizaron una evaluación de las zonas que pueden llegar a inundarse en Campeche debido al efecto de un viento norte bajo 2 escenarios diferentes del nivel medio del mar.

La evaluación de la inundación en zonas costeras se realiza por medio de la aplicación de un modelo numérico que resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical, que además tiene la capacidad de simular el secado y mojado de celdas durante la evaluación de casos hidrodinámicos. Este modelo se aplicará al dominio topo batimétrico real de la ciudad de Campeche.

El modelo numérico propuesto por Posada (2008), el cual resuelve sobre una malla jerárquica de tipo Quadtree las ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical con un método de volumen finito por medio de una aproximación numérica de tipo Godunov de segundo orden, se utiliza el solucionador de Riemman para resolver la aproximación de Roe con la cual se determinan los flujos no viscosos, la integración en el tiempo se realiza con el método de primer orden de Adams-Bashforth.

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto a 1980-1999)		Aumento en el nivel medio del mar (m en 2090-2099 respecto a 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo obtenido a partir de modelos, excluidos los cambios climáticos dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo
Concentraciones constantes en los niveles del año 2000	0.6	0.3 – 0.9	No disponible
Escenario B1	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
Escenario A1T	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
Escenario B2	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
Escenario A1B	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
Escenario A2	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
Escenario A1FI	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

El modelo utilizado por Posada y Vega consta de un sistema de mallado de tipo jerárquico, estas mallas permiten crear sistemas de celdas no estructurados que almacenan la información con una estructura similar a la de un árbol genealógico (Rogers, 2001); Las mallas son de tipo Quadtree, ya que se aplican a un dominio bidimensional, si se aplicara a un modelo tridimensional se denominaría Octree. Estas mallas son irregulares debido a que contienen

celdas de diferentes tamaños en todo el dominio de cálculo, con lo cual se logra una alta definición en las zonas de interés y baja en otras partes del dominio que no son tan importantes de conocer al detalle. Para realizar este tipo de mallado jerárquico, son necesarios dos pasos: generación inicial y Regularización, los cuales se describen en Posada (2008).

Al ser un modelo bidimensional, las variables que se cuantifican para cada celda del dominio de Cálculo son: la superficie libre (un valor positivo indica una posición por encima del nivel de Referencia, que para este trabajo es el nivel medio del mar), y las velocidades promediadas en la vertical, tanto para las abscisas (eje X) como para las ordenadas (eje Y), al ser tres incógnitas se deben resolver igual número de ecuaciones, las cuales son:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (67)$$

Donde:

$$H = h + \eta$$

$\eta$  sobreelevación de la superficie libre respecto al nivel medio del mar, (m).

$h$  profundidad del fondo respecto al nivel medio del mar, (m).

$U$  Velocidad media en la dirección X, (m/s).

$V$  Velocidad media en la dirección Y, (m/s).

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(U^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(UVH)}{\partial y} = fVH - gH \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) + H \varepsilon_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + 2H \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (68)$$

### f factor de Coriolis

$\varepsilon_h$  coeficiente de viscosidad de remolino

$\tau_{xz(\eta)}$  Esfuerzo debido al viento en la dirección X

$\tau_{xz(-h)}$  Esfuerzo debido al fondo en la dirección X

Ecuación de cantidad de movimiento, dirección y

$$\frac{\partial VH}{\partial t} + \frac{\partial(UVH)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2H)}{\partial y} = -fUH - gH \frac{\partial n}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_{xz(\eta)} - \tau_{xz(-h)}) + H \varepsilon_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) + 2H \frac{\partial V}{\partial y} \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial y} + H \frac{\partial \varepsilon_h}{\partial x} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (69)$$

### Ecuaciones complementarias

Factor de Coriolis se calcula con la expresión:

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (70)$$

Donde:

$$\omega = 7.3 \times 10^{-5} \text{ rad/s (velocidad de la tierra)}$$

$$\varphi \text{ latitud de la zona de estudio}$$

Fricción de fondo. Los esfuerzos debidos a la fricción del fondo del mar se evalúan con la expresión:

$$\tau_{xz(-h)} = \rho_o C_D |\tilde{U}| U \quad (71)$$

$\rho_o$  es la densidad del agua de mar

$C_D$  coeficiente de arrastre que es función del coeficiente de Chezy

$$|\tilde{U}| = \sqrt{U^2 + V^2} \quad \text{módulo de la velocidad}$$

El coeficiente de arrastre se puede calcular con :

$$C_D = \frac{g}{c^2} \quad (72)$$

donde se calcula con la fórmula de Colebrook-White,  $C = 181 \log(12H/K_s)$ :  $K_s$  es un parámetro que depende de la rugosidad del fondo marino, el modelo utiliza  $K_s = 0.2$ , como lo propone Castañedo (2000).

### Esfuerzo debido al viento

Los esfuerzos debido al viento son de la forma:

$$\tau_{xz(\eta)} = C_\alpha \rho_\alpha W_x W \quad (73)$$

$C_\alpha$  con valor de 0.0026, coeficiente de arrastre del viento (Falconer, 1994)

$\rho_\alpha$  densidad del aire

$W$  velocidad del viento a 10m sobre el nivel del mar

$W_x$   $W \cos \theta$ , componente en X del viento

$\theta$  Ángulo de incidencia del viento respecto al eje X

### Coeficiente de viscosidad de remolino

El modelo tiene la opción de considerar un valor constante o de calcular uno variable con la expresión:

$$\varepsilon_k = I^2 \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (74)$$

Donde:

$$I^2 = C_s \Delta_x \Delta_y \quad (75)$$



Este modelo utiliza para  $C$  el sugerido por Castañedo (2000) que es 0.05, pero se puede utilizar el indicado por Blumberg y Mellor de 0.1 (1987).

Para poder representar el fenómeno de inundación por marea de tormenta, el modelo numérico debe permitir que las celdas se sequen o inunden dependiendo del caso.

Para el cálculo de las velocidades se utiliza la menor profundidad entre 2 celdas vecinas, se evalúa si una celda está seca o húmeda utilizando la profundidad y la superficie libre en el centro de ésta.

Para calcular el coeficiente de fricción  $C$  de Chezy se utiliza la expresión:

$$C = 18 \log \left( \frac{12H}{k_s} \right) \quad (76)$$

Donde  $k_1$  es la altura de la rugosidad del lecho marino.

Por ejemplo, si  $K_s = 0.03\text{m}$ , cuando  $H$  sea menor a  $0.003\text{m}$  el coeficiente  $C$  será de 1.5, lo cual convierte la fricción en un valor muy alto, obligando a que las velocidades del flujo sean casi equivalentes a cero. Se implementan 3 límites para cada paso de tiempo, se verifica la altura del agua  $H_i$  en cada celda del dominio y en función de su calado se realiza el secado o mojado de la celda de la siguiente manera:

Si  $H_i < H_{\text{seco}}$ ; la celda se considera seca, se anulan las velocidades y el valor de la superficie libre es igual a cero, esta celda se convierte entonces en tierra.

Si  $H_i > H_{\text{seco}}$ ; la celda entra al dominio de cálculo, las velocidades se consideran iguales a cero y su superficie libre obtiene el valor de 10% de la superficie libre de la celda vecina.

Los valores de los límites de inundación y secado son :  $H_{\text{seco}}=0.1K_s$  y  $H_{\text{inund}}=0.5K_s$

## 4.4. Sequías

### Índices de sequías

Son funciones continuas que relacionan los valores de precipitación y otras variables hidrometeorológicas, de tal manera de caracterizar las sequías, a través de la comparación con umbrales predeterminados para el método. Es importante tener en cuenta la escala de tiempo y espacial utilizada.

### Índice PDI (Palmer Drought Index)

Se basa en las anomalías hídricas del balance hídrico seriado de Palmer y permite, entre otras aplicaciones, determinar periodos de sequias y excesos hídricos.

Los datos fundamentales para la determinación del índice son la precipitación y la evapotranspiración potencial.

Los Valores característicos del índice PDI son:

Valor PDI	Categoría de sequía
>4	Extremadamente húmedo
3.0 a 3.9	Muy húmedo
2.0 a 2.9	Moderadamente húmedo
1.0 a 1.9	Ligerament húmedo
0.5 a 0.9	Húmedo incipiente
-0.4 a 0.4	Normal
-0.5 a -0.9	Sequía incipiente
-1.0 a -1.9	Sequía reducida
-2.0 a -2.9	Sequía moderada
-3.0 a -3.9	Sequía severa
< -4.0	Sequia extrema

Palmer, a partir del balance hídrico desarrollado, obtiene la expresión:

$$X_i = X_{i-1} + Z_i / 3 - 0,103X_{i-1} \quad (77)$$

$$Z = dk \quad (78)$$

$$d = PE - P \quad (79)$$

$$k = (PE + R) / (P + L) \quad (80)$$

$X_i$ : Índice de sequía

$Z$ : Índice de anomalía hídrica

$d$ : Déficit hídrico

$k$ : Factor climático

$P$ : Precipitación

$PE$ : Evapotranspiración potencial

$R$ : Recarga

$L$ : Perdidas

### Índice SPI (Standardized Precipitation Index)

Considera las probabilidades de ocurrencia de precipitación para un periodo dado y se calcula comparando la precipitación acumulada total para una estación o región en particular durante un intervalo de tiempo específico, con el promedio de la precipitación acumulada para ese mismo intervalo a lo largo de toda la serie de registros.

Valores característicos del índice SPI:

Valor SPI Categoría de sequía	
>2.0	Extremadamente húmedo
1.99 a 1.50	Muy húmedo
1.49 a 1.00	Moderadamente húmedo
0.99 a -0.99	Normal
-1.00 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa
< -2.0	Sequía extrema

McKee et al., 1993, posibilita la medición de la sequía en distintas escalas temporales, tales como 3, 6, 12 y 24 meses, según el objetivo del estudio donde se aplica este índice de sequías.

Arreola - Navar, (2008), construyeron y analizaron 3 cronologías de *Pseudotsugamenziesii* con el fin de determinar las tendencias, productividad, y reconstruir sequías del pasado en las cronologías; analizar la correlación entre índices de crecimiento y la temperatura y precipitación; la correlación entre índices de crecimiento y el fenómeno del niño y reconstrucción del clima del pasado utilizando cronologías desarrolladas.

El índice de crecimiento radial estandarizado (ICRE) se estimó de la resta de la amplitud del anillo menos su promedio y se dividió por la desviación estándar. Se utilizaron los valores de temperatura y precipitación registrados por las estaciones climatológicas y los valores del ENSO (El Niño / Southern Oscillation) tomados del (NNOA-CIRES, 2004)

Utilizaron el índice de crecimiento estandarizado acumulado para magnificar y detectar las tendencias y patrones de las cronologías.

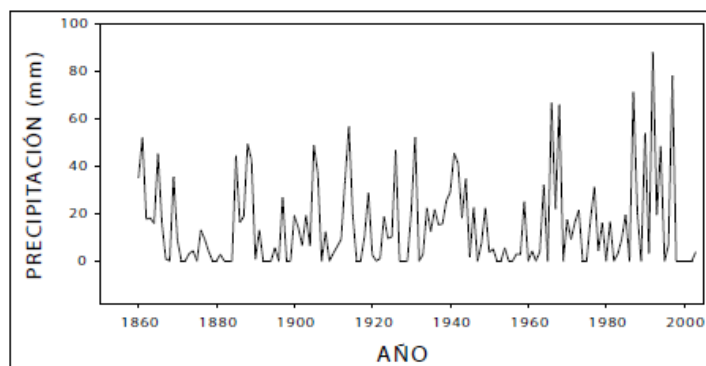
Por medio del análisis de regresión y correlación de datos anuales de temperatura y precipitación, se lograron examinar las tendencias del índice de crecimiento de las 3 cronologías con los factores de clima (temperatura, precipitación y fenómeno del niño).

En las gráficas de las cronologías estandarizadas acumuladas sobresalen claramente cuatro periodos de sequías: dos de duración prolongada y dos de duración corta. El primer periodo de sequía reconstruido se presentó entre 1880 y 1903, observándose una mayor temporalidad de la sequía en el sitio de La Marta (23 años) y menor en La Encantada (siete años). El segundo periodo de sequía se presentó entre 1907 y 1937. Esta sequía se observa con una mayor duración en La Encantada (30 años) seguida de La Marta (28 años). El tercer periodo seco se presentó durante la década de los años cincuenta permaneciendo hasta mediados de los ochenta en La Marta y La Encantada, y hasta 1963 en El Potosí, teniendo La Encantada la mayor temporalidad de la sequía (34 años). El cuarto periodo seco se presentó a finales de los noventa iniciando prácticamente en 1998, con una duración de cinco años en los tres sitios estudiados

Los resultados arrojados en el análisis de regresión revelan que la precipitación invernal se asocia adecuadamente con el ICRE, principalmente la precipitación que se presenta durante el periodo de invierno y parte inicial de la primavera (enero, febrero y marzo), lo cual indica que la variabilidad del ancho de los anillos de crecimiento recibe cierta influencia de la precipitación que se registra durante la dormancia o inmediatamente después de iniciar el crecimiento durante los primeros meses del año.

Las precipitaciones de finales de la primavera, verano y otoño no estuvieron relacionadas estadísticamente con el crecimiento radial, lo que se explica porque posiblemente el balance hidrológico de esta etapa es más negativo que durante la etapa tardía del invierno e inicio de la primavera.

En el transcurso de 1860 a 2003, se presentaron cuatro lapsos de tiempo con baja o nula precipitación invernal: 1. de 1871- 1885, 2. de 1892-1902, 3. de 1950-1963 y, 4. De 1998-2003, consistentes también con los periodos secos detectados; en la figura 4.4.1. También se pueden apreciar cuatro grupos anuales con más o menos buena precipitación. Éstos cubren un promedio de seis años en los periodos de 1860-1866, 1885-1889, 1939-1944 y 1990-1994 con una precipitación promedio de 28 mm, 34, 32 y 42, respectivamente



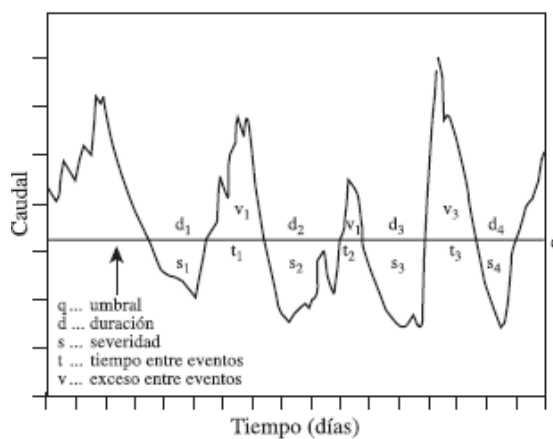
**Figura 4.4.1. Lapsos de Precipitación**

Las cronologías La Marta y La Encantada tienen una relación con el MEI muy similar en tiempos, mientras que El Potosí contrasta totalmente con esta tendencia.

Con los resultados de la correlación entre el ICRE y el MEI, se puede explicar que el crecimiento de los anillos de los árboles está relacionado con las condiciones climáticas que se presentan durante el fenómeno del ENSO en esta parte de México. Inviernos fríos y húmedos poseen un balance hidrológico positivo por periodos más largos de tiempo y esto ocasiona una mayor disponibilidad de agua para el crecimiento de los árboles. Estas condiciones climáticas son típicas durante la presencia de fenómenos de El Niño, como ha sido observado por Cavazos y Hastenrath (1992), por Méndez et al., (2008) para México y por Pavia y Badana (1998) para climas mediterráneos del noroeste de México. Relaciones positivas entre el ENSO y el crecimiento radial de los árboles han sido también reportadas en otros trabajos de investigación para México (Magaña et al., 1999; González et al., 2005)

Birkel et al, 2006, realizaron un estudio de la sequía hidrológica en Costa Rica; el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) proveyó los datos hidrológicos de diecisiete estaciones fluviométricas de su base de datos, para el periodo comprendido entre el año 1973 y el 2003. El área de las cuencas elegidas en este estudio varía entre 200 y 4767 km<sup>2</sup>. Las propiedades de sequía se calcularon para los datos de las estaciones que garantizan una cobertura regional y permite así realizar el análisis de tendencias.

Los eventos de sequía hidrológica fueron definidos por medio del método del "nivel de umbral", usando un valor de caudal específico (en este estudio: Q<sub>90</sub>) que supera o queda por debajo de cierto porcentaje determinado por una curva de duración. La aplicación de la teoría según Zelenhasic y Salvai (1987) del umbral a una serie de caudal diario (Figura 4.4.2) permite definir eventos de sequía en términos de duración  $d$  (días), volumen de déficit  $s$  (1000 m<sup>3</sup>) y el número de sequías ocurridas en un año ND (-). El umbral se define a través de la curva de duración y refleja el caudal (m<sup>3</sup>/s) que está superado o no en un porcentaje (Q<sub>90</sub> = 90 por ciento) de todo el tiempo.



**Figura 4.4.2. Aplicación de la teoría según Zelenhasic y Salvai (1987) del umbral a una serie de caudal diario**

De acuerdo con Tallaksen y Hisdal (1997), el tiempo entre dos eventos  $t$  y el criterio de exceso  $v$  tuvo que ser introducido para seleccionar eventos menores de poca duración y de poco déficit. Se usan eventos de sequía definidos para calcular varios índices de sequía en términos máximos de severidad en un año, como por ejemplo el índice de sequía de duración máxima anual, AMD en días, el déficit máximo anual, AMV en 1000 m<sup>3</sup> y la frecuencia (Número de sequías, ND).

Un método para detectar la existencia de sequía fue calculado mediante dichos índices para tratar de responder a la pregunta de si las sequías hidrológicas se han vuelto más frecuentes en Costa Rica (en el término del número de sequías ocurridas en un año, ND) y severas (en términos de duración, AMD y déficit, AMV). Hisdal, Stahl, Tallaksen y Demuth (2001) propusieron el método no-paramétrico de Mann - Kendall (MK) por la **Curtosis de datos** hidrológicos, es decir, la ocurrencia de pocos eventos extremos y una mayoría de eventos normales.

Mann (1945) y Kendall (1975) detectaron por primera vez tendencias en series de tiempo proponiendo un método estable, simple, no paramétrico y basado en rangos para la correlación de dos variables, que en este caso es el tiempo y series de sequía. La variable estadística MK (para Mann-Kendall) para una serie de tiempo, de datos  $\{Z_k, k = 1, 2, \dots, n\}$  se define de la siguiente manera:

$$T = \sum_{j < i} \text{sgn}(Z_i - Z_j) \quad (81)$$

Donde

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x < 0 \\ 0 & \text{si } x = 0 \\ -1 & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

Si hay consistencia en las observaciones presentes y si no hay una tendencia en la serie, la estadística MK del método estará distribuida normalmente y asintóticamente con

$$E(T) = 0 \quad (82)$$

E (T) ...Expectativa de la estadística T del MK (-)

$$\text{Var}(T) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (83)$$

Var (T) .....Varianza de la estadística T del MK (-)

La hipótesis de una tendencia positiva (sequías más frecuentes o severas), o, negativa (sequías menos frecuentes o severas), no se puede desatender a un nivel de significación  $\alpha$ , si  $|T| > u_{1-\alpha/2}$ , donde  $u_{1-\alpha/2}$  es el  $1-\alpha/2$  cantil de la distribución normal estándar. El método realizado por tres índices de sequía (AMD, AMV y ND) obtenidos por el umbral constante Q90 y aplicado a una prueba estadística de dos lazos con un nivel de significación de cinco por ciento ( $\alpha = 0.05$ ).

El análisis de tendencias es para estudiar si la sequía hidrológica en Costa Rica se ha vuelto más frecuente y severa. Una tendencia de sequía hacia un aumento o una disminución en la severidad o la frecuencia basada en un periodo relativamente corto, puede resultar ser parte de una fluctuación climática natural de largo plazo, o de una influencia humana de corto plazo. Así, las tendencias en series de sequías no pueden tomarse como una prueba de un cambio climático artificialmente inducido, pero sí para hallar cambios en el comportamiento hidrológico correspondiente al periodo de estudio.

Sachi et al., 2008, comparan el comportamiento de los índices de sequía PDSI y el índice auto calibrado de severidad de sequías de Palmer. (SCPDSI); tomaron como estación representativa del sur de Santa Fe a la estación agro meteorológica de Zavalla, Argentina durante el periodo enero de 1973 a mayo de 2008. Se encuentra ubicada en el Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario, forma parte de la red del Servicio

Meteorológico Nacional y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria y es representativa de una zona eminentemente agrícola-ganadera. Se determinan los índices PDSI y SCPDSI mensuales para todo el periodo de análisis.

En el PDSI la evapotranspiración potencial se calcula mediante el método de Thornthwaite, en función de la temperatura media mensual climática, y la latitud. El balance hídrico utilizado para determinar los parámetros corresponde a un modelo en el que el suelo se divide en dos capas, una superior con una capacidad de retención de 25 mm. y una profunda cuya capacidad es de 225 mm. Para el cálculo del PDSI se utiliza el software PDIWIN (Ravelo y Herrero, 1999).

Palmer (1965), calcula originalmente sus parámetros, características climáticas y factores de duración, promediando valores de unas pocas localidades que representan condiciones de clima semi-árido y de clima sub-húmedo.

Wells (2003) propone una modificación en el cálculo de las constantes basándose en las características climáticas del lugar. Esto se logra mediante una correcta calibración de las características climáticas, las que afectan los valores del **PDSI** y automáticamente el cálculo de los factores de duración. Por lo tanto, se mejora la sensibilidad del índice.

El **SCPDSI** reemplaza los valores empíricos de las características climáticas ( $K$ ) y los factores de duración (0.897 y 1/3) por valores calculados en base a las condiciones del lugar.

Palmer define los rangos de eventos no extremos entre los valores +4 y -4. Pero en la práctica, al aplicar las ecuaciones originales a regiones con características climáticas determinadas, los valores fuera del rango (-4, +4) resultan con mucha frecuencia no simétricos y con intensidades significativamente inferiores (superiores) en los eventos secos (húmedos) extremos a los valores -4 (+4).

Si el **PDSI** fuese una medida estandarizada de la severidad de la sequía, la frecuencia de los valores extremos positivos y negativos deberían ser las mismas en un periodo extenso de años (Wells, 2003).

Wells (2003), propone una corrección a estas limitaciones. Para ello es necesario definir con un mismo porcentaje la frecuencia de los valores extremos ( $f_i$ ). Por ejemplo, si el valor usado para  $f_i$  es 2%, o sea, se suponen eventos extremos cada 50 años, la relación entre la frecuencia esperada y la frecuencia observada define el parámetro de corrección  $k$ :

#### Sequías extremas

$$k = \frac{\text{frecuencia esperada del percentil 2}}{\text{frecuencia observada del percentil 2}} \quad (84)$$

#### Extremos húmedos

$$k = \frac{\text{frecuencia esperada del percentil 98}}{\text{frecuencia observada del percentil 98}} \quad (85)$$

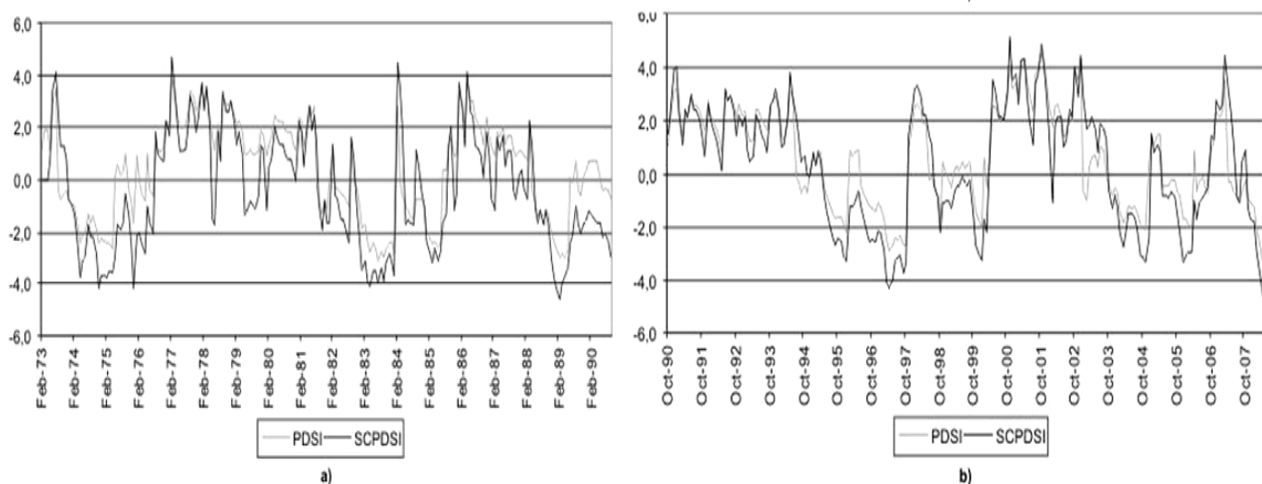
El cálculo de las características climáticas y factores de duración del PDSI así como la estimación y las calibraciones del SCPDSI se realizan para los años 1973-2005. El periodo de cálculo de los índices es desde 1973 a 2008.

Para el presente análisis se define como "evento seco" ("evento húmedo") al periodo de tiempo en que los índices **PDSI** y **SCPDSI** toman continuamente valores inferiores a -0.5 (superiores a +0.5).

Se analiza la duración, cantidad e intensidad de los eventos secos y húmedos determinados por cada uno de los índices estudiados y se realiza una comparación del comportamiento de los mismos en las situaciones extremas clasificadas por cada método.

El coeficiente de correlación entre el **PDSI** y el **SCPDSI** tiene un valor de 0.90 y es estadísticamente significativos con  $\alpha=5\%$ .

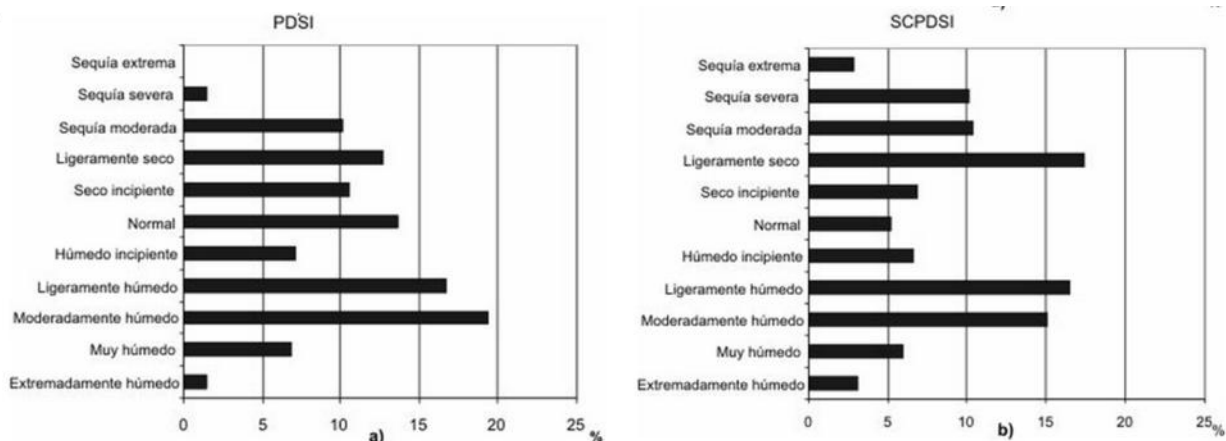
La figura 4.4.3 (a y b) muestra la distribución en las diferentes categorías asignadas por Palmer para cada uno de los índices. Se observa una variación en la forma de las distribuciones de frecuencia después de la calibración; en el caso del **PDSI**, la función de distribución es asimétrica positiva, con un máximo absoluto en la categoría "moderadamente húmedo". Además no se presentan casos dentro de la categoría "sequía extrema". En cuanto al **SCPDSI** se muestra una distribución bimodal, con máximos en las categorías "ligeramente seco" y "ligeramente húmedo". Los porcentajes de situaciones normales disminuyen significativamente respecto al **PDSI**, y se determina el mismo número de casos de "sequía extrema" y de casos "extremadamente húmedos", si bien se observa un mayor porcentaje en la categoría "sequía severa" respecto de su opuesto "muy húmedo".



**Figura 4.4.3.a y 4.4.3.b. Evolución temporal de los índices de sequía analizados PDSI y SCPDSI.**

La distribución de frecuencias de los índices: Figura 4.4.4.a. **PDSI** y 4.4.4.b. **SCPDSI**. Las categorías corresponden a las denominaciones definidas por Palmer.





**Figura 4.4.4a y 4.4.4b. Distribución de frecuencias de los índices**

El porcentaje de eventos extremos supera el 2% debido a que la calibración se realiza teniendo en cuenta el periodo 1973-2005, de manera que al considerar un mayor periodo de información (hasta el 2008) aumenta el porcentaje a un 3%. Esto se debe a la inclusión como evento extremadamente húmedo al **SCPDSI** de marzo de 2007 y como sequías severas a abril y mayo de 2008.

El cambio en la distribución de frecuencia que se observa al calibrar el índice **PDSI** se debe a dos aspectos fundamentales que se han tenido en cuenta en la calibración: por un lado, el cálculo de la evapotranspiración de referencia se realiza a través del método de FAO Penman-Monteith, de este modo se tienen en cuenta todas las variables que intervienen en el proceso de paso de agua en estado líquido desde la superficie y las plantas a agua en estado de vapor a la atmósfera.

En sitios con información climática completa, de un periodo suficientemente largo de años y con conocimiento de la capacidad de almacenaje de agua en el suelo, este índice complejo constituye una herramienta adecuada para caracterizar ocurrencia y magnitud de eventos extremos.

De todas maneras, para concluir en forma más significativa que el **SCPDSI** presenta la mayor eficiencia para detectar eventos extremos, se debería correlacionar dicho índice con mediciones de humedad de suelo y de rendimientos de cultivos locales.

## 4.5 Referencias.

1. Abbott, M., Refsgaard, J., 1996. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, vol. 22. Kluwer Academic Publishers
2. ARMC (2000). "Floodplain management in Australia. Best practice principles and guidelines", Australia: Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand , SCARM Report 73, 105 pp.
3. Avelar, C.E. (2007), "Validación de un modelo para estimar pérdidas esperadas por escenarios de huracán en México", XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.
4. Batts ME, Cordes MR, Russell LR, Shaver JR, and Simiu E. Hurricane wind speeds in the United States. J Str Div ASCE 1980;1000:2001±15.
5. Becker, A. y Serban, P. (1990) Hydrological models for water resources system design and operation. *Operational. Hydrol. Report 34*, wmo, Geneva, Switzerland.
6. Belleudy, P. (2004). "Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations / risque, aléa et vulnérabilité", DDS-TUE364- 9, Suiza.
7. Bethlahmy, N. 1977. Flood analysis by SMAX transformation. J. Hydraulics Division 103: 69-78.
8. Birkel, C. y S. Demuth. 2006. Drought in Costa Rica - Temporal and spatial variability, trends and its relationship to atmospheric circulation. International conference on FRIEND, Havana, Cuba, IAHS Red Book (aceptado).
9. Bobée, B., and F. Ashkar. 1991. Log-Pearson type 3 distribution. *In: The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, U.S.A. pp: 76-120.
10. Box, G.E.P., Cox, D.R., 1964. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society* 26, 211-243 (Discussion 244-252).
11. Campos-Aranda D.F. Hidrosistemas Urbanos. Conceptos básicos, crecientes y planicies de inundación. *Ciencia y Desarrollo*, (145):49-57. 1999.
12. Campos-Aranda D.F. Contraste de cinco métodos de ajuste de la distribución GVE en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI(2):77-92. 2001.
13. Campos A., D. F. 2006. Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos. *Avances en Hidráulica* 13. AMH-IMTA. México, D. F. 172 p.
14. Campos A., D. F. 2007. Parámetros hidrológicos de la cuenca. *In: Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento*. Edición del autor. San Luis Potosí, S.L.P. pp: 41-50.
15. Campos-Aranda D.F. Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km<sup>2</sup> de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*, 42(6):615-627. 2008
16. Cavazos, T. and S. Hastenrath (1990), "Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation", *International Journal of Climatology*, no. 10, pp. 377-386.

17. Cervantes-Sánchez O. y Landeros-Ortiz J.J. Curvas intensidad- duración-periodo de retorno de las tormentas máximas registradas en Tacubaya, DF. XVIII Congreso Nacional de Hidráulica, San Luis Potosí, SLP, 2004, pp. 479-486.
18. Chander S., Spolia S.K., Kumar A. Flood Frequency Analysis by Power Transformation. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(HY11):1495-1504, 1978.
19. Chander, S., S. K. Spolia, and A. Kumar. 1978. Flood frequency analysis by Power Transformation. *J. Hydraulics Division* 104: 1495-1504.
20. Chen C-I. Rainfall Intensity-Duration-Frequency fórmulas *Journal of the Hydraulics Engineering*, 109(12):1603-1621, 1983
21. Chow, V.T.; Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Santa Fe de Bogotá, 584 pp.
22. Davison AC., Smith RL. Models for exceedances over high thresholds (with discussion). *J Roy Statist Soc B* 1990;52:393±442.
23. Escalante S., C. 1999. Inferencia y pronóstico de eventos con base en la teoría de los subconjuntos borrosos. *Ing. Hidráulica en Méx.* XIV: 5-17.
24. Gopalakrishnan, S.G., David P. Bacon, Nash.at N. Ahmad, Zafer Boybeyi, Thomas J. Dunn, Mary S. Hall, Yi Jin, Pius C. S. Lee, Rangaro V. Madala, R. Ananthakrishna Sarma,
25. Haan L. Extreme value statistics. In Galambos J, Lechner J, Simiu E, editors. *Extreme value theory and applications*, vol 1. The Netherlands: Dordrecht, 1994. p. 93-122
26. Hisdal, H., K. Stahl; L.M. Tallaksen y S. Demuth, S. 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, 21: 317-333.
27. Huerta, B., Vega E. y Avelar C., (2006), "Caracterización del daño causado a estructuras y contenidos por inundaciones fluviales y costeras". XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.
28. Huerta, B., Ordaz, M., Reinoso, E., Avelar F., Torres, M., Zeballos, A., Osuna, E., Martínez, I. y Hernández, G. (2007), "Sistema experto para la evaluación de pérdidas por riesgos hidrometeorológicos en México", XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.
29. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. ERIC II: Extractor Rápido de Información Climatológica 1920-1998. 1 CD. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos.
30. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2003. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). 8 CD. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Comisión Nacional del Agua-IMTA. Jiutepec, Morelos.
31. Janjic, Z.I., J. P. Gerrity Jr. and S. Nickovic, 2001: An Alternative Approach to Nonhydrostatic Modeling. *Monthly Weather Review*. Vol. 129, No. 5, pp. 1164-1178.
32. Janjic, Z., 2003: A nonhydrostatic model based on a new approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 271- 285.
33. Kendall, M.G. 1975. *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin, London.
34. Kite G.W. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Colorado, USA. Water Resources Publications. Fort Collins. 1977. Pp. 156-168.

35. Knutson, T.R. and R.E. Tuleya, 2004: Impact of CO<sub>2</sub>- Induced Warming on Simulated Hurricane Intensity and Precipitation: Sensitivity to the Choice of Climate Model and Convective Parameterization. *Journal of Climate*: Vol. 17, No. 18, pp. 3477-3495.
36. Lizano, O.G. 1990. Modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico durante huracanes. *Revista Geofísica* (33), 75-103.
37. Lizano, O.G. 1988. Modelo de predicción de olas generadas por huracanes en el Mar Caribe. Tesis doctorado, Universidad de Puerto Rico, Mayaguez, 126pags.
38. Lizano O.G. y Fernández W. 1996. Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Costa Rica durante el periodo 1886-1988. *Top Meteor. Oceanogr.*, 3(1): 3-10.
39. Mann, H.B. 1945. Nonparametric Tests against Trend. *Econometrica* 13, 245-259.
40. Mark D. Turner, and Tim Wait, 2002: An Operational Multi-Scale Atmospheric Model with Grid Adaptivity for Hurricane Forecasting. *Monthly Weather Review*, Vol. 130, No. 7, pp. 1830-1847.
41. Martín-Vide, J. P.; López-Querol, S.; Martín-Moreta, P.; Simarro-Grande, G. y Benito-Fernández, G. (2003). Uso de modelos uni y bidimensionales en llanuras de inundación. Aplicación al caso del río Tajo en Talavera de la Reina. *Ingeniería del agua*. 10:49-58.
42. Méndez-González, J., J. J. Nívar y O.V. González (2008), "Análisis de tendencias de la precipitación (1920-2004) en México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 65, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 38-55.
43. Miranda, E. (1999), "Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings", *Journal of Structural Engineering*, 125(4), 417-425.
44. NDBC (2011). "Datos de características del oleaje". National Data Buoy Center (NDBC), consultado el 14 de diciembre 2011, disponible en: <http://www.ndbc.noaa.gov.html>.
45. NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (2004), Document maintained by Klaus Wolter (klaus.wolter@noaa.gov), update: April 19, 14:43:11 MDT [[http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei\\_index.html](http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei_index.html)].
46. PALMER, W. 1965. Meteorological drought. US: Weather Bureau, Reserch Paper N° 45, Washington.
47. Pavia, E. G. and A. Badana (1998), "ENSO modulates rainfall in the Mediterranean California", *Geophysical Research Letters*, no. 25, pp. 3855-3858.
48. RAVELO, A. y HERRERO, C. 1999. PDIWIN v1.0. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales
49. Resio, D.t. 1981. The estimation of wind-wave generation in a discrete spectral model. *J of Phys Oceanog.* 11, 510-525.
50. Russell LR. Probability distributions for hurricane effects. *J Waterways Harbours and Coastal Eng Div ASCE* 1971;97(WW2):130±54.
51. Russo, B., Gómez, M. and Macchione, F. (2011). "Experimental approach to determine flood hazard criteria in urban areas", 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.

52. Sánchez, L. y Méndez, L. (2009). "Modelo de elevación digital e informatización del sistema de drenaje mayor y menor de la zona oeste de la ciudad de Santa Ana de Coro, Falcón.", Trabajo de Investigación, UNEFM, Coro, Venezuela, 230 pp.
53. Sánchez, L. (2011) . "Un nuevo enfoque del método de ponderación mixta en la determinación de la peligrosidad a las inundaciones pluviales en una cuenca urbana", Centro de Investigaciones en Recursos Hídricos (CIDRHI), UNEFM, reporte 01-2011, Coro, Falcón, Venezuela.
54. Schaefli, B., Hingray, B., Musy, A., 2004. Improved calibration of hydrological models: use of a multi-objective evolutionary algorithm for parameter and model structure uncertainty estimation. *Hydrology: Science and Practice for the 21st Century*, pp. 1.
55. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 3*. Región Hidrológica No. 37. El Salado, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980a.
56. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 4*. Región Hidrológica No. 36. Nazas-Aguanaval, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980b.
57. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 5*. Región Hidrológica No. 26. Pánuco, Tomos I y II, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1982.
58. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) *Boletín Climatológico No. 6*. Regiones Hidrológicas No. 24 Oriente (Bajo Rio Bravo) y No. 25 Golfo Norte (San Fernando-Soto La Marina), Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1983.
59. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). *Isoyetas de Intensidad-Duración Frecuencia*. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura. México, DF. 1990. 495 p.
60. Simiu E, Scanlan RH. *Wind effects on structures*. 3rd ed. New York: Wiley Interscience, 1996.
61. Smith RL. Extreme value theory. In Lederman W, Lloyd E, Vajda S, Alexander C, editors. *Handbook of applicable mathematics*. New York: John Wiley & Sons, 1989. p. 437±472.
62. SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1975. Actualización al Boletín Hidrológico No. 36. Tomo VI, periodo 1970-73. Subsecretaría de Planeación de la S.R.H. México, D. F.
63. Stedinger, J. R., R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou. 1993. Frequency analysis of extreme events. *In: Maidment D. R. (ed). Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. New York, U.S.A. pp: 18.1-18.66
64. Tallaksen, L.M. y H. Hisdal. 1997. Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. *Proceedings of the 3rd International conference on FRIEND, 1-4 Oct. 1997, Postojna, Slovenia, IAHS Publ., 246, 141-150.*
65. Témez P., J. R. 1991. Generalización y mejora del método racional. *Versión de la Dirección General de Carreteras de España. Ingeniería Civil 82: 51-56.*

66. Torres, M.A., Avelar, C.E. y Huerta, B. (2007), "Evaluación del riesgo por inundaciones debidas a tormentas", XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero
67. Triviño, A. P. y Ortiz, S. R. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y rios rambla mediterráneos. *Investigaciones geográficas*. 35:67-83.
68. Vickery PJ, Twisdale LA. Prediction of hurricane windspeeds in the US. *J Struct Eng* 1995;121:1691±9.
69. WELLS, N. 2003. Documentation of the original and self-calibrating Palmer Drought Severity Index used in the Nat. Agr. Decision Support System. Univ. of Nebraska, Lincoln.
70. Willems, P., 2007. River modelling, Adapted version 2007 of the "GeneralMethodology for River Flood Modelling" for the Administration of Waterwaysand Sea - Department Flanders Hydraulics and Hydrological Research.Katholieke Universiteit Leuven Hydraulics Laboratory, Heverlee, BE (in Dutch).
71. Willems, P., 2009. A time series tool to support the multi-criteria performanceevaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling and Software* 24(3).
72. Willoughby, H.E. and Rahn, M.E. (2004). "Parametric Representation of the Primary Hurricane Vortex. Part I: Observations and Evaluation of the Holland (1980) Model". *Monthly weather review, American Meteorological Society*, volumen 132, dec. 2004.
73. Yang, J., Reichart, P., Abbaspour, K.C., Yang, H., 2007. Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: statistical model fórmulaion and Bayesian inference. *Journal of Hydrology* 340 (3), 167-182.
74. Zelenhasic, E. y A. Salvai. 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resour. Res.* (23, 1), pp. 156-168.
75. Zonensein, J.; Miguez, M.G.; De Magalhães, L.P.C. and Valentin, M.G. (2008). "Flood risk index as an urban management tool", 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.

## Capítulo 5. Estudio de caso

### 5.1 Introducción

La península de Yucatán sufre la constante amenaza de mareas de tormenta, vientos, deslaves, oleajes, desbordamiento de ríos e inundaciones por acumulación de lluvias. (Vega et al, 2012). En el año 2010, en Campeche se presentaron eventos de precipitación extrema que ocasionaron grandes inundaciones. En la ciudad capital en un tiempo de 2 horas hubo una precipitación de 116.6mm que ocasionó severas inundaciones en la ciudad de San Francisco, Campeche. (CENECAM, 2010).

El Estado de Campeche se encuentra ubicado en la Península de Yucatán, limitando al norte con Yucatán, al sur con Tabasco, Guatemala y Belice, al este con Quintana Roo y al oeste con el Golfo de México. Sus coordenadas geográficas extremas son las siguientes: 17°49' - 20°51' latitud Norte y 89°06' - 92° 27' longitud Oeste. Tiene una extensión territorial de 56,797.84 km<sup>2</sup> y una población total de 822 mil 441 habitantes -censo de población 2010- distribuida en once municipios: Calkini, Champotón, Candelaria, Campeche, Carmen, Calakmul, Escárcega, Hecelcakan, Hopelchen, Palizada y Tenabo (figura 5.1.1). (CENECAM, 2010).



**Figura 5.1.1. División del estado de Campeche.**

Existen localidades del resto del Estado que también se ven afectadas por las inundaciones y algunas cabeceras importantes que por su densidad de población y complejidad orográfica sufren, de la misma forma, de estas contingencias. De esta manera, para este tipo de fenómeno meteorológico se mencionan y describen las siguientes zonas de riesgo para que la población se encuentre enterada (CENECAM, 2010):

## 1.- Región de los "Ríos".

Río Palizada	Río Chumpán
Río Viejo	Río Champotón
Río Marentes	Río Mamantel
Río Las Piñas	
Río Caribe	Arroyo "La Esperanza"
Río Candelaria	Arroyo "Las Golondrinas"

- Municipios con localidades susceptibles a inundación e incomunicación., (CENECAM, 2010):

- |            |              |                |
|------------|--------------|----------------|
| * Calakmul | * Candelaria | * Escárcega    |
| * Calkini  | * Carmen     | * Hecelochakan |
| * Campeche | * Champótón  | * Hopelchen    |

Actualmente el CENECAM tiene sectorizado al Estado de Campeche en tres regiones de previsión meteorológica (figura 5.1.2): Norte, Centro y Sur. La región norte abarca los municipios de Calkiní, Hecelchakán, Hopelchén y Tenabo; la región centro que comprende a Campeche y Champotón y por último la región sur, comprendiendo los municipios de Calakmul, Escárcega, Candelaria, Palizada y Carmen.

Debido a la necesidad de contar con regiones homogéneas, se establece un criterio fundamentado en las características geográficas y climáticas del Estado, para la elaboración de una nueva distribución espacial y así establecer una nueva regionalización con el objetivo de identificar en el tiempo y espacio la distribución de las precipitaciones en el estado de Campeche, (CENECAM, 2010).



**Figura 5.1.2. Regiones delimitadas por el Centro Estatal de Emergencias para Elaboración de boletín meteorológico.**



Debido a las características climáticas y orográficas, a partir de ahora podemos entonces determinar cinco zonas o regiones (CENECAM, 2010):

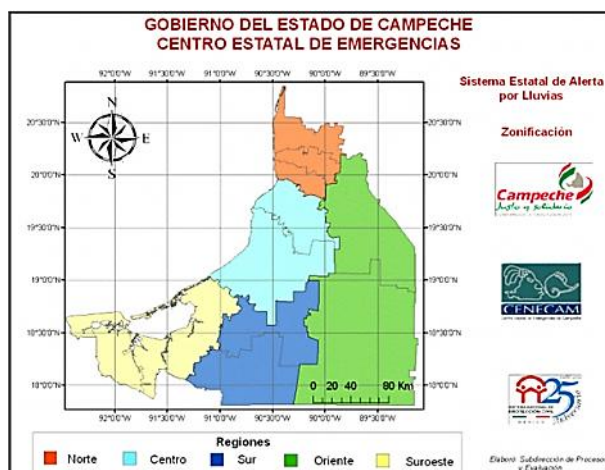
**Región Norte:** Calkiní, Hecelchakán y Tenabo

**Región Oriente:** Hopelchén y Calakmul

**Región Centro:** Campeche y Champotón

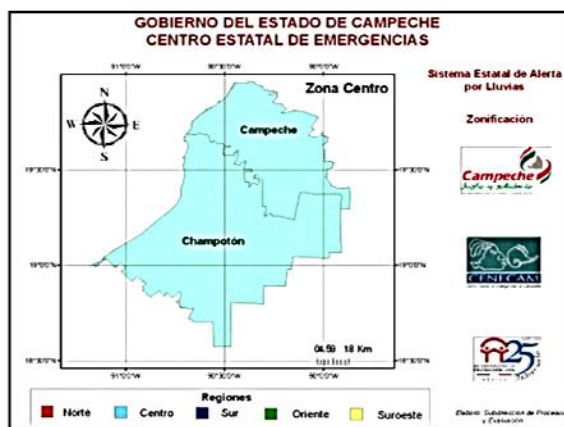
**Región Sur:** Candelaria y Escárcega, y

**Región Suroeste:** Carmen y Palizada



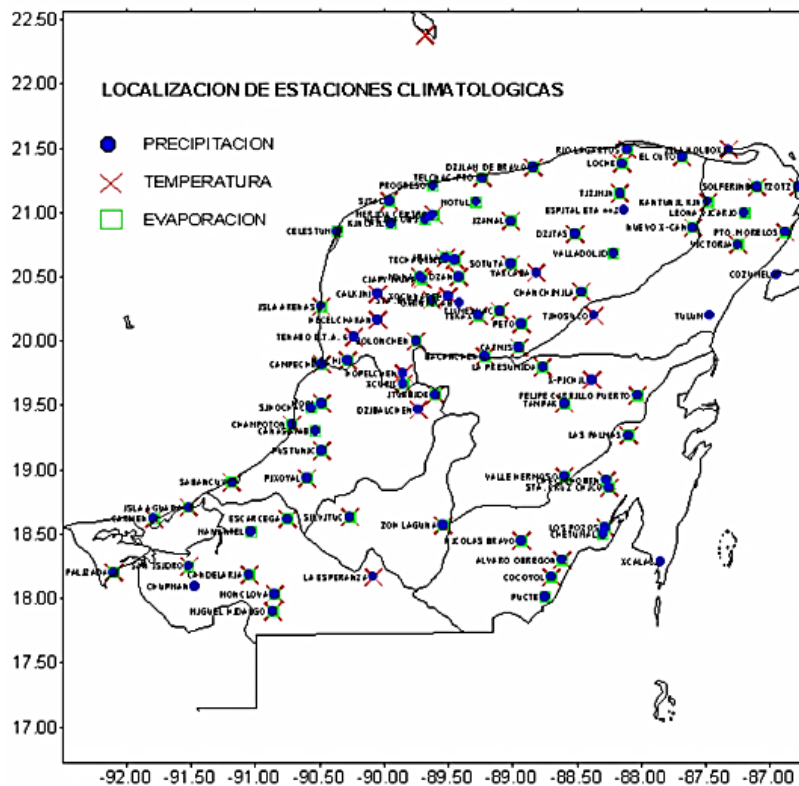
**Figura 5.1.3.** Imagen de la nueva distribución municipal por regiones para el boletín del Sistema de Alertamiento de Tiempo Severo.

La cuenca se encuentra localizada en el municipio de Champotón (Figura 5.1.4) en la zona Centro de Estado de Campeche, entre las coordenadas  $89^{\circ}54'$  y  $91^{\circ}11'$  de longitud oeste y  $18^{\circ}34'$  y  $19^{\circ}41'$  de latitud norte. (INEGI, 2011).



**Figura 5.1.4.** Zonificación de las regiones Centro.

Dentro de la península de Yucatán se cuenta con 245 estaciones climatológicas, 17 estaciones climatológicas automáticas, 7 estaciones meteorológicas automáticas y 2 estaciones de radar meteorológico. Esta información fue recabada por la CNA.



**Figura 5.1.5.** Estaciones climatológicas ubicadas en el Estado de Campeche.

Para conocer el comportamiento de escurrimiento de una cuenca, la conducción de un río, la red principal del drenaje, se deben realizar estudios hidrológicos e hidráulicos adecuados.

## 5.2 Estudio de caso en Champotón, Campeche.

El estudio realizado por Posada y Vega, (2010) en la cuenca del río Champotón la cual se delimitó a partir de información cartográfica en formato digital (cartas topográficas del INEGI escala 1:50000) y Modelo Digital de elevaciones (MDE) con una resolución de pixel de 20x 20m para determinar las características físicas del área de estudio.

Los objetivos del estudio realizado fueron (Vega et al., 2010):

- Realizar estudios hidrológicos e hidráulicos de la cuenca.
- Construir mapas de peligro, asociados a inundaciones por desbordamientos del río (Programa Hec RAS y su vinculación con ArcGis).
- Obtener parámetros físicos de la cuenca con ArcGis.
- Con los datos de precipitación de las estaciones climatológicas realizar el análisis estadístico.
- Obtener caudales de diseño para diferentes periodos de retorno mediante un análisis hidrológico.

### Localización de la zona en estudio:

El río Champotón se encuentra dentro de la cuenca "Río Champotón y Otros", perteneciente a la región hidrográfica No 31 y al organismo de cuenca Península de Yucatán Oeste (Vega et al.,2012). La región No 31 está ubicada al suroeste de la península de Yucatán. Colinda al poniente con la R.H No 30 (Grijalva-Usumacinta); al noroeste con la laguna de Términos y el Golfo de México; al norte, su límite con la R.H. No 32 (Yucatán norte); al oriente con la RH No33. (Yucatán este) y al sur con la República de Guatemala. (CENAPRED, 2010).

El río desemboca en el Golfo de México; en su desembocadura se ubica la ciudad Champotón. La longitud del río es de 48km, 35km son navegables de manera continua desde la desembocadura en el Golfo de México hasta la estación hidrométrica Canasayab. (Vega et al.,2012)

La parte más alta de la cuenca tiene una elevación de 120msnm; el desarrollo principal del río Champotón se da sobre una planicie con pendiente suave y sin afluentes. El área de la cuenca es de 710 km<sup>2</sup> aproximadamente como se observa en la Figura 5.2.1. (Vega et al.,2012)



**Figura 5.2.1. Cuenca del Río Champotón.**

A través de la base de datos CLICOM (Red Mexicana de estaciones climatológicas), utilizando los datos de precipitación máxima en 24 horas, así como la información otorgada por la gerencia técnica local de la CONAGUA se llevó a cabo el análisis de la precipitación en la cuenca.

Se realizó un análisis estadístico de lluvia máxima en 24 horas, haciendo un ajuste de funciones de probabilidad con el programa **AX** (Jiménez, E.M., 1997) el cual ajusta distintas funciones de probabilidad a muestras de datos y calcula el error estándar de cada una de ellas con respecto a la muestra.

Con el método de los polígonos de Thiessen se obtuvo la precipitación media, considerando el análisis regional para diferentes periodos de retorno.

### Análisis del escurrimiento

El estado de Campeche cuenta con 3 estaciones hidrométricas localizadas en los ríos Candelaria, Palizada y Champotón. La estación hidrométrica Canasayab, ubicada en el límite (aguas arriba) de la cuenca baja solo registra el escurrimiento de 36.62% del área total.

Los datos de esta estación se analizaron con el mismo proceso que los datos de lluvia de las estaciones climatológicas y se obtuvo el gasto instantáneo y total de la parte alta de la cuenca.

Tabla 5.2.1

Tabla 5.2.1. Datos de la estación.

<i>Clave</i>	<i>Nombre</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>	<i>Años de registro</i>	<i>Periodo</i>
31002	Canasayab	-90.575	19.294	50	1956-2006

Para determinar los gastos de diseño se utilizaron curvas de intensidad- duración y periodo de retorno a partir de análisis estadístico de la lluvia máxima en 24 horas y el estudio de regionalización. También se determinó el tiempo de concentración de la cuenca con características fisiográficas del cauce principal, que nos permite determinar el tiempo de respuesta de la cuenca.

El análisis hidráulico se centra en el modelado del comportamiento y variación de la superficie libre del agua o el nivel del agua a lo largo de todo el río Champotón, bajo ciertos escenarios y condiciones de frontera. Esto se refiere a que a lo largo de un cauce existen secciones transversales críticas, y cuando se presentan eventos extremos en la cuenca de análisis que a su vez generan escurrimientos extraordinarios, se desbordan y generan inundaciones en llanuras adyacentes.

Para realizar un análisis hidráulico de un río, se debe definir con ayuda del MDE la trayectoria del cauce, los bordos naturales, llanuras de inundación y secciones transversales del río. En este caso se requirió hacer un levantamiento batimétrico del río, se ocupó un ecosonda Valeport; este equipo se programó para que tomara registros de latitud, longitud y profundidad a cada segundo.

En el caso de los escenarios, se tendrán diferentes condiciones de salida, debido a la influencia de la marea astronómica y la marea de tormenta.

Para determinar qué nivel de marea se puede presentar se utilizaron registros de marea de la red mareo gráfica instalada por el instituto EPOMEX y el Instituto de Ingeniería de la UNAM; para el estado de Campeche, (Ruiz et al., 2010).

Los mapas de peligro son presentaciones gráficas y espaciales que muestran la distribución de fenómenos perturbadores de origen natural o antropogénico, basados en datos probabilísticos y/o estadísticos que conducen a la determinación de un nivel cuantitativo de la intensidad de un fenómeno perturbador para un lugar específico.

Se generó el producto final, el Sistema de información geográfica **SIG**, el cual es dinámico pues permite hacer el cruce entre el peligro caracterizado (áreas de inundación) con diferentes bases de datos tales como líneas vitales (carreteras, líneas de alta tensión,

acueductos) infraestructura de servicios (refugios, escuelas, hospitales), reservas protegidas, áreas de cultivos y planes de ordenamiento.

Los mapas de peligro obtenidos para periodos de retorno de 10 y 100 años tomaron en cuenta el efecto de la marea astronómica y de tormenta en la desembocadura del río Champotón, los diversos escenarios de inundación y el cruce con la información.

Se concluye con la importancia y necesidad de generar mapas de peligro por efecto de desbordamiento de ríos a causa de los factores ya mencionados, los que son una herramienta dinámica de prevención de inundaciones, sirven para el ordenamiento territorial pues se puede evitar la construcción de inmuebles en zonas propensas a inundaciones, o para diseñar la infraestructura adecuada para que soporte las inundaciones.

En el estado de Campeche, los fenómenos hidrometeorológicos han originado desastres naturales que han sido registrados en archivos históricos. Los antecedentes en cartografía sobre amenazas naturales en Campeche, son los mapas de zonas propuestos por el CENECAM en el atlas de riesgos 2000, evaluación de daños en las zonas costeras de la península de Yucatán por el huracán Isidore elaborado en el Centro EPOMEX-UAC (Rivera, 2004) y el diagnóstico de riesgos por inundación y atlas de peligros a nivel ciudad, financiado por SEDESOL y el ayuntamiento de Campeche (Palacio, 2005).

En 2009, inició el proyecto atlas de peligros naturales del estado de Campeche, realizado en conjunto con el centro EPOMEX de la UAC, IINGEN UNAM, y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para el centro estatal de atención a emergencias del estado de Campeche, CENECAM.

A partir de la información documental, estadística, de gabinete y de campo, para generar documentos cartográficos en formato analógico y digital, ubicando las zonas expuestas a peligros. La información digital se almacenó en un SIG actualizable.



**Figura 5.2.2.** Sistema de consulta de resultados de atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche

Los peligros que afectan con mayor intensidad y frecuencia al Estado de Campeche son los peligros hidrometeorológicos como la marea de tormenta, oleaje, viento, lluvia e inundaciones.

El estudio hidrológico de la cuenca del Río Champotón se generó a partir de un análisis de eventos extremos de precipitación, considerando la teoría de regionalización y la aplicación de un modelo de lluvia-escorrentía; la marea astronómica de la región de Champotón fue calculada con los registros medidos por un sensor de presión absoluta instalado en la costa.

La marea de tormenta asociada a los eventos meteorológicos fue cuantificada a través de un modelo numérico que se resuelve con ecuaciones de aguas someras promediadas en la vertical; para la hidrodinámica del río se utilizó el modelo numérico HEC.RAS V4.1, y los resultados se integraron en un SIG (Sistema de Información Geográfica). Se utilizó la metodología propuesta por el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) para la cuantificación de zonas inundables en ríos, por medio del uso de software HecRas y ArcMap.

#### Características de la cuenca:

Las características de la cuenca fueron determinadas a través de cartas topográficas digitales escala 1:50 000 (INEGI, 2001a y b) y un MDE (Modelo digital de elevaciones), con una resolución espacial de pixel de 20 x 20m utilizando el software ArcInfo versión 9.3. El MDE fue realizado por el grupo ODI para el Proyecto Atlas de Peligros Naturales del Estado de Campeche, que realiza la Universidad Autónoma de Campeche (UAC) y la Universidad Nacional Autónoma de México. (UNAM) para el Centro de Atención a Emergencias del Estado de Campeche (CENECAM, 2010).

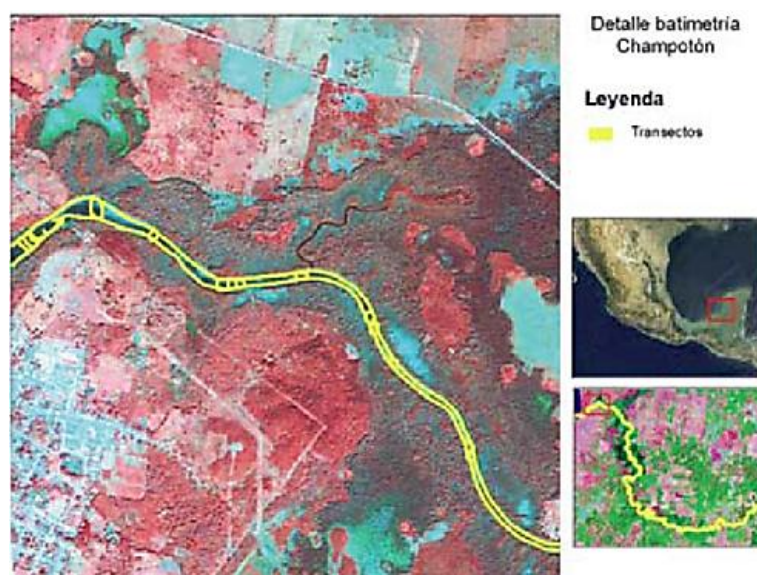
Las lluvias en la zona son principalmente en verano; entre el periodo de mayo-octubre la precipitación pluvial varía entre 900 y 1000mm, con lluvia apreciable de 30 a 59 días; entre noviembre y abril la precipitación disminuye y es de 100 a 125mm, con lluvia de 0 a 29 días. Las temperaturas en verano tienen valores máximos de 40°C y en invierno mínimas de 12°C. El promedio de temperatura anual es de 26°C. (Koppen, 1948; García et al., 1989).

#### Metodología

Posada et al, 2010, utilizaron un modelo digital de elevaciones con resolución de 20 m proporcionado por la empresa ODIGROUP de Campeche, ya que del MDE del INEGI que era la información geográfica inicial no se logró obtener las secciones transversales para el modelado hidráulico. Se realizó la batimetría de detalle del cauce navegable del río Champotón, y se incluyeron las cartas topográficas del INEGI en formato .DXF para complementar las curvas de nivel. Para el levantamiento batimétrico a través de una ecosonda Valeport de 210 kHz con GPS integrado se tomaron los registros de latitud, longitud y profundidad con una frecuencia de 4Hz, con la ayuda de una computadora portátil se hizo de manera simultánea la recolección de los datos. Tabla 5.2.1

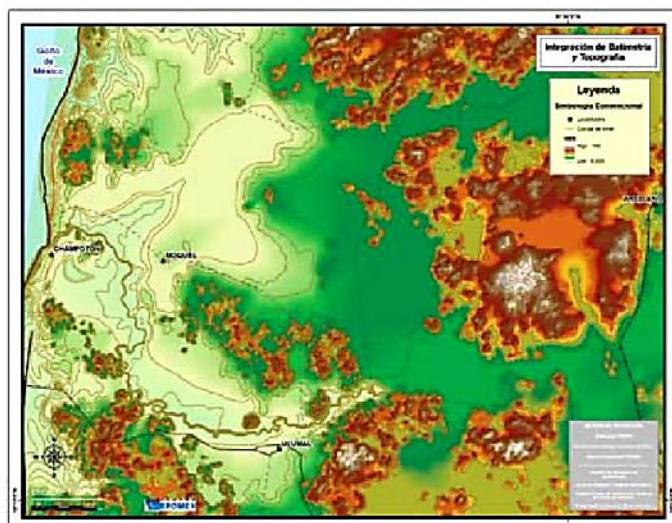
Clave	Nombre	Longitud	Latitud	Años de registro	Periodo
4008	Champotón, (SMN)	-90.717	19.35	31	1921, 1933-1961
4012	Hool, Champotón	-90.411	19.513	37	1963-1971, 1973-1974, 1976-1977, 1979, 1982, 1984-1993, 1996, 1998- 2008
4028	Pustunich, Champotón	-90.479	19.145	48	1953-1965, 1967-1976, 1978-1979, 1982-1984, 1986-1987, 1990-1994, 1996-2008
4041	Champotón, Champotón DGE	-90.72	19.362	47	1954-1957, 1963-1983, 1986-1989, 1991-2007
4052	Canasayab	-90.575	19.294	20	1975-1990, 2005-2008
4072	Siho-chac, Champotón	-90.584	19.506	27	1982-2008

Con el programa Hypack se realizó la navegación de la embarcación a través del río. Se inició con el levantamiento al inicio de la desembocadura del río en el Golfo de México en dirección a la parte más angosta (estación Canasayab) de la CONAGUA, clave 31002, BANDAS. El tramo cubierto abarcó 32.87 kilómetros como se observa en la .2.3.

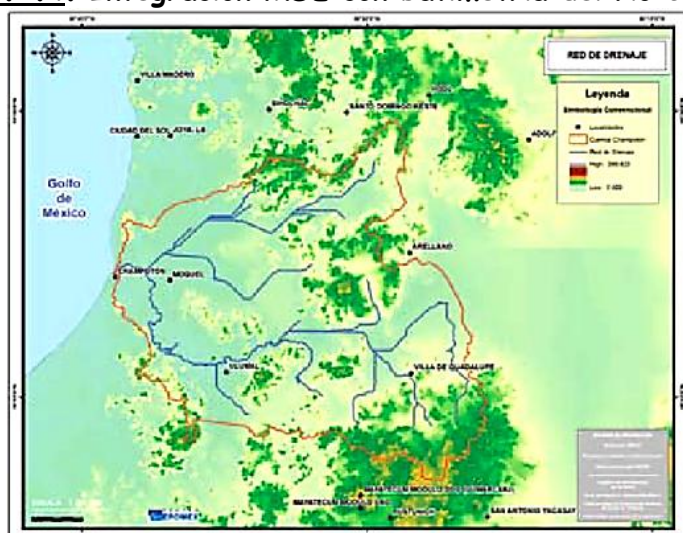


**Figura 5.2.3.** Detalle de la batimetría del río Champotón en donde se observan los transectos transversales.

La figura 5.2.4. Contiene la información topográfica del modelo digital de elevaciones, y la figura 5.2.5. Esquematiza la cuenca Champotón con la red de drenaje calculada con ArcMap.



**Figura 5.2.4. Integración MDE con batimetría del río Champotón**



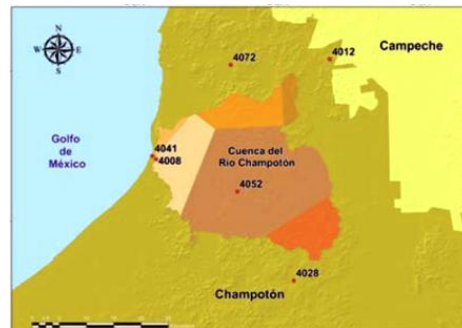
**Figura 5.2.5. Cuenca del río Champotón y red de drenaje**

### **Datos de precipitación y caudales:**

Con la base de datos CLICOM (Servicio meteorológico nacional, 2011), se obtuvieron los datos de precipitación máxima en 24 horas; se consideraron las estaciones climatológicas que tuviera un registro continuo y completo de un mínimo de 20 años; en total, se tomaron 6 estaciones de lluvia y se llevó a cabo el análisis estadístico de manera regional.

La obtención de la precipitación media se obtuvo a través del método de los polígonos de 1998). El método se logró aplicar con el programa ArcGis con el cual se obtuvo el área de influencia de cada estación mostrada en la figura 5.2.6.

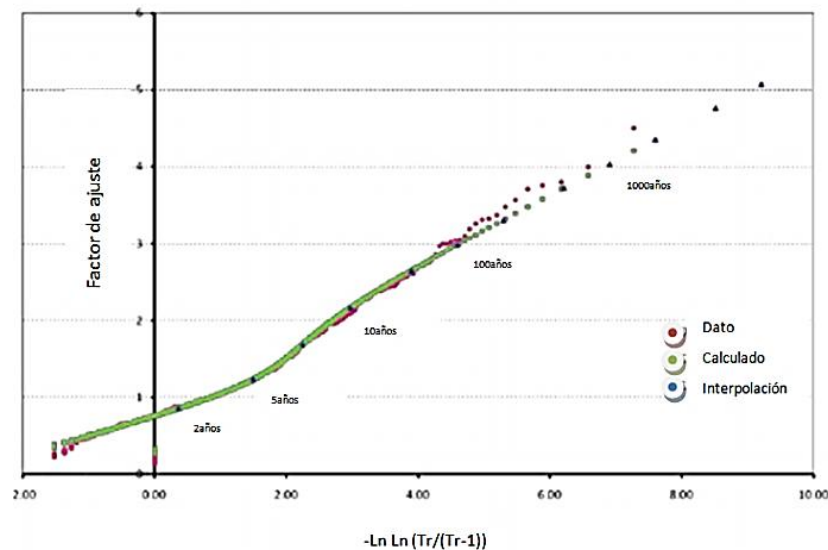




**Figura 5.2.6.** Áreas de influencia de las estaciones en la cuenca del río Champotón.

Mediante el programa AX (Jiménez, 1997) se llevó a cabo un ajuste de funciones, para determinar distintas funciones de probabilidad a muestras de datos y calcular el error estándar de cada una de ellas con respecto a la muestra; este programa también permite obtener los valores de lluvia máxima para diferentes periodos de retorno como se muestra en la figura 5.2.7. El mejor resultado obtenido por el programa.

Doble Gumbel para el Estado de Campeche



**Figura 5.2.7.** Análisis Regional de lluvias máximas de 24 horas para las estaciones climatológicas.

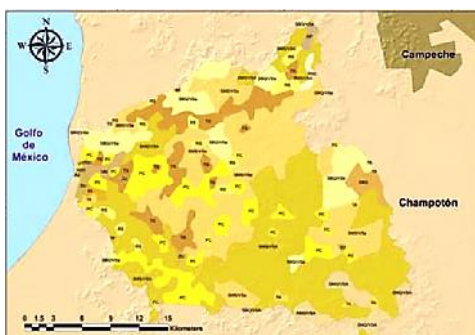
El modelo lluvia-escorrentía utilizado está basado en la fórmula racional; este método considera que el gasto máximo se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad ( $i$ ) constante en un tiempo dado ( $d$ ) igual al tiempo de concentración ( $t_c$ ). (Campos, 2007).

El tiempo de concentración se determinó con las características fisiográficas del cauce principal de la cuenca, y así después se logró determinar el tiempo de respuesta de la cuenca. Por otro lado, se obtuvo la precipitación e intensidad  $i$  para el  $t_c$  obtenido anteriormente y para cada periodo de retorno establecido en la salida de la cuenca, tabla 5.2.2.

**Tabla 5.2.2. Intensidad para varios periodos de retorno.**

Intensidad para diferentes periodos de retorno	
<i>Tr</i> (años)	<i>Intensidad</i> ( $d=tc, mm/h$ )
2	3.97
5	5.82
10	7.62
20	9.28
50	11.31
100	12.79
200	14.22
500	16.16
1000	17.59
10000	22.3

El coeficiente de escurrimiento ( $C_e$ ) es un factor determinante para este modelo, se obtiene a través de las cartas de la serie 2 del Inventario Nacional Forestal (INEGI, 2010), de la cual se extrajo el polígono de la cuenca del río Champotón (Figura 5.2.8) con los diferentes usos de suelo y tipo de vegetación para el área estudiada. De acuerdo a la vegetación y uso de suelo en la región se utilizó la tabla 5.2.3 para obtener dicho valor. (Aparicio, 1997).

**Figura 5.2.8. Uso de suelo y vegetación de acuerdo a la carta de Inventario Nacional Forestal.****Tabla 5.2.3 Coeficientes de escurrimiento para tipo de suelo**

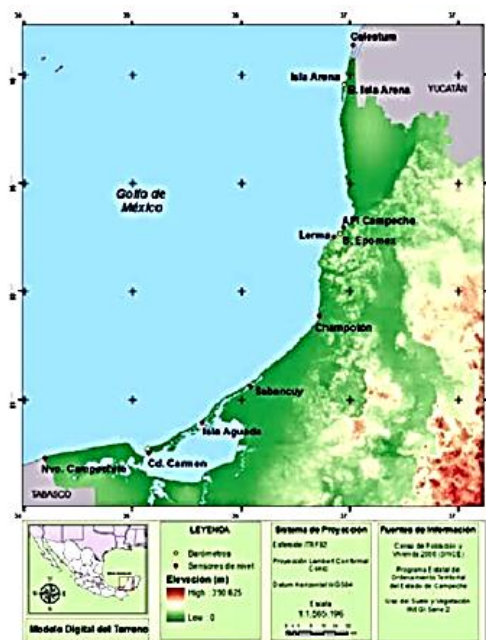
Valores del coeficiente de escurrimiento $C_c$		
Cobertura vegetal en porcentaje (%)		Factor $C_c$
Bosque bien definido	( $\geq 97\%$ )	0.02
$80\% \leq$	Cobertura vegetal $\leq 96\%$	0.2
$60\% \leq$	Cobertura vegetal $\leq 79\%$	0.3
$40\% \leq$	Cobertura vegetal $\leq 59\%$	0.4
$16\% \leq$	Cobertura vegetal $\leq 39\%$	0.5
$5\% \leq$	Cobertura vegetal $\leq 15\%$	0.6
Suelo desnudo $< 4\%$ Cobertura vegetal		1

Los resultados obtenidos de precipitación, e intensidad de la tabla 5.2.4 fueron corregidos por el coeficiente de intervalo fijo, el cual corrige los datos por toma de lectura y por el factor de reducción por área FRA, el cual se aplica para cuencas muy separadas, con baja densidad de estaciones, y considerando los polígonos de Thiessen. Se aplicó la metodología propuesta por Domínguez et al., (2008) y Domínguez y Palacio (2010).

**Tabla 5.2.4. Gastos de diseño en la desembocadura del río Champotón.**

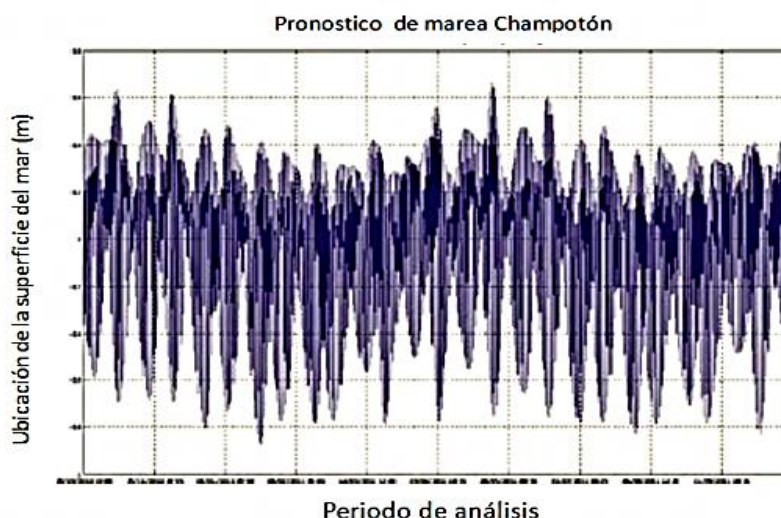
Gastos de diseño en desembocadura del río Champotón	
Tr (años)	Qp (m3/s)
2	180.36
5	264.25
10	346
20	421.54
50	513.81
100	580.92
200	645.94
500	734.02
1000	799.03

En octubre del 2009 el instituto EPOMEX-UAC y el IINGEN UNAM instalaron un sistema de sensores de presión absoluta y temperatura para poder caracterizar adecuadamente la marea astronómica para las localidades costeras más importantes del estado( figura 5.1.15 Posada et al., 2010), gracias a estos sensores se determinó que la marea es mixta; es decir; se presentan 2 mareas altas y 2 bajas por día, en total 2 ciclos sucesivos con periodos de 12 horas y 25 minutos cada uno, con amplitudes distintas entre sí (Pulido, 2011). Se muestra en la figura 5.2.9 la localización de mareógrafos y barómetros.



**Figura 5.2.9. Localización de mareógrafos y barómetros.**

La señal de marea astronómica se reconstruyó para el año 2011 con las componentes señaladas figura 5.2.10., donde se indica que la máxima pleamar es de 0.66MSN-MM y la mínima bajamar de -0.88MSNMMN, lo cual produce como resultado una altura de marea de 1.54 metros considerada como marea micro mareal por ser menor a 2 metros, al ser tan somera la bahía de Champotón, ocasiona que cuando se presentan las mareas bajas se puedan observar las barras y bajos litorales que se localizan en la zona litoral de la ciudad. Los componentes de marea para la ciudad de Champotón se muestran en la tabla 5.2.5.



**Figura 5.2.10** Pronóstico de mareas para la ciudad de Champotón.

**Tabla 5.2.5** Marea para la ciudad de Champotón.

Sitio	Parámetro	Componentes de la marea							Tipo	% Confiab
		M2	S2	N2	K2	K1	O1	P1		
Champotón	Frecuencia (1/s)	0.0805	0.0833	0.0789	0.0835	0.0417	0.0387	0.0415	Mixta	88
	Amplitud (m)	0.2177	0.0762	0.0553	0.0141	0.2449	0.1918	0.0664		
	Fase (°)	102.60	108.20	91.83	98.56	305.86	307.84	278.60		

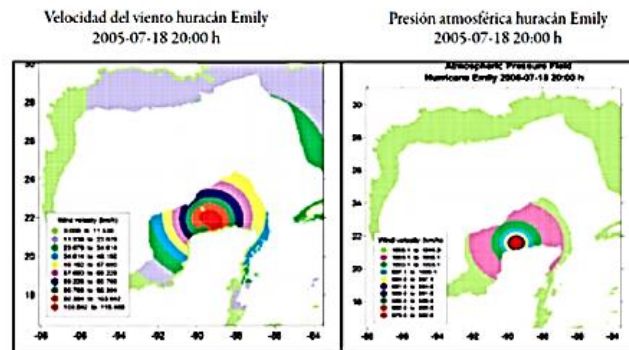
Teniendo determinado el nivel de pleamar se procedió a calcular los niveles de marea de tormenta por medio de la aplicación de 2 modelos numéricos HURAC (Silva et al., 2000) y HD23 (Posada et al., 2008). La marea de tormenta y la astronómica son importantes ya que si se presenta un huracán con la máxima pleamar, el nivel de inundación será mayor.

El modelo HURAC calcula los campos de velocidades y presión atmosférica debidas a un huracán; es un modelo paramétrico que obtiene la magnitud y dirección del viento para cualquier instante de tiempo, así como el valor de la presión a partir de los registros del NOAA; el HD23 se encarga de resolver ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento sobre una malla numérica, así obtiene las velocidades de flujo y el valor de la superficie libre del agua.

### Cálculo de la marea de tormenta+

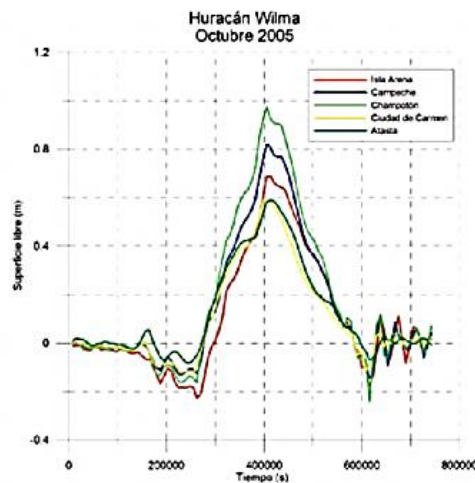
La metodología para calcular la marea en la ciudad de Champotón tomando en cuenta diversos periodos de retorno es la siguiente: (Posada et al., 2010).

1. Para el análisis de huracanes se consideraron los registrados en el periodo de 1948 al 2010 en la zona del Mar Caribe y Golfo de México. Para cada año se seleccionaron los huracanes que cruzaron en un radio máximo de 200Km algún punto geográfico de Campeche. Por ejemplo en el 2005 fueron Emily, Wilma y Stan.
2. Para los huracanes seleccionados se obtuvo su campo de velocidades y presiones por medio del modelo HURAC. Figura 5.1.11. huracán Emily, campos de presión y velocidad cuando su ojo estaba el norte de Progreso (Yucatán).
- 3.



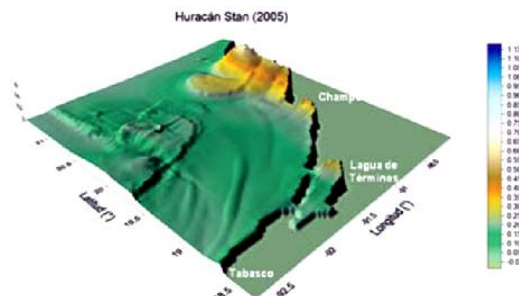
**Figura 5.2.11.. Campos de velocidades y presiones del huracán Emily, Yucatán.**

4. Se ejecutaron los modelos HURAC y HD23 para cada uno de los años generalizados y sus respectivos huracanes registrados, para obtener variaciones de la superficie libre en la zona estudiada. Figura 5.1.12. variación de superficie libre del agua para huracán Wilma en 5 puntos de la costa de Campeche.
- 5.



**Figura 5.2.12. Tiempo vs superficie libre para el huracán Wilma.**

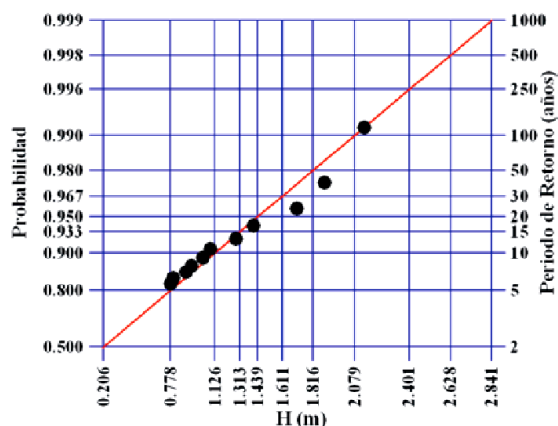
6. Se obtuvo el máximo valor de la superficie libre del agua en toda la zona costera de la ciudad de Champotón para cada huracán. Figura 5.2.13 máxima marea de tormenta para el Estado de Campeche debida al huracán Stan 2005.



**Figura 5.2.13.** Marea de tormenta máxima para huracán Stan 2005.

7. Si en el mismo año se presentan varios huracanes, se obtiene el máximo valor de la marea de tormenta para cada punto de todos los huracanes.  
8. Con los máximos anuales calculados se realiza el análisis extremal con la distribución de probabilidad Weibull, con gran validez para fenómenos que ocurren en el mar.

Con los parámetros obtenidos se generan mapas de marea de tormenta para periodos de retorno de 2,5,10,20,30,50,100,250,500 y 1000 años, y funciones de inundación para todas las celdas costeras de Campeche; figura 5.2.14 muestra la funciones correspondiente a la celda más cercana a la desembocadura del río Champotón.



**Figura 5.2.14.** Funciones de inundación para las celdas costeras de Campeche.

Los escenarios de ascenso del nivel medio del mar asociados al cambio climático considerados se obtuvieron de: proyecciones que el IPCC (2007) propone para el año 2099 (tabla 5.2.6) y las proyecciones de Zavala et al., (2010) con el registro histórico del equipo oceanográfico del Sistema Mareográfico Nacional, instalado en Ciudad del Carmen, cuya tendencia indica un aumento de 3.4mm/año del nivel medio del mar a partir del año 1990.

Tabla 5.2.6. **Proyecciones del calentamiento de la superficie libre y aumento en el nivel medio del mar para finales del siglo XIX (IPCC, 2007).**

Caso	Cambio de Temperatura (°C en 2090-2099 respecto a 1980-1999)		Aumento en el nivel medio del mar (m en 2090-2099 respecto a 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo obtenido a partir de modelos, excluidos los cambios climáticos dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo
Concentraciones constantes en los niveles del año 2000	0.6	0.3 – 0.9	No disponible
Escenario B1	1.8	1.1 – 2.9	0.18 – 0.38
Escenario A1T	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.45
Escenario B2	2.4	1.4 – 3.8	0.20 – 0.43
Escenario A1B	2.8	1.7 – 4.4	0.21 – 0.48
Escenario A2	3.4	2.0 – 5.4	0.23 – 0.51
Escenario A1FI	4.0	2.4 – 6.4	0.26 – 0.59

Tabla 5.2.7. **Escenarios de modelación para el río Champotón.**

Esc	Periodo de Retorno (años)	Marea			Aumento Nivel Medio del Mar		Condición de frontera en la desembocadura (m.s.n.m)
		Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Astronómica (MSNMM)	Tormenta (MSNMM)	Zavala 2099	IPCC 2099	
1	10	346.04	0.66	1.126	-	-	1.786
2	10	346.04	0.66	1.126	0.37	-	2.156
3	10	346.04	0.66	1.126	-	0.59	2.376
4	20	421.54	0.66	1.439	-	-	2.099
5	20	421.54	0.66	1.439	0.37	-	2.469
6	20	421.54	0.66	1.439	-	0.59	2.689
7	50	513.81	0.66	1.816	-	-	2.476
8	50	513.81	0.66	1.816	0.37	-	2.846
9	50	513.81	0.66	1.816	-	0.59	3.066
10	100	580.92	0.66	2.019	-	-	2.679
11	100	580.92	0.66	2.019	0.37	-	3.069
12	100	580.92	0.66	2.019	-	0.59	3.269

El resumen de los 12 escenarios de modelación propuestos para este estudio estimado para el año 2099 está contenido en la tabla 5.2.7. Se considera que la marea astronómica, la de tormenta y la estimación de caudales en el río no cambia, solo el nivel del mar aumenta.

Adicionalmente a este trabajo de tesis se elaboró un mapa de la correlación existente entre el fenómeno de sequías que afecta periódicamente al país y los eventos de precipitación media a nivel estatal, a partir de la revisión de la información reportada por la CONAGUA. Estos resultados se incluyen en el anexo 1.

### 5.3 Referencias

1. Aparicio, F.J., 1997. Fundamentos de Hidrológica de Superficie, 6ta Reimpresión. Limusa, S.A de C.V.
2. Arcos Espinosa, G., S.B. Jiménez-Hernández, R Padilla-Hernández, 2010. Esguerrimiento medio anual y disponibilidad de agua en la vertiente del Golfo de México, p. 61-72. En: E.Rivera Abbott, M., Refsgaard, J., 1996. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, vol. 22. Kluwer Academic Publishers
3. Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, y G.J. Villalobos Zapata (eds.) Cambio Climático en México un Enfoque Costero- Marino. Universidad Autónoma de Campeche.cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
4. Bender, M., T. Knutson, R. Tuleya, J. Sirutis, G. Vecchi, S. Garner, y I. Held, 2010. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science*,327, 454. DOI: 10.1126/science.1180568.
5. Campos, Aranda D. F., 1998. Procesos del Ciclo Hidrológico, 3ra Reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí; Facultad de Ingeniería; San Luis Potosí, México; D.F.
6. Campos, Aranda D. F., 2007. Estimación y aprovechamiento del esguerrimiento: Primera edición, San Luis Potosí, S.L.P. isbn-970-95118-0-7 conagua, 2011. bandas, Banco Nacional de Aguas Superficiales, conagua, Mexico.<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
7. Castanedo, S., 2000. Desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional para el estudio de la propagación de ondas largas en estuarios y zonas someras. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria.
8. CENECAM, "Plan Estatal de Contingencias para fenómenos Hidrometeorológicos 2010", México: Gobierno del Estado de Campeche, 2010.
9. Domínguez. M. R., G. G. Esquivel, M. A. Baldemar, R.A. Mendoza, y J.M.L. Arganis, 2008. Manual del modelo para pronóstico de esguerrimiento., Serie manuales. ii- unam.
10. Domínguez, R., S.E. Palacio, 2010. Tormentas de diseño en el río Grijalva. xxi Congreso Nacional de Hidráulica. Octubre, 2010. esri, 2009. Programa Arcinfo versión 9.3. Flores S, J., e I. Espejel, 1994. Etnoflora yucatanense: tipos de vegetación de la península de Yucatán. Fascículo 3, uady, Mérida Yucatán, p. 73-83.
11. García, E., R. Vidal, y M.E. Hernández, 1989. Las regiones climáticas de México. En A. García de Fuentes, A(ed). Atlas Nacional de México, Instituto de Geografía, unam.
12. INEGI, "Resultados Definitivos del Censo de Población y Vivienda del Estado de Campeche" <http://www.inegi.org.mx/default.aspx>
13. INEGI, 2010. Uso de Suelo y Vegetación Serie II, Clave E1601, 1:250,000, formato \*.shp.[http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/regiones\\_hidrologicas.cfm?c=519](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/regiones_hidrologicas.cfm?c=519).
14. IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ipcc, Ginebra, Suiza, 104 p.



15. Jiménez, E. M., et al. *Manual de Operación de los programas AX.EXE*, CENAPRED, México, 1997
16. Ruiz, G., Mendoza, E., Silva, R., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Escalante, y E., Ruíz, F., 2008. Caracterización del régimen de oleaje y viento de 1948-2007 en el litoral mexicano. *Revista de Ingeniería del Agua*, 16(1).
17. Ruiz, G., Vega, B.E., Posada, G., Silva, R., Nava, J. C "Implementación de Red Mareográfica en el Litoral del Estado de Campeche", 2010, p 27-48. *Jaina*, vol. 21, No 1, enero-junio. 2010. ISSN 0188 - 4700, CENAPRED 2006
18. Posada. G., Silva, R., Medina, R. (2008), "Modelo numérico tridimensional para transporte de un contaminante conservativo", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*,. Vol. XXIII, núm. 1, II Época, enero-marzo de 2008 pp. 5-19. ISSN-0186-4076
19. Posada, G., Vega, B.E, Ruíz, G., Silva, R., Nava, J.C., Pulido, Y. (2010), "*Sistema de Medición de Niveles de Mar y Temperatura en el Estado de Campeche, México* ", XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay. (Artículo aceptado).
20. Ruiz, G. et. al. (2008), "Análisis extremal en Atlas del clima marítimo de aguas litorales mexicanas", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*.
21. Silva, R., (2005) Análisis y descripción estadística del oleaje, Serie Docencia Instituto de Ingeniería UNAM, ISBN 970-32-0710-3. Septiembre.
22. Silva, R., et. al., 2008. Atlas Oceanográfico de clima marítimo de la vertiente Atlántica mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México.

## Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones

La ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos en el mundo se debe en mayor parte al cambio climático que se ha intensificado y ocasiona un desequilibrio en la zona afectada. En este trabajo se presentaron diversas metodologías para el estudio de eventos; en el caso de México cabe detallar que son pocos los investigadores dedicados al estudio de huracanes en México, la mayoría están concentrados en la UNAM y otros pocos en el Servicio Meteorológico Nacional; para los eventos de inundaciones el análisis se enfoca a la cuantificación de los daños económicos y materiales; estos se presentan generalmente en las zonas costeras por la aparición de los huracanes, pero las inundaciones se han extendido al interior del país por rebasar la capacidad de las obras hidráulicas o por la falta de ellas; el agua forma corrientes que a su paso ocasionan deslaves e inundaciones en zonas marginales en las cuales la gente no está prevenida.

En el caso de la precipitación y sequía los estudios van ligados, pues los métodos para su estudio están basados en datos históricos para determinar con qué frecuencia se presentan estos eventos y en qué zonas, a pesar de esto, el país no está preparado para afrontar los problemas generados por estos eventos; en el caso de que se reduzca la precipitación en una zona de producción agrícola se puede presentar una temporada de sequía que por falta de disponibilidad de agua genera pérdidas económicas en este sector.

La distribución territorial es parte del problema ocasionado por el cambio climático, zonas que antes eran productivas y con tierra fértil se han transformado en áreas anormalmente secas, la población tiene que buscar reubicarse en otras zonas para no ser vulnerable y adaptarse a los cambios.

Los estudios y métodos realizados por diversos autores coinciden en varios aspectos; uno de ellos es la elaboración de mapas de riesgo; estos son de gran utilidad pues permiten ver las zonas más afectadas, la concentración de la población y la extensión del problema para darse una idea global del comportamiento de dichos fenómenos.

Los ingenieros civiles pueden contribuir a la planificación y valoración de riesgos, tomando en cuenta los diferentes escenarios presentados en el país y con ayuda de las dependencias encargadas de re-distribuir mejor las reservas para cuando se presenten emergencias y crisis repentinas.

Para combatir o mitigar las sequías, una opción es adaptar un mecanismo de riego que desfogue a las zonas áridas del país utilizando agua de re-uso o inclusive el agua del mar llevando a cabo procesos de desalinización o algún tratamiento. O, como sugiere la CONAGUA, disminuir las zonas de riego por inundación cambiando a formas de riego más eficientes como la metodología de riego por goteo, donde se aprovecharía mejor el recurso.

En el caso de zonas rurales o propensas a riesgos de inundación con ayuda de los pluviógrafos se puede medir la intensidad de la precipitación y con base en estudios anteriores hacer una revisión de los niveles máximos alcanzados en la presencia de una inundación. Con estos datos se puede informar y prevenir a la población, con un plan de apoyo económico reubicar las viviendas en zonas más seguras o invertir en alguna obra de captación que tenga la capacidad de almacenar el agua y evitar los desbordamientos.

En cuanto a recursos financieros para el apoyo a desastres naturales convendría hacer una revisión detallada de cómo está actualmente la distribución de recursos y re asignarlos con ayuda de los estudios realizados en el país, enfocarse en la zona y su mayor problema, de manera que al presentarse una emergencia haya un recurso disponible al momento y no que el estado afectado sufra mayores pérdidas por falta de apoyo del gobierno.

La población también puede contribuir a reducir el cambio climático tan drástico en el mundo, creando una conciencia de lo que realmente causa estos cambios; por ejemplo, el manejar adecuadamente materiales, sustancias o residuos peligrosos en las ciudades para evitar derrames y contaminar; controlar el crecimiento urbano desordenado y los asentamientos en orillas de barrancas o zonas cercanas a ríos; darle mejor mantenimiento a la infraestructura urbana e industrial para evitar fallas.

La CONAGUA también contribuye a la planificación regional y subregional, pues al tener mapas detallados de las cuencas y subcuencas, ayuda a observar el comportamiento de las aguas superficiales que pueden convertirse en inundaciones o escurrimientos súbitos.

Protección civil es la encargada de elaborar planes y programas: una medida fue tener un mayor control en la construcción de edificaciones que cumplan con requisitos mínimos de resistencia a fenómenos naturales.

## Referencias

1. Aparicio, F.J., 1997. Fundamentos de Hidrológica de Superficie, 6ta Reimpresión. Limusa, S.A de C.V
2. Arcos Espinosa, G., S.B. Jiménez-Hernández, R Padilla-Hernández, 2010. Esguerrimiento medio anual y disponibilidad de agua en la vertiente del Golfo de México, p. 61-72. En: E.Rivera Abbott, M., Refsgaard, J., 1996. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, vol. 22. Kluwer Academic Publishers
3. Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, y G.J. Villalobos Zapata (eds.) Cambio Climático en México un Enfoque Costero- Marino. Universidad Autónoma de Campeche.cetys-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
4. Bender, M., T. Knutson, R. Tuleya, J. Sirutis, G. Vecchi, S. Garner, y I. Held, 2010. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes. *Science*,327, 454. DOI: 10.1126/science.1180568.
5. Campos, Aranda D. F., 1998. Procesos del Ciclo Hidrológico, 3ra Reimpresión. Universidad Autónoma de San Luis Potosí; Facultad de Ingeniería; San Luis Potosí, México; D.F.
6. Campos, Aranda D. F., 2007. Estimación y aprovechamiento del esguerrimiento: Primera edición, San Luis Potosí, S.L.P. isbn-970-95118-0-7 conagua, 2011. bandas, Banco Nacional de Aguas Superficiales, conagua, Mexico.<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
7. Castanedo, S., 2000. Desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional para el estudio de la propagación de ondas largas en estuarios y zonas someras. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad de Cantabria.
8. CENECAM, "Plan Estatal de Contingencias para fenómenos Hidrometeorológicos 2010", México: Gobierno del Estado de Campeche, 2010.
9. Domínguez. M. R., G. G. Esquivel, M. A. Baldemar, R.A. Mendoza, y J.M.L. Arganis, 2008. Manual del modelo para pronóstico de esguerrimiento., Serie manuales. ii- unam.
10. Domínguez, R., S.E. Palacio, 2010. Tormentas de diseño en el río Grijalva. xxi Congreso Nacional de Hidráulica. Octubre, 2010. esri, 2009. Programa Arcinfo versión 9.3. Flores S, J., e I. Espejel, 1994. Etnoflora yucatanense: tipos de vegetación de la península de Yucatán. Fascículo 3, uady, Mérida Yucatán, p. 73-83.
11. Acevedo F... Diaz-Peon Antonio Luna. Principales fenómenos meteorológicos que afectaron el estado de Veracruz en el año 2005
12. Alcantara-Ayala I. Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology* 61, 2004, pp. 19-40.
13. Ayala Carcedo FJ. El sofisma de la imprevisibilidad de las inundaciones y la responsabilidad social de los expertos. Un análisis del caso español y sus alternativas.Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, ISSN 0212-9426, Nº. 33, 2002 , págs. 79-92
14. Bitrán Bitrán Daniel, Lorena Acosta Colsa, Héctor Eslava Morales, Carlos Gutiérrez Martínez, Marco Antonio Salas Salinas, María Teresa Vázquez Conde. Impacto

- socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la república mexicana en el año 2001. CENAPRED, 2002.
15. Bravo Lujano Cirilo e Ing. Hdz Unzón Alberto. Reseña del huracán "Jova" del Océano Pacífico. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional Gerencia de Meteorología y Climatología. / Subgerencia de Pronóstico Meteorológico Temporada 2011 de Ciclones Tropicales.
  16. Breña Puyol Agustín Felipe, Precipitación y Recursos Hidráulicos en México. Universidad autónoma Metropolitana, 2006. Libro en línea: [http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/precipitacion/PRHM\\_04-libro.pdf](http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/precipitacion/PRHM_04-libro.pdf)
  17. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Sistema Nacional de Protección Civil. Guía Básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Fenómenos hidrometeorológicos. México, 2006, 140 pp
  18. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Secretaría de Gobernación. Ciclones Tropicales. Serie Fascículos, México. 2007. [http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc\\_Ciclones\\_2007.pdf](http://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/3112008Fasc_Ciclones_2007.pdf).
  19. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2008. Septiembre, 2009. 264 pp
  20. CENAPRED, 2011. <http://www.cenapred.unam.mx/es/Investigacion/RHidrometeorologicos/FenomenosMeteorologicos/Inundaciones/>
  21. CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, Edición 2007. CONAGUA-SEMARNAT, Diciembre, 28-30.
  22. CONAGUA. Inventario Nacional de Obras de Protección contra inundaciones en cauces naturales. Capítulo 2. Zonas inundables en México. CONAGUA 2008. 29-42.
  23. CONAGUA. Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2006, 2007 y 2008. CONAGUA-SEMARNAT, 2009. 75- 258.
  24. CONAGUA. Análisis de las temporadas de huracanes de los años 2006, 2007 y 2008. CONAGUA-SEMARNAT, 2009, pp75- 258.
  25. CONAGUA. Estadísticas del agua 2010. Capítulo 2 Situación de los recursos hídricos. 32-33.
  26. CONAGUA, 2010. Atlas digital del agua México. <http://www.conagua.gob.mx/atlas>
  27. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del Agua en México, Edición 2011. CONAGUA-SEMARNAT, Marzo. 185 pp.
  28. CONAPO. La Situación demográfica de México 2002. Consejo Nacional de Población, Secretaría de Gobernación, México 2003, 182 pp
  29. CONAPO. La Situación demográfica de México 2006. Consejo Nacional de Población, Secretaría de Gobernación, México, 2006
  30. Cruz Flores P. Impacto Socioeconómico Del "Huracán Karl" Sobre Instalaciones De Salud En Veracruz, México Con Una Población De 7 Millones 600 Mil Habitantes En Septiembre Del Año 2010. Escuela De Medicina, Sta. Catarina Mártir. Cholula, México. Abstracts - 17th World Congress on Disaster and Emergency Medicine. Prehospital and Disaster Medicine Vol. 26, Supplement 1

31. Endfield, G. H., I. Fernández- Tejedo and S. L... O'Hara. Drought and disputes, deluge and dearth: climatic variability and human response in colonial Oaxaca, Mexico. *Journal of Historical Geography* 30, 2004, pp. 249-276.
32. Esquivel G., G. Prospectiva de la demanda de agua en México. Tesis de Maestría. Posgrado de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 200, pp. 79.
33. Guha-Sapir D, Vos F, Below R, with Ponserre S. Annual Disaster Statistical Review 2010: The Numbers and Trends. Brussels: CRED; 2011. [http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR\\_2010.pdf](http://www.cred.be/sites/default/files/ADSR_2010.pdf)
34. Abbott, M., Refsgaard, J., 1996. Distributed Hydrological Modelling. Water Science and Technology Library, vol. 22. Kluwer Academic Publishers
35. ARMC (2000). "Floodplain management in Australia. Best practice principles and guidelines", Australia: Agricultural and Resource Management Council of Australia and New Zealand, SCARM Report 73, 105 pp.
36. Avelar, C.E. (2007), "Validación de un modelo para estimar pérdidas esperadas por escenarios de huracán en México", XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.
37. Batts ME, Cordes MR, Russell LR, Shaver JR, and Simiu E. Hurricane wind speeds in the United States. *J Str Div ASCE* 1980;1000:2001±15.
38. Becker, A. y Serban, P. (1990) Hydrological models for water resources system design and operation. *Operational. Hydrol. Report 34*, wmo, Geneva, Switzerland.
39. Belleudy, P. (2004). "Risques Hydro-météorologiques, crues et inondations / risque, aléa et vulnérabilité", DDS-TUE364- 9, Suiza.
40. Bethlahmy, N. 1977. Flood analysis by SMEMAX transformation. *J. Hydraulics Division* 103: 69-78.
41. Birkel, C. y S. Demuth. 2006. Drought in Costa Rica - Temporal and spatial variability, trends and its relationship to atmospheric circulation. International conference on FRIEND, Havana, Cuba, IAHS Red Book (aceptado).
42. Bobée, B., and F. Ashkar. 1991. Log-Pearson type 3 distribution. *In: The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology*. Water Resources Publications. Littleton, Colorado, U.S.A. pp: 76-120.
43. Box, G.E.P., Cox, D.R., 1964. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society* 26, 211-243 (Discussion 244-252).
44. Campos-Aranda D.F. Hidrosistemas Urbanos. Conceptos básicos, crecientes y planicies de inundación. *Ciencia y Desarrollo*, (145):49-57. 1999.
45. Campos-Aranda D.F. Contraste de cinco métodos de ajuste de la distribución GVE en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*, XVI(2):77-92. 2001.
46. Campos A., D. F. 2006. Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos. *Avances en Hidráulica* 13. AMH-IMTA. México, D. F. 172 p.
47. Campos A., D. F. 2007. Parámetros hidrológicos de la cuenca. *In: Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento*. Edición del autor. San Luis Potosí, S.L.P. pp: 41-50.

48. Campos-Aranda D.F. Calibración del método racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km<sup>2</sup> de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*, 42(6):615-627. 2008
49. Cavazos, T. and S. Hastenrath (1990), "Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation", *International Journal of Climatology*, no. 10, pp. 377-386.
50. Cervantes-Sánchez O. y Landeros-Ortiz J.J. Curvas intensidad- duración-periodo de retorno de las tormentas máximas registradas en Tacubaya, DF. XVIII Congreso Nacional de Hidráulica, San Luis Potosí, SLP, 2004, pp. 479-486.
51. Chander S., Spolia S.K., Kumar A. Flood Frequency Analysis by Power Transformation. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(HY11):1495-1504, 1978.
52. Chander, S., S. K. Spolia, and A. Kumar. 1978. Flood frequency analysis by Power Transformation. *J. Hydraulics Division* 104: 1495-1504.
53. Chen C-I. Rainfall Intensity-Duration-Frequency fórmulas *Journal of the Hydraulics Engineering*, 109(12):1603-1621, 1983
54. Chow, V.T.; Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Santa Fe de Bogotá, 584 pp.
55. Davison AC., Smith RL. Models for exceedances over high thresholds (with discussion). *J Roy Statist Soc B* 1990;52:393±442.
56. Escalante S., C. 1999. Inferencia y pronóstico de eventos con base en la teoría de los subconjuntos borrosos. *Ing. Hidráulica en Méx.* XIV: 5-17.
57. Gopalakrishnan, S.G., David P. Bacon, Nash.at N. Ahmad, Zafer Boybeyi, Thomas J. Dunn, Mary S. Hall, Yi Jin, Pius C. S. Lee, Rangaro V. Madala, R. Ananthakrishna Sarma,
58. Haan L. Extreme value statistics. In Galambos J, Lechner J, Simiu E, editors. *Extreme value theory and applications*, vol 1. The Netherlands: Dordrecht, 1994. p. 93-122
59. Hisdal, H., K. Stahl; L.M. Tallaksen y S. Demuth, S. 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology*, 21: 317-333.
60. Huerta, B., Vega E. y Avelar C., (2006), "Caracterización del daño causado a estructuras y contenidos por inundaciones fluviales y costeras". XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco.
61. Huerta, B., Ordaz, M., Reinoso, E., Avelar F., Torres, M., Zeballos, A., Osuna, E., Martínez, I. y Hernández, G. (2007), "Sistema experto para la evaluación de pérdidas por riesgos hidrometeorológicos en México", XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero.
62. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2000. ERIC II: Extractor Rápido de Información Climatológica 1920-1998. 1 CD. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-IMTA. Jiutepec, Morelos.
63. IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2003. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). 8 CD. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales- Comisión Nacional del Agua-IMTA. Jiutepec, Morelos.
64. Janjic, Z.I., J. P. Gerrity Jr. and S. Nickovic, 2001: An Alternative Approach to Nonhydrostatic Modeling. *Monthly Weather Review*. Vol. 129, No. 5, pp. 1164.1178.

65. Janjic, Z., 2003: A nonhydrostatic model based on a new approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 271- 285.
66. Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London.
67. Kite G.W. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Colorado, USA. Water Resources Publications. Fort Collins. 1977. Pp. 156-168.
68. Knutson, T.R. and R.E. Tuleya, 2004: Impact of CO<sub>2</sub>- Induced Warming on Simulated Hurricane Intensity and Precipitation: Sensitivity to the Choice of Climate Model and Convective Parameterization. *Journal of Climate*: Vol. 17, No. 18, pp. 3477-3495.
69. Lizano, O.G. 1990. Modelo de viento ajustado a un modelo de generación de olas para el pronóstico durante huracanes. *Revista Geofísica* (33), 75-103.
70. Lizano, O.G. 1988. Modelo de predicción de olas generadas por huracanes en el Mar Caribe. Tesis doctorado, Universidad de Puerto Rico, Mayaguez, 126pags.
71. Lizano O.G. y Fernández W. 1996. Algunas características de las tormentas tropicales y de los huracanes que atravesaron o se formaron en el Caribe adyacente a Cota Rica durante el periodo 1886-1988. *Top Meteor. Oceanogr.*, 3(1); 3-10.
72. Mann, H.B. 1945. Nonparametric Tests against Trend. *Econometrica* 13, 245-259.
73. Mark D. Turner, and Tim Wait, 2002: An Operational Multi-Scale Atmospheric Model with Grid Adaptivity for Hurricane Forecasting. *Monthly Weather Review*, Vol. 130, No. 7, pp. 1830-1847.
74. Martín-Vide, J. P.; López-Querol, S.; Martín-Moreta, P.; Simarro-Grande, G. y Benito-Fernández, G. (2003). Uso de modelos uni y bidimensionales en llanuras de inundación. Aplicación al caso del río Tajo en Talavera de la Reina. *Ingeniería del agua*. 10:49-58.
75. Méndez-González, J., J. J. Nívar y O.V. González (2008), "Análisis de tendencias de la precipitación (1920-2004) en México", *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 65, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 38-55.
76. Miranda, E. (1999), "Approximate seismic lateral deformation demands on multistory buildings", *Journal of Structural Engineering*, 125(4), 417-425.
77. NDBC (2011). "Datos de características del oleaje". National Data Buoy Center (NDBC), consultado el 14 de diciembre 2011, disponible en: <http://www.ndbc.noaa.gov.html>.
78. NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (2004), Document maintained by Klaus Wolter (klaus.wolter@noaa.gov), update: April 19, 14:43:11 MDT [[http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei\\_index.html](http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei_index.html)].
79. PALMER, W. 1965. Meteorological drought. US: Weather Bureau, Reserch Paper N° 45, Washington.
80. Pavia, E. G. and A. Badana (1998), "ENSO modulates rainfall in the Mediterranean California", *Geophysical Research Letters*, no. 25, pp. 3855-3858.
81. RAVELO, A. y HERRERO, C. 1999. PDIWIN v1.0. Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales
82. Resio, D.t. 1981. The estimation of wind-wave generation in a discrete spectral model. *J of Phys Oceanog.* 11, 510-525.



83. Russell LR. Probability distributions for hurricane effects. *J Waterways Harbours and Coastal Eng Div ASCE* 1971;97(WW2):130±54.
84. Russo, B., Gómez, M. and Macchione, F. (2011). "Experimental approach to determine flood hazard criteria in urban areas", 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre, Brazil.
85. Sánchez, L. y Méndez, L. (2009). "Modelo de elevación digital e informatización del sistema de drenaje mayor y menor de la zona oeste de la ciudad de Santa Ana de Coro, Falcón.", Trabajo de Investigación, UNEFM, Coro, Venezuela, 230 pp.
86. Sánchez, L. (2011) . "Un nuevo enfoque del método de ponderación mixta en la determinación de la peligrosidad a las inundaciones pluviales en una cuenca urbana", Centro de Investigaciones en Recursos Hídricos (CIDRHI), UNEFM, reporte 01-2011, Coro, Falcón, Venezuela.
87. Schaefli, B., Hingray, B., Musy, A., 2004. Improved calibration of hydrological models: use of a multi-objective evolutionary algorithm for parameter and model structure uncertainty estimation. *Hydrology: Science and Practice for the 21st Century*, pp. 1.
88. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 3*. Región Hidrológica No. 37. El Salado, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980a.
89. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 4*. Región Hidrológica No. 36. Nazas-Aguanaval, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1980b.
90. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico No. 5*. Región Hidrológica No. 26. Pánuco, Tomos I y II, Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1982.
91. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) *Boletín Climatológico No. 6*. Regiones Hidrológicas No. 24 Oriente (Bajo Rio Bravo) y No. 25 Golfo Norte (San Fernando-Soto La Marina), Subsecretaría de Planeación. México, DF. 1983.
92. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). *Isoyetas de Intensidad-Duración Frecuencia*. República Mexicana. Subsecretaría de Infraestructura. México, DF. 1990. 495 p.
93. Simiu E, Scanlan RH. *Wind effects on structures*. 3rd ed. New York:Wiley Interscience, 1996.
94. Smith RL. Extreme value theory. In Lederman W, Lloyd E, Vajda S, Alexander C, editors. *Handbook of applicable mathematics*. New York:John Wiley & Sons,1989. p. 437±472.
95. SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). 1975. Actualización al Boletín Hidrológico No. 36. Tomo VI, periodo 1970-73. Subsecretaría de Planeación de la S.R.H. México, D. F.
96. Stedinger, J. R., R. M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou. 1993. Frequency analysis of extreme events. *In: Maidment D. R. (ed). Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc. New York, U.S.A. pp: 18.1-18.66

97. Tallaksen, L.M. y H. Hisdal. 1997. Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. Proceedings of the 3rd International conference on FRIEND, 1-4 Oct. 1997, Postojna, Slovenia, IAHS Publ., 246, 141-150.
98. Téméz P., J. R. 1991. Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España. Ingeniería Civil 82: 51-56.
99. Torres, M.A., Avelar, C.E. y Huerta, B. (2007), "Evaluación del riesgo por inundaciones debidas a tormentas", XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Ixtapa-Zihuatanejo, Guerrero
100. Triviño, A. P. y Ortiz, S. R. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y rios rambla mediterráneos. *Investigaciones geográficas*. 35:67-83.
101. Vickery PJ, Twisdale LA. Prediction of hurricane windspeeds in the US. *J Struct Eng* 1995;121:1691±9.
102. WELLS, N. 2003. Documentation of the original and self-calibrating Palmer Drought Severity Index used in the Nat. Agr. Decision Support System. Univ. of Nebraska, Lincoln.
103. Willems, P., 2007. River modelling, Adapted version 2007 of the "General Methodology for River Flood Modelling" for the Administration of Waterways and Sea - Department Flanders Hydraulics and Hydrological Research. Katholieke Universiteit Leuven Hydraulics Laboratory, Heverlee, BE (in Dutch).
104. Willems, P., 2009. A time series tool to support the multi-criteria performance evaluation of rainfall-runoff models. *Environmental Modelling and Software* 24 (3).
105. Willoughby, H.E. and Rahn, M.E. (2004). "Parametric Representation of the Primary Hurricane Vortex. Part I: Observations and Evaluation of the Holland (1980) Model". *Monthly weather review*, American Meteorological Society, volumen 132, dec. 2004.
106. Yang, J., Reichart, P., Abbaspour, K.C., Yang, H., 2007. Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: statistical model formulation and Bayesian inference. *Journal of Hydrology* 340 (3), 167-182.
107. Zelenhasic, E. y A. Salvai. 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resour. Res.* (23, 1), pp. 156-168.
108. Zonensein, J.; Miguez, M.G.; De Magalhães, L.P.C. and Valentin, M.G. (2008). "Flood risk index as an urban management tool", 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK.
109. Hastenrath, Stefan, Dierk Polzin, Charles Mutai: Diagnosing the 2005 drought in equatorial east Africa. *J. Climate*, 20,2007, pp. 4628-4637.
110. Held I.M., Delworth T.L., Lu J, Findell K.L., and Knutson T.R. Simulación de la sequía de Sahel en el vigésimo y siglo XXI - llevado a cabo y otros. 102 (50): 17891 - Procedimientos de la National Academy of Sciences. October 17, 2005.
111. IMTA. 2001. Página del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://www.imta.gob.mx/>
112. Instituto Nacional de Ecología y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. , INE-SEMARNAT. Cuarta comunicación nacional ante la convención

- marco de las naciones unidas sobre el cambio climático, México lo gris ponerlo en las referencias completas abajo, 2009.
113. IPCC. Climate change 2007: synthesis report summary for policymakers. Assessment of Working groups I, II and III to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
  114. Jiménez, B., Torregrosa, M.L, Aboitez A, L.. El Agua en México: Cauces y Encauces. CONAGUA-Academia Mexicana de Ciencias, 2010, pp. 702.
  115. Luja, V. H., R. Rodríguez-Estrella. 2010. Are tropical cyclones sources of natural selection? Observations on the abundance and behavior of frogs affected by extreme climatic events in the Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of Arid Environments* 74, 2010, pp.1345-1347.
  116. Magaña, V. y C. Neri. Eventos Hidrometeorológicos Extremos en el Valle de México. Publicado en Revista Ciudades. Num. 74, 2007, pp. 26-30.
  117. Mapping the impacts of natural hazards and technological accidents in europe — An overview of the last decade European Environment Agency. 2010. 25-32.
  118. Murcia H. Fermano y Macía José Luis. Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México.
  119. Ollero Alfredo. Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain *Geomorphology* Volume 117, Issues 3-4, 1 May 2010, Pages 247-260
  120. ONU. Agua para todos, agua para la vida: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. ONU. NY: UNESCO, Berghahn Books, 2003.
  121. Ortiz Gómez, R., Zúñiga Alvarado C., Barragán Barrios C., Wagner Gómez, A.I. (2010). Análisis de la red de estaciones climatológicas de la República Mexicana. Memorias del Congreso Nacional de Hidráulica, AMH, Guadalajara, Jal., octubre del 2010.
  122. Ovalles, F., A. Cortez, M. Rodríguez, J. Rey y E. Cabrera-Bisbal. Variación geográfica del impacto del cambio climático en el sector agrícola en Venezuela. *Agronomía Tropical* 58(1), 2008, pp. 37-40.
  123. Paredes, Franklin y Guevara, Edilberto. Desarrollo y evaluación de un modelo para predecir sequías meteorológicas en los Llanos de Venezuela. *Bioagro*, abr. 2010, vol.22, no.1, p.03-10. ISSN 1316-3361
  124. Pérez, J. B. Pronóstico Numérico del tiempo para el Valle de México. Tesis de Maestría. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM, 2004. 70 pp.
  125. Comisión Nacional del Agua. Banco nacional de datos de aguas superficiales (bandas). consulta de datos hidrométricos, de sedimentos y vasos [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDA S.htm](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDA%20S.htm)
  126. Comisión Nacional del Agua 2010. <http://www.conagua.gob.mx/>
  127. Comisión Nacional del agua. CONAGUA 2011. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/ocpy/Contenido.aspx?id=dd1e336c-9afa-4afd-aae0-ffe2582d6a58%7CSequimiento%20Huracanes%7C0%7C24%7C0%7C0%7C0>

128. Instituto Mexicano de tecnología del agua  
[http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com\\_wrapper&view=wrapper](http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com_wrapper&view=wrapper)
129. Inventario Nacional de Obras de protección contra inundaciones en cauces naturales. CONAGUA 2010. <http://sgh.conagua.gob.mx/>
130. Miranda Alonso S, Benítez Pensado V., Flores Zamudio R. Una herramienta para el manejo de los datos climatológicos del país. IMTA 2003.
131. Perevochtchikova María, Simposio: Desarrollo de las estadísticas del medio ambiente: fuentes, alcances y usos. Centro de Estudios Demográficos Urbanos y Ambientales. Octubre 2008.
132. Proyecto de Modernización del Servicio Meteorológico Nacional de México Diagnóstico Institucional y Plan Estratégico de Desarrollo 2010-2019 Consultoría realizada con la asistencia técnica de la OMM. (octubre 2009-enero 2010)
133. Salinas V.M. Actualización y manejo de la base de datos de precipitación y temperatura para el estado de Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis, 1998.
134. Servicio Meteorológico Nacional. Información sinóptica de los observatorios [http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=22&Itemid=90](http://smn.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=22&Itemid=90). 2012
135. Servicio Meteorológico Nacional <http://smn.conagua.gob.mx/emas/>
136. Vázquez Aguirre J.L. Datos climáticos de la República Mexicana: panorama actual y requerimiento inmediato. Primer foro del medio ambiente atmosférico en el estado de Veracruz, Febrero 2006.
137. Servicio Meteorológico Nacional de Honduras, 2012. <http://www.smn.gob.hn/web/glosario>
138. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., & Chen, Z. Technical summary. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: University Press, 2007
139. Soto Montes de Oca, Gloria, Herrera Pantoja Marina. Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Agosto 2009. [http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua\\_Soto\\_abast\\_cc\\_RepFinal.pdf](http://www.cvcccm-atmosfera.unam.mx/cvcccm/proyectos/Agua_Soto_abast_cc_RepFinal.pdf)
140. Tong J. · Zhang Qiang · Zhu Deming ,Wu Yijin . Yangtze floods and droughts (China) and teleconnections with ENSO activities (1470-2003). *Quaternary International*. 144 (1). February 2006, 29-37.
141. García, E., R. Vidal, y M.E. Hernández, 1989. Las regiones climáticas de México. En A. García de Fuentes, A(ed). *Atlas Nacional de México*, Instituto de Geografía, unam.
142. INEGI, "Resultados Definitivos del Censo de Población y Vivienda del Estado de Campeche" <http://www.inegi.org.mx/default.aspx>
143. INEGI, 2010. Uso de Suelo y Vegetación Serie II, Clave E1601, 1:250,000, formato \*.shp. [http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/regiones\\_hidrologicas.cfm?c=519](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/basicos/hidrologia/rios/regiones_hidrologicas.cfm?c=519).

144. IPCC, 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ipcc, Ginebra, Suiza, 104 p.
145. Jiménez, E. M., et al. *Manual de Operación de los programas AX.EXE*, CENAPRED, México, 1997
146. Ruiz, G., Mendoza, E., Silva, R., Posada, G., Pérez, D., Rivillas, G., Escalante, y E., Ruíz, F., 2008. Caracterización del régimen de oleaje y viento de 1948-2007 en el litoral mexicano. *Revista de Ingeniería del Agua*, 16(1).
147. Ruiz, G., Vega, B.E., Posada, G., Silva, R., Nava, J. C "Implementación de Red Mareográfica en el Litoral del Estado de Campeche", 2010, p 27-48. *Jaina*, vol. 21, No 1, enero-junio. 2010. ISSN 0188 - 4700, CENAPRED 2006
148. Posada. G., Silva, R., Medina, R. (2008), "Modelo numérico tridimensional para transporte de un contaminante conservativo", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*,. Vol. XXIII, núm. 1, II Época, enero-marzo de 2008 pp. 5-19. ISSN-0186-4076
149. Posada, G., Vega, B.E, Ruíz, G., Silva, R., Nava, J.C., Pulido, Y. (2010), "*Sistema de Medición de Niveles de Mar y Temperatura en el Estado de Campeche, México* ", XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay. (Artículo aceptado).
150. Ruiz, G. et. al. (2008), "Análisis extremal en Atlas del clima marítimo de aguas litorales mexicanas", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*.
151. Silva, R., (2005) Análisis y descripción estadística del oleaje, Serie Docencia Instituto de Ingeniería UNAM, ISBN 970-32-0710-3. Septiembre.
152. Silva, R., et. al., 2008. Atlas Oceanográfico de clima marítimo de la vertiente Atlántica mexicana. Universidad Nacional Autónoma de México.

## ANEXO 1

**Correlación entre porcentajes de sequía y precipitación a nivel nacional**

Se realizó una captura de datos de los porcentajes mensuales de sequía a nivel nacional abarcando el periodo 2003-2011 (datos disponibles); se obtuvo un promedio anual presentado en la tabla 1.

**Tabla 1. Promedio anual de porcentajes de sequías en la República Mexicana**

Promedio anual de sequías					
	D0 a D4	D1 a D4	D2 a D4	D3 a D4	D4
2011	75.99	61.25	45.74	27.31	7.34
2010	26.77	14.16	7.41	1.85	0.00
2009	53.84	26.94	9.59	1.58	0.14
2008	52.97	30.73	9.73	1.93	0.15
2007	47.30	28.04	12.28	3.37	0.09
2006	62.13	38.51	19.61	7.95	2.42
2005	29.30	8.28	0.53	0.01	0.00
2004	24.25	7.12	1.71	0.66	0.14
2003	46.51	23.76	10.87	3.14	0.66

Lo mismo se hizo en el caso de las precipitaciones obteniendo los promedios anuales del mismo periodo (2003-2011) considerando todos los estados de la República Mexicana. **Tabla 2**

Promedio Anual de precipitaciones						
	Sonora	Chihuahua	Coahuila	Durango	Zacatecas	S.L.P
2011.00	30.01	21.71	14.67	20.47	26.21	76.86
2010.00	37.75	39.18	49.33	46.61	42.42	113.33
2009.00	37.08	39.08	27.57	43.28	40.63	79.25
2008.00	38.15	45.84	38.25	53.55	48.37	114.61
2007.00	36.28	40.63	43.53	33.30	36.68	103.13
2006.00	29.91	50.58	26.73	48.49	37.95	60.00
2005.00	24.89	38.54	39.26	31.15	34.54	67.37
2004.00	47.81	62.12	49.49	53.73	57.40	67.57
2003.00	26.62	31.23	40.98	36.38	45.52	72.98

Promedio Anual de precipitaciones						
	Aguascaliente	Baja California	Baja Calif Sur	Campeche	Colima	Chiapas
2010.00	21.48	17.23	5.78	98.41	113.94	198.47
2011.00	41.09	24.78	9.11	118.77	100.07	227.53
2008.00	34.58	9.62	18.80	94.46	71.70	162.76
2006.00	54.74	13.43	15.83	130.00	77.76	196.24
2007.00	45.60	9.91	15.15	104.39	76.74	184.33
2005.00	54.59	9.21	25.83	127.79	91.90	196.18
2009.00	42.44	15.38	10.91	149.20	60.51	182.49
2003.00	59.28	29.79	16.94	102.10	81.50	142.85
2004.00	47.27	16.54	26.89	142.07	73.09	161.30

**Tabla 2. Promedio anual de precipitaciones a nivel nacional.**

Promedio Anual de precipitaciones						
	D.F	Guanajuato	Guerrero	Hidalgo	Jalisco	México
2011.00	65.22	31.56	99.53	58.76	50.19	54.80
2010.00	58.16	66.48	126.75	78.23	78.36	67.48
2009.00	59.43	51.93	82.59	65.87	58.64	60.48
2008.00	61.74	61.07	106.03	66.96	72.40	56.63
2007.00	66.43	63.86	98.86	73.56	72.15	72.56
2006.00	73.49	64.99	107.89	57.93	74.29	59.93
2005.00	53.78	42.50	92.34	57.91	55.33	45.76
2004.00	60.73	73.16	95.35	52.43	87.46	62.58
2003.00	64.00	76.78	86.76	52.00	61.33	59.00

Promedio Anual de precipitaciones						
	Michoacan	Morelos	Nayarit	Nuevo Leon	Oaxaca	Puebla
2008.00	57.48	80.63	94.10	31.91	115.72	106.67
2005.00	90.53	100.58	137.48	102.60	161.68	113.76
2007.00	63.80	85.97	106.77	40.26	105.64	103.03
2006.00	68.73	85.23	129.22	68.68	134.19	116.33
2003.00	66.16	67.24	92.96	57.91	101.07	112.01
2009.00	74.17	73.93	83.50	51.19	105.85	101.82
2011.00	57.43	59.52	101.29	76.60	134.86	104.49
2010.00	76.38	100.63	119.58	69.18	111.72	108.54
2004.00	72.69	91.63	87.41	63.69	122.23	133.00

Promedio Anual de precipitaciones						
	Queretaro	Quintana Roc	Sinaloa	Tabasco	Tamaulipas	Tlaxcala
2009.00	31.03	123.03	49.61	208.04	50.28	60.28
2005.00	59.76	125.32	49.70	213.49	84.27	69.09
2008.00	40.83	91.73	46.76	142.89	52.97	54.60
2003.00	53.48	100.83	61.49	218.11	87.25	56.65
2010.00	52.88	104.35	55.74	212.63	81.64	60.10
2006.00	49.18	94.33	60.98	223.02	55.85	73.00
2011.00	36.25	121.38	44.63	169.67	61.57	56.45
2007.00	58.20	90.59	72.68	163.68	64.42	58.87
2004.00	66.94	129.38	44.24	173.01	72.82	51.43

Promedio Anual de precipitaciones		
	Veracruz	Yucatán
2010.00	129.46	81.07
2011.00	149.26	89.30
2005.00	116.11	63.31
2007.00	131.16	74.94
2009.00	124.49	93.12
2003.00	137.85	74.27
2006.00	152.51	92.29
2004.00	123.59	86.58
2008.00	139.55	70.96

Para el caso de la sequía se ordenaron los datos de mayor a menor. Con la Formula de Weibull se calculó el periodo de retorno y se dibujó en escala Gumbel la función de distribución empírica histórica.

Promedio anual de sequías

No.	D0 a D4	D1 a D4	D2 a D4	D3 a D4	D4	Tr	Escala Gumbel
1	75.99	61.25	45.74	27.31	7.34	10	2.2504
2	62.13	38.51	19.61	7.95	2.42	5	1.4999
3	53.84	30.73	12.28	3.37	0.66	3.333333	1.0309
4	52.97	28.04	10.87	3.14	0.15	2.5	0.6717
5	47.30	26.94	9.73	1.93	0.14	2	0.3665
6	46.51	23.76	9.59	1.85	0.14	1.666667	0.0874
7	29.30	14.16	7.41	1.58	0.09	1.428571	-0.1856
8	26.77	8.28	1.71	0.66	0.00	1.25	-0.4759
9	24.25	7.12	0.53	0.01	0.00	1.111111	-0.8340

D0 Anormalmente seco

D2 Sequía Severa

D4 Sequía excepcional

D1 Sequía Moderada

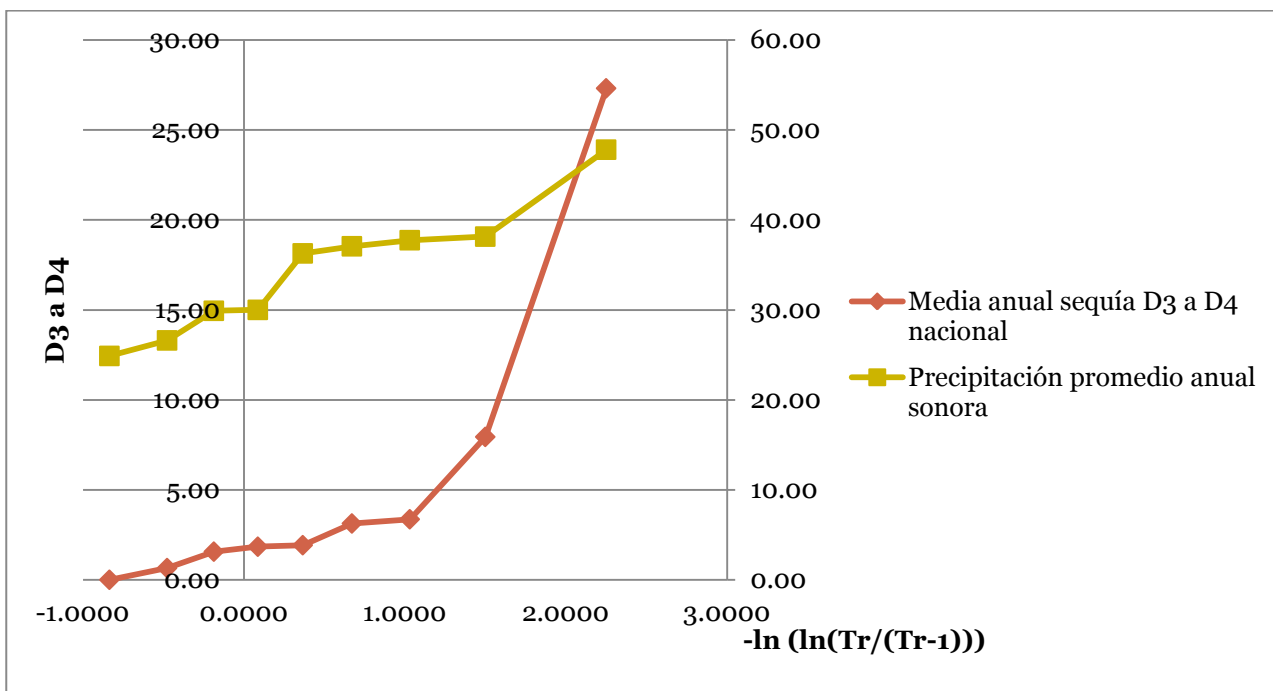
D3 Sequía Extrema

En el caso de las precipitaciones también se ordenaron los datos y se hizo el mismo procedimiento utilizando Weibull y Gumbel.

Promedio Anual de precipitaciones								
No.	Sonora	Chihuahua	Coahuila	Durango	Zacatecas	S.L.P	Tr	Escala Gumbel
1	47.81	62.12	49.49	53.73	57.40	114.61	10.000	2.2504
2	38.15	50.58	49.33	53.55	48.37	113.33	5.000	1.4999
3	37.75	45.84	43.53	48.49	45.52	103.12	3.333	1.0309
4	37.08	40.60	40.98	46.61	42.42	79.25	2.500	0.6717
5	36.28	39.17	39.26	43.28	40.63	76.86	2.000	0.3665
6	30.01	39.08	38.25	36.38	37.95	72.98	1.667	0.0874
7	29.91	38.54	27.57	33.30	36.68	67.57	1.429	-0.1856
8	26.62	31.23	26.73	31.15	34.54	67.37	1.250	-0.4759
9	24.89	21.71	14.67	20.47	26.21	60.00	1.111	-0.8340

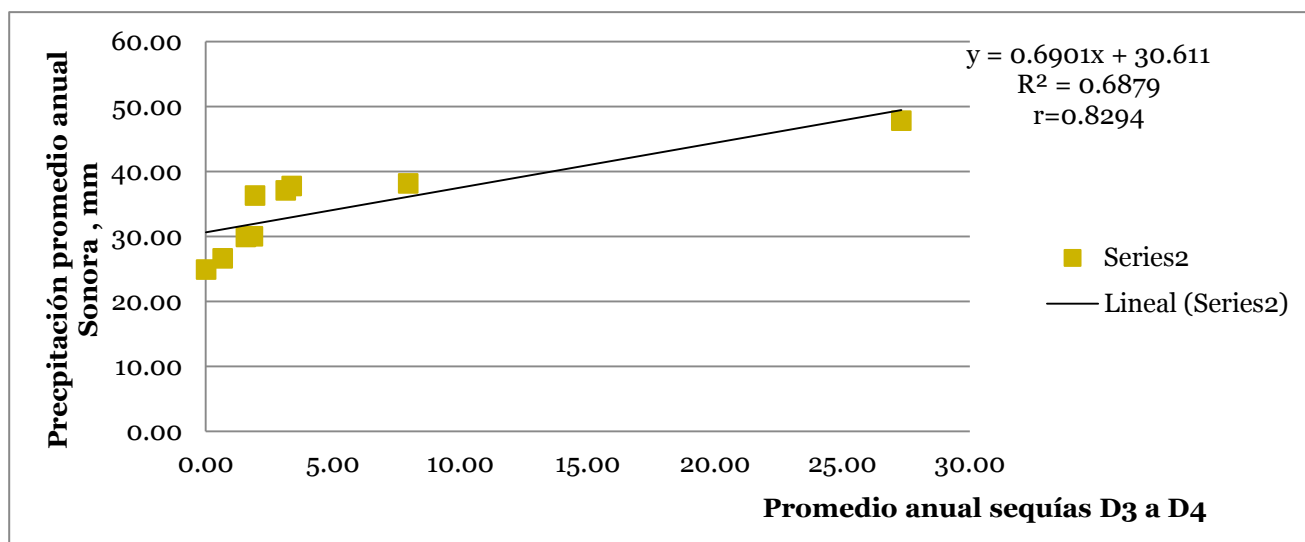
Se hizo el dibujo comparando las funciones de distribución para cada estado vs la de las sequías a nivel nacional de la columna D3-D4. Figura 1 (Sonora)





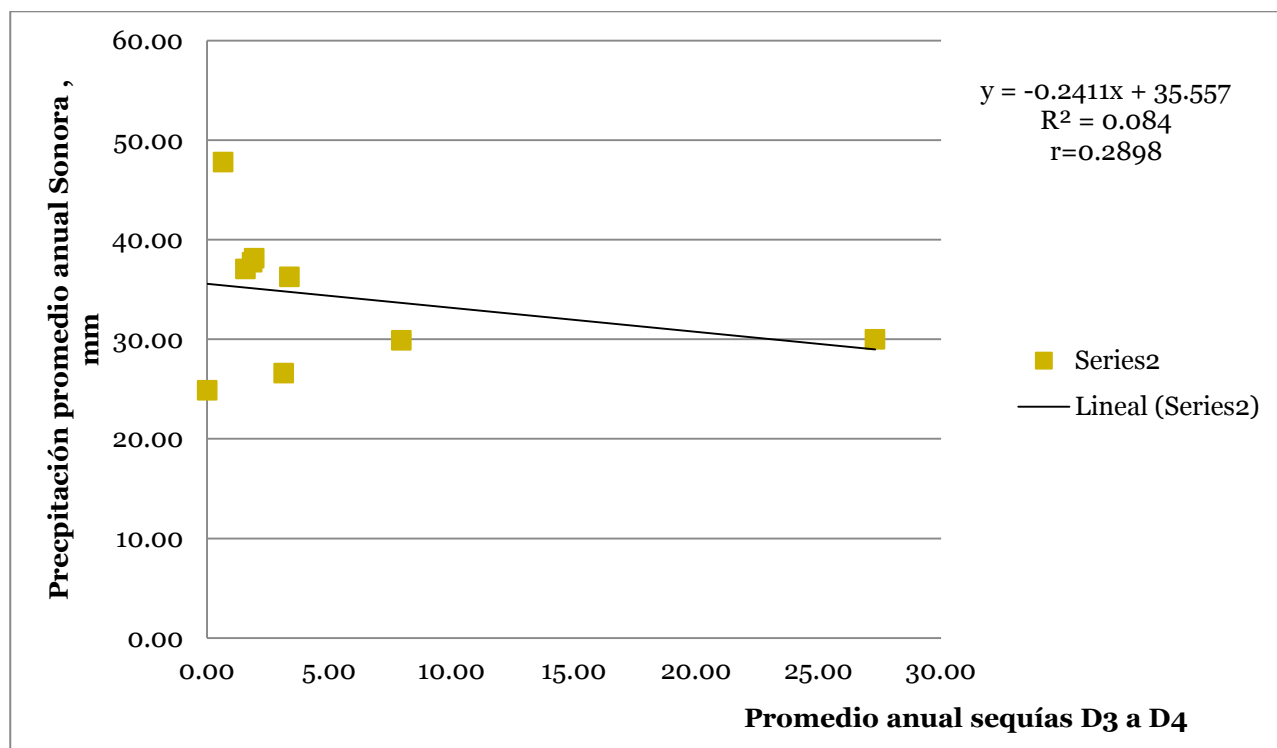
El valor promedio de sequías D3 a D4 para un periodo de retorno de 10 años corresponden a valores de precipitación media anual de 30.01 mm, que tienen un periodo de retorno de 1.67 años mientras que el valor de la precipitación para un periodo de retorno de 10 años es mayor (47.81 mm)

Con datos ordenados:



Se observa una cierta correlación entre las funciones de distribución empíricas de los promedios de sequías D3 a D4 con los valores de la precipitación promedio anual en el estado de Sonora.

Por otro lado, se compararon directamente los datos año con año y sin ordenar.



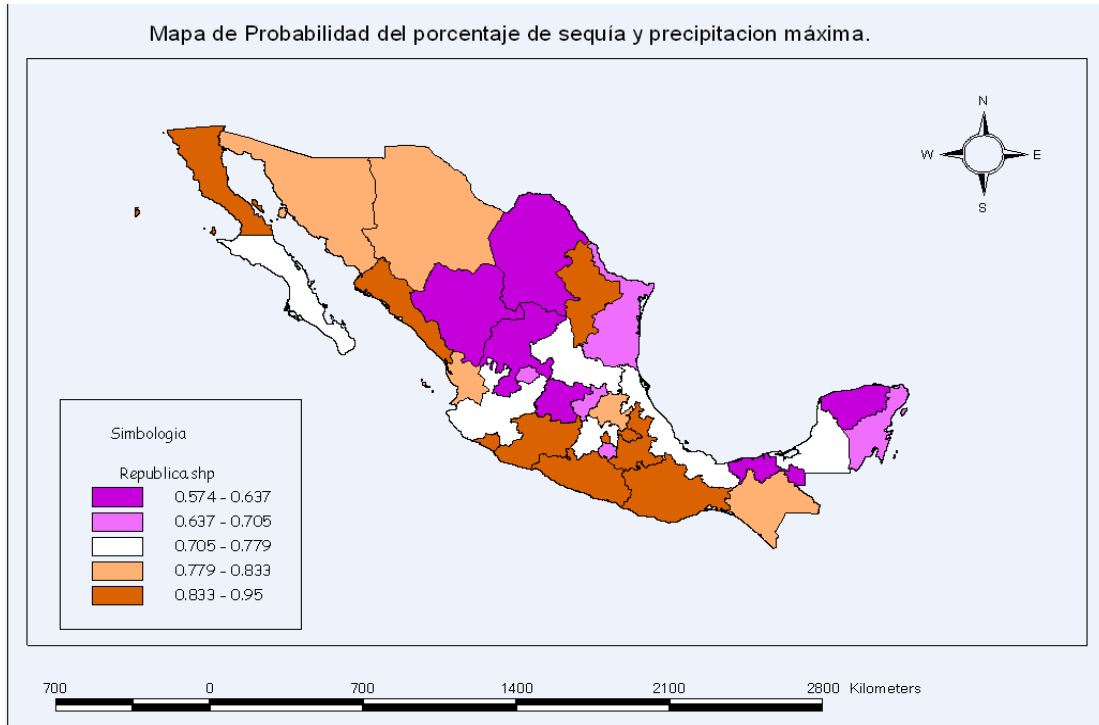
Mientras que la relación del promedio anual de sequías D3 a D4 con respecto a la precipitación media anual da correlaciones bajas al comparar con un comportamiento lineal, al aumentar el promedio anual de sequías D3 a D4 no parece disminuir mucho el valor de la precipitación por lo que no se puede decir que una precipitación media anual baja implique la ocurrencia de una sequía D3 a D4

Se obtuvieron los valores R1 y R2 para cada estado y con ArcView se realizaron los mapas respectivos a cada caso.

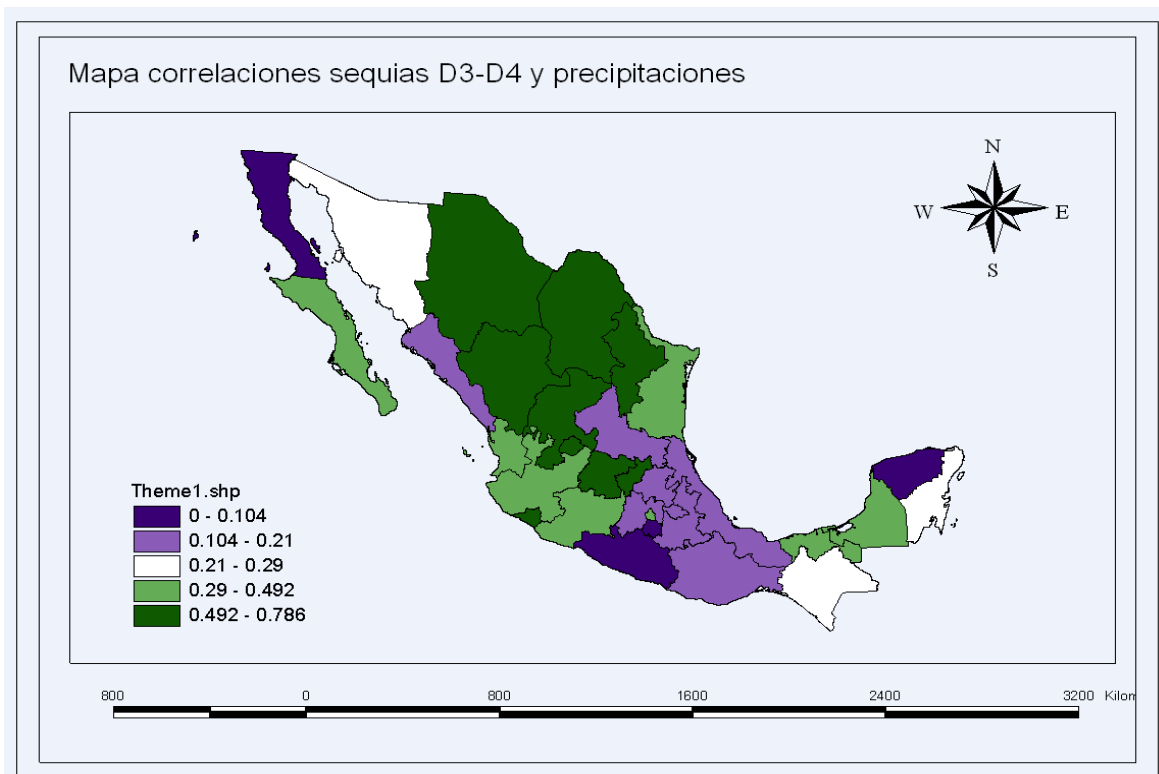
ESTADOS	R1	R2
AGUASCALIENTES	0.642339474	0.668281378
BAJA CALIFORNIA	0.872410454	0.08
BAJA CALIFORNIA SUR	0.755049667	0.379209705
CAMPECHE	0.752263252	0.350570963
COAHUILA	0.60149813	0.78612976
COLIMA	0.859069264	0.774080099
CHIAPAS	0.784920378	0.281780056
CHIHUAHUA	0.832766474	0.594978991
D.F	0.855628424	0.418330013
DURANGO	0.620725382	0.628887907
GUANAJUATO	0.624899992	0.619677335
GUERRERO	0.892692556	0.06244998
HIDALGO	0.810246876	0.166132477
JALISCO	0.761248974	0.492036584
México	0.77923039	0.172046505
MICHOACAN	0.875442745	0.380394532
MORELOS	0.664981203	0.104403065
NAYARIT	0.795298686	0.371079506
NUEVO LEON	0.85	0.616035713
OAXACA	0.89509776	0.21
PUEBLA	0.949526198	0.184390889
QUERETARO	0.704627561	0.545068803
Q. ROO	0.663927707	0.269814751
S. LUIS P.	0.736478106	0.179443584
SINALOA	0.864118047	0.123693169
SONORA	0.829397372	0.289827535
TABASCO	0.574108004	0.352420204
TAMAULIPAS	0.697782201	0.490713766
TLAXCALA	0.865794433	0.175499288
VERACRUZ	0.764002618	0.132287566
Yucatán	0.636631762	0.064031242
ZACATECAS	0.827647268	0.664605146

Se presentan los estados por intervalos de correlaciones con respecto a las sequías:

Mapa R1



Mapa R2



### Tabla de resultados R1

0.95-0.833	0.833-0.779	0.779-0.705	0.705-0.637	0.637-0.564
PUEBLA	CHIHUAHUA	México	QUERETARO	AGUASCALIENTES
OAXACA	SONORA	VERACRUZ	TAMAULIPAS	Yucatán
GUERRERO	ZACATECAS	JALISCO	MORELOS	GUANAJUATO
MICHOACAN	HIDALGO	BAJA CALIFORNIA SUR	Q. ROO	DURANGO
BAJA CALIFORNIA	NAYARIT	CAMPECHE		COAHUILA
TLAXCALA	CHIAPAS	S. LUIS P.		TABASCO
SINALOA				
COLIMA				
D.F				
NUEVO LEON				

En los estados de Puebla, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Baja California, Tlaxcala, Sinaloa, Colima, D.F y Nuevo León se observan las más altas correlaciones entre el promedio anual del porcentaje de sequías **D3** a **D4**

En Aguascalientes, Yucatán, Guanajuato, Durango, Coahuila y Tabasco se obtuvieron bajas correlaciones, es decir en esos sitios hay precipitaciones en general bajas ocurra o no un evento de sequia **D3-D4**

### Tabla de resultados R2

0.786-0.492	0.492-0.29	0.29-0.21	0.21-0.104	104-0.0
COAHUILA	JALISCO	CHIAPAS	PUEBLA	BAJA CALIFORNIA
COLIMA	TAMAULIPAS	Q. ROO	S. LUIS P.	Yucatán
AGUASCALIENTES	D.F	OAXACA	TLAXCALA	GUERRERO
ZACATECAS	MICHOACAN		México	
DURANGO	B. CALIFORNIA SUR		HIDALGO	
GUANAJUATO	NAYARIT		VERACRUZ	
NUEVO LEON	TABASCO		SINALOA	
CHIHUAHUA	CAMPECHE		MORELOS	
QUERETARO	SONORA			

En Coahuila, colima, Aguascalientes, Zacatecas, Durango, Guanajuato, Nuevo León, Chihuahua y Querétaro se presentan las mayores correlaciones en el caso de comparación de año con año.

En Baja California, Yucatán y Guerrero se observan las más bajas correlaciones para el caso de comparación de año con año.