



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIONES Y  
ESTUDIOS SOBRE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO  
(CIEMAD)**

***Escenarios de lluvia en México***

Tesis que presenta:

**M. EN C. ÁNGEL REFUGIO TERÁN CUEVAS**

Para obtener el grado de:

**DOCTOR EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO**

Directoras de tesis:

**DRA. MARÍA EUGENIA GUTIÉRREZ CASTILLO  
DRA. VALENTINA DAVYDOVA BELITSKAYA**



**México, D. F.**

**Julio 2010**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D.F. siendo las 12:00 horas del día 9 del mes de Junio del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIEMAD para examinar la tesis titulada:

**"Escenarios de lluvia en México"**

Presentada por el alumno:

TERÁN CUEVAS ÁNGEL REFUGIO  
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)  
Con registro: 

B	0	6	1	4	5	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

DOCTOR EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

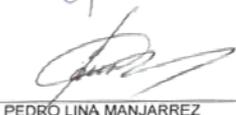
Directores de tesis

  
DRA. MARÍA EUGENIA GUTIERREZ CASTILLO

  
DRA. VALENTINA DAVYDOVA BELITSKAYA

  
DR. VICTOR FLORENCIO SANTES HERNÁNDEZ

  
DRA. MARIBEL ESPINOSA CASTILLO

  
DR. PEDRO LINA MANJARREZ

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

  
DRA. NORMA PATRICIA MUÑOZ SEVILLA  
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CIEMAD  
DIRECCIÓN





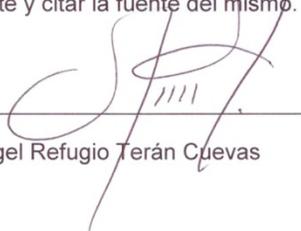
# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, el día 01 de julio del año 2010, el que suscribe Ángel Refugio Terán Cuevas, alumno del Programa de Doctorado en Ciencias en Medio Ambiente y Desarrollo, con número de registro B061452 adscrito al CIEMAD-IPN, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de la Dra. María Eugenia Gutiérrez Castillo y la Dra. Valentina Davydova Belitskaya cede los derechos del trabajo intitulado: "Análisis de escenarios de lluvia en México", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben de reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directoras del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: [angel.teran@conagua.gob.mx](mailto:angel.teran@conagua.gob.mx). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Ángel Refugio Terán Cuevas

## **Créditos**

El trabajo de investigación que sustenta esta tesis de Doctorado fue realizado en las instalaciones del Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua y del Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo del IPN, bajo la dirección de las Doctoras Ma. Eugenia Gutiérrez Castillo y Valentina Davydova Belitskaya con el apoyo financiero de los proyectos de investigación CIIEMAD-IPN proyecto SIP número 20080469, 20090515 y 20100868.

## Agradecimientos

La realización de esta tesis ha sido posible gracias a numerosas personas que, de forma directa o indirecta me han apoyado en todo momento. Agradezco a todos aquellos que con su colaboración, sus consejos o sus ánimos han hecho posible que este trabajo llegue a su fin.

Esta tesis está dedicada en forma muy especial **a mis padres**, quienes me dieron fortaleza y espíritu de lucha para realizarme como persona y servir a la sociedad de la mejor forma posible.

.....a mis hijos, **Ana Beatriz, Luis Angel y Judith Stephany, a mi esposa Ana Bertha**, quienes me dieron amor y paciencia y me fortalecían día con día para llegar a la meta final.

.....a **mi hermano Victorino y su esposa Melly**, quienes gracias a ellos pude también terminar con un proyecto más de vida, y quienes estuvieron siempre a mi lado en los momentos más difíciles de mi vida.

.....a **mis hermanos**, quienes me brindaron apoyo en forma indirecta cuando se presentaron los momentos más difíciles de mi vida.

.....a **la familia de mi esposa** que me brindó el apoyo físico y moral durante la época más difícil de mi vida.

A los directores de la tesis; **Dra. María Eugenia Gutiérrez, Dra. Valentina Davydova, Dr. Victor Santes, Dra. Maribel Espinosa**, por guiarme y aconsejarme en cada momento y por hacer que este trabajo no perdiera calidad.

En especial, **a la Dra. María Eugenia** quién siempre estuvo apoyando en momentos difíciles de mi vida, y **al Dr. Tovar** por su conminación a terminar este trabajo.

Al personal de la Subgerencia de Monitoreo Atmosférico Ambiental por los numerosos apoyos en la construcción de esta tesis; **Erika, Carolina, Maky, Juan Carlos y Javier**.

**Al Dr. Michel Rosengaus**, quién me brindó la oportunidad de realizar este proyecto de desarrollo profesional, y **al Coordinador del Servicio Meteorológico Nacional, Felipe Adrián Vázquez Gálvez**, por conminarme a terminar este proyecto.

A todos mis amigos, quienes me respaldaron en diferentes formas cuando los necesitaba; **Ramiro, Luis, Sergio, Gregorio, Alejandro, Arturo y Gabriel**.

## INDICE GENERAL

Contenido	Páginas
Créditos.	
Agradecimientos.	i
Índice General.	ii
Lista de figuras.	iii
Lista de tablas.	vi
Resumen y Abstract.	vii y viii
1. Introducción.	1
1.1 Justificación.	4
1.2 Hipótesis.	6
1.3 Objetivos: General y específicos.	6
2. Marco teórico.	7
2.1 La lluvia en los desastres hidro-meteorológicos.	7
2.2. El impacto de los sistemas meteorológicos extremos en México.	11
2.3. Características y comportamiento de la lluvia.	14
2.4 La lluvia en México y sus escenarios.	22
2.5 México y la distribución de la lluvia en el entorno global.	25
2.6. El registro actual de la lluvia en México.	27
2.7. La distribución espacial de la lluvia en México.	29
2.8. Sistemas de Información Geográfica, SIG.	31
2.9 Acciones y respuestas.	36
3. Metodología.	39
3.1. Área de estudio.	39
3.2. Diseño del estudio.	41
3.3. Base de datos de lluvia CLICOM.	43
3.4 Interpolación de los datos de lluvia.	44
3.5 Transformación de las mallas interpoladas a un formato de SIG	48
3.6 Validación de los datos interpolados con los originalmente registrados.	49
3.7. Análisis de datos históricos de lluvia anual y mensual.	54
3.8 Análisis de frecuencias de las lluvias.	55
3.9 Período de retorno.	55
3.10 Análisis de tendencias de las lluvias.	57
4. Resultados.	63
4.1. Base de datos de lluvia (MALLA-SIG) y su validación.	63
4.2. Distribución espacio temporal de la lluvia en México (1950-2008).	65
4.3. Estimación de escenarios de lluvia en México.	82
4.4. Caso de estudio.	108
5. Discusión de los resultados	110
6. Conclusiones	120
7. Perspectivas futuras y recomendaciones	122
8. Bibliografía.	123
Anexos: Artículos científicos derivados de la tesis, programas, mapas	132

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Huracanes que han impactado a México desde 2000 a 2007.	12
2	Trayectoria de los huracanes más severos.	13
3	Desarrollo de las lluvias convectivas.	16
4	Desarrollo de las lluvias orográficas.	17
5	Descripción de un frente frío.	18
6	Descripción de un frente cálido.	19
7	Pluviómetro ordinario.	19
8	Tipos de pluviómetros: a) de balanza, b) de oscilación, c) Combinación de balanza y de oscilación.	20
9	Esquema de Petterson (P.N. = Polo Norte, P.S. = Polo Sur).	20
10	Descripción de la lluvia media anual del planeta de acuerdo a Brooks y Hunt, 1930.	27
11	Localización de las 5900 estaciones de CLICOM.	28
12	Distribución en un día normal de registros para medir la lluvia. Los círculos negros señalan la inconsistencia espacial de los datos.	29
13	Climatología de la lluvia en forma mensual (1950-2008).	30
14	Climatología anual de la distribución de la lluvia en México.	30
15	Número de registros máximos y mínimos registrados en un día de cada año del sistema CLICOM (1950-2008).	31
16	Modelos de análisis utilizando sistemas de información geográficas, SIG.	33
17	Diseño conceptual para la generación de escenarios de lluvia.	42
18	Descripción del método de Thiessen.	46
19	Descripción del método de Isoyetas.	48
20	Sobreposición de los datos reales de lluvia y los interpolados.	53
21	Promedio anual de la lluvia acumulada en el país (1950-2008).	54
22	Descripción matemática de la pendiente y su relación con las lluvias.	60
23	Variación de la pendiente relacionado con las variaciones de las lluvias diarias.	61
24	Descripción matemática para la observación de las pendientes en diferentes intervalos de tiempo con respecto a las lluvias observadas diariamente.	61
25	Descripción del análisis de pendientes (P), aplicado a datos de lluvia.	62
26	Integración de la base de datos de lluvia, MALLA-SIG.	64
27	Señal espectral del comportamiento mensual de la lluvia.	66
28	Comportamiento estacional de las lluvias.	67

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura	Título	Página
29	Climatología anual de la lluvia en México (1950-2008).	67
30	Comportamiento estacional de las lluvias en la republica mexicana periodo 1950-2008.	68
31	Climatología de la lluvia en forma MENSUAL (1950-2008).	69
32	Comportamiento histórico para el mes de ENERO (1950-2008).	70
33	Mapa climatológico de la lluvia para el mes de ENERO (1950-2008).	70
34	Comportamiento histórico para el mes de FEBRERO (1950-2008).	71
35	Mapa climatológico de lluvia para el mes de FEBRERO (1950-2008).	70
36	Comportamiento histórico para el mes de MARZO (1950-2008).	72
37	Mapa climatológico de lluvia para el mes de MARZO (1950-2008).	72
38	Comportamiento histórico para el mes de ABRIL (1950-2008).	73
39	Mapa climatológico de lluvia para el mes de ABRIL (1950-2008).	73
40	Comportamiento histórico para el mes de MAYO (1950-2008).	74
41	Mapa climatológico de lluvia para el mes de MAYO (1950-2008).	74
42	Comportamiento histórico para el mes de JUNIO (1950-2008).	75
43	Mapa climatológico de lluvia para el mes de JUNIO (1950-2008).	75
44	Comportamiento histórico para el mes de JULIO (1950-2008).	76
45	Mapa climatológico de lluvia para el mes de JULIO (1950-2008).	76
46	Comportamiento histórico para el mes de AGOSTO (1950-2008)	77
47	Mapa climatológico de lluvia para el mes de AGOSTO (1950-2008).	77
48	Comportamiento histórico para el mes de SEPTIEMBRE (1950-2008).	78
49	Mapa climatológico de lluvia para el mes de SEPTIEMBRE (1950-2008).	78
50	Comportamiento histórico para el mes de OCTUBRE (1950-2008).	79
51	Mapa climatológico de lluvia para el mes de OCTUBRE (1950-2008).	79
52	Comportamiento histórico para el mes de NOVIEMBRE (1950-2008).	80
53	Mapa climatológico de lluvia para el mes de NOVIEMBRE (1950- 2008).	80
54	Comportamiento histórico para el mes de DICIEMBRE (1950-2008).	81
55	Mapa climatológico de lluvia para el mes de DICIEMBRE (1950-2008).	81
56	Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de INVIERNO.	82
57	Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de PRIMAVERA.	83
58	Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de VERANO.	84

## LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura	Título	Página
59	Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de OTOÑO.	86
60	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 5 años.	87
60	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 10 años.	88
62	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 15 años.	88
63	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 20 años.	89
64	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 25 años.	89
65	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 30 años.	90
66	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 35 años.	91
67	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 40 años.	91
68	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 45 años.	92
69	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 50 años.	93
70	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 55 años.	93
71	Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 59 años.	94
72	Mapa anual de tendencias de las lluvias (1950-2008).	95
73	Mapa de tendencias de lluvias en la estación de verano (1999-2008).	96
74	Mapa de tendencias de lluvias en la estación de primavera (1999-2008).	97
75	Mapa de tendencias de lluvias en la estación de otoño (1950-2008).	97
76	Mapa de tendencias de lluvias en la estación de invierno (1950-2008).	98
77	Tendencias de la lluvia para el mes de ENERO.	99
78	Tendencias de lluvia para el mes de FEBRERO.	100
79	Tendencias de la lluvia para el mes de MARZO.	101
80	Tendencias de la lluvia para el mes de ABRIL.	102
81	Tendencias de la lluvia para el mes de MAYO.	102
82	Tendencias de la lluvia para el mes de JUNIO.	103
83	Tendencias de la lluvia para el mes de JULIO.	104
84	Tendencias de la lluvia para el mes de AGOSTO.	105
85	Tendencias de la lluvia para el mes de SEPTIEMBRE.	105
86	Tendencias de la lluvia para el mes de OCTUBRE.	106
87	Tendencias de la lluvia para el mes de NOVIEMBRE.	107
88	Tendencias de la lluvia para el mes de DICIEMBRE.	108

## LISTA DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1	Niveles de deforestación en tres cuencas del estado de Chiapas (Terán e Ibarra, 2006).	24
2	Coefficientes de correlación de Pearson; mensual, estacional y anual calculados para datos interpolados de la malla y de registros diarios de lluvia.	65
3	Coefficientes correlación de Pearson para zonas húmedas y secas del país.	65

## RESUMEN

El análisis histórico de datos de lluvia en el país a través de una geo-base de datos bajo un formato de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitió entender el comportamiento y distribución espacial de la lluvia en México, y localizar las zonas con mayor y menor humedad, y que están relacionadas con la cantidad de lluvia que se acumula diariamente en función de los sistemas meteorológicos que se desarrollan en la atmósfera e impacten en el país, tal es el caso de los huracanes. El análisis climatológico de la lluvia en forma mensual, estacional y anual, permitió establecer las dos estaciones de lluvia que se presentan año con año en el país; la seca y la húmeda. La identificación del periodo de retorno de las lluvias extremas, permite alertar a las autoridades correspondientes en la toma de decisiones, y prevenir a la población ante la posibilidad de una inundación o deslave. Por otra parte, la determinación de las tendencias positiva y negativa de las lluvias en las diferentes zonas del país, permite alertar también, en la toma de decisiones en la escases o excesos del recurso agua para su manejo en el sector; urbano, agrícola e industrial.

Para lograr lo anterior, fue necesario integrar una base de datos histórica que permitiera visualizar y analizar el comportamiento de las lluvias en los últimos 59 años, cuya consideración principal fueron los huecos espaciales y temporales en los registros históricos de los datos de estaciones climatológicas de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Por lo tanto y ante la necesidad de información con mayor resolución espacial y temporal, se decidió desarrollar MALLA-SIG con un periodo de análisis que va desde 1950 al 2008, y una separación entre nodo y nodo de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . La base de mallas interpoladas se transformó a un formato de sistemas de información geográfica para un mejor manejo y aplicación de los datos, y se validó en forma mensual y estacional obteniendo un coeficiente de correlación entre 0.6 y 0.7. La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica, permitió identificar escenarios del comportamiento de la lluvia en forma mensual, estacional y anual en México, tales como sus tendencias y la presencia de máximas extremas que permitió calcular el periodo de retorno y su comparación con los eventos extremos que han impactado al país en los últimos años.

Se presenta como estudio de caso el evento ocurrido en los estados de Tabasco y Chiapas durante el 2007, en donde la presencia de lluvias máximas extremas ocurridas en zonas con alto nivel de deforestación, provocó la inundación en Tabasco. Los resultados se presentaron en el Centro Nacional de Prevención de Desastres, y se proporcionaron los mapas digitales en formato de Sistemas de Información Geográfica, los cuales permitieron a las autoridades de la Comisión Nacional de la Vivienda (CONAFOVI), Protección Civil, Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), entre otros, establecer planes de protección al medio ambiente y a la población.

## ABSTRACT

Historical analysis of rainfall data in the country through a geo-data base belong a geographic information systems (GIS), allowed to understand the rainfall distribution in Mexico, and identify areas with a trend of higher and lower humidity, which are related to the amount of the daily accumulated rainfall on the basis of meteorological weather systems developed in the atmosphere that reach the country, this is the case of hurricanes. The monthly, seasonal and annual rainfall analysis, which allowed establishing two rainfall seasons that occurs every year in the country; dry and humid. Furthermore, the identification of the period return of extreme rainfall values allows to the appropriate authorities in making decisions and warns people of a disaster caused by floods and landslides. Moreover, the identification of positive and negative trends of rainfall in different areas of the country, alarms also in making decisions on the scarcity or excess of water resources in the urban, agricultural and industrial sector.

To achieve this, it was necessary to integrate a historical database that can visualize and analyze the rainfall in the past 59 years whose main consideration was the spatial and temporal gaps in the historical records of the data network of weather stations at the National Weather Service (NWS). Therefore, and given the need for information with higher spatial and temporal resolution, it was decided to develop MALLA-GIS, with a spatial resolution of  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ , and historical analysis since 1950 to 2008. The new database mesh became interpolated into a format of geographic information systems for better management and implementation of the data, and was validated on a monthly and seasonal scale obtaining a correlation coefficient between 0.6 and 0.7. The application of Geographic Information Systems, allowed us to identify monthly, seasonal and yearly rainfall scenarios in Mexico and its trends, extreme maximum presence, return period and its comparison with the extreme events occurred in Mexico during the last years.

A case of study is presented during the event occurred in the states of Tabasco and Chiapas in 2007, where the presence of extreme maximum rainfall occurred in areas with high levels of deforestation, caused the flooding in Tabasco. The results were presented at the National Center for Disaster Prevention and digital maps are provided in the form of Geographic Information Systems, which enabled the authorities of the National Housing Commission (CONAFOVI), Civil Protection, Ministry of Communications and Transportation (SCT), Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT), National Water Commission (CONAGUA), among others, establish plans to protect the environment and population.

## 1. INTRODUCCION

El estudio de las características y comportamiento de la lluvia a nivel local, regional y global ha adquirido un renovado interés en conexión con su impacto en el cambio del clima y su relación con tópicos como los desastres hidrometeorológicos y el manejo de los recursos hídricos. Diversos estudios han demostrado incrementos o decrementos en el régimen de la lluvia en muchos lugares del mundo en las últimas décadas, algunos de los resultados más relevantes permitieron identificar que aproximadamente 30 regiones del mundo han presentado prolongados y abruptos cambios en sus patrones lluviosos a lo largo del siglo XX (Dore, 2005; Zhang et al., 2007). El norte de México es una de las regiones reportadas con disminución de lluvia asociada a una severa sequía durante el periodo 1921 – 1940, los investigadores reconocen que los eventos examinados pueden ser dependientes de las características geográficas de las regiones evaluadas por lo que es necesario profundizar los estudios para cada región del mundo (Narisma et al., 2007).

La lluvia como componente clave del ciclo hidrológico, varía su comportamiento dependiendo de la localización y del tiempo, su variabilidad en la escala de años a días e incluso en la escala regional puede ser irregular y muy alta y estar afectada tanto por fuerzas naturales como antropogénicas (Zhang et al., 2007). El entendimiento de las variaciones estacionales, los cambios interanual, los patrones de distribución espacio temporal, la aparición de anomalías o similitudes interanuales es un tema en continuo e intenso debate dada la relevancia que tiene el manejo de recursos hídricos con el desarrollo de las regiones. Las modificaciones en el comportamiento de la lluvia afectan directamente a sistemas socioeconómicos y naturales, tal es el caso de los ecosistemas y el mantenimiento de la biodiversidad, así como la salud de las poblaciones por citar algunos ejemplos, por este motivo son de particular interés para diversos sectores de la sociedad.

Las alteraciones en el régimen de lluvias son importantes en varios sectores del país; para el sector hidroeléctrico e hidráulico, agricultura, así como con el manejo de las fuentes y suministro de agua en regiones urbanas, entre otros. En la agricultura es particularmente importante, ya que su uso y manejo se ven afectados por la variabilidad interanual, y diversos estudios han insistido respecto a la estrecha asociación de la fluctuación de la productividad de los campos con el patrón de la lluvia (Kirschbaum et al., 2008), de tal forma que la planeación de las actividades agrícolas es altamente dependiente del conocimiento que se tenga de la disponibilidad del recurso hídrico en las distintas regiones.

La identificación de tendencias y variaciones espacio - temporales para adaptarse a los cambios en el patrón de lluvias requiere de contar con información relacionada con la climatología diaria, mensual y anual de la lluvia, dado que constituyen elementos básicos para identificar requerimientos de irrigación suplementaria y para aplicar simulaciones hidrológicas en estudios ingenieriles relacionados con el manejo de cuerpos de agua y su almacenamiento. Este tipo de información es de específica importancia para regiones que están más sujetas a presiones de crecimiento poblacional como es el caso de los países en vías de desarrollo, que presentan cotidianamente una alta demanda del recurso hídrico para dar continuidad a su desarrollo económico (Herath y Ratnayakeb, 2004).

La necesidad de conocer los cambios en los patrones de lluvia y del clima, así como de considerar su inclusión en los procesos de planeación de desarrollo, y en el diseño de estrategias de adaptación, ha conducido en las últimas décadas al desarrollo de investigaciones relacionadas con el análisis de registros históricos de lluvia que permitan conocer y estimar sus variaciones y tendencias espacio-temporales (Vaes y Berlamont, 2002). La fuente de registros históricos de lluvia puede provenir de observaciones de campo realizadas *in situ* y manejadas por redes de monitoreo locales y/o regionales, de datos paleontológicos (dendrocronología Pederson et al., 2001), glaciológicos, o biogeoquímicos (estratigráficos). En México la principal fuente de información de datos históricos

de lluvia corresponde a las observaciones en campo realizadas sistemáticamente en las estaciones de monitoreo que se encuentran distribuidas a lo largo y ancho de la república y que envían su información al Servicio Meteorológico Nacional dependiente de la Comisión Nacional del Agua. A pesar de que los registros diarios de lluvia se han venido reportado con frecuencia, en muchas ocasiones el registro y envío de la información se realiza en forma inconsistente, el periodo de cobertura no es tan amplio, por este motivo los estudios relacionados con el análisis histórico de lluvia en México son escasos (Englehart y Douglas, 2002; García, 2003; Méndez et al., 2008 y 2009; Salas, 2008), como consecuencia el análisis de los patrones globales de lluvia en México aún permanecen incompletos.

El notable desarrollo en la tecnología de manejo de bases de datos ha hecho posible la integración de alta resolución espacial al manejo de diversas variables ambientales, tal es el caso del manejo de bases de datos a través de sistemas de información geográfica (SIG). La integración de información ambiental proveniente de métodos de modelación ligada al manejo de información de lluvia proveniente de redes de monitoreo y al ingreso de datos a métodos automatizados de procesamiento y análisis de información, posibilita el análisis en tiempo real, en cortos tiempos, de distintos escenarios ambientales de regiones urbana, rurales, y aún más de regiones remotas como zonas montañosas donde la cobertura de datos es escasa o inexistente.

La insuficiencia de datos de lluvia disponibles y relacionados con la tendencias y variabilidad del clima en México es una innegable limitante para planear el apropiado y futuro uso de recursos hídricos, en este sentido la presente investigación se enfocó a realizar primero un análisis histórico de la lluvia en la República Mexicana en el periodo de 1950 a 2008 aplicando el diseño de una base de datos SIG, posteriormente se realizó un análisis climatológico para estimar los promedios mensuales y anuales de lluvia, y se calcularon escenarios de lluvia considerando las lluvias máximas registradas en el país y su periodo de

retorno, así como las tendencias de las lluvias en los últimos 59 años. Los resultados del estudio se concentrarán en un servidor de mapas que facilite el acceso y la difusión de la información a distintos usuarios.

### **1.1 Justificación**

El desarrollo de estudios orientados al conocimiento del comportamiento de la naturaleza y sus impactos en los riesgos provocados por las lluvias, se hace cada vez más necesario, no sólo desde el punto de vista científico sino también desde el ámbito de la protección civil. Durante los últimos años hemos observado un sinnúmero de ejemplos como las inundaciones ocurridas en la ciudad de Nueva Orleans, Estados Unidos en agosto del 2005, así como los desastres dejados por el huracán Nargis en la república de Myanmar en mayo del 2008. En México podemos mencionar las inundaciones ocurridas por una perturbación tropical en conjunto con la presencia del huracán Stan en octubre del 2005, así como las recientes inundaciones provocadas por el frente frío no. 4 en Tabasco y Chiapas en octubre del 2007. Esto muestra las consecuencias derivadas de la escasa o nula previsión de los riesgos naturales y ello no sólo en los países más pobres, incapaces de actuar eficazmente ante los riesgos producidos por una inadecuada ocupación del territorio, sino también en los más avanzados. En este sentido, la población de todo el mundo exige una respuesta rápida y eficaz ante los peligros naturales debido a la mayor capacidad tecnológica y al desarrollo científico alcanzado en los últimos años y el uso de los Sistemas de Información Geográfica. Sin embargo, la sociedad debe de entender que para evitar catástrofes naturales es necesario entender el comportamiento de las variables naturales como la lluvia en su intensidad, así como donde ocurren, como ocurren, su frecuencia y su evolución en el transcurso de una serie histórica de datos.

En este sentido el sociólogo alemán Beck Ulrich (1999), manifiesta que el discurso del riesgo empieza donde la confianza en nuestra seguridad termina y deja de ser relevante cuando ocurre la potencial catástrofe. En estos primeros años del siglo XXI, la ONU ha planteado a través de la Estrategia Internacional

para la Reducción de los Desastres (ONU, 2001), diversas acciones tendientes a incrementar la conciencia pública con respecto a la reducción de los desastres. Además de este objetivo principal, destacan, entre otros, mejorar el conocimiento científico sobre las causas de los peligros naturales y sus consecuencias en el espacio y en la sociedad a través de entender el comportamiento de la naturaleza. En las últimas décadas se han desarrollado numerosos trabajos científicos sobre el comportamiento de los fenómenos naturales, su recurrencia y los efectos en la sociedad en diversos lugares del planeta. Sin embargo, en México no son muchos los trabajos que abordan uno de los principales riesgos que más pérdidas humanas y económicas ha ocasionado a lo largo de su historia: aquellos derivados de las lluvias intensas. Pese a la existencia de numerosas publicaciones sobre los impactos ocasionados por los fenómenos meteorológicos extremos, o las características generales de la lluvia en las zonas afectadas, se obvian cuestiones relevantes como recurrencias, análisis de distribución espacial y temporal, y sobre todo, las tendencias de las lluvias en forma histórica.

En México, podemos mencionar en general que los desastres naturales provocados por las intensas lluvias se han acentuado durante los últimos años, y han provocado daños a la población afectando las actividades económicas y productivas, y también la pérdida de vidas humanas. Los desastres naturales en México han dejado daños con un costo promedio anual de 100 vidas humanas y cerca de 700 millones de dólares (CENAPRED, 2003). El escaso conocimiento del comportamiento de la naturaleza y sus impactos, conlleva a desastres naturales como los originados por las intensas lluvias y sus diferentes situaciones climatológicas, los deslaves y las fuertes inundaciones en zonas donde el hombre no tiene información de la ocurrencia de lluvias extremas, y que con el paso del tiempo se convierten en un desastre natural.

En el sureste de México y en gran parte del país, el cambio climático empieza a manifestarse como un incremento en la intensidad y el número de eventos meteorológicos extremos tales como ondas tropicales y tormentas

severas (Aguilar et al., 2005). Otros autores han establecido que sobre la cuenca del Grijalva-Usumacinta, se acumula un alto nivel de lluvia durante el año alcanzando de 3000 a 4000 mm. Los meses con mayor lluvia son septiembre y octubre (Landa, Magaña y Neri, 2008).

## **1.2 HIPOTESIS**

La integración de la base de datos históricos de lluvia de México (MALLA-SIG) sobre una estructura de Sistemas de Información Geográfica, permite caracterizar el comportamiento espacio-temporal de la lluvia y generar escenarios climatológicos de lluvia con mayor grado resolución.

## **OBJETIVO GENERAL**

Generar mapas de escenarios climatológicos de lluvia en México, a través del análisis y manejo de una base histórica de datos de lluvia integrada en Sistemas de Información Geográfica, así como su validación y aplicación para un caso de estudio.

## **1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Desarrollo de programas computacionales que permitieron conformar y validar una base de datos histórica de lluvia de todo el país en el periodo de 1950 al 2008.
- b) Desarrollo de programas computacionales para la integración de la base de datos en sistemas de información geográfica.
- c) Desarrollo de programas computacionales para generar mapas del país de:
  - Climatología de lluvia mensual y anual.
  - Ocurrencia de lluvias máximas extremas.
  - Periodos de retorno de las lluvias máximas extremas.
  - Tendencias de las lluvias en forma mensual y anual.
- d) Aplicar los resultados obtenidos para lo ocurrido en la inundación de Tabasco y Chiapas en Octubre del 2007.
- e) Integrar los resultados en un servidor de mapas para su difusión y publicación.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 La lluvia en los desastres hidro-meteorológicos**

Actualmente en el mundo, los efectos destructivos de eventos extremos de lluvia han provocado desastres debido a las fuertes inundaciones y deslaves, y se magnifican debido a la alta vulnerabilidad que presentan las diferentes poblaciones derivado de un conjunto de factores. Entre otros, la insuficiencia de medidas preventivas y de mitigación en las regiones o zonas vulnerables debido a la falta de datos, y la carencia de planes y programas para el ordenamiento de los asentamientos humanos, el manejo adecuado de las cuencas hidrográficas y la operación e implementación de los sistemas de alerta temprana, por lo que se requiere de datos confiables con una alta resolución espacial y temporal en un formato que permita integrar todas las variables posibles, tal como lo permite los sistemas de información geográfica, SIG.

En general, los desastres que incluyen acontecimientos geológicos y meteorológicos, como terremotos, inundaciones, huracanes, erupciones volcánicas, sequías, tornados, deslizamientos, incendios forestales y tsunamis suelen presentarse como fenómenos geo-espaciales complejos que varían en magnitud y frecuencia. El entendimiento y manejo de cualquier tipo de desastre, requiere como prerrequisito inicial identificar los factores que lo desencadena, y de esta manera poder calcular, estimar y priorizar cómo se comportan para establecer estrategias de manejo y conocer áreas susceptibles, por la frecuencia e intensidad de los eventos y los escenarios más probables. Dentro de los múltiples factores que intervienen en los desastres naturales, es importante incorporar el estudio de variables climatológicas como el comportamiento de la lluvia. Los datos de lluvia son elementos esenciales en estudios hidrológicos e ingenieriles, en sistemas de manejo de tormentas, y en la determinación del impacto potencial en las inundaciones asociadas con eventos de tormentas de diversas frecuencias. La caracterización del comportamiento de la lluvia en forma horaria, mensual y estacional, es importante para el manejo de procesos que están bajo la presión de

una creciente demanda, debido tanto al incremento de la población como al desarrollo económico de las distintas regiones, tal es el caso de simulaciones hidrológicas, requerimientos complementarios de irrigación y en estudios ingenieriles relacionados con manejo del agua en sus almacenamientos, suministro y del análisis de su distribución (Herath y Ratnayakeb, 2004).

Se puede mencionar que las lluvias máximas extremas provocan fuertes inundaciones en los continentes, y una **inundación** se define como un evento natural y recurrente que se produce en las corrientes de agua, como resultado de lluvias intensas o continuas que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y de los cauces, desbordan e inundan las llanuras de inundación, en general aquellos terrenos aledaños sobre los drenajes del agua. Las inundaciones se pueden dividir de acuerdo con el régimen de los cauces en: lenta o de tipo aluvial, súbita o de tipo torrencial y encharcamiento (Glosario de términos de la Organización Meteorológica Mundial, 2001). En el caso de las inundaciones, es común describirlas en términos de una magnitud determinada, periodo de retorno o su intervalo de repetición. Una crecida de 50 años en cualquier punto de un río es la descarga de agua que se puede esperar que suceda en promedio una vez cada 50 años.

Como ejemplo se menciona al río Nilo, en donde pequeñas variaciones en la crecida del río durante el mes de junio dependían de la intensidad de las lluvias que se registraban, y ocasionaba graves trastornos a la agricultura de Egipto: Un nivel de las aguas inferior a seis metros en la primera catarata suponía la hambruna del país y numerosos terrenos sin cultivar; un nivel superior a los ocho metros conducía a la inundación de los poblados, la obturación de canales de riego, ganado ahogado y destrucción de viviendas. Es por ello que los egipcios vigilaban las lluvias cada año y las crecidas, y para determinarla, se construyeron en el Alto Egipto los llamados nilómetros, los cuales son pozos o escaleras para medir y registrar el comportamiento de las crecidas (<http://www.personal.us.es/cmaza/egipto/economia1.htm#Contexto%20geográfico>).

En otros países como el Reino Unido en Europa, la presencia de lluvias máximas extremas provocaron una gran inundación que originó la separación de algunas porciones de los continentes, tal como lo menciona Sanjeev Gupta (Investigador del Imperial College London), en donde una gran inundación hace miles de años separó lo que ahora es el Reino Unido del resto de Europa y lo convirtió en una isla. Gupta señaló que la inundación se produjo probablemente hace 450,000 y 200,000 años cuando el río Rin y el Támesis alimentaron un gran lago en la zona conocida ahora como el sur del Mar del Norte, y que pudo haber durado varios meses. Los glaciares bloquearon el lago por el norte, y una gran cordillera que se expandía de Dover a Francia contuvo el agua hacia el sur, dijeron los investigadores en un estudio publicado en *Nature* (Catastrophic flooding origin of shelf valley systems in the English Channel).

Además, podemos mencionar en el caso de Europa de acuerdo al EEA (*European Environmental Agency*) Briefing, 2005, “El cambio climático y las inundaciones en Europa”, que las inundaciones no sólo pueden ser mortales para seres humanos y animales, sino que pueden provocar enfermedades y dejar a personas sin hogar, además de resultar dañinas para el ambiente, la infraestructura y la propiedad. Sin embargo, también pueden tener importantes efectos positivos sobre los ecosistemas fluviales, la recarga de aguas subterráneas y la fertilidad del suelo. Por lo tanto, puede hacerse una distinción, por una parte los episodios de lluvias normales (anuales), que suelen causar inundaciones con poco o ningún daño, y que en ocasiones tienen efectos positivos y, por otra, los episodios excepcionales que pueden tener consecuencias muy graves. Las consecuencias adversas de los episodios de lluvias extremas que provocan inundaciones, para la salud humana son complejas y profundas. Las inundaciones repentinas suponen un mayor riesgo de víctimas mortales, puesto que sobrevienen sin previo aviso.

Así mismo, las lluvias máximas extremas que provocan inundaciones y constituyen el tipo de catástrofe natural más habitual en Europa, prevé que el

cambio climático y la creciente intensidad de las lluvias torrenciales aumentará la frecuencia de grandes inundaciones fluviales en algunas zonas, especialmente en el centro, el norte y el noreste de Europa. En particular, se prevé un aumento del número de inundaciones inesperadas y localizadas pero de carácter grave (inundaciones repentinas), por lo que también es probable que aumente el riesgo de víctimas. Se requieren medidas destinadas a prevenir las inundaciones y atenuar sus consecuencias. Algunos países ya están emprendiendo iniciativas.

De acuerdo al EEA Briefing International 2005, las inundaciones representaron el 43% de todas las catástrofes que se produjeron durante el periodo comprendido entre 1998 y 2002. En este periodo, Europa registró unas 100 inundaciones graves que causaron cerca de setecientas muertes, el desplazamiento de aproximadamente medio millón de personas y al menos 20,000 millones de euros de pérdidas económicas en bienes asegurados. Las inundaciones afectaron a una superficie de alrededor de un millón de kilómetros cuadrados (las zonas que padecieron inundaciones repetidas veces durante el período de referencia se contabilizaron más de una vez). Además, se vio afectada aproximadamente un 1,5 % de la población europea. Desde enero hasta diciembre de 2002, se produjeron quince inundaciones graves en Europa, en países como Austria, la República Checa, Alemania, Hungría y la Federación rusa. Estas inundaciones causaron cerca de doscientas cincuenta muertes y afectaron a un millón de personas.

Hacia el Norte de Europa, la lluvia anual aumentó entre un 10 y un 40% durante el período 1990–2000, mientras que partes del sur experimentaron un descenso del 20%. Las pautas estacionales reflejan tendencias incluso más pronunciadas. En particular, durante la estación invernal, el sur y el este de Europa experimentaron un clima más seco mientras que muchas partes del noroeste del continente registraron más lluvias. Según los pronósticos, la lluvia anual aumentará en la Europa septentrional y los veranos serán más lluviosos en

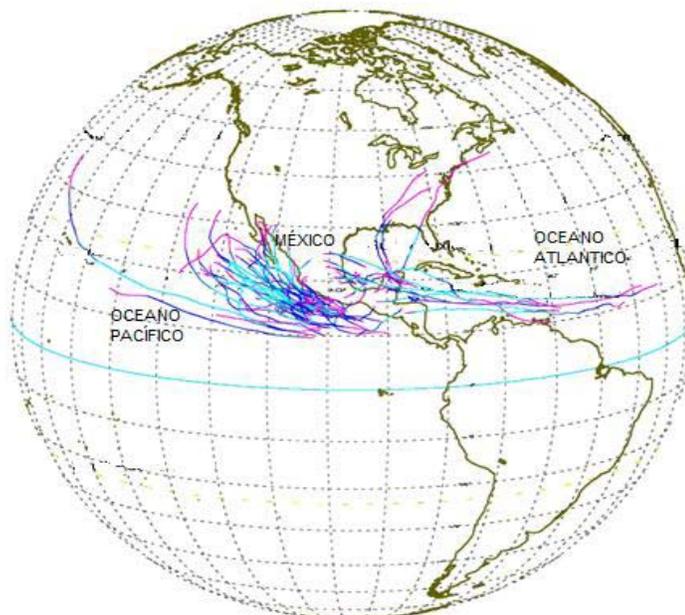
casi todo el continente. Las pautas estacionales reflejan tendencias incluso más pronunciadas.

En consecuencia, podemos decir que las inundaciones varían en función de la magnitud de las lluvias que se registren, y dependen de su frecuencia y localización. Podemos mencionar que el número de víctimas mortales por cada episodio de inundación descendió en cierta medida, y fue debido a la introducción de mejores sistemas de alerta en función del conocimiento del comportamiento de la lluvia. Las tendencias relativas a la frecuencia e intensidad de los futuros episodios de inundación, estarán estrechamente relacionadas con cambios del comportamiento de las lluvias y la descarga fluvial, así como con otros escenarios climáticos a largo plazo e incrementadas por las actividades antropogénicas. En Europa desde 1976, se ha constatado un aumento del número de días muy lluviosos en la porción central y septentrional, mientras que se han observado descensos en otras partes de la zona meridional. Según las previsiones, los episodios de lluvia intensa serán cada vez más frecuentes, por lo que aumentará el riesgo de inundaciones en las cuencas fluviales.

## **2.2. El impacto de los sistemas meteorológicos extremos en México.**

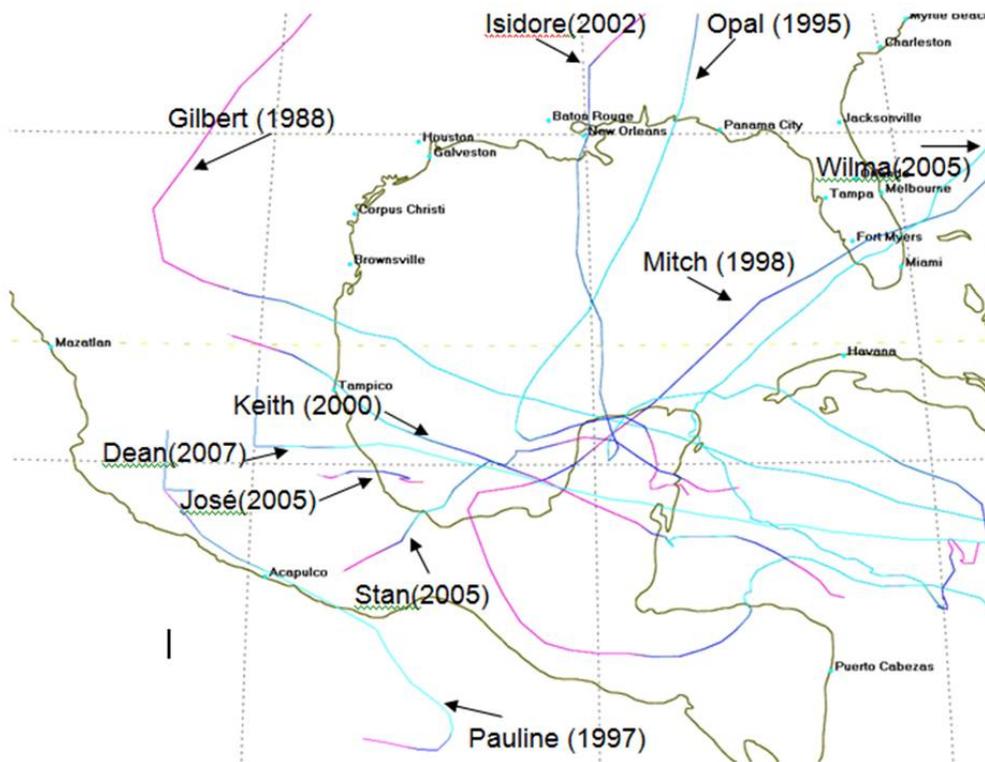
Si se analiza la localización de México en el escenario global, se observa una fuerte afectación por los ciclones tropicales, el cual lo hace vulnerable a sufrir los embates de las tormentas o ciclones tropicales que se generan en el océano Pacífico y el Atlántico, así como recibir un alto porcentaje de humedad proveniente del Golfo de México, Mar Caribe, y el Océano Pacífico, que origina el desarrollo de sistemas meteorológicos convectivos y que dan origen a lluvias muy intensas. En este escenario, las zonas costeras son más propicias a las inundaciones debido al impacto directo de los ciclones tropicales, y a los escurrimientos de las zonas altas provocados por las lluvias orográficas (**Figura 1**). De los 25 ciclones que en promedio llegan cada año a los océanos cercanos al país, cuatro o cinco penetran el territorio y causan daños severos como inundaciones (Rosengaus, 1998). Con mucha frecuencia ocurren inundaciones provocados por sistemas convectivos

como la registrada en Coahuila en Abril del 2004, y más recientemente las ocurrida en Chiapas y Tabasco en octubre del 2007 provocado por un frente frío independiente de la actividad ciclónica.



**Figura 1.** Huracanes que han impactado a México desde el 2000 al 2007.

Los huracanes han causado un número importante de víctimas fatales y cuantiosas pérdidas materiales durante los últimos años, los cuales difieren en afectaciones año con año. Dada la magnitud de los impactos, no se ha detectado efectos significativos de estos fenómenos sobre los grandes polos de desarrollo durante los años en que ocurrieron los desastres, salvo lo ocurrido en los estados de Tabasco y Chiapas, en que se detectaron impactos socioeconómicos en la agricultura y el transporte. En estas inundaciones, la participación del hombre las ha intensificado en gran medida debido a la deforestación en las zonas altas, las cuales son un reten natural de los suelos y que permiten su conservación (CENAPRED, 2008). Los huracanes que más daños han ocasionado en los últimos 8 años han sido Isidore (2003) con categoría de nivel V, Stan (2005) con categoría de nivel I, José (2005) que alcanzó la categoría de Tormenta Tropical, Dean (2007) que alcanzó la categoría V con una intensidad máxima sostenida de los vientos de 269 Km/h, y una presión atmosférica de 906 mb (**Figura 2**).



**Figura 2.** Trayectoria de los huracanes más severos.

En general, los fenómenos hidrometeorológicos tienen grandes repercusiones positivas y negativas en México, debido entre otros factores, a su ubicación geográfica, su orografía y a los diversos sistemas meteorológicos que lo afectan, pero principalmente a la distribución de su población, los grandes contrastes que ésta presenta y a su dinamismo, debido a que tiene un crecimiento, en algunas partes intenso, o bien, está en movimiento debido a fenómenos migratorios. Lo anterior supone un reto importante para las autoridades de Protección Civil en sus tres niveles, federal, estatal y municipal, por lo que éstos deben de trabajar de manera coordinada, teniendo los mismos objetivos y hablando un mismo lenguaje, ya que los fenómenos hidrometeorológicos afectan por igual a cualquier región o sector social. En ocasiones un desastre hidrometeorológico puede tener alcance nacional. Por ejemplo, un huracán que afecte tanto la Península de Yucatán como la región noreste del país; o los daños

ocasionados en Chiapas por ciclones tropicales o lluvias intensas que ameriten ayuda inmediata de parte de diversos sectores del país. De acuerdo al Anuario Estadístico de América Latina y el Caribe y “La Reducción de la Vulnerabilidad frente a los Desastres, marzo 2000”, el número de víctimas fatales provenientes de desastres hidrometeorológicos, geológicos y antropogénicos, durante los últimos 20 años, asciende a más de 10,000 personas, alrededor de 500 anuales en promedio. Los daños directos calculados alcanzan 96 mil millones de dólares en el lapso, con un monto promedio anual de cerca de 500 millones de dólares. Los últimos desastres de tipo meteorológico ocurridos en México, tales como lluvias intensas, granizadas, heladas y sequías se registraron durante los años 1982, 1985, 1988, 1995, 1997, 1998, 2003, 2006 y 2007.

En el caso de México, los desastres naturales han dejado daños con un costo promedio anual de 100 vidas humanas y cerca de 700 millones de dólares (CENAPRED, 2003). El escaso conocimiento del comportamiento de la naturaleza y sus impactos, conlleva a desastres naturales como los originados por las intensas lluvias y sus diferentes situaciones climatológicas.

### **2.3. Características y comportamiento de la lluvia.**

#### **2.3.1 Origen y formación de la lluvia**

La precipitación es cualquier forma de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la tierra, y ocurre cuando la atmósfera se satura con el vapor de agua, el agua se condensa y cae en forma de precipitación. El aire se satura a través de dos procesos: por enfriamiento y añadiendo humedad. La precipitación que alcanza la superficie de la tierra puede producirse en muchas formas diferentes, como lluvia, lluvia congelada, llovizna, nieve, aguanieve y granizo. La virga es la precipitación que comienza a caer a la tierra pero que se evapora antes de alcanzar la superficie. La precipitación es un componente principal del ciclo hidrológico, y es responsable de depositar la mayor parte del agua dulce en el planeta. Aproximadamente 505000 km<sup>3</sup> de agua caen como precipitación cada año, y de ellos 398000 km<sup>3</sup> caen sobre los océanos.

Dada el área de la Tierra, eso significa que la precipitación anual promediada globalmente es más o menos de 1000 mm, y la lluvia anual media sobre los océanos de 1100 mm (Monsalve, 2000).

### **2.3.2. Intensidad y duración de las lluvias**

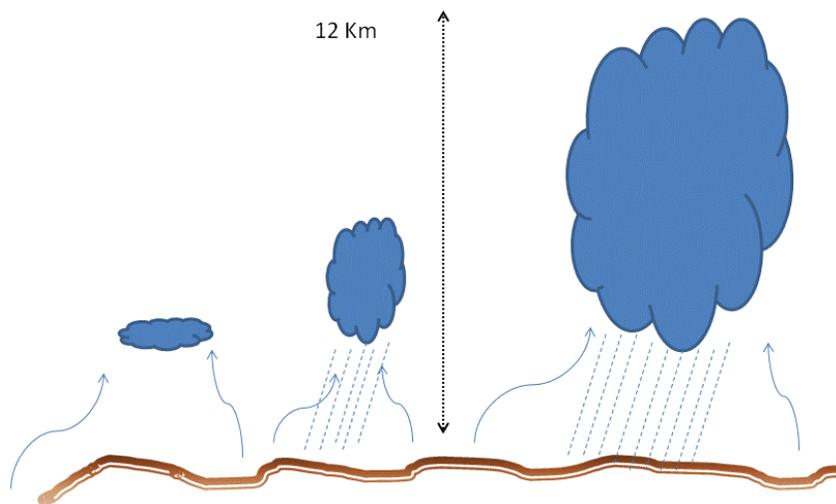
La intensidad y duración de la lluvia están relacionadas inversamente; es decir, las tormentas de intensidad altas probablemente serán de duración corta, y las tormentas de intensidad baja pueden tener una duración larga. La intensidad de la lluvia suele medirse en milímetros por hora, es decir, lluvia por unidad de tiempo. Cuando se trata de precipitaciones muy intensas se pueden medir en milímetros por minuto. Los valores más altos de lluvia registrados en el mundo han superado los 1000 mm en un día, y se ubicaron en Baguío, Filipinas, con 1168 mm y en Teherrapundji, India, con 1 036 mm en 24 horas consecutivas. Estos casos corresponden a un ciclón tropical y a una lluvia monzónica, respectivamente. Si se analizan todas las lluvias severas que ha habido en un período suficientemente largo, resulta que los de mayor intensidad son los más breves, las mayores intensidades sólo se dan durante un período de tiempo muy corto, a medida que el tiempo va siendo mayor, la intensidad media de la lluvia intensa va disminuyendo. En las regiones continentales la hora en que se da el máximo de lluvia coincide casi siempre con el máximo de temperatura, en cambio en las zonas costeras, las lluvias más intensas son generalmente en la noche (Maderey y Jiménez, 2005).

### **2.3.3 Factores de formación de la lluvia**

En general, las nubes se forman por enfriamiento del aire y por debajo de su punto de saturación, y tiene lugar por varios procesos que conducen al ascenso adiabático con el consiguiente descenso de presión y descenso de temperatura. La intensidad y cantidad de lluvia dependerán del contenido de humedad del aire y de la velocidad vertical del mismo. De estos procesos se derivan los diferentes tipos de lluvia:

### 2.3.3.1. Lluvia convectiva

Tiene su origen en la inestabilidad de una masa de aire más caliente que las circundantes. La masa de aire caliente asciende, se enfría, se condensa y se forma la nubosidad de tipo cumuliforme, y origina lluvias en forma de chubascos o tormentas. El ascenso de la masa de aire se debe, generalmente, a un mayor calentamiento en superficie (**Figura 3**).

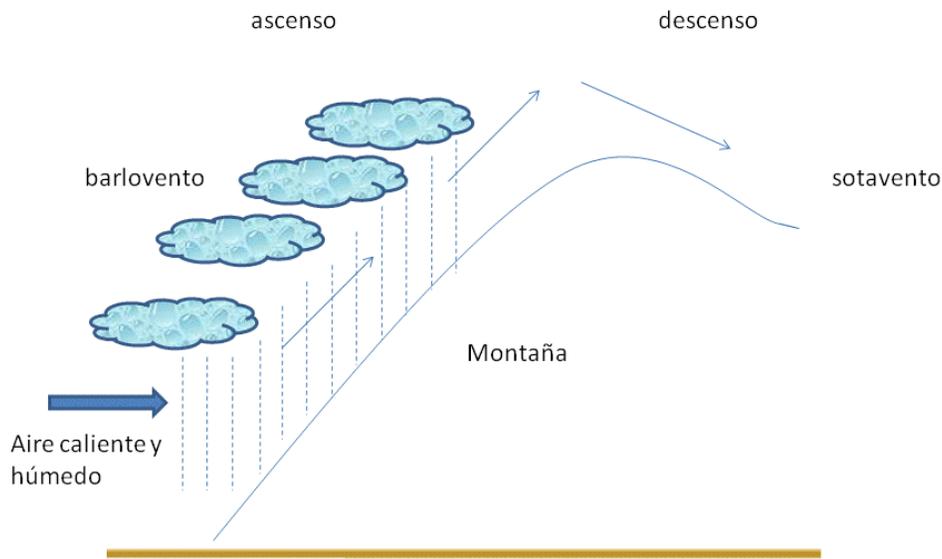


**Figura 3.** Desarrollo de las lluvias convectivas.

La lluvia convectiva proviene de nubes convectivas, como los cumulonimbos o cúmulos congestus. La mayor parte de las lluvias en zonas tropicales es convectiva; sin embargo, se ha sugerido que también se da la lluvia estratiforme dado el desarrollo de nubosidad estratiforme con una intensidad más suave y continua comparada con las lluvias convectivas. Los copos de nieve y el granizo siempre indican convección. A latitudes medias, la lluvia convectiva tiene relación con los frentes fríos (a menudo detrás del frente), las líneas de chubascos y los frentes cálidos con una significativa humedad disponible.

### 2.3.3.2. Lluvia orográfica

La lluvia orográfica ocurre en el lado de barlovento de las montañas y está causada por el movimiento ascendente de un flujo de aire húmedo a través de la montaña, que provoca la refrigeración adiabática y la condensación (**Figura 4**).



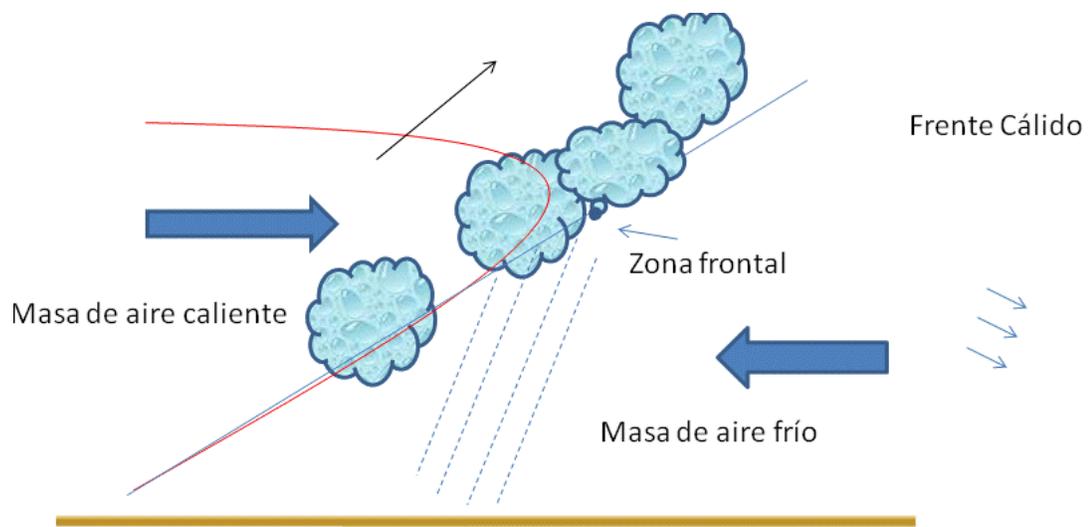
**Figura 4.** Desarrollo de las lluvias orográficas

En las zonas montañosas del mundo, sujetas a vientos relativamente consistentes (por ejemplo, los vientos alisios), prevalece un clima más húmedo por lo general en el lado de barlovento de la montaña que en el lado de sotavento. La humedad es eliminada por el ascenso orográfico, dejando el aire más seco en la bajada (generalmente calentándose), y una sombra de lluvias al lado de sotavento. La lluvia orográfica es bien conocida en las islas oceánicas, como por ejemplo las Islas Hawaianas, donde la mayor parte de la lluvia queda en el lado de barlovento, mientras que el lado de sotavento tiende a ser completamente seco (casi parecido a un desierto). Este fenómeno causa sustanciales declives locales en la lluvia media; en las áreas costeras caen entre 500 y 750 mm por año, mientras que en los altiplanos interiores caen 2.5 m por año. En Sudamérica, la sierra de Los Andes bloquea la mayor parte de la humedad Atlántica que llega a

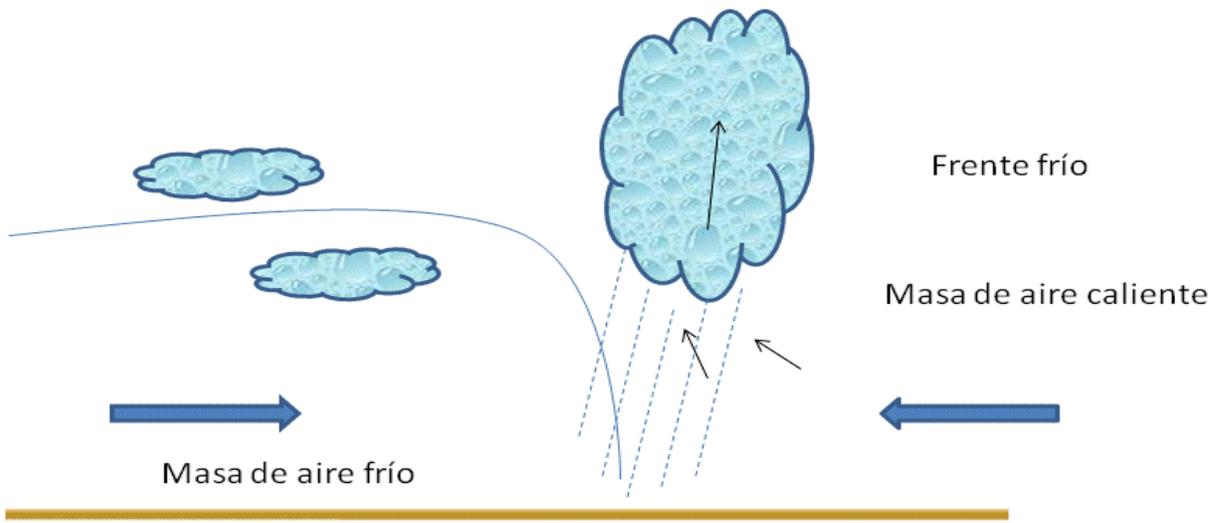
aquel continente, causando un clima parecido a un desierto en la costa pacífica de Perú y norte de Chile, ya que la fría Corriente de Humboldt asegura que el aire del Océano Pacífico sea seco también.

### 2.3.3.3. Lluvias frontales o ciclónicas

Es la que está asociada al paso de una perturbación ciclónica. Se presentan dos casos: frontal y no frontal. La precipitación frontal puede ocurrir en cualquier depresión barométrica, resultando el ascenso debido a la convergencia de masas de aire que tienden a rellenar la zona de baja presión. La precipitación frontal se asocia a un frente frío o a un frente cálido. En los frentes fríos el aire cálido es desplazado violentamente hacia arriba por el aire frío (**Figura 5**), dando lugar a nubosidad de gran desarrollo vertical acompañada de chubascos que a veces son muy intensos, así como de tormentas y granizo. La precipitación del frente frío es generalmente de tipo tormentoso, extendiéndose poco hacia delante del frente. En los frentes cálidos (**Figura 6**), el aire caliente asciende con relativa suavidad sobre la cuña fría, en general de escasa pendiente, dando lugar a una nubosidad más estratiforme que en el frente frío y, por lo tanto, a lluvias y lloviznas más continuas y prolongadas, pero de menor intensidad instantánea (Maderrey y Jiménez, 2005).



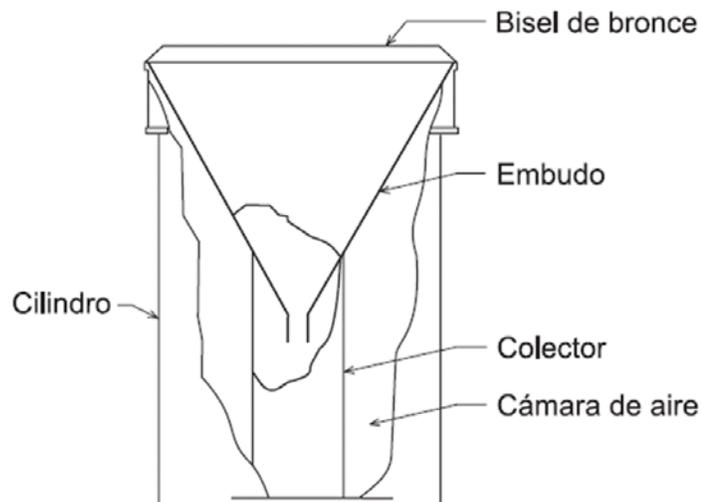
**Figura 5.** Descripción de un frente frío.



**Figura 6.** Descripción gráfica de un frente cálido.

#### 2.3.3.4. Herramientas para medir y registrar la lluvia

El método estándar de medir la lluvia es un pluviómetro estándar, que puede ser de plástico o metal, y de entre 100 mm y 200 mm. El cilindro interior se llena con 25 mm de lluvia, que al desbordar fluye en el cilindro externo (**Figura 7**).



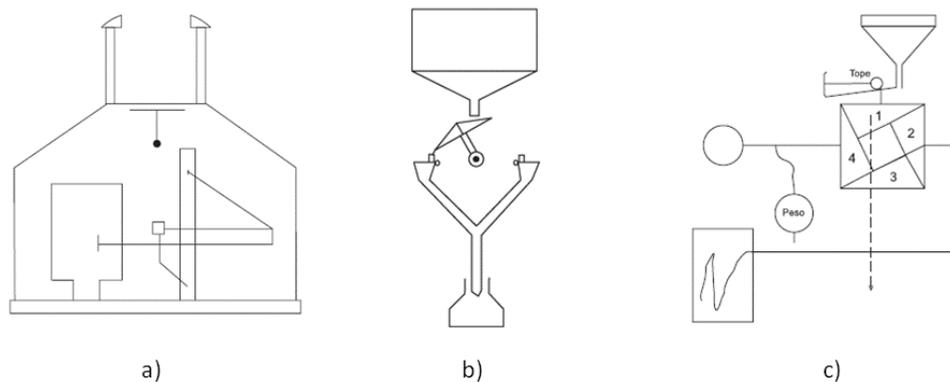
**Figura 7.** Pluviómetro ordinario

Los calibradores plásticos tienen marcas en el cilindro interior con una resolución de 0.25 mm, mientras que los calibradores metálicos requieren el uso

de un palo diseñado con marcas de 0.25 mm. Estos calibradores se adaptan para el invierno quitando el embudo y el cilindro interior y permitiendo que la lluvia de nieve entre en el cilindro externo. Una vez que la nevada o hielo termina de acumularse, o cuando se acerca a 300 mm, se retira para que se derrita, o se usa agua caliente para llenar el cilindro interior a fin de derretir la precipitación congelada en el cilindro externo, guardando la cantidad de fluido caliente añadido, que luego se resta del total general una vez que todo el hielo o nieve se ha derretido.

- **Pluviógrafos**

Otros instrumentos destinados a medir la distribución de la lluvia en el tiempo en un determinado lugar son los pluviógrafos, y permiten conocer la cantidad de lluvia a través del tiempo y su intensidad. Hay cinco clases o tipos fundamentales: Pluviógrafo de flotador sin sifón automático, de flotador con sifón automático, de balanza, Pluviógrafo de oscilación y el de una combinación del pluviógrafo de balanza y oscilación (**Figura 8**).



**Figura 8.** Tipos de Pluviógrafos: a) de balanza, b) de oscilación y c) Combinación de balanza y de oscilación.

### 2.3.3.5 Radar meteorológico

Los radares son sistemas activos de teledetección provistos de sensores que trabajan en la región de las microondas del espectro electromagnético (0.1 - 1

m). Emiten un haz energético propio que reciben tras su reflexión sobre la superficie observada. Existen dos tipos fundamentales de radares, los destinados a la meteorología y climatología que utilizan, una longitud de onda muy sensible a la presencia de agua o hielo en la atmósfera; y los destinados a topografía que utilizan longitudes de onda mayores que no interactúan con ninguno de los componentes de la atmósfera. Los primeros suelen ser fijos y situados en tierra, los segundos son móviles y se sitúan sobre aviones o satélites. Existen también radares meteorológicos situados sobre aviones, son los "cazadores de huracanes". El radar meteorológico emite un impulso de radiación y recoge el eco que resulta tras rebotar con gotas de agua o cristales de hielo en la atmósfera. Se puede medir con precisión el tiempo transcurrido y por lo tanto la distancia a la que esta la gota de agua o hielo. Cuanto mayor sea el tamaño y concentración de gotas y cristales, mayor será la señal que recibe el radar. Las medidas de la precipitación mediante el radar se abocan a la altura y a la intensidad de la precipitación. Por lo que respecta a la altura de la precipitación, se toman fotografías que proyectan el área del temporal que la produce; en éstas aparecen zonas luminosas de mayor o menor intensidad, de acuerdo con la variación de las intensidades del eco que se correlacionan con las precipitaciones acumuladas, de conformidad con las informaciones recibidas de las estaciones sinópticas. Con esta información se pueden trazar rápidamente las isoyetas. Por otro lado, representa un medio para efectuar medidas de precipitación en zonas inaccesibles.

### **2.3.3.6 Satelitales**

En los últimos años se ha agregado la medición de lluvia por satélite. La bondad de los satélites es de mayor importancia en zonas inaccesibles para la instalación de estaciones pluviométricas que puedan medir la lluvia. Además, el hecho de ser un medio barato y de amplia aplicación en países como México donde los recursos económicos y humanos son escasos, son de gran ayuda y permiten monitorear la lluvia en zonas donde no se tiene una densidad suficiente

de estaciones. En México existen dos sistemas que utilizan las bondades de los satélites geoestacionarios GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) de EEUU (West, East e Indian Ocean) que realizan tomas cada 30 minutos, el sistema EprepMEX desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, y el HYDROESTIMATOR, que fue desarrollado en la NOAA-NESDIS de los Estados Unidos, y que actualmente opera en México con algunas adaptaciones considerando los sistemas meteorológicos que afectan cada país. y que permiten monitorear la lluvia en forma horaria y diaria. Existen otros mecanismos por ejemplo, un radar a bordo del satélite de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM, por sus siglas en inglés), de la NASA, mide las precipitaciones mensuales con una precisión aproximada del 10% (Scofield y Kuligowsky, 2003).

#### **2.4. La lluvia en México y sus escenarios**

Un escenario de lluvia es la representación del comportamiento espacio temporal de la lluvia en base al análisis de una serie histórica de datos. En este sentido, los datos deben de provenir de una fuente oficial y confiable que posea la infraestructura necesaria para poder registrar y almacenar datos de lluvia. Por lo que en México, la actual Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional, ha sido la institución responsable desde hace varias décadas en llevar a cabo dicha actividad. El sistema actual que almacena datos de lluvia en forma histórica es el CLICOM (CLImatology COMputarized).

Luego entonces, desde hace varios años Klaus y Jáuregui (1975), encontraron que en el noreste de México el aumento de la lluvia durante la etapa invernal, se debió a un cambio en la circulación atmosférica de los vientos de zonal a meridional, asimismo, en la misma década, se observó un aumento en el número de frentes fríos y “nortes” que afectaron al noreste de México y la región del Golfo. En época más reciente, Salinas *et al.* (1992) reportaron cambios en las intensidades de la lluvia a escala regional en la Península de Baja California, diferente a lo encontrado en esta investigación, donde solamente una pequeña

porción de BCS manifiesta tendencias al incremento de la lluvia. A escalas más grandes, las tendencias de varios parámetros de precipitación a nivel anual en gran parte del territorio Mexicano han sido estudiadas por Méndez *et al.* (2005), documentando que el número de días lluviosos se incrementa al norte de México, concordando con los patrones geográficos de incremento de lluvia.

Algunos otros estudios intentan explicar las variaciones de la lluvia en México; en este sentido, Mosiño y Morales (1988) establecieron que los regímenes de lluvia por debajo de lo normal en el Centro de México, fue debido a la intensidad de los eventos de El Niño. A su vez, Cavazos y Hastenrath (1990) concluyeron que el incremento de la lluvia en el norte del territorio Mexicano, se debió a las influencias de este mismo fenómeno. Más recientemente Méndez *et al.* (2007) obtuvo resultados similares en el aumento de la lluvia durante el invierno boreal en el norte del territorio Mexicano, y estableció que ha sido consecuencia del fenómeno del ENSO (El Niño Oscilación del Sur). Bajo estas consideraciones, el incremento de lluvia invernal en las regiones áridas y semiáridas del territorio Mexicano, se debe parcialmente a las teleconexiones del fenómeno del ENSO, el cual parece ser más intenso en el norte de México y costas del Pacífico. No obstante, la distribución de la lluvia en tiempo y espacio en la República Mexicana, asociada a la circulación atmosférica, rasgos fisiográficos y fenómenos climáticos que la condicionan, han sido bien descritos y documentados recientemente (García, 2003; Pavia *et al.*, 2006). Por otra parte y confrontando lo que sucede en otras partes del mundo, en el Pacífico Asiático, se ha encontrado que las variaciones de la lluvia responden a los períodos de eventos El Niño y La Niña (Xu *et al.*, 2005). Asimismo, las variaciones locales de la distribución de las tendencias de la lluvia pueden atribuirse a las alteraciones en la circulación atmosférica, así como a la modificación de los forzamientos radiactivos (Hurrell, 1995).

De acuerdo a los estudios anteriores, se prevén consecuencias importantes que podrían ocurrir en los próximos años en las regiones áridas y semiáridas de México, en el cual el superávit de la lluvia (si continúa por varios años) podría

desempeñar un papel trascendental con la redistribución geográfica de los tipos de vegetación. Además, podría adicionarse el incremento de temperaturas máximas y mínimas en ciertas regiones del norte de México, las cuales actualmente experimentan cambios importantes que van desde +0.1 hasta +0.7°C por década (Méndez *et al.*, 2005). Los resultados evidencian la existencia de condiciones climáticas inversas a las registradas en décadas pasadas; las regiones áridas, ubicadas hacia el norte de México, tienden a incrementar la lluvia en aproximadamente 2% de la normal. Jones y Hulme (1996) y Hulme *et al.* (1998) establecen que globalmente la lluvia ha incrementado en un 2%, especialmente en las áreas continentales del hemisferio Norte. Las regiones más lluviosas del país perciben una disminución significativa de lluvia siendo del orden de 1%. Situaciones inversas a las encontradas por Kruger (2006) en Sudáfrica, donde los regímenes secos y húmedos tienden a acentuarse. Lo último que podemos mencionar, es la tendencia de las lluvias extremas es más pronunciada como en la zona alta de Chiapas y Tabasco, mientras que en algunas zonas del norte presentan descensos.

Lo que ocurrió en México en los estados de Tabasco y Chiapas (**Tabla 1**), en donde la deforestación aumentó el riesgo de inundación. Por otra parte el crecimiento del desarrollo urbanístico en lo que antes eran llanuras de inundación, aumenta la magnitud de las consecuencias negativas, contribuyendo al riesgo de inundaciones río abajo debido a la ‘canalización’ de los ríos (actividades aplicadas en los ríos de Tabasco).

**Tabla 1.** Niveles de deforestación en tres cuencas del estado de Chiapas (Terán e Ibarra, 2006).

Cuenca	Superficie (ha)	Área deforestada (ha)	Tasa de deforestación (ha/año)	% con respecto de la cuenca
Coatan	103,935.11	7,479.01	498.6	7.2
Huehuetan	76,993.3	3,921.9	261.5	5.07
Huixtla	72,977.83	5,157.64	343.8	6.99

## **2.5. México y la distribución de la lluvia en el entorno global**

Los factores de mayor importancia en la formación de la lluvia son el contenido de humedad y la velocidad vertical de la masa de aire. Un mapa de lluvia deberá destacar las zonas en que existen corrientes ascendentes, compensadas con otras en que el movimiento predominante sea descendente. Considerando el globo terrestre en su totalidad, se puede observar cómo estas zonas de ascenso y descenso se corresponden perfectamente. Si se considera a la superficie terrestre perfectamente uniforme, o si sólo se considera el valor medio de la lluvia en zonas a distintas latitudes, se tienen, de acuerdo con la circulación general de la atmósfera, ocho zonas claramente diferenciadas, que pueden agruparse en las bandas o cinturones zonales siguientes (Maderey y Jiménez, 2005).

### **2.5.1. Cinturón ecuatorial (I)**

Está constituido por la zona intertropical de convergencia en la cual confluyen los vientos alisios de uno y otro hemisferio, dando lugar a un movimiento general convectivo vertical ascendente. Debido a su desplazamiento durante el año, en este cinturón se distinguen tres zonas: una central (1), con lluvia abundante en todas las estaciones del año, limitada por las máximas oscilaciones del frente intertropical. Otras dos, contiguas a la anterior y simétricas (2), con lluvias apreciables en verano y sequía en invierno, y por último, las dos zonas exteriores (3) que reciben escasa lluvia en el verano y casi nula en el invierno.

### **2.5.2. Cinturones subtropicales (II)**

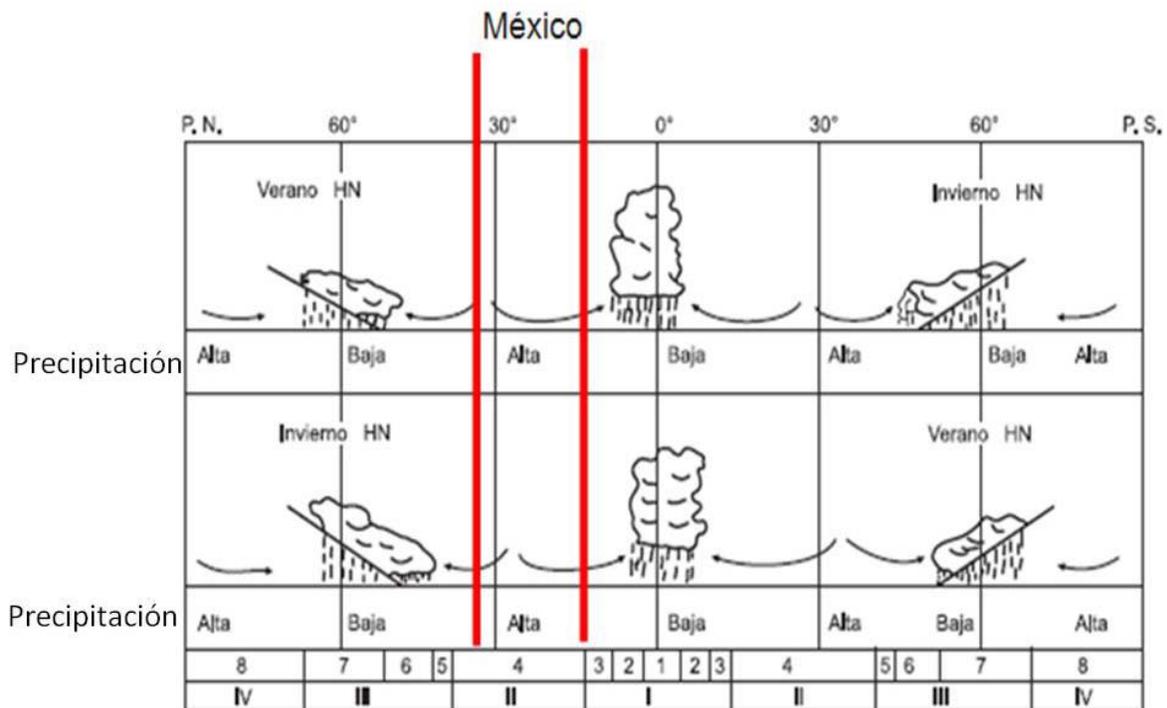
Corresponden a la zona de los anticiclones subtropicales donde predominan los movimientos descendentes (subsistencia). Debido a ello, las precipitaciones son muy escasas durante todo el año (4). México se localiza en esta zona donde las lluvias son altas en un entorno global.

### 2.5.3. Cinturones de latitudes medias (III)

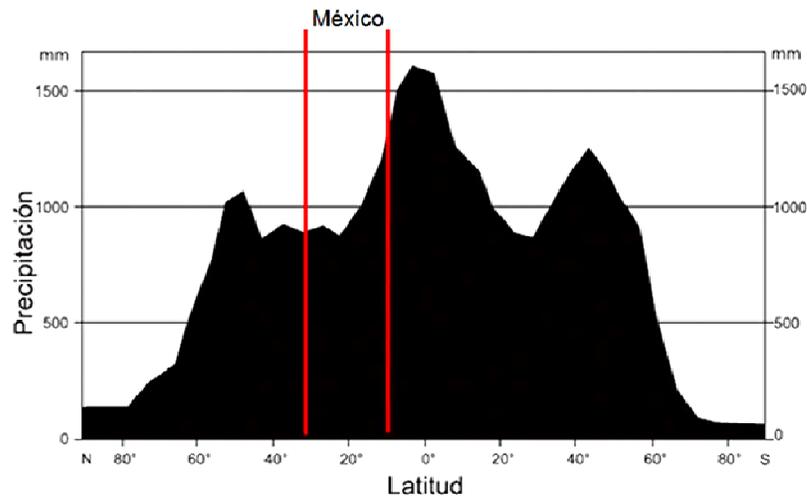
En estas latitudes la precipitación es generalmente de origen frontal y algunas veces proviene de masas de aire inestable (esquema de Petterson). Se distinguen tres zonas: Las más próximas al cinturón subtropical (5), con escasas lluvias en invierno y casi nulas en verano. Otras (6) contiguas a las anteriores, con precipitaciones apreciables en invierno y sequía en verano (por el desplazamiento de las altas subtropicales), y las últimas (7) en latitudes mayores, con precipitación durante todo el año debido al frente polar (**Figura 9**).

### 2.5.4. Regiones polares (IV)

En estas regiones la precipitación es escasa todo el año, debido a la falta de humedad del aire y al movimiento predominante de las masas de aire que es vertical descendente. Estas zonas se representan en el esquema de Petterson y se sintetizan en el **Figura 10**.



**Figura 9.** Esquema de Petterson (P.N.= Polo Norte, P.S. = Polo Sur).

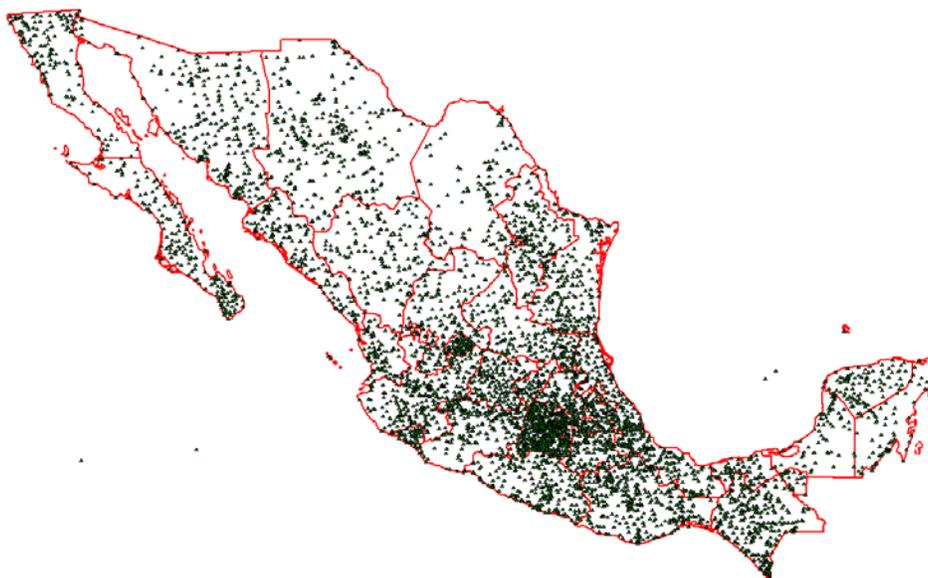


**Figura 10.** Distribución anual de la lluvia en el planeta de acuerdo a Brooks y Hunt, 1930.

## 2.6. El registro actual de la lluvia en México

México ha contado en su historia con alrededor de 5900 estaciones climatológicas distribuidas por todo el país. En la actualidad se encuentran operativas más de 3500. Esta información se almacena en la Base de Datos Climatológica Nacional (BDCN), y es administrada por la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN). La BDCN se maneja con el programa CLICOM (CLImatología COMputarizada), proporcionado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La **Figura 11** muestra la distribución original de las estaciones convencionales instaladas para medir la lluvia en el país.

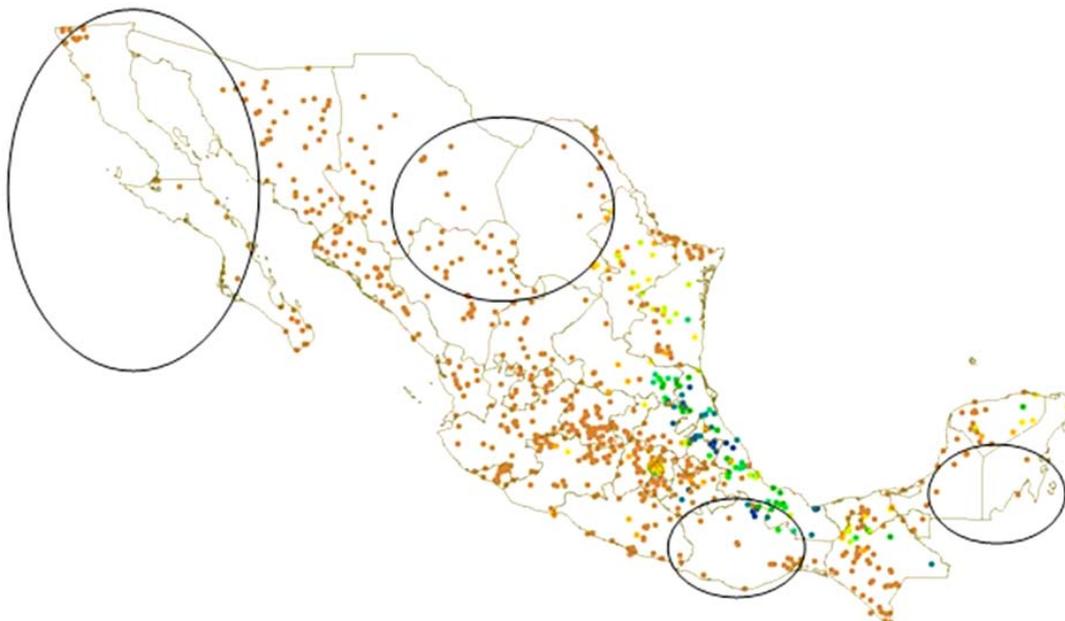
En las estaciones climatológicas, los registros de la lluvia acumulada de las últimas 24 horas, se mide diariamente en un intervalo de tiempo que va desde las 07 h de la mañana a las 07 h de la mañana del día siguiente. Adicionalmente, se toman otras observaciones como de la temperatura, estado de nubosidad del cielo, si hubo granizo, helada, tormenta o neblina entre otras. El instrumental que se utiliza es profesional y cumple con la normatividad solicitada por la OMM. Para medir la precipitación se utilizan pluviómetros convencionales.



**Figura 11.** Distribución de las 5900 estaciones del sistema CLICOM

(Fuente, SMN 2009).

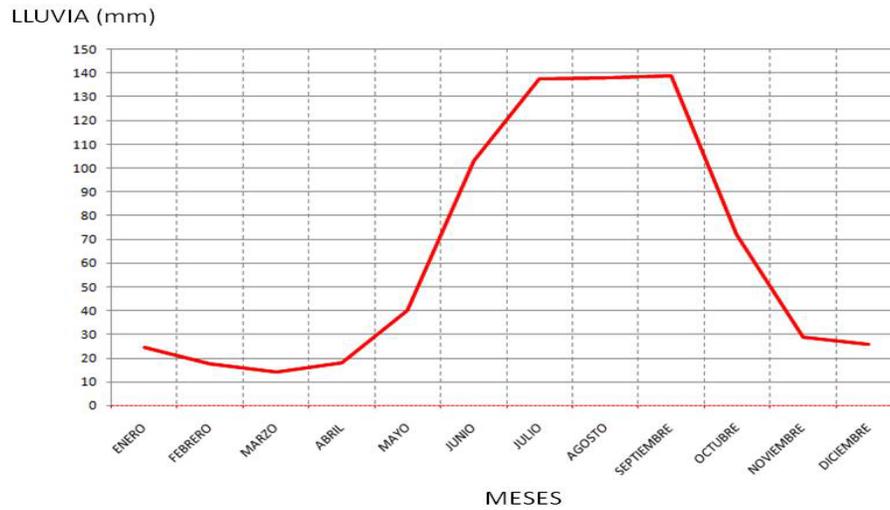
En la actualidad, los registros de lluvia diaria varían entre los 800 y 1000 reportes, por lo que la distribución de las estaciones que reportan en el país varía diariamente. La zona que presenta una mayor concentración de estaciones se localiza en la zona Centro, y la que posee en forma general menos estaciones se localiza en el Norte del país entre los estados de Chihuahua y Coahuila, así como la Península de Baja California (**Figura 12**). En las estaciones climatológicas, los registros de la lluvia acumulada de las últimas 24 h, se mide diariamente en un intervalo de tiempo que va desde las 07 h de la mañana a las 07 h de la mañana del día siguiente. Adicionalmente se toman otras observaciones como de la temperatura, estado de nubosidad del cielo, si hubo granizo, helada, tormenta o neblina entre otras. El instrumental que se utiliza es profesional y cumple con la normatividad solicitada por la OMM. Para medir la precipitación se utilizan pluviómetros convencionales.



**Figura 12.** Distribución en un día normal de registros para medir la lluvia. Los círculos negros señalan la inconsistencia espacial de los datos (Fuente: SMN 2009).

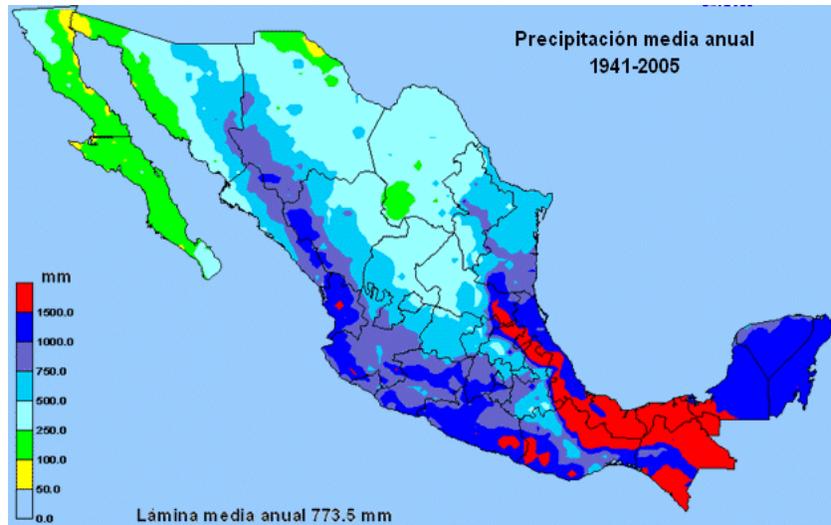
### 2.7. La distribución espacial de la lluvia en México

Actualmente se desarrollan diferentes proyectos a nivel estatal para aumentar la infraestructura de medición de la lluvia. Esto es debido al incremento de los problemas de inundación que se observan en varias zonas del país y que requiere elaborar medidas de mitigación y alerta temprana. Para lograrlo, se requiere conocer el comportamiento de la lluvia en tiempo real e histórico. Se puede observar en forma general que la zona más húmeda del país se localiza entre los estados de Veracruz, Tabasco y Chiapas con láminas de lluvia acumulada anual cercano a los 4000 mm. La zona con menor humedad se localiza en la Península de Baja California con una lámina de lluvia anual que no supera los 100 mm. La **Figura 13** muestra el comportamiento climatológico de la lluvia en forma mensual durante los últimos 59 años, y se puede observar los meses más secos y los más húmedos.



**Figura 13.** Climatología de la lluvia en forma mensual (1950-2008).

El mes más seco corresponde al mes de marzo, y el más húmedo al mes de septiembre. La distribución de la lluvia acumulada en forma anual se observa en la **Figura 14**.



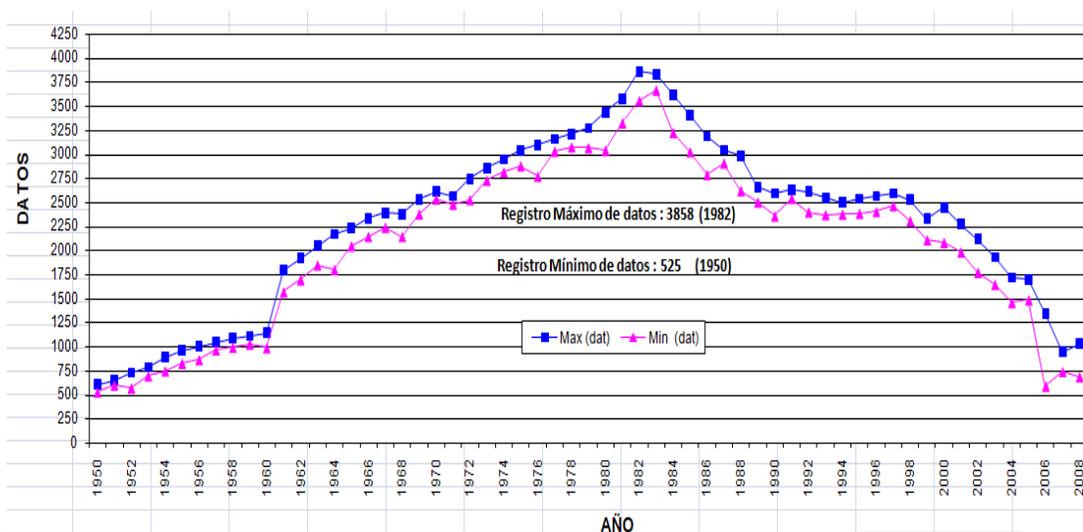
**Figura 14.** Climatología anual de la distribución de la lluvia en México.

La disponibilidad de datos MAXIMA y MINIMA registrado en un día de cada año dentro del sistema CLICOM se puede observar en la **Figura 15**, y que

muestra casi una distribución normal de los datos. La máxima cantidad de datos registrados ocurrió en el año de 1982 con 3858 registros en un día. El mínimo registro de datos disponible ocurrió en el año de 1950 con 525 datos.

## 2.8. Sistemas de Información Geográfica, SIG

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para operar en forma coordinada y lógica en el análisis de la captura, almacenamiento, la transformación y presentación de toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Los SIG son una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial, y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos, 2008).



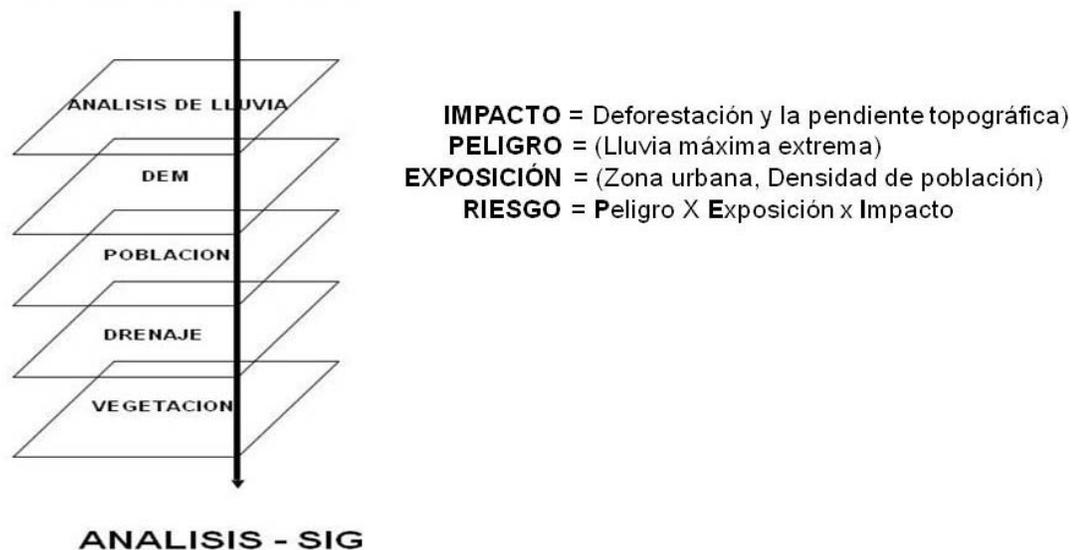
**Figura 15.** Número de registros máximos y mínimos obtenidos en un día de cada año del sistema CLICOM (1950-2008).

Desde sus orígenes, hace solamente 20 años, los sistemas de información geográficos se han convertido en una plataforma de desarrollo y análisis de gran alcance dentro de la infraestructura informática, proporcionando un marco del cual podemos analizar y entender mejor lo que ocurre en nuestro alrededor. Los SIG

proveen un marco intuitivo del cual podemos analizar el ambiente natural y el desarrollado por el hombre. Aunque organizar un lugar o localización pueda considerarse intuitivo, es solamente mediante un SIG que podemos hacerlo de una manera estructurada que también puede ser duplicada y accesible para el público en general. Los SIG han introducido nuevos conceptos relacionados al análisis y modelaje de datos complejos, mapas interactivos y la integración de gran variedad de datos con información geo-espacial. Además, ha introducido nuevos formatos de visualización y de procesamiento de datos geo-referenciados, cuyos conceptos están avanzando, no solamente la geografía sino a todas las ciencias. Dentro del espectro de los SIG y su cantidad de aplicaciones, esta plataforma también ha sido efectivamente utilizada para estudiar y resolver problemas relativos a los provocados por los desastres naturales (Zlatanova y Basta, 2005).

Es por ello que para atenuar las consecuencias devastadoras de los sistemas meteorológicos extremos, algunas organizaciones científicas y agencias estatales han incorporado las tecnologías de información existentes como los SIG en la mitigación de los desastres naturales, y donde los investigadores han sugerido que la tecnología de SIG puede desempeñar un papel importante e integral en la disminución de los impactos adversos de peligros naturales en la sociedad. El uso de los SIG para entender la complejidad de los peligros naturales en el contexto geo-espacial y temporal se considera de suma importancia en el manejo y explotación de información con una alta resolución espacial y temporal, y que permita integrar todas las variables posibles (Álvarez, 2004). Por ende, la integración de información temática como la de lluvia, y almacenada en el SIG mediante una base de datos georeferenciados, queda establecido como una herramienta esencial para cualquier investigación cuyo objetivo es determinar el peligro planteado por fenómenos naturales peligrosos, como los originados por lluvias máximas extremas.

Un riesgo natural es descrito generalmente por datos físicos ambientales. Las capas de datos típicamente usados en los SIG incluyen: tipos de suelos, usos del terreno, la vegetación, la topografía, la meteorología, la geología, etc.; y se adquieren o se derivan de observaciones in situ y de imágenes de fotografías aéreas o de satélites. Muchos de las aplicaciones de los SIG son basados en la manipulación de las capas de información y su interacción (**Figura 16**). Los datos socioeconómicos también se incorporan para determinar vulnerabilidad de la comunidad e incluyen datos de censo de la población y datos sobre la infraestructura de utilidades y de acceso. Estos datos socioeconómicos son esenciales en el análisis de vulnerabilidad.



**Figura 16.** Modelo de análisis utilizando sistemas de información geográfica, SIG

La información detallada sobre tipo de hogar, forma de sustento, seguridad, sistemas de transportación, etc., son requeridos. Por ejemplo, los datos sobre vivienda incluyen los materiales y tipo de construcción y las edades de edificios. Los datos sobre las utilidades (ej: agua, electricidad, telecomunicación, líneas de gas, y alcantarillado), los datos sobre instalaciones de seguridad (ej., los hospitales, cuarteles de policías, centros de manejo de emergencia, etc.), y los datos sobre el acceso a los lugares (ej: carreteras, puentes, túneles, etc.) también se requieren, donde sea posible. Toda esta gamma de información se almacena

en el SIG mediante una base de datos georeferenciados. Estas bases de datos contienen la información geográfica, numérica y alfanumérica en varios formatos digitales, incluyendo mapas vector y “raster”, las mensuras terrestres, imágenes aéreas y de satélites, los textos, los documentos y los datos tabulados. La información almacenada en geo-bases de datos se compila en diversas escalas geográficas y temporales, usando una variedad de métodos y de tecnologías. Estas geo-bases de datos se utilizan por los administradores de la política pública, los ingenieros, científicos, y las instituciones gubernamentales. Para muchos científicos, los geo-bases de datos representan fuentes importantes de información para validar los modelos físicos, estadísticos o conceptuales.

### **2.8.1. Los sistemas de información geográfica en la toma de decisiones.**

Los desastres naturales pueden resultar mortales para los seres humanos, daños a la infraestructura, a las actividades socioeconómicas y al ambiente. Las geo-bases de datos temáticos y los archivos cartográficos digitales, se han convertido en una parte importante de estrategias integradas en un sistema de información geográfica para evaluar el riesgo de los peligros naturales y antropogénicos. Los sistemas de aviso han sido diseñados para alertar a la población, y tienen como objetivo proteger sus estructuras y la infraestructura, de acontecimientos naturales extremos como los huracanes, y apoyados en el análisis de las geo-bases de datos para proporcionar pronósticos exactos, confiables y oportunos. El personal de protección civil en el manejo de emergencias de las agencias municipales, regionales y nacionales, y los encargados de riesgo que trabajan para las compañías de seguros, utilizan sistemas de información geográfica para estimar la frecuencia y las características de acontecimientos naturales extremos. Además, los usuarios profesionales y los consultores privados pueden utilizar geo-bases de datos para solucionar problemas locales de riesgo. Hasta donde sea posible, las instituciones responsables de proteger al ambiente y a la población, deben tener acceso en

forma rápida y confiable a través de los sistemas de información geográfica y obtener información de gran utilidad sobre una variedad de peligros naturales, de forma tal que puedan investigar sobre las consecuencias de un sitio en específico (Bernknopf, 2005).

La aplicación y manejo de los SIG, realzan la metodología integrada multidisciplinaria al estudio de desastres naturales y su mitigación. La integración de los datos, tareas de evaluación de riesgo y la toma de decisiones incluyen fomentar la creatividad en el uso de la información geo-espacial (ej: escalas geográficas, integración con datos ambientales y socioeconómicos, etc.), y se fomentan además, los métodos de análisis espaciales que exploren con eficacia la modelación de peligros, vulnerabilidad y tareas de evaluación de riesgo. En adición, se promueve que las metodologías se conviertan en herramientas para apoyar la toma de decisiones. Los geo-bases de datos de alta calidad integrados con un SIG pueden apoyar la toma de una decisión racional en un contexto espacial y temporal que puede ser de gran utilidad a los administradores del orden público. Los SIG pueden facilitar el entendimiento de la complejidad de los riesgos naturales extremos, y la visualización de sus consecuencias y como podrían afectar a las comunidades más vulnerables. Además, ayudarían en la mitigación y reducción de los desastres. Las mejoras continuas en los sistemas de computación, permite desarrollar las teorías innovadoras y los usos prácticos de evaluación de riesgo de peligros naturales. El desarrollo y acceso al Internet y las técnicas avanzadas de visualización, proporcionarán una oportunidad de comunicar con eficacia los riesgos de los peligros naturales al público a fin de proveer mayor protección y seguridad (USDA, 2007).

Los SIG pueden beneficiar grandemente en la mitigación de desastres naturales porque las metodologías espaciales pueden ser exploradas completamente en el proceso de evaluación de riesgo, desde la integración de los datos hasta las tareas de evaluación y la toma de decisiones. En primer lugar, los datos espacialmente referenciados confiables y actualizados son importantes en la

evaluación de riesgo de los peligros naturales. Las tareas de evaluación y toma de decisiones son limitadas, en última instancia, por la disponibilidad y la calidad de los datos. En segundo lugar, el análisis espacial de los SIG con sus variados métodos y técnicas, tienen la habilidad de integrar los datos ambientales y socioeconómicos en el análisis de vulnerabilidad.

Finalmente, el propósito del proceso de evaluación de riesgo es apoyar la toma de decisiones racionales, y tomar medidas prácticas relevantes en la evaluación de los peligros. En la toma de decisiones se debe ser capaz de proporcionar los procedimientos definidos y sistemáticos para medir la probabilidad de los peligrosos. Una de las ventajas dominantes de usar las herramientas de los SIG en la toma de decisiones, es el uso eficiente de hacer múltiples análisis variando parámetros y generando panoramas alternos en un contexto geo-espacial. La generación y la consideración de soluciones alternas permite la investigación de resultados con variedad de impactos entre los factores multivariados y/o que están en conflicto, resultando en la identificación de características potencialmente indeseables de las soluciones a los panoramas alternos de la decisión (Monroe, 1997). En las últimas dos décadas, las organizaciones regionales, nacionales e internacionales han hecho esfuerzos considerables en diseñar, poner en práctica y mantener inventarios digitales con información ambiental y temática sobre los peligros naturales e información socioeconómica (Vakis, 2006).

## **2.9 Acciones y respuestas**

Recientemente, se ha identificado que para enfrentar los efectos de las fuerzas de la naturaleza, es necesario adoptar un enfoque global, que contemple los aspectos científicos y tecnológicos relativos al conocimiento de las tormentas severas y su ocurrencia, y de esta manera desarrollar nuevas metodologías utilizando los sistemas de información geográfica que permitan reducir los impactos, y además prever esquemas de nuevos desarrollos urbanos en zonas menos riesgosas, además de implementar operativos para apoyar a la población

con medidas organizativas, para que esté preparada y responda de manera apropiada ante una avenida repentina y extrema.

Un requerimiento esencial para la implementación de una metodología, es la necesidad de conocer la presencia de las lluvias severas, dónde, cómo y cuándo se presentarán. Esto permitiría la aplicación de modelos de lluvia – escurrimiento e integrar y analizar datos para poder identificar como estos eventos pueden incidir en la población.

Aunque las inundaciones y los deslaves representan un problema trascendental, el tipo de datos, su robustez y consistencia aún limitan la predicción precisa de las series de tiempo de los eventos extremos. Hoy en día no existe un sistema nacional a escala global para monitorear o detectar condiciones de lluvia que puedan disparar este tipo de desastres lo que crea inseguridad e incertidumbre respecto al comportamiento de la lluvia y su localización, y se plantea el compromiso de las poblaciones para actuar en la mitigación, adaptación y reducción del riesgo, que siguen siendo un desafío mundial (PNUD, 2006).

Cabe esperar que las inundaciones se incrementen en el futuro, en función de la frecuencia e intensidad de la lluvia y del crecimiento del desarrollo urbano sobre zonas inaccesibles, es por ello que en el caso de Europa se tomen medidas formales destinadas a prevenir y atenuar las consecuencias del comportamiento de las lluvias y sus impactos en la población. Algunos países, como Alemania en conjunto con la Comisión Europea, ya están emprendiendo iniciativas, y dado el carácter transfronterizo de las inundaciones, y se propuso recientemente una acción concertada en materia de gestión de los riesgos de inundación, que se centrará en el desarrollo y la aplicación de planes coordinados de gestión de los riesgos y sus mapas de inundación.

La Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) está analizando actualmente las diversas maneras en que los Estados miembros de la UE elaboran sus mapas de riesgo de inundación. En el caso de México se han desarrollado mapas estatales que muestran las zonas con riesgo de inundación, y

las metodologías empleadas varían unas con otros. Los resultados son impresos y los datos no se pueden recuperar en forma digital.

La propuesta en México a través de este trabajo mediante la aplicación de sistemas de información geográfica, permitirá extrapolar los resultados futuros de acuerdo a la alteración dinámica de las variables aplicadas. Esto es por el incremento de los niveles de la deforestación, y al crecimiento de la mancha urbana en zonas de alto riesgo considerando los asentamientos sobre los drenes principales de los ríos. El desarrollo de herramientas estandarizadas que permitan combinar resultados a través de los SIG's, permitirá extrapolar los resultados a futuro a través de políticas de desarrollo urbano y de protección a la población y al ambiente.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área de estudio

Si analizamos el entorno global, podemos observar diferentes masas continentales asociadas a los diferentes continentes: América, África, Antártica, Asia, Europa y Oceanía. El continente americano, a su vez, se divide en tres partes: **América del Norte** (constituida por Estados Unidos de América, Canadá y **México**), América Central y América del Sur. Luego entonces, México es un país localizado en América del Norte y comparte frontera por el norte con Estados Unidos y al sureste con Guatemala y Belice. Su superficie es de 1'964,375 km<sup>2</sup>, con una superficie continental de 1'959,248 km<sup>2</sup> y una insular de 5,127 km<sup>2</sup>. Esta extensión lo ubica en el decimocuarto lugar entre los países del mundo con mayor territorio, ubicado en el sur del subcontinente norteamericano. La longitud de sus costas continentales es de 11,122 km, por lo cual ocupa el segundo lugar en América, después de Canadá, repartidos en dos vertientes: al occidente, el océano Pacífico y el golfo de California; y al este, el golfo de México y el mar Caribe, que forman parte de la cuenca del océano Atlántico.

El relieve se caracteriza por ser muy accidentado y alojar múltiples volcanes. El territorio es recorrido por las sierras Madre Oriental y Madre Occidental, que son una prolongación de las Montañas Rocosas. La sierra Madre Occidental termina en Nayarit, en la confluencia con el Eje Neovolcánico. A partir de allí, paralela a la costa del Pacífico, corre la Sierra Madre del Sur. Los ríos de México se agrupan en tres vertientes. La vertiente del Pacífico, la del Golfo y la vertiente interior. El más largo de los ríos mexicanos es el Bravo, de la vertiente del Golfo. Éste tiene una longitud de 3.034 km, y sirve como límite con Estados Unidos. Otros ríos en esta vertiente son el Usumacinta, que sirve como límite con Guatemala; el río Grijalva, quizá el más caudaloso del país; y el río Pánuco, a cuya cuenca pertenece el Valle de México.

### 3.1.1. El clima en México

México tiene una gran diversidad climática. Su situación geográfica ubica dos áreas separadas por el trópico de Cáncer: una zona tropical y una desértica. Sin embargo, el relieve y la presencia de los océanos influyen mucho en la configuración de los climas en el país. Luego entonces, es posible encontrar climas fríos de alta montaña a unos cientos de kilómetros de los climas más calurosos de la llanura costera. El más notable por sus variaciones es el clima del estado de Chihuahua, donde se dan las temperaturas más bajas del país, que llegan en ocasiones a los  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y las más altas en la desértica Ciudad Juárez. Allí se ubica uno de los más importantes desiertos de América: el de Chihuahua.

La zona cálida lluviosa comprende la llanura costera baja del Golfo de México y del Pacífico. En esta región las temperaturas oscilan entre los  $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  y los  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Una zona templada comprende las tierras localizadas entre los 914 y los 1.830 msnm. Aquí, las temperaturas oscilan entre los  $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  en enero y de  $21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  en julio. La zona fría va desde los 1.830 msnm de altitud hasta los 2.745 metros. El clima templado sub-húmedo o semi-seco alcanza temperaturas que oscilan entre los  $10$  y los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y presenta lluvias no mayores a los 1000 mm anuales. A una altitud superior a 1.500 metros, la presencia de este clima depende de la latitud de la región. En las áreas con este tipo de clima, las heladas son una constante que se presenta cada año.

Un segundo tipo de clima lo constituyen el cálido-húmedo y el cálido sub-húmedo. En las zonas con este clima, llueve durante el verano o a lo largo de todo el año. La lluvia alcanza el índice superior anual de 3.500 mm, y presenta una temperatura media anual que oscila entre los  $24$  y  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las zonas con este tipo de clima se ubican en las planicies costeras del golfo de México, del océano Pacífico, el Istmo de Tehuantepec, en el norte de Chiapas y en la península de Yucatán. El trópico seco presenta variedades de los climas anteriores. Se localiza en los declives de la Sierra Madre Occidental y Oriental, las cuencas altas de los ríos Balsas y Papaloapan, así como en ciertas regiones del istmo de Tehuantepec,

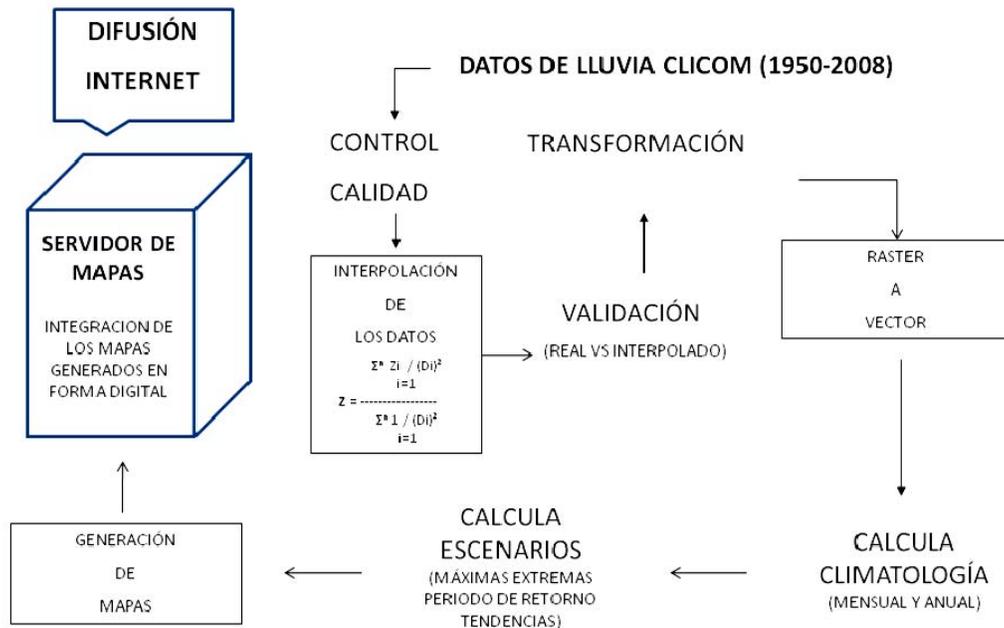
la península de Yucatán y el estado de Chiapas. El trópico seco es, por lo tanto, la zona más amplia de los climas cálidos extremos en México.

Las zonas áridas son las regiones donde la lluvia anual es menor a 350 mm. La temperatura anual varía entre los 15 y los 25 °C, y su índice de lluvia es sumamente variable. La mayor parte del territorio mexicano, ubicado al norte del trópico de Cáncer, es una zona con este tipo de características. La estación húmeda se extiende entre los meses de mayo y octubre. En promedio llueve durante 70 días al año. La situación dominante, sin embargo, es la escasez de lluvia en la mayor parte del territorio, hecho relacionado con los obstáculos que representan a las nubes de lluvia en las altas montañas que enmarcan la Altiplanicie Mexicana. En la zona templada del altiplano, el promedio de lluvia es de 635 mm anuales. La zona más fría, de alta montaña, registra lluvia de 460 mm. En el semi-desierto del norte del Altiplano apenas alcanza 254 mm de lluvia anuales. En contraste con la aridez de este territorio (que concentra el 70% de la población mexicana), existen algunas regiones que pueden recibir de 1.000 mm y hasta más de 3.000 mm. El promedio de temperatura para el país es de unos 19 °C. Sin embargo, Ciudad Juárez, Chihuahua, Hermosillo y Monterrey donde las Temperaturas son realmente extremas. Juárez debido a su clima desértico extremo ha presentado una variación de temperatura histórica en 1962 por casi 80°C (-26,2°C a 51,7 °C).

### **3.2. Diseño del estudio**

El diseño del presente estudio, se realizó con base en el sistema CLICOM, el cual contiene registros históricos de datos de lluvia. Los datos extraídos corresponden al periodo de 1950 - 2008. Se aplicó un control de calidad para eliminar datos de mala calidad. Cabe mencionar que los datos de lluvia registradas por las diferentes estaciones del país, presentaron inconsistencia en el espacio y en el tiempo, esto quiere decir que ninguna estación presentó una continuidad en la serie de 1950 al 2008, y además provocó que el número de registros diarios fuera variable en el lapso de tiempo analizado.

Los datos con valores superiores a los 400 mm de lluvia se validaron de la siguiente manera; se corroboró el dato con los archivos impresos históricos de la CSMN para descartar errores de captura, o bien, establecer relaciones con sistemas meteorológicos extremos como los huracanes. En estos casos se analizaron con otros datos de la misma fecha con valores mayores a 400 mm para su aceptación. Para esto último, fue necesario utilizar el programa HURTRACK de la NOAA, y extraer los huracanes en los días considerados. Si hubo la presencia de huracanes, el valor entre 400 y 700 mm se aceptaba, en caso contrario los valores altos se eliminaron. El valor máximo aceptado no fue superior a los 700 mm, y fue bajo el criterio de haber encontrado una validación consistente en su documentación. En la base de datos CLICOM se observaron valores superiores a los 10,000 mm, los cuales no fueron considerados. La **Figura 17** muestra el diagrama del proceso general para realizar el presente trabajo.



**Figura 17.** Diseño conceptual para la generación de escenarios de lluvia.

### 3.3. Base de datos de lluvia CLICOM.

La base de datos del clima oficial en el país, es la que existe y se encuentra disponible en el SMN, el sistema CLIMA COMputarizado (CLICOM). Esta base de datos contiene la información registrada en la red de estaciones climatológicas convencionales. La información de CLICOM presenta un retraso en lo que su actualización se refiere. Este retraso puede variar desde algunos meses hasta varios años y está relacionado básicamente con dificultades de acceso a los datos en papel y con retrasos en el proceso de digitalización de la información. El retraso mencionado varía entre las diversas estaciones climatológicas y resulta interesante notar que no sólo se observa en la base de datos mexicana de CLICOM, sino que también se observa en otras bases de datos climáticas del mundo, tal y como muestra un estudio realizado por Beck *et al.* (2005), en donde el decaimiento en la disponibilidad de datos en los periodos más recientes puede atribuirse a retrasos en la actualización de la mayoría de las fuentes, y la única alternativa para compensar parcialmente este retraso parece ser el uso de datos transferidos en tiempo semi-real de las estaciones en las que se cuente con este tipo de reportes.

Al analizar el número de observaciones disponibles en el mundo se observa un máximo global de reportes a mediados de los ochenta y decrementos posteriores. En el caso de México, hacia el año 1982 se cuenta con un promedio de alrededor de 3000 puntos de observación, y de los que actualmente alrededor de 800 estaciones en promedio están disponibles en tiempo real. Existen otras fuentes de datos atmosféricos en el país, tales como los datos de observatorios sinópticos, radio sondeo, satélite, radar y de otras redes de medición, mas éstos no son mencionados aquí porque su uso es en la mayoría de los casos con fines meteorológicos o trabajos de corto plazo, mientras que el tema de este documento son los datos climáticos. La convergencia entre los insumos y productos de corto, mediano y largo plazo es el tema de estudio de proyectos específicos como la iniciativa "The Observing System Research and Predictability Experiment

(THORPEX)” que actualmente desarrolla la Organización Meteorológica Mundial (OMM) <http://www.wmo.int/thorpex>.

### 3.4. Interpolación de los datos de lluvia.

En climatología es una práctica común el generar un campo interpolado a partir de datos irregularmente distribuidos (ver Haagenson, 1982; Johnson, 1982). La interpolación es un método indirecto para calcular los valores faltantes a partir de datos existentes. Normalmente el volumen de información requerido para una interpolación se restringe en función de los métodos aplicados, y que además se requiere un banco histórico para el cálculo (Gandin, 1988).

Por otra parte no siempre es necesario que la red de datos esté completa. Por ejemplo, para el cálculo de lluvia media sobre una región, existen métodos como el de los polígonos de Thiessen y de Distancias Inversas que no requieren en principio continuidad en los datos (Sarmiento *et al.*, 1990). En la mayoría de los casos prácticos, el dato ausente es simplemente ignorado, (bajo la hipótesis implícita que estas ausencias son al azar) o se aplican técnicas ad-hoc (interpolación lineal, sustitución por el más próximo) que luego no son documentadas en el trabajo final. En cualquier caso, se afecta a la población en forma arbitraria, en base a hipótesis que rara vez son evaluadas. El tema en cambio es de gran interés en el área de la Estadística y las Ciencias Sociales en general (Rubin, 1987).

#### 3.4.1. Método de Distancias Inversas

En este método, los coeficientes de ponderación son sólo función de las distancias entre el punto de interés y cada una de las estaciones con datos. Así, para un punto cualquiera de la trama  $j = r$ , la ponderación para el valor medido en la estación  $g = s$  se calcula como:

$$Z_{rs} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i / [D(r,s)]^2}{\sum_{i=1}^n 1 / [D(r,i)]^2} \quad \text{Ec.1}$$

Dónde,

$Z_{rs}$  es el punto más cercano a un dato de lluvia

$D(r, s)$  es la distancia entre el punto  $r$  y la estación  $s$

$n$  es el número de datos puntuales con precipitación.

Un problema con este método es el hecho que cuando hay dos estaciones cercanas, no se considera la redundancia en la información. El método permite resolver la inconsistencia espacial de los datos, y que por la naturaleza del problema de los datos de lluvia en el país, su aplicación fue de los más aceptados.

### **3.4.2. Cálculo de la lámina de lluvia promedio**

La lluvia puede tener una gran variabilidad en espacio y en tiempo. En cuanto al primer aspecto, la variabilidad espacial no sólo es notable a escala global (zonas desértica o tropicales etc.), sino que también puede ser muy importante a escalas más pequeñas, tal como una cuenca de unos pocos cientos de kilómetros cuadrados o aún menores (Campos, 2007).

### **3.4.3. Media del área de lluvia de un evento de tormenta**

$$P_1 = \frac{1}{T} \frac{1}{A} \int_A f(x) dx \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $f(x)$  es la función que describe la acumulación total de una tormenta en todos los puntos  $x_i$ ,  $A$  corresponde al área y  $T$  el periodo de duración de una tormenta.

### **3.4.4. Lámina de lluvia promediada en el tiempo sobre un periodo dado**

$$P_1 = \frac{1}{T} \frac{1}{A} \sum_{i=1}^{T \rightarrow \alpha} \int_A f(x, t_i) dx, \quad \text{Ec. 3}$$

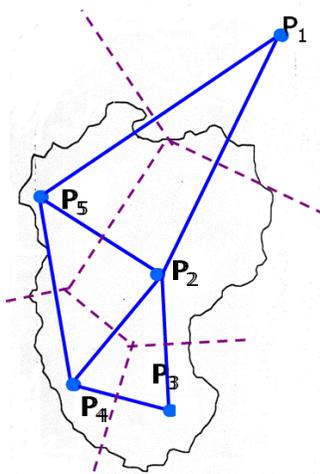
Dónde  $f(x, t_i)$  es una función que describe la lluvia total en  $x$  con período  $t_i$ .

Puesto que las observaciones de lluvia son generalmente valores en puntos discretos, no conocemos la función  $f(x)$ . Luego entonces, la integración espacial se aproxima mediante alguna clase de promedio pesado discreto. Los pesos valdrían

1/n, con n el número de estaciones, si éstas estuviesen uniformemente distribuidas y el proceso de lluvia fuese completamente homogéneo en el espacio. Este no es el caso real, ya que comúnmente, se usan dos métodos diferentes para obtener los promedios sobre un área de los eventos de una lluvia intensa. El primer método es el esquema de pesos de Thiessen, ilustrado en la **Figura 18** donde se muestra una región con 5 estaciones de lluvia. El mecanismo de peso es de la forma,

$$[P] = \sum_{i=0}^n \rho_i P_i \tag{Ec. 4}$$

Donde  $\rho_i$  es el peso aplicado a la observación  $P_i$ .



Estación	Lluvia (P)	Área (A)	Wi	P * A
	mm	Km2		mm*km2
P <sub>1</sub>	10.00	0.22	0.02	2.2
P <sub>2</sub>	20.00	4.02	0.44	80.4
P <sub>3</sub>	30.00	1.35	0.15	40.5
P <sub>4</sub>	40.00	1.60	0.18	64.0
P <sub>5</sub>	50.00	1.95	0.21	97.5
		<b>9.14</b>	<b>1.00</b>	<b>284.6</b>
Precipitación media=			31.14 mm	

**Figura 18.** Descripción del método de Thiessen.

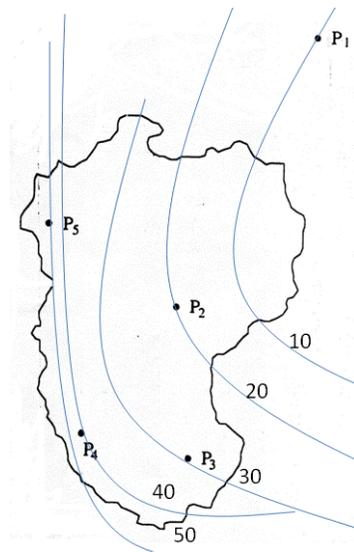
En el método de Thiessen, se delimitan subregiones correspondientes a cada registro de lluvia, y el peso es una medida de la contribución del área correspondiente. En el procedimiento, todas las áreas están conectadas con segmentos de recta, y luego se construyen los bisectores perpendiculares a cada segmento, extendiéndolos hasta que se intersecten, formando polígonos irregulares. Luego entonces, cada estación queda rodeada por un polígono cerrado de una determinada área. Los pesos  $\rho_i$  vienen dados por  $\rho_i = A_i / A$ , donde  $A_i$  es el área del polígono que rodea a la estación  $i$ , y  $A$  es el área total de la zona bajo estudio. El área de cada polígono puede estimarse por planimetría o

cualquier otra aproximación válida. El segundo método es de las isoyetas. Un mapa de isoyetas muestra líneas de igual lluvia (**Figura 19**). En este método, los pesos son también  $\rho_i = A_i / A$ , pero ahora  $A_i$  es el área entre isoyetas. Los valores de lluvia son los promedios entre curvas contiguas de igual lluvia. A cada área se le asigna la precipitación media entre las dos isoyetas que forman su frontera.

El método de las isoyetas es preferible y más preciso. Su principal limitación es que requiere suficientes observaciones como para permitir calcular las líneas de igual precipitación:

$$\bar{P} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n A_i \bar{p}_i \quad \text{Ec. 5}$$

Se desarrolló un programa en "C" llamado CRE\_GRD.C, y utiliza la función GRID del sistema SURFER para generar las mallas de 320 columnas x 200 líneas. El algoritmo interpolador es el de distancias inversas considerando una distribución heterogénea de los datos de lluvia diaria, y considera el área bajo las coordenadas extremas que delimitan al país, latitud y longitud. El programa utilizó a GEOREF.C para la georeferencia de los datos. La salida de los programas fueron en formato \*.GRD.



Isoyetas	Lluvia (mm)	Área (km <sup>2</sup> )	Lluvia x Área (mm*km <sup>2</sup> )
0-10	5.00	0.88	4.40
10-20	15.00	1.59	23.85
20-30	25.00	2.24	56.00
30-40	35.00	3.01	105.35
40-50	45.00	1.22	54.90
50-60	55.00	0.20	11.00
		9.14	255.50
Precipitación media= 255.50/9.14=			<b>27.95 mm</b>

**Figura 19.** Descripción del método de Isoyetas.

### 3.5 Transformación de las mallas interpoladas a un formato de Sistemas de Información Geográfica.

Se desarrollaron programas computacionales en "C" para cumplir con la transformación de los datos. El programa SIG.C, permite transformar las mallas interpoladas a un formato de sistemas de información geográfica. A los datos diarios de lluvia procesados se les insertó una línea de identificación para los campos de un archivo. El programa consideró otro programa auxiliar llamado ISO.C que permitiera leer y transformar la estructura de datos que genera la función GRID de SURFER. Los datos son flotantes de 4 bytes en formato binario, y

rotados a 180 grados. A través del desarrollo del programa CREA\_SIG.C, se procesaron 21,535 archivos diarios de lluvia con 20,112 nodos.

### **3.6. Validación de los datos interpolados con los originalmente registrados.**

La cantidad de lluvia se caracteriza por su distribución en el tiempo y en el espacio. Es decir, dada la extensión del país con una serie de datos de lluvia, interesa conocer cómo varían en el tiempo y en las diferentes zonas de México. El análisis de los datos de lluvia debe hacerse en base a la teoría estadística de muestreos, aplicable a cualquier otro tipo de colección de datos experimentales. En el campo de la hidrología se requiere definir, tanto espacial como temporalmente a la lluvia. Esto es función del objetivo y las metas para las cuales se emplea los datos (Monsalve, 2000). En general, los parámetros estadísticos permiten dar una descripción cuantitativa de los datos de lluvia analizados. De una muestra se puede deducir estimaciones del comportamiento de la lluvia en una región analizada (Freund et al., 2000). Para llevar a cabo la validación de los datos se utilizaron los siguientes parámetros estadísticos (Gilbert, 1988):

#### **3.6.1. Medidas de tendencia central**

Se llaman así porque tienden a situarse en el centro del conjunto de datos ordenados según su magnitud. La media aritmética es un valor alrededor del cual los valores observados varían de una manera aleatoria. Se representa por  $\bar{x}$  y se define como:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n X_i}{n}, \quad \text{Ec. 6}$$

donde  $n$  es el número de datos.

Se llama mediana **Me** al valor de la variable tal que el número de observaciones para las cuales el valor de  $x$  es inferior a **Me** es igual al número para el cual el valor de  $x$  es superior a **Me**. La moda es el valor de la variable correspondiente al máximo de la curva de frecuencia; es el valor que se presenta

más frecuentemente. La media ponderada se obtiene al asociarle un peso a los valores observados. Se define como:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^k w_i x_i}{\sum_{i=1}^k w_i} \quad \text{Ec. 7}$$

donde  $k$  es el número total de observaciones.

### **3.6.2. Medidas de dispersión**

Las medidas de dispersión no sólo ayudan a describir una distribución, sino que también proporcionan información sobre la precisión con que la media de una muestra caracteriza la media de la población. La desviación estándar se define como la raíz cuadrada del cuadrado medio de las desviaciones

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{Ec. 8}$$

Cuando el número de datos es inferior o igual a 30, se utiliza un estimador insesgado  $(n-1)$  debido al tamaño de la muestra. Se denomina varianza al cuadrado de la desviación estándar. El coeficiente de variación es un parámetro adimensional definido por la relación entre la desviación estándar y la media, y proporciona información para comparar las dispersiones de variables correspondientes a escalas de razón, sin considerar información referente a sus unidades o que correspondan a poblaciones extremadamente desiguales.

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad \text{Ec. 9}$$

### **3.6.3. Medidas de asimetría**

El coeficiente de asimetría es un dato interesante en una distribución de frecuencias, ya que observa si los datos aparecen simétricamente o no respecto de la media. Si queremos cuantificar la simetría, es necesario conservar la información acerca tanto del signo como de la distancia de cada dato a la media dentro de simetría. Este razonamiento lleva a utilizar una potencia impar de las

desviaciones. En el caso en que el coeficiente valga cero, la distribución es simétrica alrededor de la media. Los valores positivos, indicarán distribuciones con mayor sesgo a la derecha y los valores negativos indicarán un mayor sesgo a la izquierda.

$$\square = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x}) \right]^{1.5}} \quad \text{Ec. 10}$$

#### **3.6.4. Covarianza**

La covarianza  $S(X, Y)$  de dos variables aleatorias  $X$  e  $Y$  se define como:

$$S_{xy} = 1/n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 1/n \sum_{i,j} x_i y_j n_{ij} - \bar{x}\bar{y} \quad \text{Ec. 11}$$

- Si  $S_{xy} > 0$  hay dependencia directa (positiva), es decir, a grandes valores de  $x$  corresponden grandes valores de  $y$ .
- Si  $S_{xy} = 0$  Una covarianza 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas.
- Si  $S_{xy} < 0$  hay dependencia inversa o negativa, es decir, a grandes valores de  $x$  corresponden pequeños valores de  $y$ .

#### **3.6.5. Coeficiente de correlación**

Es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables. El cálculo del coeficiente de correlación lineal se realiza dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas variables:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{Ec. 12}$$

Siendo:

$\sigma_{XY}$  la covarianza de  $(X, Y)$ ,  $\sigma_X$  y  $\sigma_Y$  las desviaciones típicas de las distribuciones marginales. El valor del índice de correlación varía en el intervalo  $[-1, +1]$ :

- Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica una independencia total entre las dos variables, es decir, que la variación de una de ellas puede influir en el valor que pueda tomar la otra. Pudiendo haber relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en idéntica proporción.
- Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.
- Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en idéntica proporción.
- Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa.

### **3.6.6. Correlación de los datos**

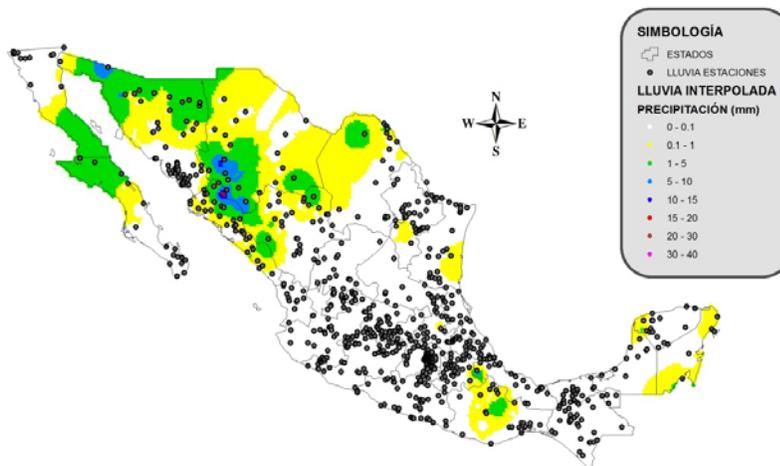
Para realizar la validación de la geo-base de datos MALLA-SIG, fue necesario realizar un muestreo de la población total de datos, y se realizó un muestreo aleatorio simple, en donde cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionado para integrar la muestra. Los datos de lluvia fueron seleccionados en forma aleatoria simple para llevar a cabo el muestreo mediante la extracción del 10% del total de datos de lluvia (21,535), y correspondieron a 2100 archivos para ser evaluados y comparados con los datos de lluvia en forma original.

Las muestras extraídas en forma aleatoria, correspondieron a los 12 meses del año sin considerar ningún criterio de preferencia en forma espacial y temporal,

esto es en cuanto a la estación seca y húmeda del año, o bien, las zonas que suelen ser las más húmedas o más secas.

Para extraer una muestra, se procedió a encontrar los correspondientes archivos diarios que se obtuvieron en forma original del sistema CLICOM, los cuales fueron en tamaño mucho menor que los archivos interpolados. Un archivo interpolado posee 20,113 puntos dentro del país, mientras que los archivos provenientes del sistema CLICOM pudieron alcanzar el máximo número de registros diarios que fue de 3,858, o bien, el mínimo de 525. **La Figura 20** muestra cómo obtener los valores correspondientes entre uno y otro, y cuya actividad fue realizada a través del sistema ARC-VIEW tratando de encontrar el nodo (interpolado) al real (CLICOM).

Después de poseer una lista de pares de datos de lluvia interpolados y reales, se procedió a encontrar la correlación de los datos. Para llevar a cabo se consideró la variable independiente a los registros reales de lluvia proporcionados por CLICOM. La variable independiente se asoció a los datos de lluvia interpolada.

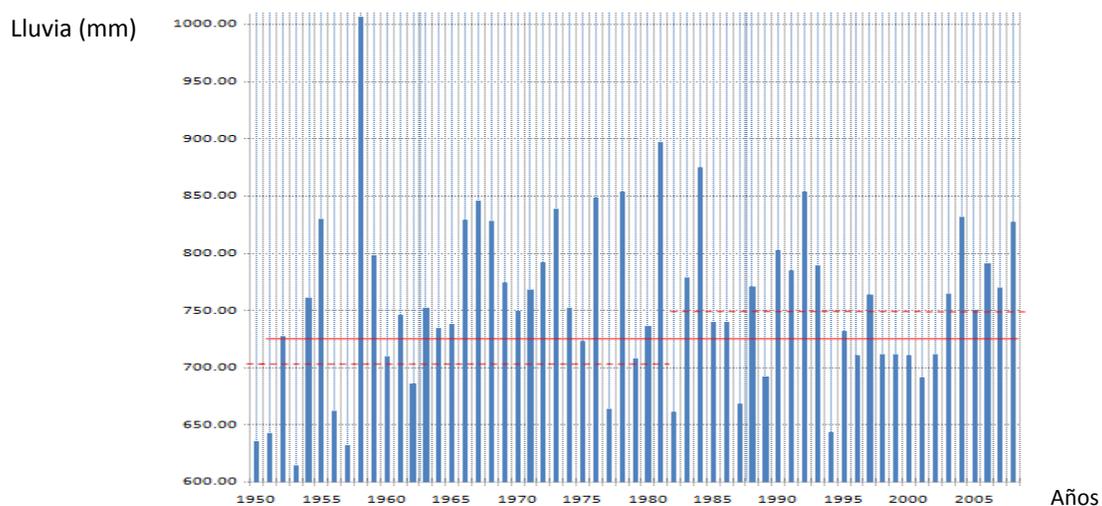


**Figura 20.** Sobreposición de los datos reales de lluvia y los datos interpolados.

### 3.7. Análisis de datos históricos de lluvia anual y mensual

Una serie de datos de lluvia anual, puede analizarse estadísticamente para determinar sus medidas de tendencia central, dispersión y asimetría, y caracterizarla a partir de los valores encontrados. **La Figura 21** muestra el histograma de lluvia anual de México (1950 - 2008) y considera las medias móviles considerando intervalos de 30 y 29 años. Sobre el histograma se trazó el valor promedio anual de la serie considerada, y que permitió determinar los años con mayor y menor humedad respecto de la media. En general, salvo condiciones extremas, se observan períodos de años húmedos y de años secos alternados. El método utilizado es de medias móviles, el cual asigna a un año dado, el promedio de lluvia calculado sobre “N” años antes y después del año considerado. Para valores anuales de lluvia, es común trabajar con series de datos históricos mayor o igual a 30 años.

Es importante poseer una red pluviométrica consistente en el espacio y en el tiempo, y de una distribución adecuada con mediciones estandarizadas, las cuales en México son escasas y ahora pueden ser sustituidas por la geobase de lluvia MAYA – SIG. Se desarrollaron programas computacionales para conocer la lluvia acumulada en forma mensual y anual, MED\_MES.C y MED\_ANO.C.



**Figura 21.** Promedio anual de la lluvia acumulada en el país (1950 al 2008).

### 3.8 Análisis de frecuencias de las lluvias

El análisis de frecuencias es un procedimiento para estimar el número de veces que ocurre un evento de lluvia de cierta intensidad y dependiendo de la serie histórica analizada se puede relacionar a la probabilidad de ocurrencia en el futuro. El análisis de frecuencias de datos de lluvia requiere que los datos sean homogéneos e independientes. La restricción de homogeneidad asegura que todas las observaciones provengan de una misma población de datos. La restricción de independencia asegura que un evento extremo, tal como una lluvia de gran intensidad aislada, no entre al conjunto de datos más de una vez. Las lluvias tienen su propia función de distribución o de densidad de probabilidad, que normalmente no se conoce a priori. Cuando se extrae un grupo de datos (muestra) al azar, es razonable esperar que su función de distribución de probabilidad sea similar a la del espacio completo, en particular si la muestra es grande. Además, lo más razonable que se puede suponer en cuanto a la frecuencia de cada dato del grupo, es que sea dentro del espacio de la muestra igual a la observada.

### 3.9 Período de retorno

La probabilidad de que se produzca una lluvia máxima extrema, con una intensidad y duración específica, se llama período o frecuencia de retorno. La intensidad de una lluvia puede predecirse para cualquier período de retorno y duración de la tormenta, a partir de tablas basadas en datos históricos de posición. El período de retorno, generalmente expresado en años, puede ser entendido como el número de años en que se espera que mediamente se repita una cierta lluvia extrema. Así podemos decir que el período de retorno de una lluvia de 200 mm en una determinada región del país ocurre cada 20 años.

Por otro lado, si un evento tiene un periodo de retorno real de  $t_p$  años, la probabilidad  $P$  de que dicho evento se presente o sea superado en un año determinado es (Campos, 2007):

$$P = \frac{1}{t_p} \quad \text{Ec. 13}$$

La ecuación más usada en hidrología para la estimación del periodo de retorno es la siguiente;

$$T_r = \frac{n+1}{N} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde,  $n$  = a la posición de la muestra en una lista ordenada del mayor al menor, y  $N$  igual al número total de muestras. Además, en la estadística existen decenas de funciones de distribución de probabilidad teóricas; de hecho, existen tantas como se quiera, y obviamente no es posible probarlas todas para un problema particular. Por lo tanto, es necesario escoger, de esas funciones, las que se adapten mejor al problema bajo análisis.

No hay ningún modo de predecir cuándo tendrá lugar una lluvia extrema y de qué magnitud será, pero los eventos de inundaciones pasadas pueden proporcionar alguna información en cuanto a lo que se podría esperar de acuerdo a las lluvias que las provocaron y a su recurrencia. Si se utiliza una técnica analítica, se recomienda que los datos sean también graficados, de tal manera que se puede tener idea de que tan bien los datos se ajustan al método utilizado, y determinar ventajas y desventajas en su aplicación. Chow (1988) ha demostrado que muchos análisis de frecuencias pueden ser reducidos a la forma:

$$X_t = \bar{X} (1 + C_v K_t) \quad \text{Ec. 15}$$

Donde  $X_t$  es la magnitud de la lluvia máxima extrema que tiene un periodo de retorno  $T$  y  $K_t$  es un factor de frecuencia. Esta relación puede transformarse escribiendo cualquier valor de  $X$  como

$$X = \bar{X} + \Delta X \quad \text{Ec. 16}$$

Y estableciendo que  $\Delta X$ , la desviación alrededor de la media, es un producto de la desviación estándar  $S$  y un factor de frecuencia  $K$

$$X = \bar{X} + SK \quad \text{Ec. 17}$$

Chow (1988) presenta los factores de frecuencia para diferentes tipos de distribución de frecuencias. Algunas distribuciones de frecuencia se mencionan a continuación.

### **3.9.1. Cálculo del periodo de retorno**

Se desarrolló el programa MAX\_MES.C para la extracción de las máximas mensuales y del programa de MAX\_ANO.C para la extracción de máximas anuales. Esto permitió conocer para cada nodo de la malla la identificación de los valores máximos de lluvia ocurridos en el lapso de 59 años. Para lograrlo, se tuvo que extraer los máximos ocurridos en cada mes de cada año y conjuntar un conjunto de 59 archivos, y aplicar después el programa MAXTRMES.C para calcular los mapas de periodos de retorno mensual. En el caso de los máximos anuales, se desarrolló el programa MAXTRANO.C para calcular los valores máximos que ocurrieron en el lapso de los 12 meses de cada año empezando desde 1950 al 2008. Por lo tanto, al igual que los máximos mensuales, se obtuvieron 59 archivos de máximos de lluvia anual que permitieron obtener el periodo de retorno de la lluvia. El programa utilizó los resultados proporcionados por el programa MAX\_ANOC.C, y se calcularon y se generaron los correspondientes mapas de periodos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 55 y 59 años.

### **3.10 Análisis de tendencias de las lluvias**

Para analizar las tendencias de las lluvias se utilizó el concepto “diferencial de lluvia”. De acuerdo con esta definición, la diferencial es una magnitud finita para cada incremento  $\Delta x$ , y al mismo tiempo proporcional a  $\Delta x$ . La otra propiedad fundamental de la diferencial es el carácter de su diferencia respecto a  $\Delta y$ , y sólo puede reconocerse 'en movimiento', por así decirlo: si consideramos un incremento  $\Delta x$  que se aproxima a cero (que sea un infinitésimo), entonces la diferencia entre  $dy$  e  $\Delta y$  será tan pequeña como se desee incluso comparada con  $\Delta x$  (Barrul, 1994). Esto nos ayuda a entender que diariamente en el país existe una

diferencial de lluvia, y que esta alcanza los valores de “0” en épocas de sequía, y que por supuesto, esta diferencial varía en el espacio y en el tiempo. La sustitución de los incrementos pequeños de la función por la diferencial, forma la base de la mayoría de las aplicaciones del análisis infinitesimal al estudio de la naturaleza (Aleksandrov en Barrul, 1994). Luego entonces dada la función  $y = f(x)$  se define:

a)  $dx$ , y se lee como *diferencial de x*, por la relación  $dx = \Delta x$ .

b)  $dy$ , y se lee como *diferencial de y*, por la relación  $dy = f'(x)dx$ .

La diferencial de una variable independiente que en este caso es la lluvia, es por definición, el incremento o decremento que experimenta día a día la lluvia; sin embargo, la diferencial de una variable dependiente o función *no* es igual a su incremento o decremento.

### **3.10.1. Incrementos**

El incremento  $\Delta x$  de una lluvia ocurrida en cualquier día  $x$  es el aumento o disminución que experimenta, desde un valor  $x = x_0$  a otro  $x = x_1$  de su campo de variación en mm de lluvia. Luego entonces,

$$\Delta X = X_1 - X_0 \quad \text{Ec. 18}$$

o bien,

$$X_1 = X_0 + \Delta X \quad \text{Ec. 19}$$

Si se da un incremento  $\Delta x$  a la variable  $x$ , (es decir, si  $x$  pasa de  $x = x_0$  a  $x = x_0 + \Delta x$ ), la función  $y = f(x)$  se verá incrementada en  $\Delta y = f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)$  a partir del valor  $y = f(x_0)$ .

El cociente

$$\frac{\Delta x \text{ (incremento de } y\text{)}}{\Delta y \text{ (incremento de } x\text{)}} \quad \Rightarrow \quad \frac{\text{Incremento TOTAL de Lluvia}}{\text{Incremento de Lluvia de un día a otro}}$$

recibe el nombre de cociente medio de incrementos de la función en el intervalo comprendido entre  $x = x_0$  a  $x = x_0 + \Delta x$  (Ayres en Barrul, 1994). En otras palabras se hace referencia al total de lluvia incrementada o decrementada en un intervalo dado de días.

### **3.10.2. Pendiente**

La pendiente se define como el valor positivo o negativo que adquiere la lluvia ( $\Delta y = a$ ) de un día a otro ( $\Delta x = h$ ). Luego entonces si  $h \neq 0$ , entonces los dos puntos distintos  $(a, f(a))$  y  $(a+h, f(a+h))$  determinan, como en la **Figura 22**, una recta cuya pendiente es,

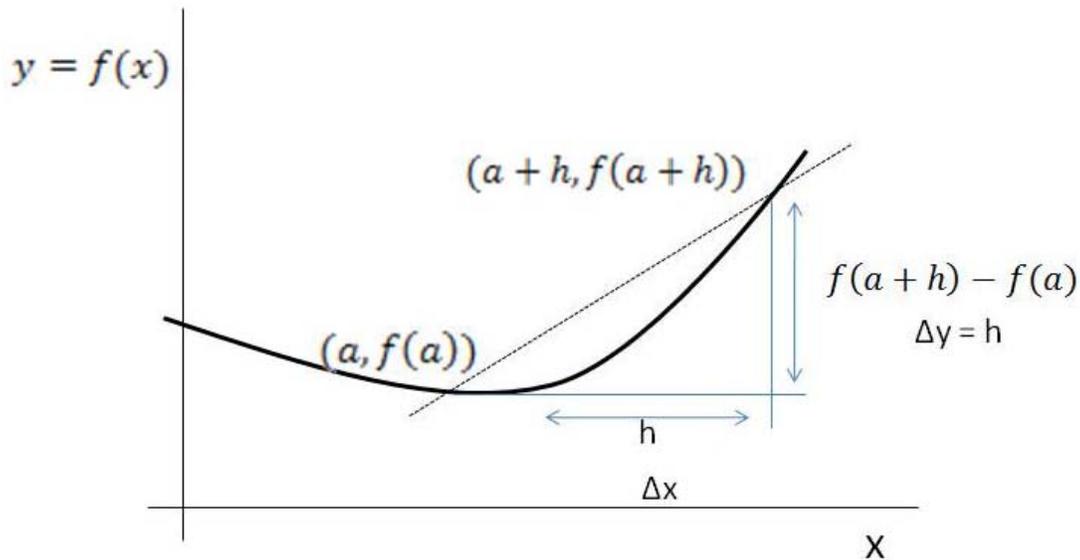
$$\frac{f(a+h)-f(a)}{h} \quad \text{Ec.20}$$

y la 'tangente' en  $(a, f(a))$  parece ser el límite, en algún sentido, de estas 'secantes', cuando  $h$  se aproxima a 0. Hasta aquí no hemos hablado nunca del 'límite' de rectas, pero *podemos* hablar del límite de sus pendientes: La pendiente de la tangente  $(a, f(a))$  debería ser,

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h)-f(a)}{h} \quad \text{Ec. 21}$$

### **3.10.3. Máximos y mínimos**

Si  $f'(a) > 0$ , la función  $f(x)$  es *creciente* en el punto  $x = a$  y si  $f'(a) < 0$ , es *decreciente* en dicho punto. Cuando  $f'(a) = 0$ , diremos que la función es *estacionaria* en el punto  $x = a$ .

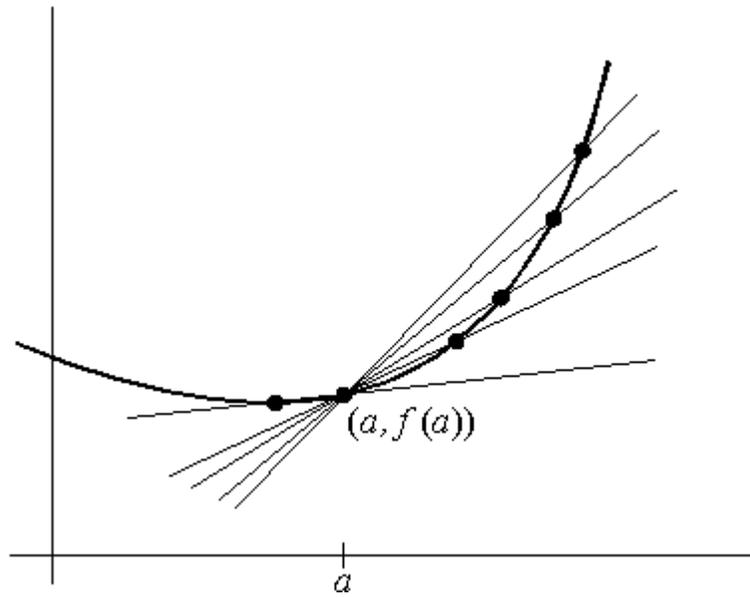


**Figura 22.** Descripción matemática de la pendiente y su relación con las lluvias.

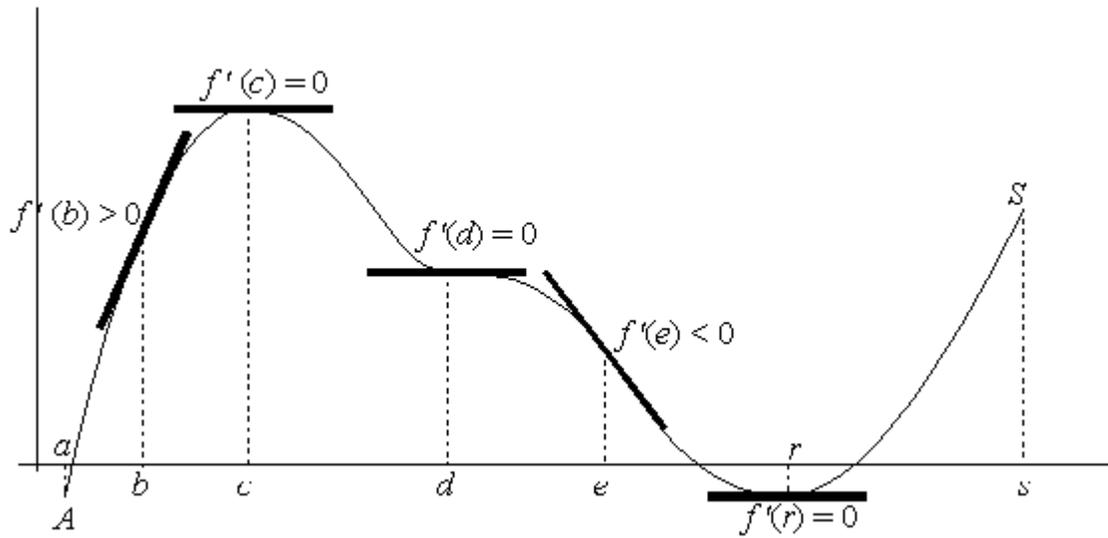
### **3.10.3. Máximos y mínimos**

Si  $f'(a) > 0$ , la función  $f(x)$  es *creciente* en el punto  $x = a$  y si  $f'(a) < 0$ , es *decreciente* en dicho punto. Cuando  $f'(a) = 0$ , diremos que la función es *estacionaria* en el punto  $x = a$ .

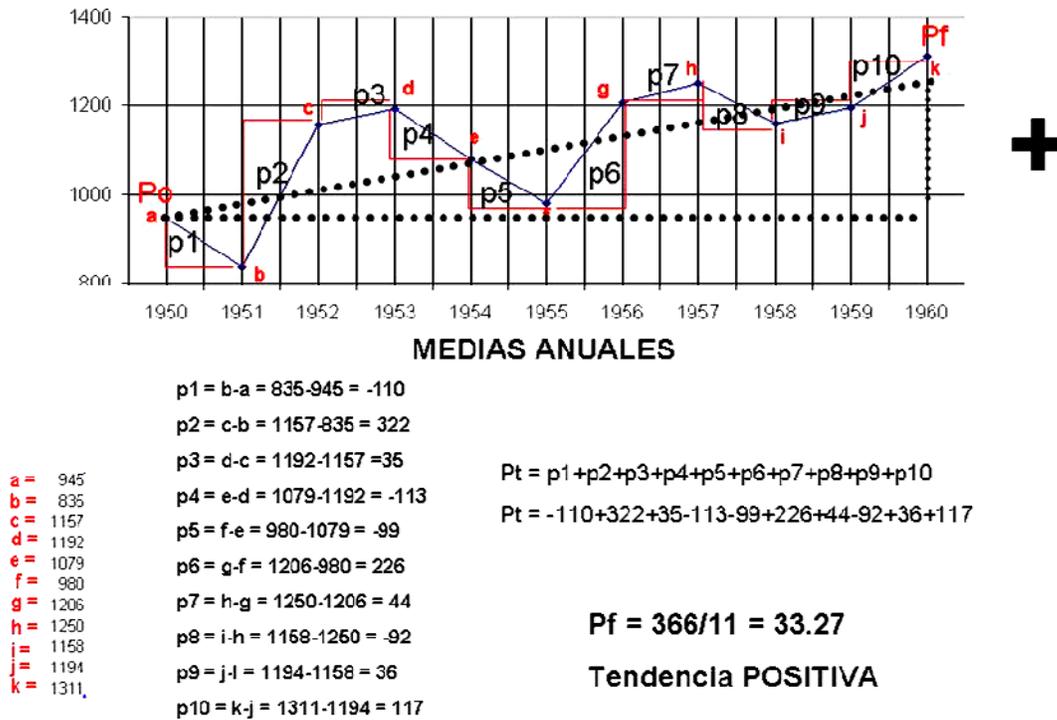
Una función  $y = f(x)$  tiene un *máximo (mínimo) relativo* en un punto  $x = a$ , cuando  $f(a)$  es mayor (menor) que los valores de la función para los puntos inmediatamente anteriores y posteriores al considerado (**Figura 23**). El comportamiento de las lluvias puede manifestar una tendencia NEGATIVA o POSITIVA, e inclusive permanecer con escasa variación en el transcurso de los años. El resultado de un análisis aplicado sobre los datos de lluvia, puede ser observado en la (**Figura 24 y 25**).



**Figura 23.** Variación de la pendiente relacionado con las variaciones de las lluvias diarias.



**Figura 24.** Análisis matemático para la observación de las pendientes en diferentes intervalos de tiempo con respecto a las lluvias observadas diariamente.



**Figura 25.** Descripción del análisis de pendientes (P), aplicado a los datos de lluvia.

Para poder realizar el cálculo de las pendientes de la lluvia, fue necesario desarrollar los programas SLP\_MES.C, de esta forma calcular las tendencias en cada uno de los meses en series históricas de 59. Se desarrollo el programa SLP\_ANO.C para calcular las tendencias de la lluvia en forma anual, y el resultado concentra lo que ocurre en cada uno de los meses proporcionando información del aumento o disminución de las lluvias. Se aplicó la primera y segunda derivada a las serie histórica de de 59 años.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Base de datos de lluvia (MALLA-SIG) y su validación

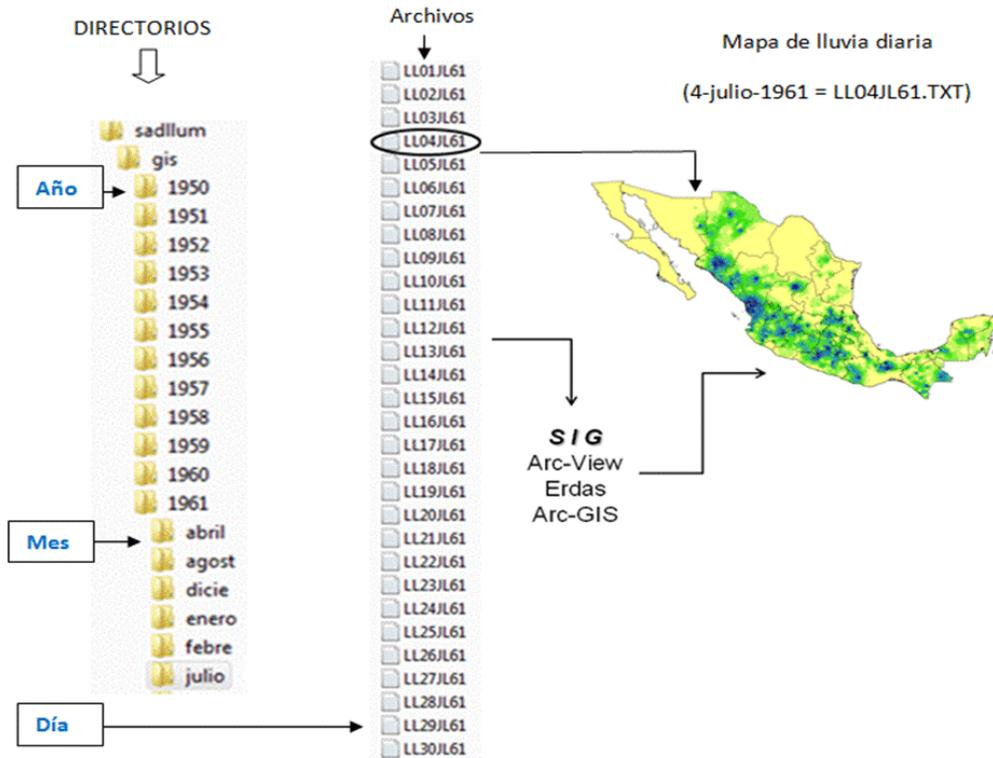
El primer resultado corresponde a la construcción de una base de datos de lluvia consistente en el espacio y en el tiempo, MALLA-SIG Ver. 1.0 (**Figura 26**). Para proporcionar un grado de confiabilidad se realizó la validación entre los datos interpolados con los registros diarios de lluvia de CLICOM. Se aplicaron dos procedimientos de aseguramiento de la calidad de los datos, el primero correspondió al descarte de datos de lluvia que presentaban inconsistencia en el espacio y en el tiempo, y el segundo correspondió a la evaluación de la correlación de Pearson entre datos interpolados y datos observados directamente de las estaciones de monitoreo; para el cálculo del coeficiente correspondiente se seleccionó una muestra (10% de la población de 21,535 archivos) a partir del método de muestreo "Aleatorio Simple".

Los resultados mostraron que en los meses más secos el factor de correlación decrece, mientras que este mismo parámetro incremento para la estación húmeda. En todos los casos el coeficiente de correlación fue de buena calidad (mayor a 0.6 y estadísticamente significativo).

La correlación temporal muestra valores de correlación entre 0.59 y 0.7. El mes con un valor más alto de correlación fue en julio con un valor R de 0.7, y el más bajo ocurrió para el mes de abril con un factor R de 0.59. En forma estacional, el valor más alto ocurrió para la estación de VERANO con un factor R de 0.67 y corresponde a la estación más húmeda. El dato más bajo se registró en la estación de PRIMAVERA con un factor R de 0.63, el cual corresponde a la estación más seca (**Tabla 2**).

En forma ANUAL, el valor promedio de la correlación fue de 0.67. Para llevar a cabo la correlación de los datos, fue necesario desarrollar el programa CORRELACION.C, y fue programado para leer los datos bajo la estructura que poseen los archivos diarios de lluvia (latitud, longitud, lluvia1(y), lluvia2(x)).

En la correlación espacial, se realizaron los mismos cálculos para las zonas más húmedas y las más secas de México, consideraron además las estaciones secas y húmedas. La zona más húmeda del país se localiza en el municipio de Tapachula, Chiapas con una lámina de lluvia anual de 3874 mm, y la zona con menor humedad se localiza en el municipio de Mexicali, Baja California con 60.62 mm. En ambos casos se validaron los datos interpolados de lluvia versus los registros de lluvia reales proporcionados por el sistema CLICOM. Para el caso de la zona más seca en el país en el intervalo de febrero al mes de abril, el coeficiente de correlación obtenido fue de 0.99. La misma zona pero considerando los meses más húmedos; julio, agosto y septiembre fue de 0.70. Para el caso de la zona más húmeda del país, el coeficiente de correlación calculado para los meses más secos del año (febrero al mes de abril), fue de 0.75, y para los meses más húmedos; julio, agosto y septiembre fue de 0.78 (**Tabla 3**).



**Figura 26.** Integración de la base de datos de lluvia, MALLA.SIG.

**Tabla 2.** Análisis de correlación. Factores de correlación de Pearson; mensual, estacional y anual calculados para datos interpolados de la malla y de registros diarios de lluvia.

INVIERNO			PRIMAVERA			VERANO			OTOÑO		
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>0.65</b>	0.67	0.64	0.59	0.63	0.67	0.70	0.65	0.69	0.67	0.66	0.65
<b>r = 0.653</b>			r = 0.63			r = 0.68			r = 0.66		

\*Coeficiente ANUAL = 0.656

\*p < 0.05

**Tabla 3.** Análisis de correlación. Factores de correlación de Pearson para zonas húmedas y secas del país.

ÉPOCA	SECA			HÚMEDA		
MESES	Feb	Mar	Abr	Jul	Ago	Sep
Zona HÚMEDA	0.89	0.90	0.76	0.81	0.77	0.77
	R=0.85			R= 0.783		
Zona SECA	0.99	0.99	0.99	0.63	0.98	0.50
	R=0.99			R=0.703		

\*p < 0.05

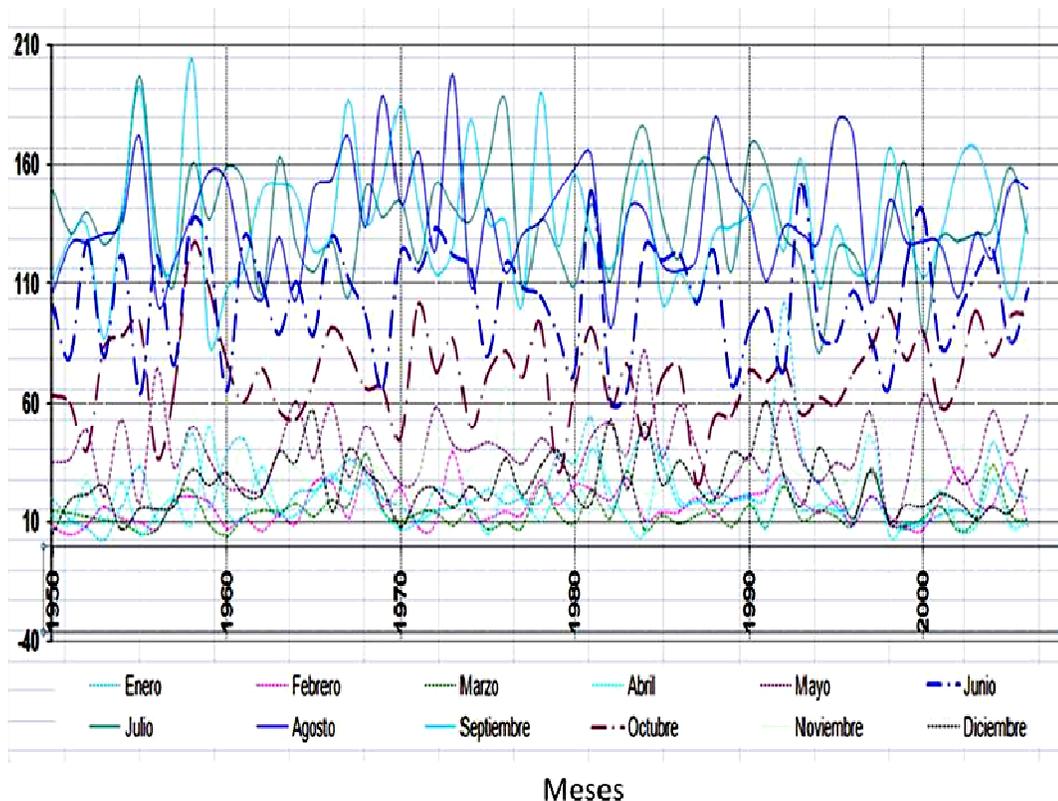
#### 4.2. Distribución espacio temporal de la lluvia en México (1950-2008).

Se analizó en forma espectral la lluvia, así como en forma espacial. En ambos casos se presenta el comportamiento espacio-temporal de la lluvia y sus características, y se obtuvieron los mapas de lluvia acumulada en forma mensual y anual. El análisis de los datos de la lámina de lluvia acumulada en forma mensual de cada año permitió analizar la señal espectral de los 12 meses durante el periodo de 1950 al 2008.

#### 4.2.1. Análisis Espectral de la lluvia

El resultado muestra la señal espectral de los meses de Noviembre a Mayo como los más secos, así como los meses de julio a septiembre como los meses más húmedos. Existe una separación de ambas estaciones definida por los meses junio y septiembre. El promedio de las señal espectral de los 12 meses en los 59 años proporciona una cantidad de 755.30 mm (**Figura 27**).

Lluvia (mm)

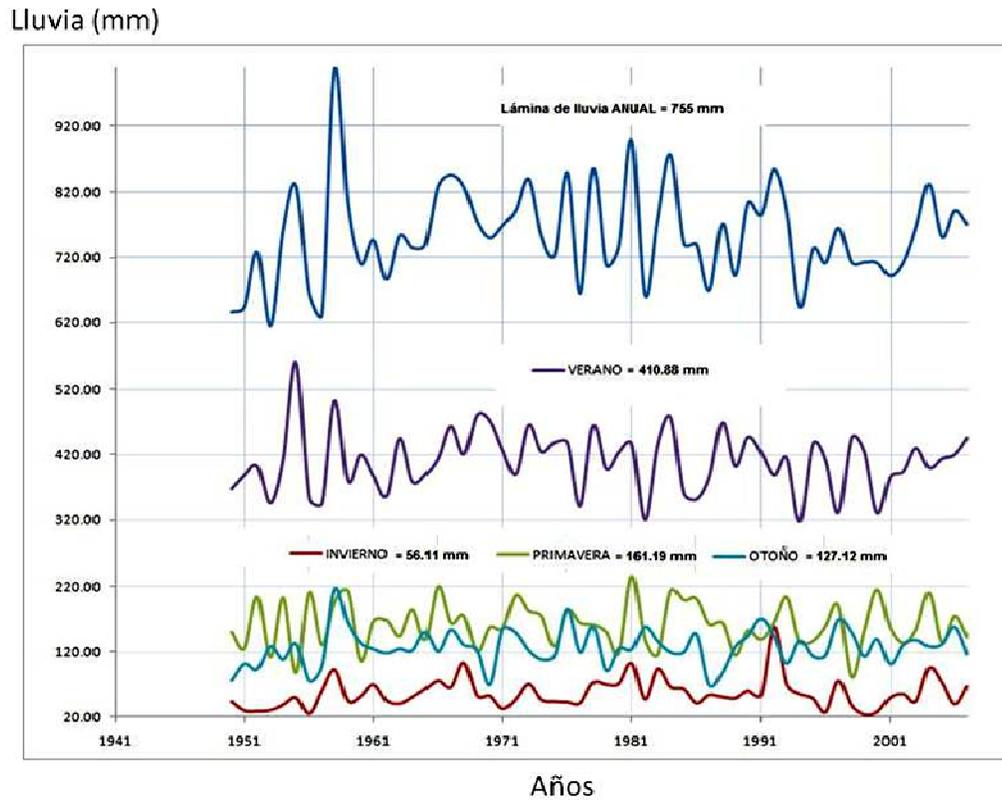


**Figura 27.** Señal espectral del comportamiento mensual de la lluvia.

#### 4.2.2. Análisis espectral estacional de la lluvia

Si se realiza una separación espectral de la señal anual en forma estacional, se identifica 2 estaciones que definen a México; una seca comprendida por las estaciones de invierno, primavera y otoño con el 45.6% de la lluvia anual acumulada, y una húmeda definida por las estación de verano con el 54.4% de la lluvia anual acumulada (**Figura 28**). El municipio con menor lámina de lluvia

acumulada corresponde al municipio de Mexicali, Baja California con 60.62 mm. La zona más húmeda del país se localiza en el municipio de Tapachula, Chiapas con una lámina de lluvia acumulada anual promedio de 3874 mm (**Figura 29**).

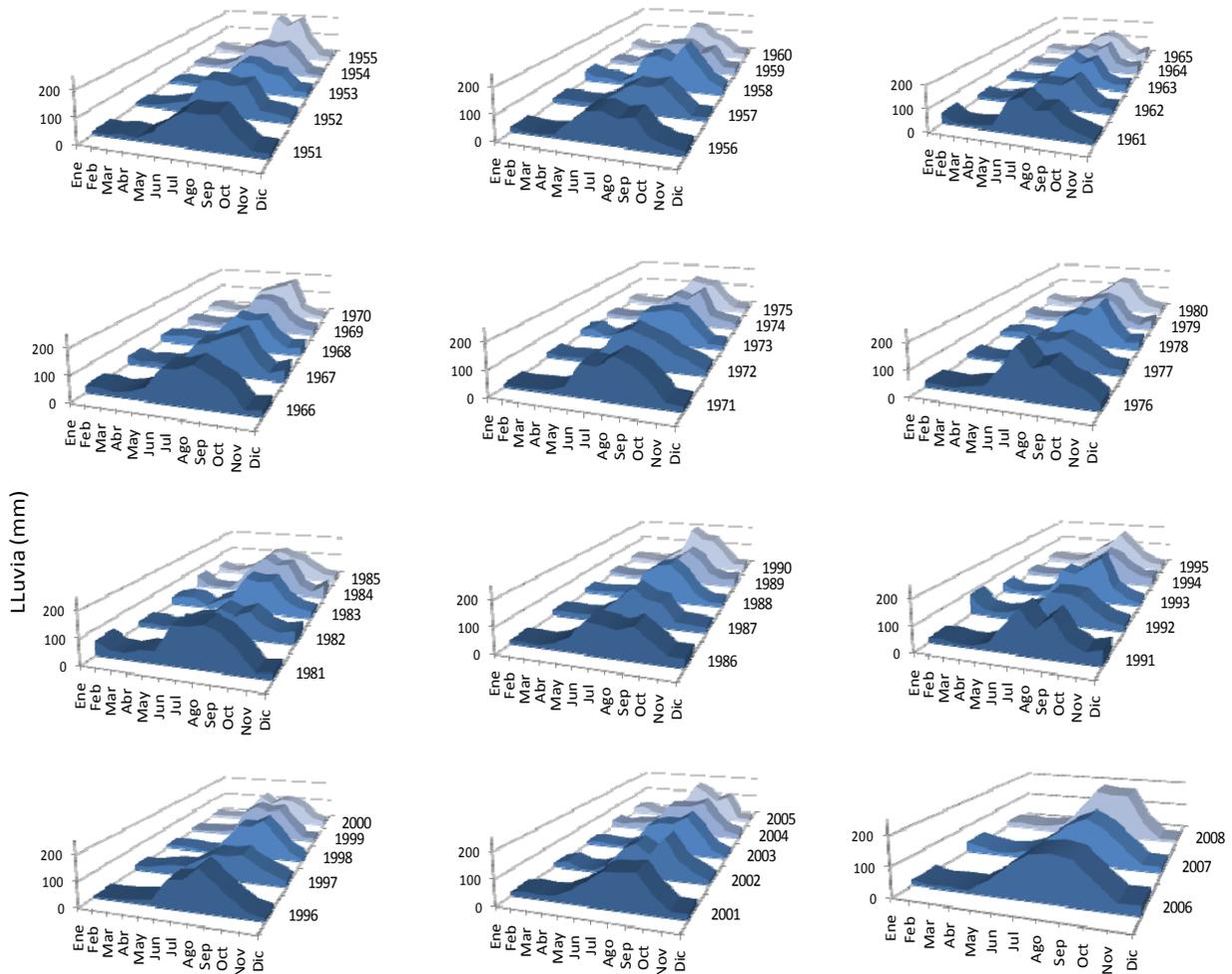


**Figura 28.** Comportamiento estacional de las lluvias.



**Figura 29.** Climatología anual de la lluvia en México (1950-2008).

En la mayor parte de los años del periodo estudiado (1950-2008) se observó una climatología estacional bimodal, con las lluvias más intensas entre julio y octubre. Un cambio notable en la climatología de los años 1951, 1965, 1969, 1972, 1973, 1979, 1980, 1988, 1989, 1992, 1994, 1995, 2001, 2006 y 2007 fue observada debido al predominio de un comportamiento unimodal en el perfil estacional de las lluvias en la República Mexicana (Figura 30). Esta variabilidad estacional puede estar fuertemente relacionada con fenómenos de oscilación del ENSO, que es relevante en las regiones tropicales (Ropelewski and Halpert, 1987; Diaz et al., 2000; Pavia et al., 2006).

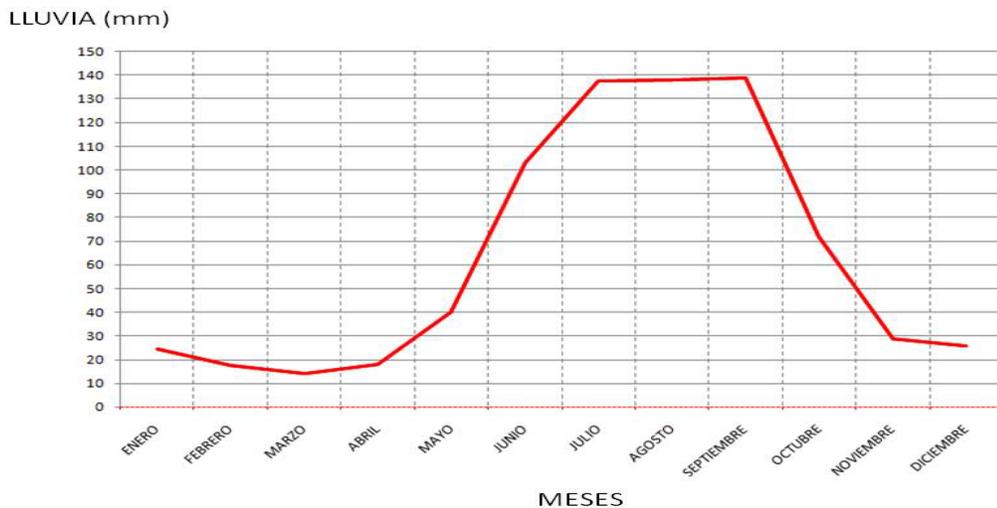


**Figura 30.** Comportamiento estacional de las lluvias en la República Mexicana en el periodo 1950-2008.

Por otro lado, en los últimos 10 años se observó un aumento en las precipitaciones que afectan el país por efecto meteorológicos extremos, mismos que se identificaron a través de la distribución unimodal presentada en la figura 30.

#### 4.2.3. Análisis MENSUAL de la lluvia.

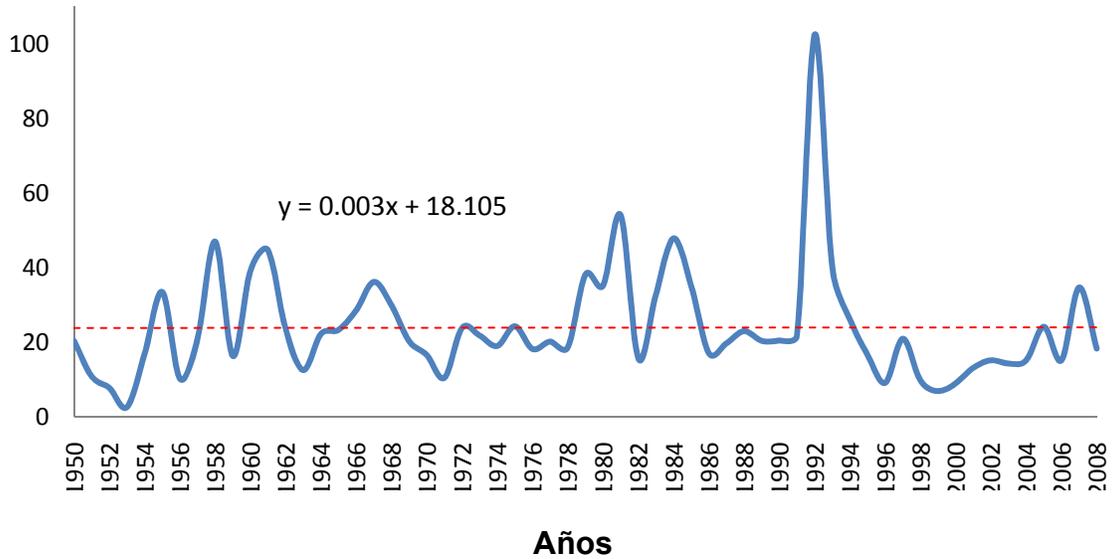
El comportamiento climatológico mensual de la lluvia durante los últimos 59 años, se puede observar en la **Figura 31**. El mes más húmedo se presenta en el mes de septiembre con una lámina de lluvia acumulada mensual de 136.84 mm, y el más seco corresponde al mes de marzo con una lámina de lluvia acumulada mensual de 14.07 mm. En general los meses más secos corresponden a enero, febrero, marzo y abril. Los más húmedo son los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.



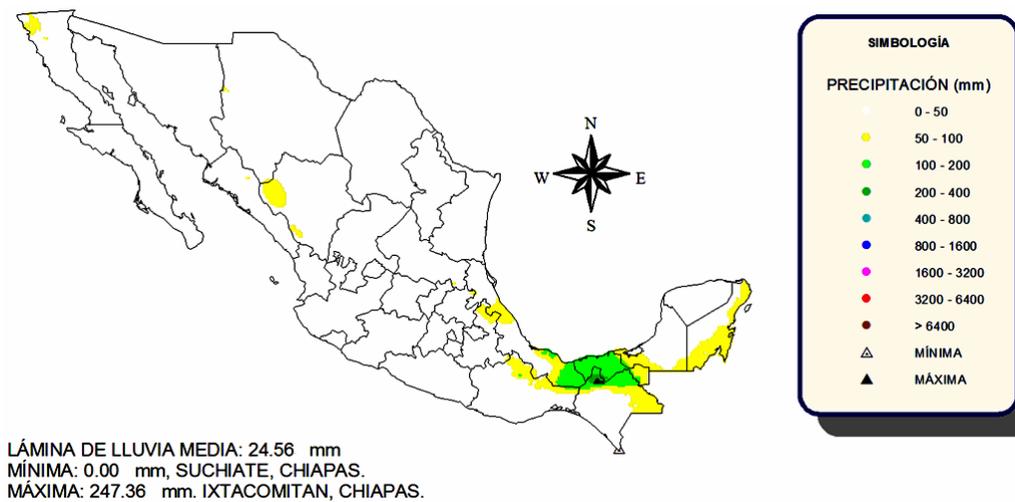
**Figura 31.** Climatología de la lluvia en forma mensual (1950-2008).

El mes de ENERO presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1953 con una lámina de lluvia de 2.72 mm, y la más húmeda ocurrió en el año 1992 con una lámina de lluvia de 102.45 mm (**Figura 32**). La **Figura 33** muestra la climatología de lluvia nacional con 24.56 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Ixtacomitán, Chiapas con 247.36 mm.

### Lluvia (mm)



**Figura 32.** Comportamiento histórico para el mes de ENERO (1950-2008).

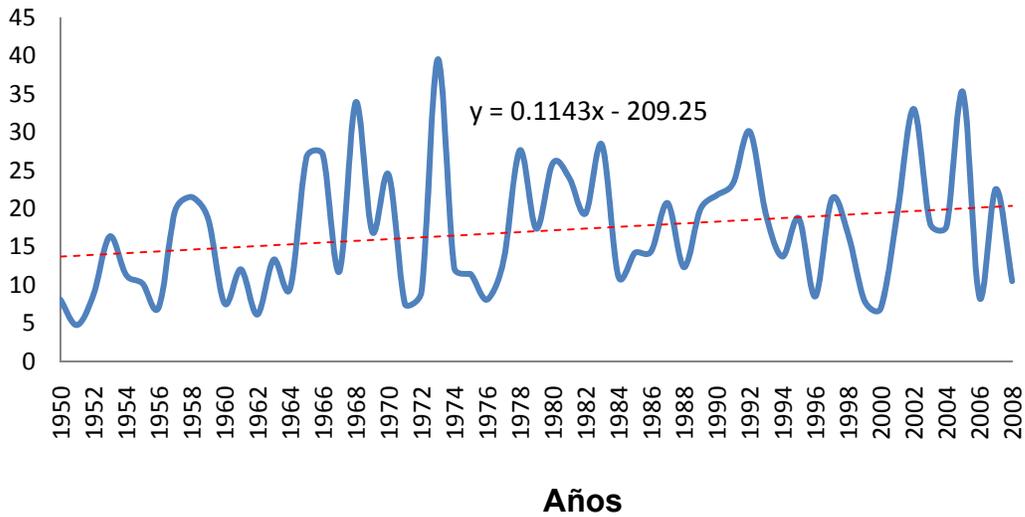


**Figura 33.** Mapa climatológico de la lluvia para el mes de ENERO (1950-2008).

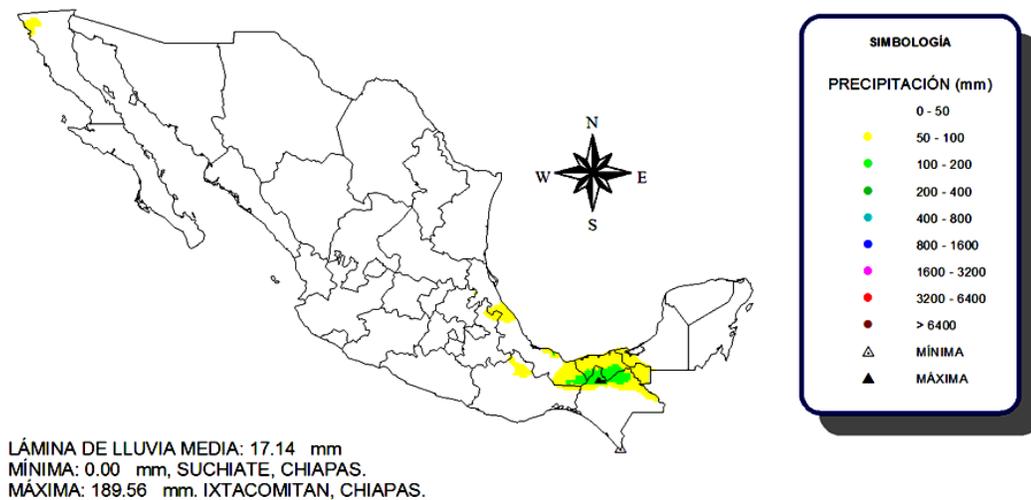
El mes de FEBRERO presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1951 con una lámina de lluvia de 4.78 mm, y la más húmeda ocurrió en el año 1973 con una lámina de lluvia de 39.50 mm (**Figura 34**). La **Figura 35** muestra la climatología de lluvia con 17.43 mm. La mayor

concentración de humedad se observa en el municipio de Ixtacomitán, Chiapas con 189.56 mm.

**Lluvia (mm)**



**Figura 34.** Comportamiento histórico para el mes de FEBRERO (1950-2008).

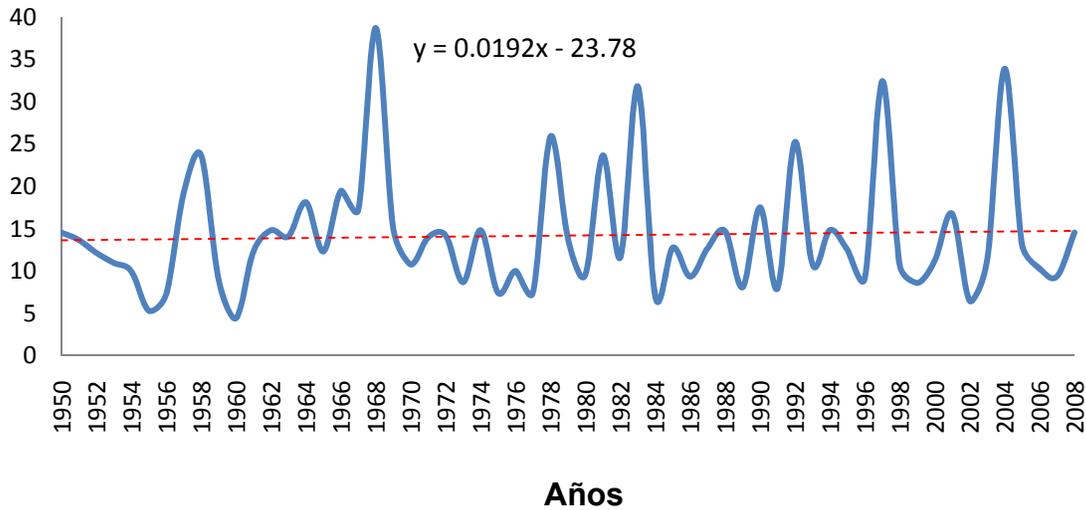


**Figura 35.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de FEBRERO (1950-2008).

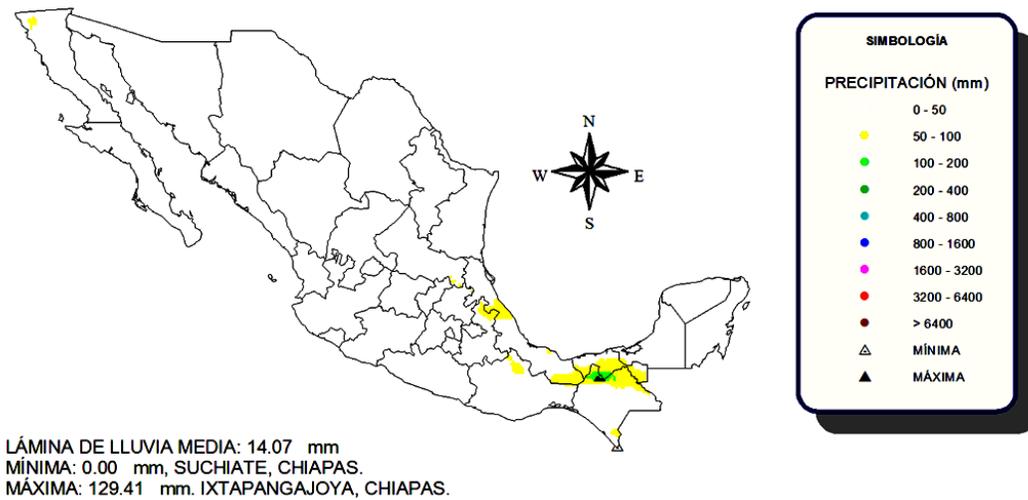
El mes de MARZO presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1960 con una lámina de lluvia de 4.41 mm, y la más húmeda ocurrió en el año 1968 con una lámina de lluvia de 38.73 mm (**Figura 36**). La

figura 37 muestra la climatología de lluvia con 14.07 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Ixtapangajoya, Chiapas con 129.41 mm.

**Lluvia (mm)**



**Figura 36.** Comportamiento histórico para el mes de MARZO (1950-2008).

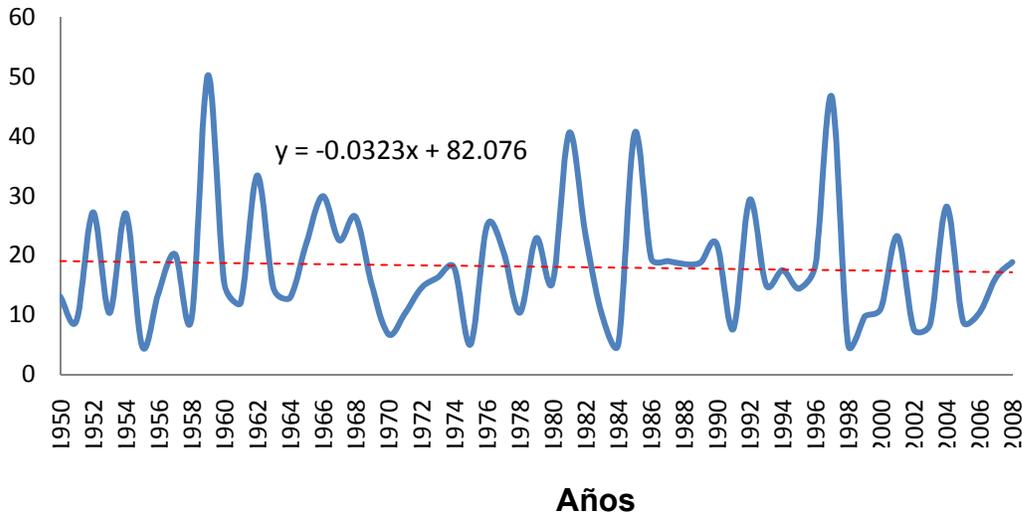


**Figura 37.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de MARZO (1950-2008).

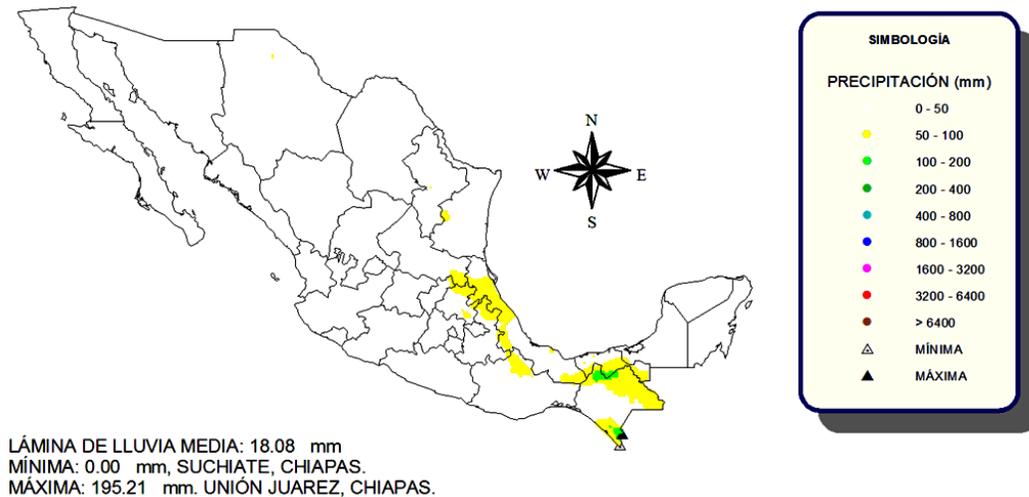
El mes de ABRIL presenta una tendencia NEGATIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1955 con una lámina de lluvia de 4.65 mm, y la más húmeda

ocurrió en el año 1959 con una lámina de lluvia de 50.21 mm (**Figura 38**). La **figura 39** muestra la climatología de lluvia con 18.08 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Unión, Juárez, Chiapas con 195.22 mm.

**Lluvia (mm)**



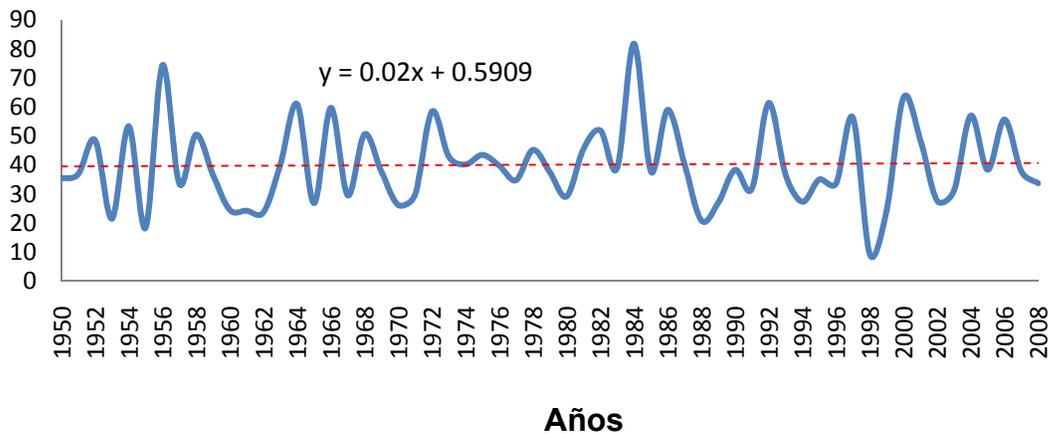
**Figura 38.** Comportamiento histórico para el mes de ABRIL (1950-2008).



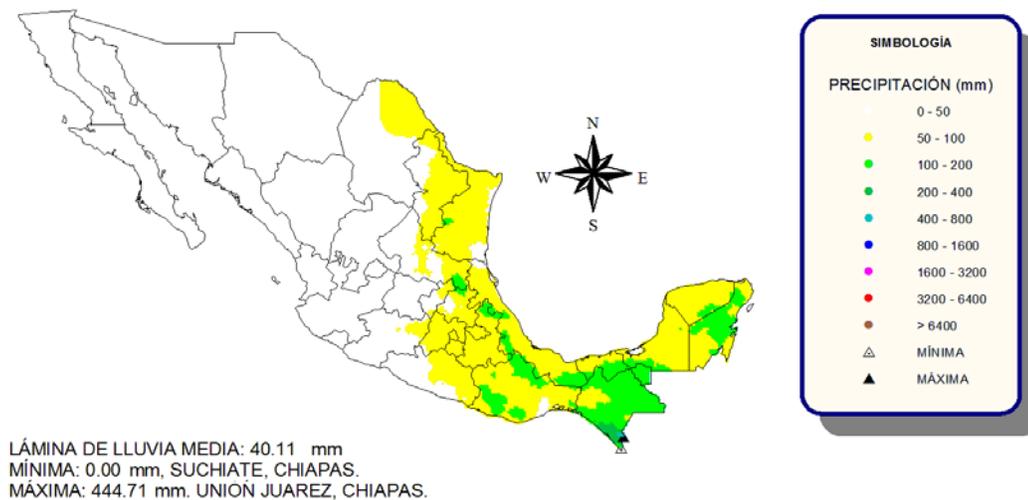
**Figura 39.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de ABRIL (1950-2008).

El mes de MAYO presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1998 con una lámina de lluvia de 9.32 mm, y la más húmeda ocurrió en el año 1984 con una lámina de lluvia de 81.83 mm (**Figura 40**). La **figura 41** muestra la climatología de la lluvia nacional con 40.11 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Unión Juárez, Chiapas con 444.71 mm.

**Lluvia (mm)**



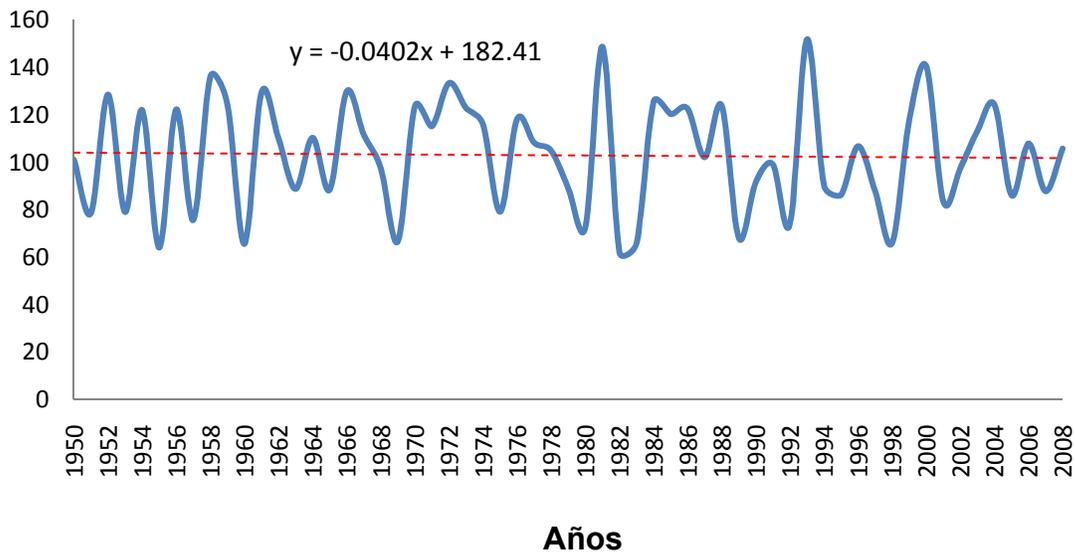
**Figura 40.** Comportamiento histórico para el mes de MAYO (1950-2008).



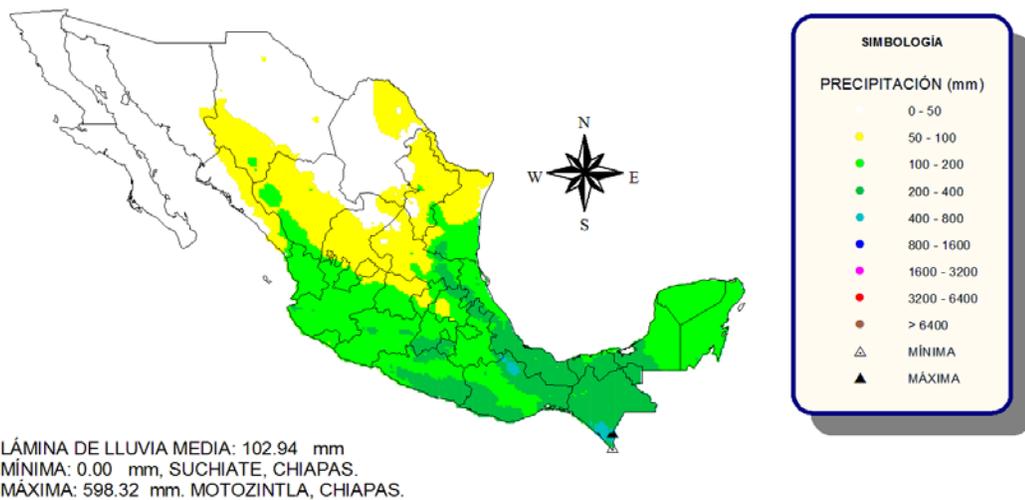
**Figura 41.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de MAYO (1950-2008).

El mes de JUNIO presenta una tendencia NEGATIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1982 con una lámina de lluvia de 62.10 mm, y la más húmeda ocurrió en el año 1993 con una lámina de lluvia de 151.84 mm (Figura 42). La figura 43 muestra la climatología de lluvia nacional con 102.95 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Motozintla, Chiapas con 598.32 mm.

**Lluvia (mm)**



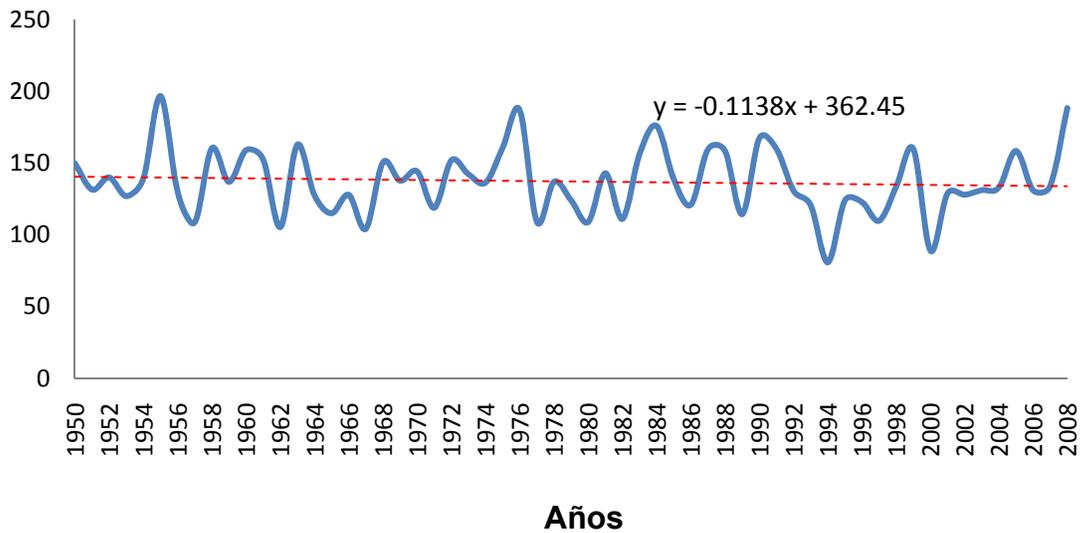
**Figura 42.** Comportamiento histórico para el mes de JUNIO (1950-2008).



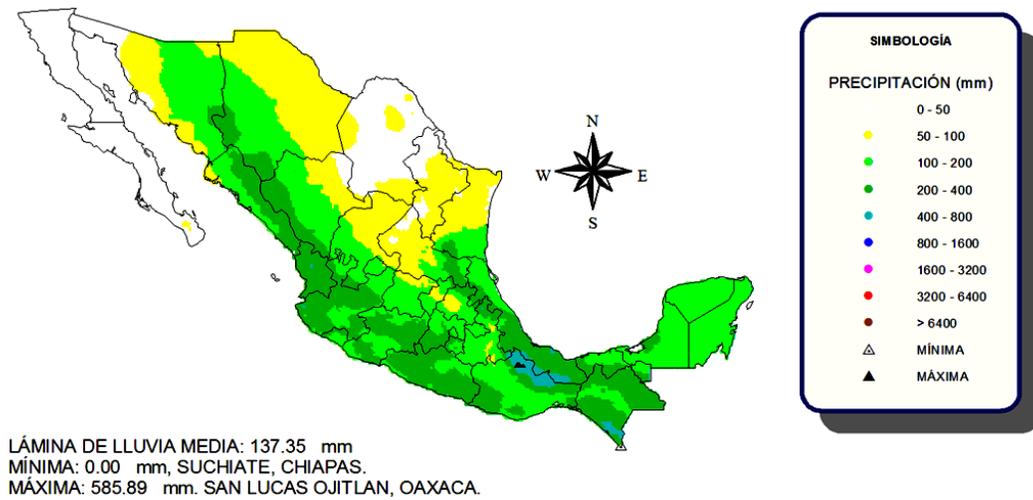
**Figura 43.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de JUNIO (1950-2008).

El mes de JULIO presenta una tendencia NEGATIVA. La época más seca ocurrió en 1994 con una lámina de lluvia de 80.79 mm, y la más húmeda ocurrió en 1955 con una lámina de lluvia de 196.95 mm (Figura 44). La figura 45 muestra la climatología de lluvia nacional con 137.36 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de San Lucas Ojtlán, Oax. con 585.89 mm.

**Lluvia (mm)**



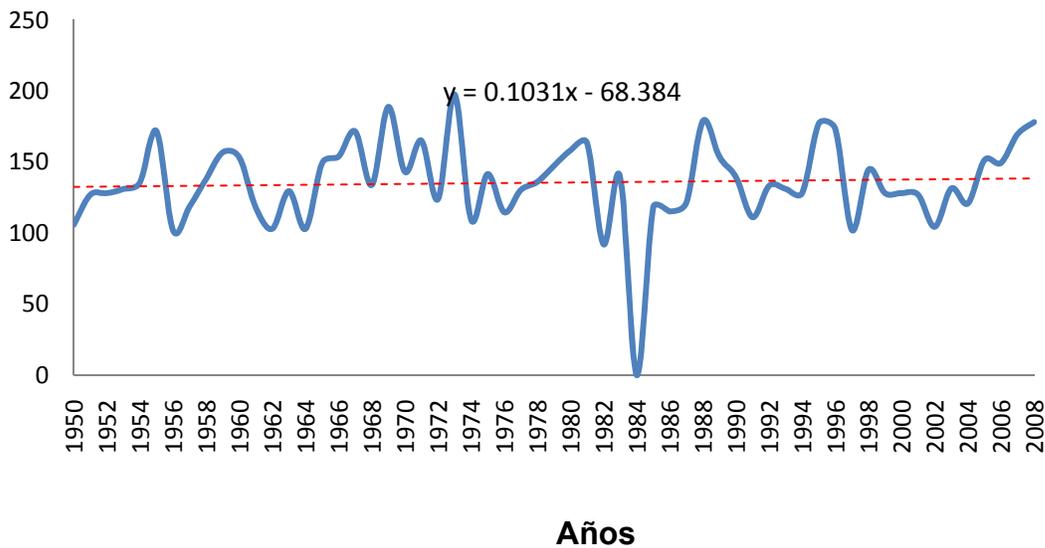
**Figura 44.** Comportamiento histórico para el mes de JULIO (1950-2008).



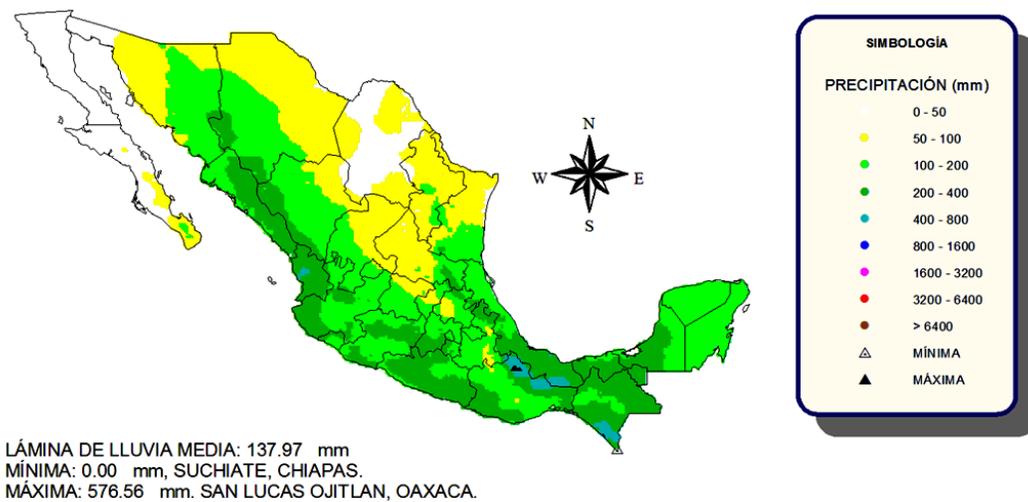
**Figura 45.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de JULIO (1950-2008).

El mes de AGOSTO presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1982 con una lámina de lluvia de 92.10 mm, y la más húmeda ocurrió en el año 1973 con una lámina de lluvia de 197.65 mm (**Figura 46**). La **figura 47** muestra la climatología de lluvia con 137.97 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de San Lucas Ojitlán, Oaxaca con 576.56 mm.

**Lluvia (mm)**



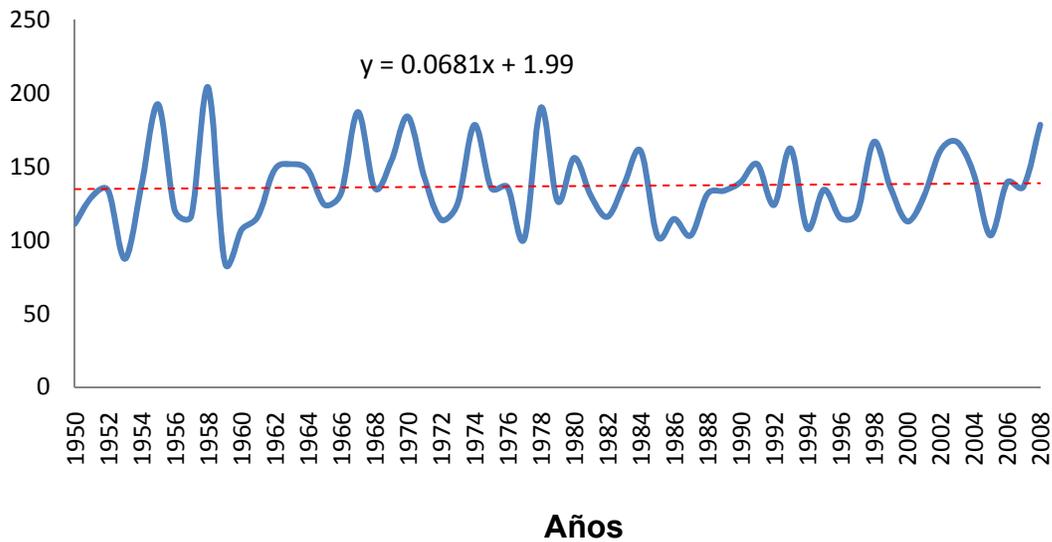
**Figura 46.** Comportamiento histórico para el mes de AGOSTO (1950-2008).



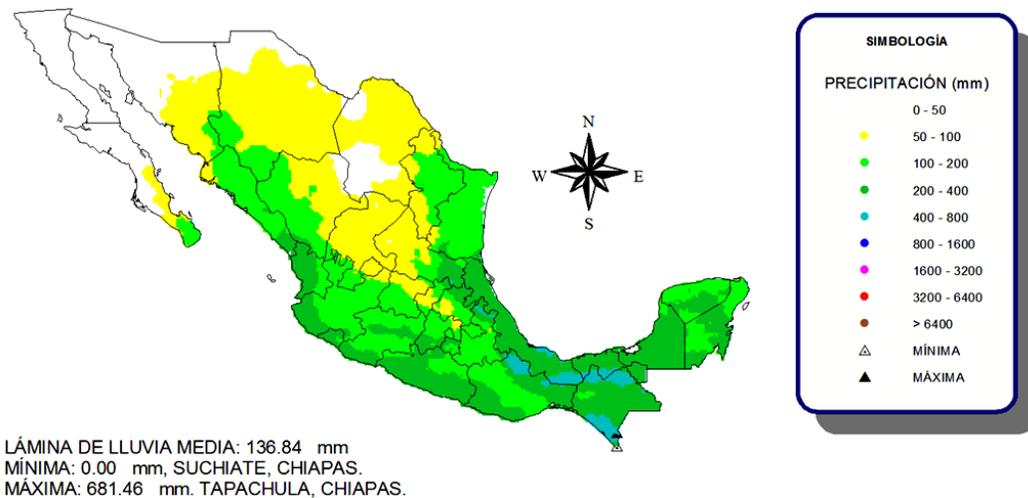
**Figura 47.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de AGOSTO (1950-2008).

El mes de SEPTIEMBRE presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en 1959 con una lámina de lluvia de 85.05 mm, y la más húmeda ocurrió en 1958 con una lámina de lluvia de 204.14 mm (Figura 48). La figura 49 muestra la climatología de lluvia con 138.85 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Tapachula, Chiapas con 681.46 mm.

**Lluvia (mm)**



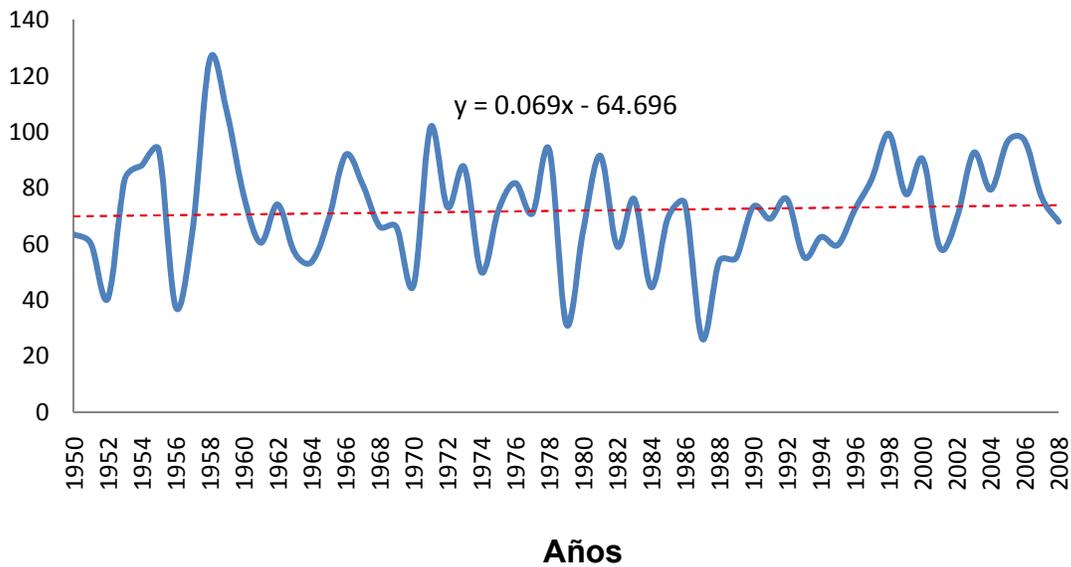
**Figura 48.** Comportamiento histórico para el mes de SEPTIEMBRE (1950-2008).



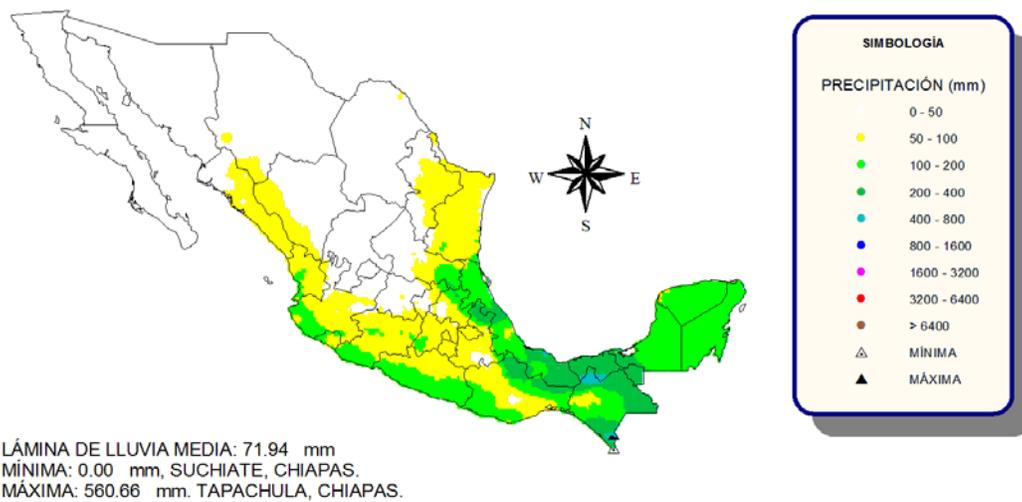
**Figura 49.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de SEPTIEMBRE (1950-2008).

El mes de OCTUBRE presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en 1987 con una lámina de lluvia de 26.28 mm, y la más húmeda ocurrió en 1958 con una lámina de lluvia de 125.92 mm (Figura 50). La figura 51 muestra la climatología de lluvia nacional con 71.95 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Tapachula, Chiapas con 560.66 mm.

**Lluvia (mm)**



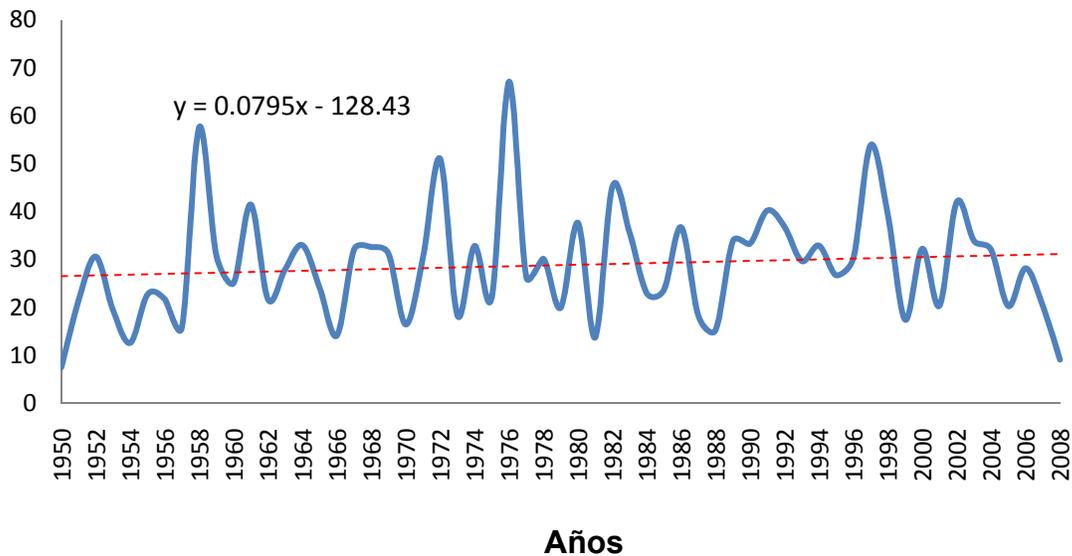
**Figura 50.** Comportamiento histórico para el mes de OCTUBRE (1950-2008).



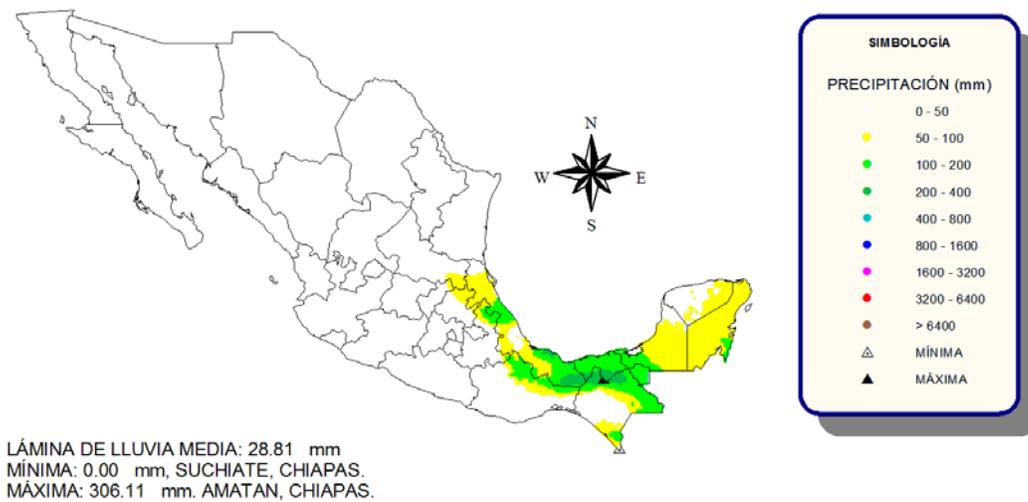
**Figura 51.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de OCTUBRE (1950-2008).

El mes de NOVIEMBRE presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en el año de 1950 con una lámina de lluvia de 7.51 mm, y la más húmeda ocurrió en el año 1976 con una lámina de lluvia de 67.10 mm (**Figura 52**). La **figura 53** muestra la climatología de lluvia nacional con 28.81 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Amatán, Chiapas con 306.11 mm.

**Lluvia (mm)**



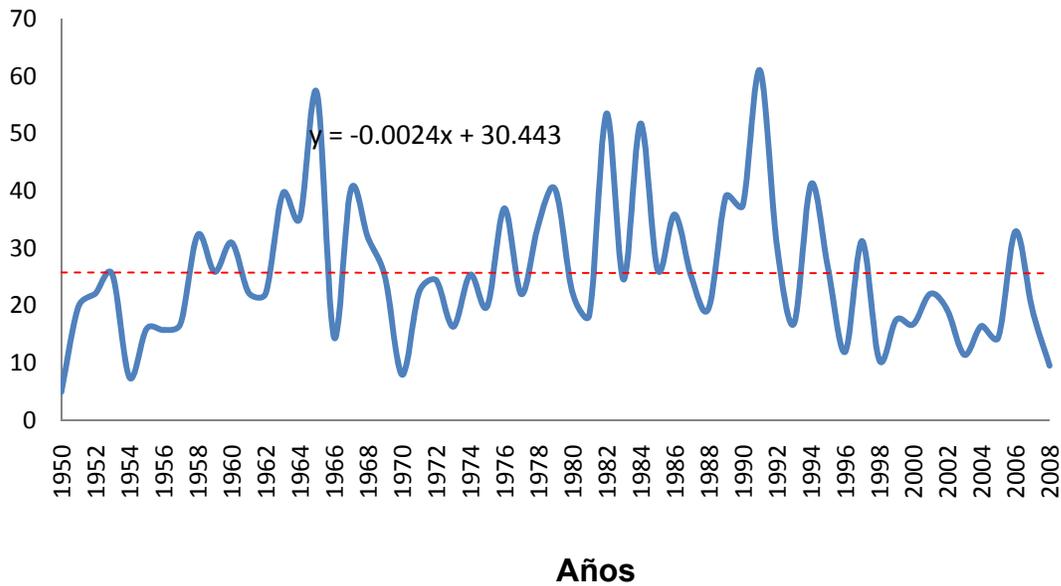
**Figura 52.** Comportamiento histórico para el mes de NOVIEMBRE (1950-2008).



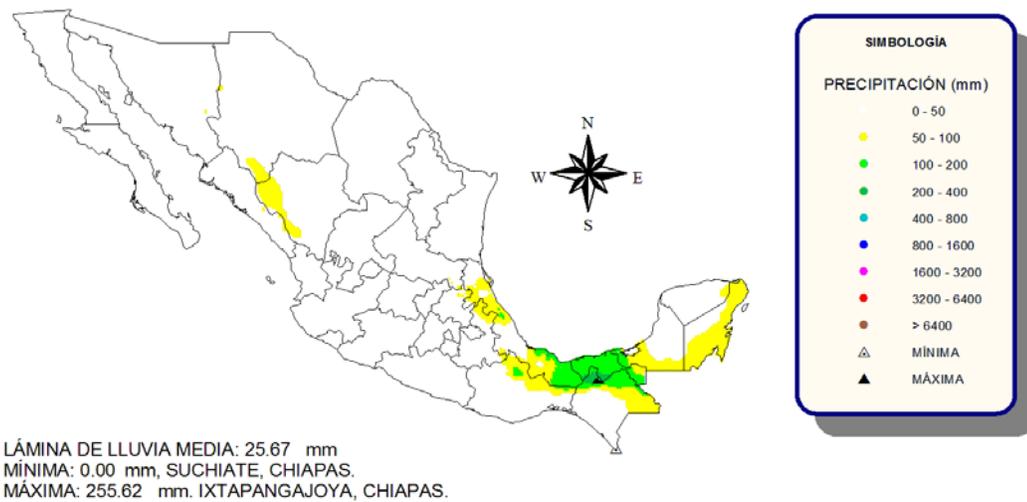
**Figura 53.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de NOVIEMBRE (1950-2008).

El mes de DICIEMBRE presenta una tendencia POSITIVA. La época más seca ocurrió en 1950 con una lámina de lluvia de 4.89 mm, y la más húmeda ocurrió en 1991 con una lámina de lluvia de 61.0 mm (Figura 54). La figura 55 muestra la climatología de lluvia nacional con 25.67 mm. La mayor concentración de humedad se observa en el municipio de Ixtapangajoya, Chiapas con 255.62 mm.

**Lluvia (mm)**



**Figura 54.** Comportamiento histórico para el mes de DICIEMBRE (1950-2008).

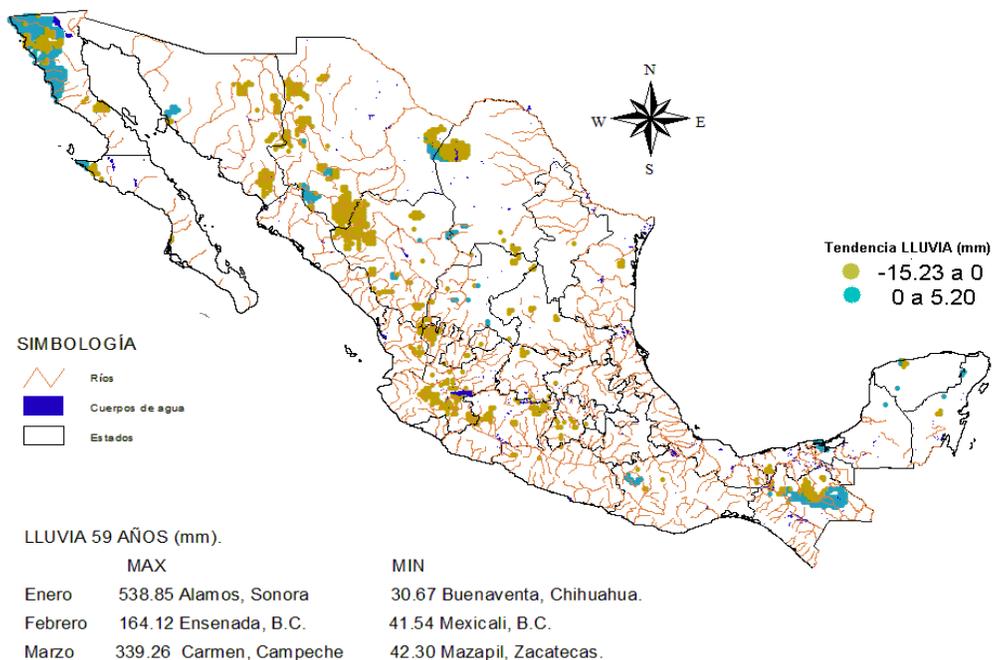


**Figura 55.** Mapa climatológico de lluvia para el mes de DICIEMBRE (1950-2008).

### 4.3. Estimación de ESCENARIOS de lluvia en México

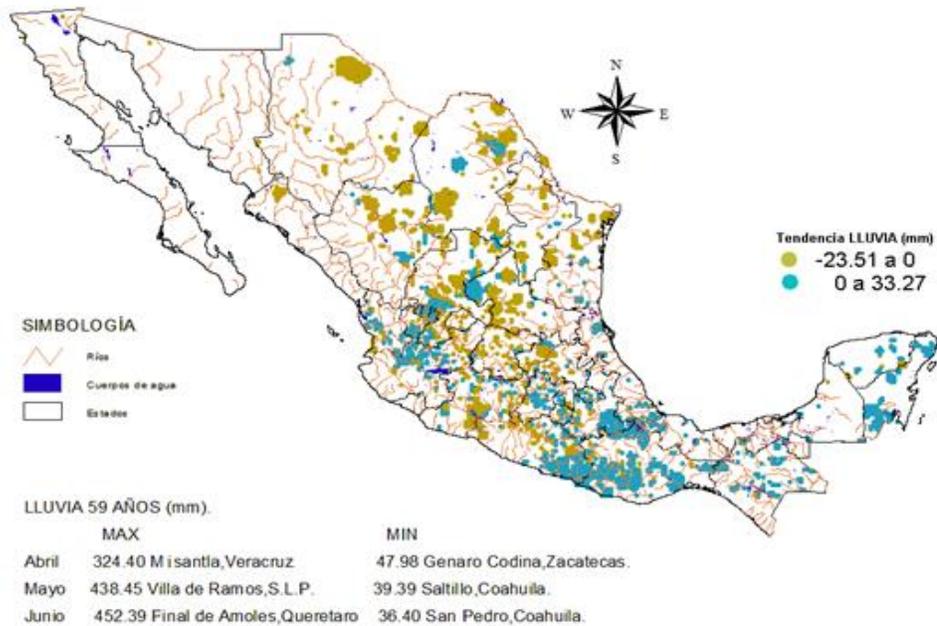
#### 4.3.1 Análisis de los escenarios de lluvia estacional y sus tendencias

Para el periodo INVERNAL se consideraron los meses de enero, febrero y marzo, afectando una superficie total del territorio nacional del 6%, dentro del cual el 67% de la superficie presenta una tendencia NEGATIVA, localizándose principalmente sobre los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Jalisco, Michoacán, Colima y Chiapas. El restante 33% presenta una tendencia POSITIVA y son las zonas que se declaran como de ALTO IMPACTO y deben de mantenerse en alerta ante la posibilidad de presentar lluvias máximas extremas. Las zonas se localizan en forma significativa en Chiapas y el norte de la Península de Baja California. Se puede observar que las lluvias máximas registradas en esta estación se localizaron en los municipios de Álamos en Sonora con 538.85 mm, Ensenada en Baja California con 164.12 mm y Ciudad del Carmen en Campeche con 339.26 mm (**Figura 56**).



**Figura 56.** Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de INVIERNO.

Para el periodo de PRIMAVERA se consideraron los meses de abril, mayo y junio, afectando una superficie total del territorio nacional del 12%, dentro del cual el 49% de la superficie presenta una tendencia NEGATIVA con valores de 0 a -23.51 mm, y se localizan en forma muy dispersa en la franja central norte-sur del país, e incluye los estados de Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Jalisco, México, Puebla, San Luis Potosí, Durango, Zacatecas, Aguascalientes, Querétaro, Tamaulipas, Nuevo León, Coahuila, Chihuahua y Sinaloa (**Figura 57**).

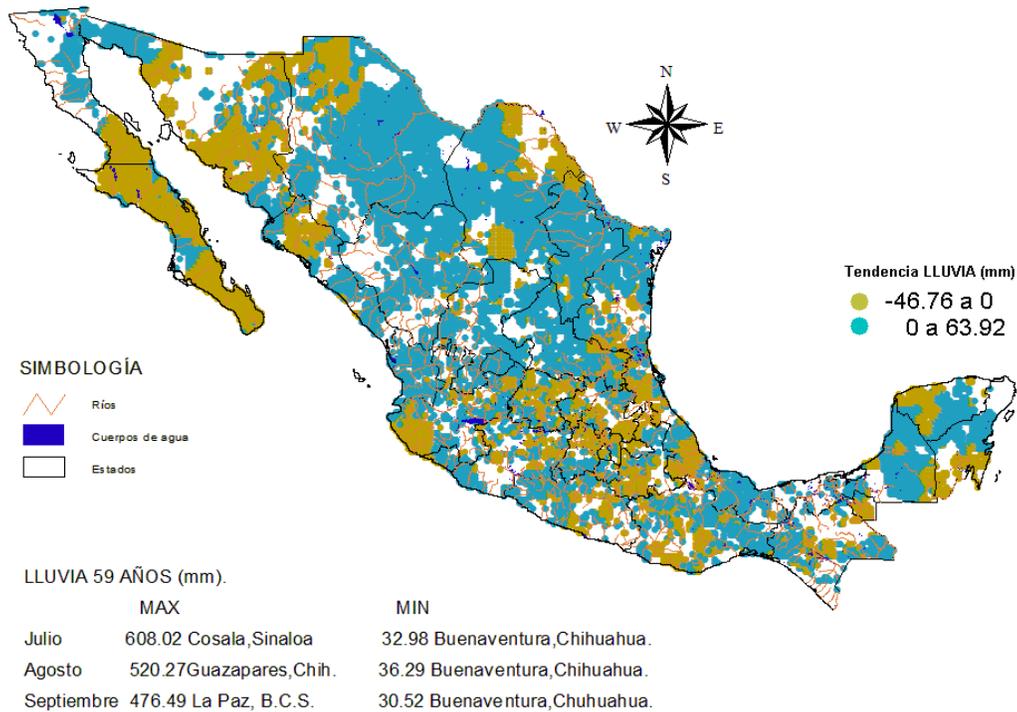


**Figura 57.** Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de PRIMAVERA.

El restante 51% presenta una tendencia POSITIVA con valores que tienden de 0 a 33.27 mm, y son las zonas que se declaran como de ALTO IMPACTO en esta estación y deben de mantenerse en alerta ante la posibilidad de presentar lluvias máximas extremas. Las zonas se localizan en forma significativa en Jalisco, San Luis Potosí, México, Morelos, Distrito Federal, Puebla, Guerrero, Veracruz, Oaxaca, Chiapas, Yucatán y Quintana Roo. Se puede observar que las lluvias máximas registradas en esta estación se localizaron en los municipios de Misantla,

Veracruz con 324.40 mm, Villa de Ramos en San Luis Potosí con 438.45 mm y Pinal de Amoles en Querétaro con 452.39 mm.

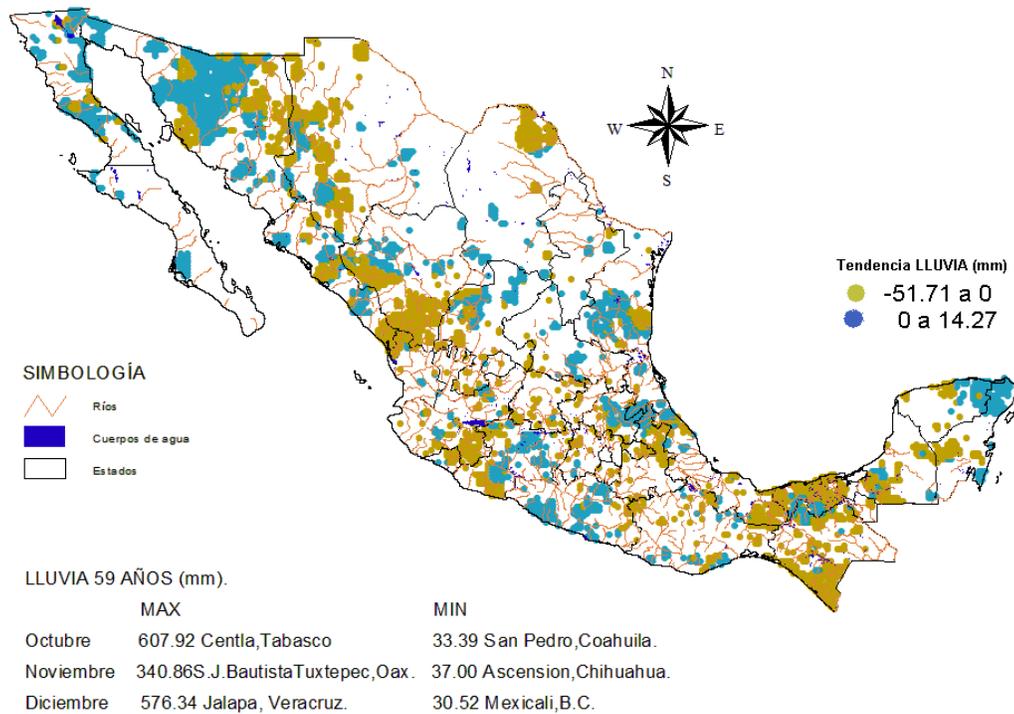
Para el periodo de VERANO se consideraron los meses de julio, agosto y septiembre, afectando una superficie total del territorio nacional del 60%, dentro del cual el 33% de la superficie presenta una tendencia NEGATIVA con valores de 0 a -46.76 mm, y se localizan en forma significativa en los estados de Sonora, Península de Baja California, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Jalisco, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Puebla, México, Guanajuato, Querétaro, Aguascalientes, Hidalgo, Chiapas, Yucatán, y Quintana Roo (**Figura 58**).



**Figura 58.** Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de VERANO.

El restante 67% presenta una tendencia POSITIVA con valores que tienden de 0 a 63.92 mm, y son las zonas que se declaran como de ALTO IMPACTO y deben de mantenerse en alerta ante la posibilidad de presentar lluvias máximas extremas. Las zonas se localizan en forma significativa en Baja California, Chihuahua, Coahuila, Tamaulipas, Nuevo León, Zacatecas, Durango, Sinaloa, Nayarit, Aguascalientes, San Luis Potosí, México, Morelos, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Veracruz, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Se puede observar que las lluvias máximas registradas en esta estación se localizaron en los municipios de Cosala, Sinaloa con 608 mm, Guazapares en Chihuahua con 520.27mm y La Paz en Baja California Sur con 476.49 mm.

Para el periodo de OTOÑO se consideraron los meses de octubre, noviembre y diciembre, afectando una superficie total del territorio nacional del 22%, dentro del cual el 51% de la superficie presenta una tendencia NEGATIVA con valores de 0 a -51.71 mm, y se localizan en forma significativa en los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Sinaloa, Jalisco, Michoacán, Guanajuato, Veracruz, Tlaxcala, Morelos, México, Tabasco, Chiapas y Campeche. El restante 49% presenta una tendencia POSITIVA con valores que tienden de 0 a 14.27 mm, y son las zonas que se declaran como de ALTO IMPACTO y deben de mantenerse en alerta ante la posibilidad de presentar lluvias máximas extremas. Las zonas se localizan en forma significativa en la Península de Baja California, Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Sinaloa, San Luis Potosí, Tamaulipas, Hidalgo, Michoacán, Guerrero y Quintana Roo. Se puede observar que las lluvias máximas registradas en esta estación se localizaron en los municipios de Centla, Tabasco con 607.92 mm, J. Bautista Tuxtepec en Oaxaca con 340.34 mm y Jalapa en Veracruz con 576.34 mm (**Figura 59**).

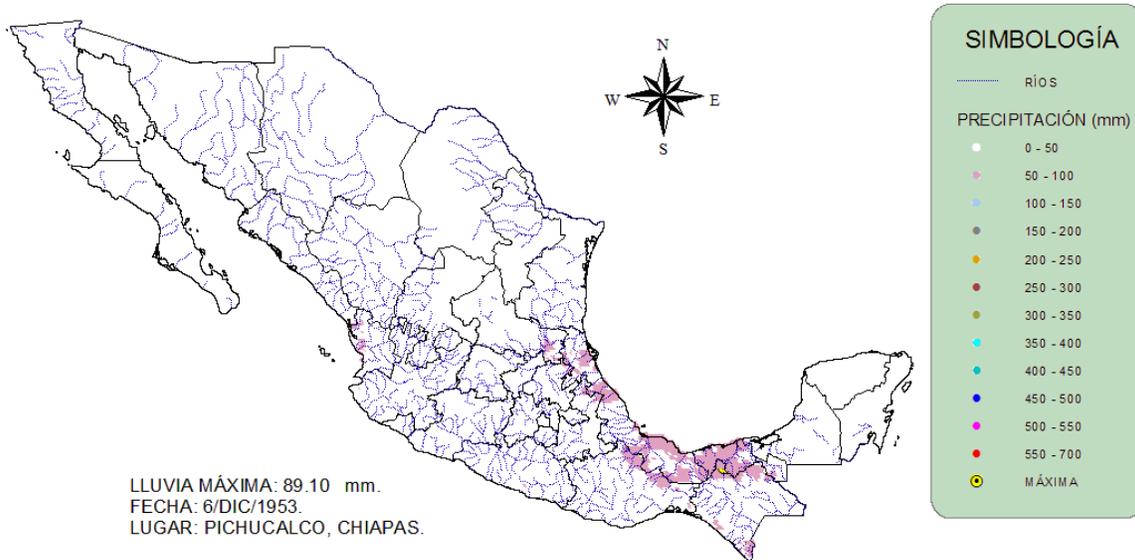


**Figura 59.** Mapa de lluvias con un periodo de retorno de 59 años en la estación de OTOÑO.

#### 4.3.2 Periodos de retorno de la lluvia

Uno de los resultados más importantes fue la extracción de los valores máximos de lluvia diaria acumulada para cada nodo del país, y después encontrar las máximas ocurridas en cada mes para los últimos 59 años. Con este resultado se calcularon los periodos de retorno de cada nodo del país para 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 55 y 59 años. El resultado permite conocer la frecuencia de las lluvias máximas extremas, así como localizarlas e identificar el peligro que puede ocurrir alrededor de una población (Figuras del 58 al 107).

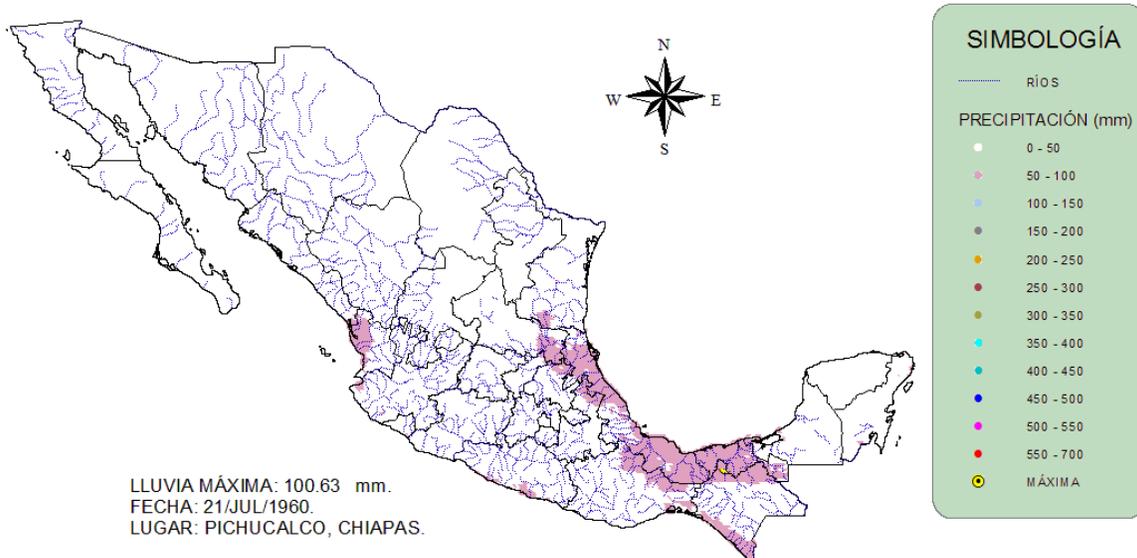
El mapa de periodo de retorno para 5 años, muestra valores de las lluvias máximas no mayores a 90 mm. El valor máximo se localizó en el municipio de Juárez, Chiapas con 89.10 mm. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Catemaco, Veracruz con 82.8 mm, Teapa, Tabasco con 82.25 y Mecayapan, Veracruz con 80.59 mm (**Figura 60**).



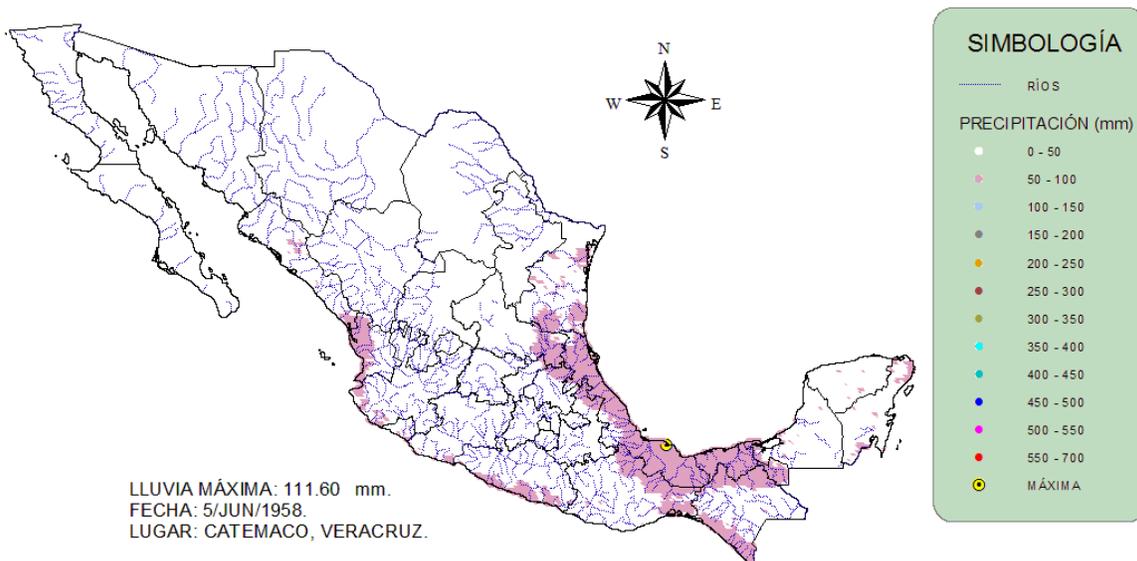
**Figura 60.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 5 años.

El mapa de periodo de retorno para 10 años, muestra valores de las lluvias máximas no mayores a 89.10 mm, y el máximo se localizó en el municipio de Pichucalco, Chiapas. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Hidalgotitlán, Veracruz con 652.52 mm, Jalapa, Tabasco con 576.34 mm y Chapultenango, Chiapas con 518.32 mm (**Figura 61**).

El mapa de periodo de retorno para 15 años, muestra valores de las lluvias máximas no mayores a 100.63 mm, y el máximo se localizó en el municipio de Pichucalco, Chiapas. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Teapa, Tabasco con 108.66 mm, Angel R. Cabada, Veracruz con 107.68 mm, San Andrés Tuxtla, Veracruz con 107.31 mm y Pichucalco, Chiapas con 104.94 mm (**Figura 62**).

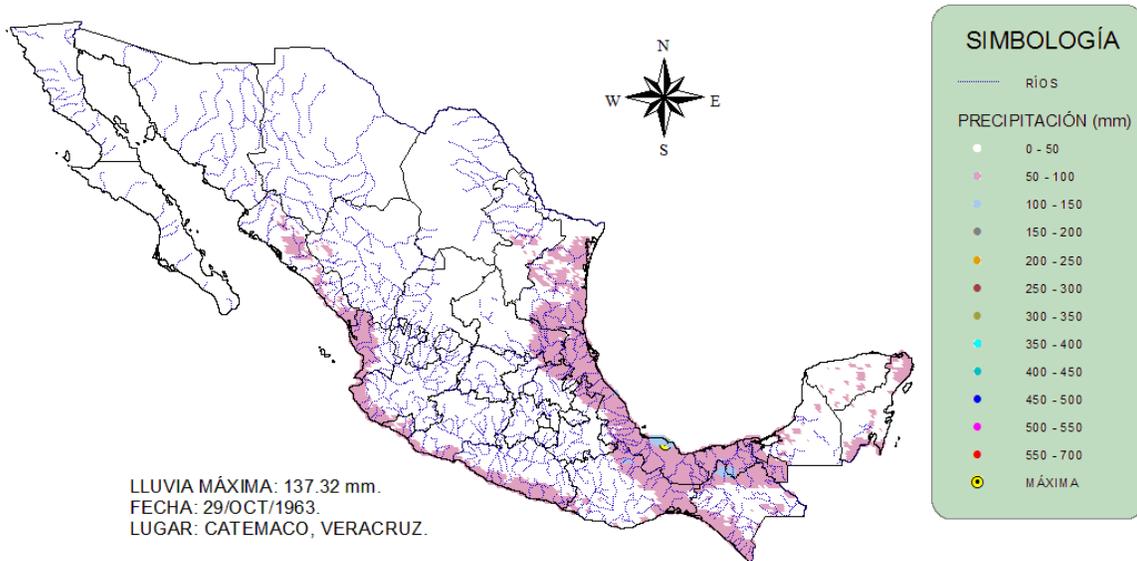


**Figura 61.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 10 años.

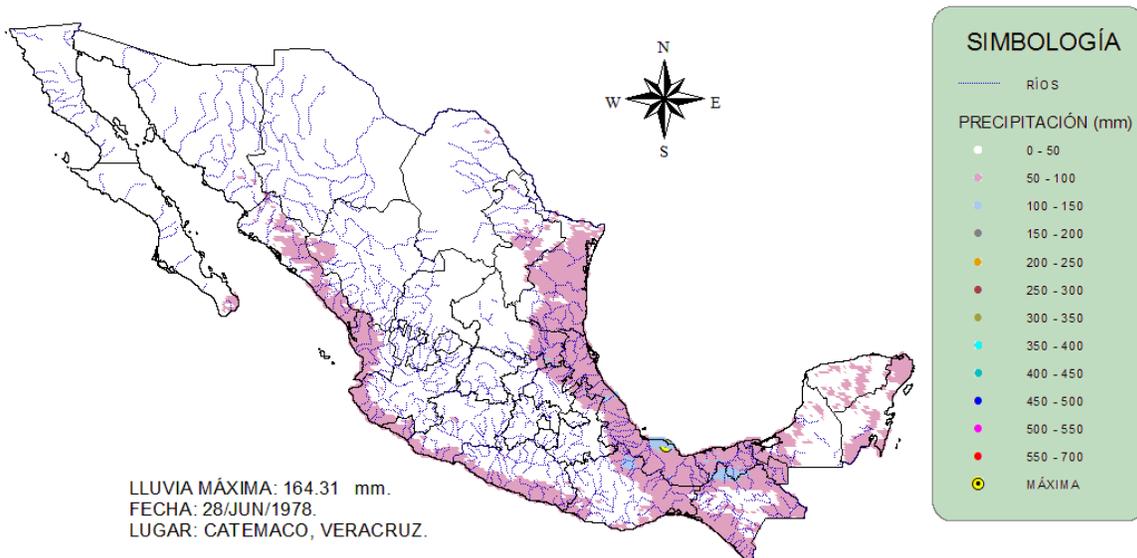


**Figura 62.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 15 años.

El mapa de periodo de retorno para 20 años, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 137.32 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Teapa, Tabasco con 121.50 mm, Angel R. Cabada, Veracruz con 122.80 mm y San Andrés Tuxtla, Veracruz con 124.38 mm (**Figura 63**).

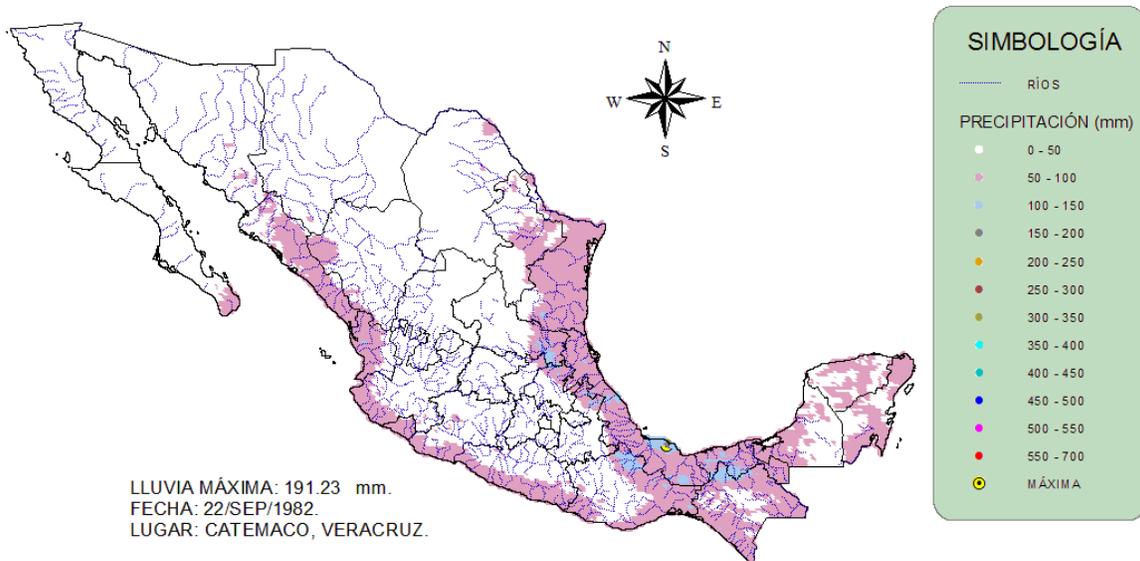


**Figura 63.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 20 años. El mapa de *periodo de retorno para 25 años*, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 164.32 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Angel R. Cabada, Veracruz con 140.96 mm, Juárez, Chiapas con 131.07 mm y Tacotalpa, Tabasco con 133.40 mm (**Figura 64**).



**Figura 64.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 25 años.

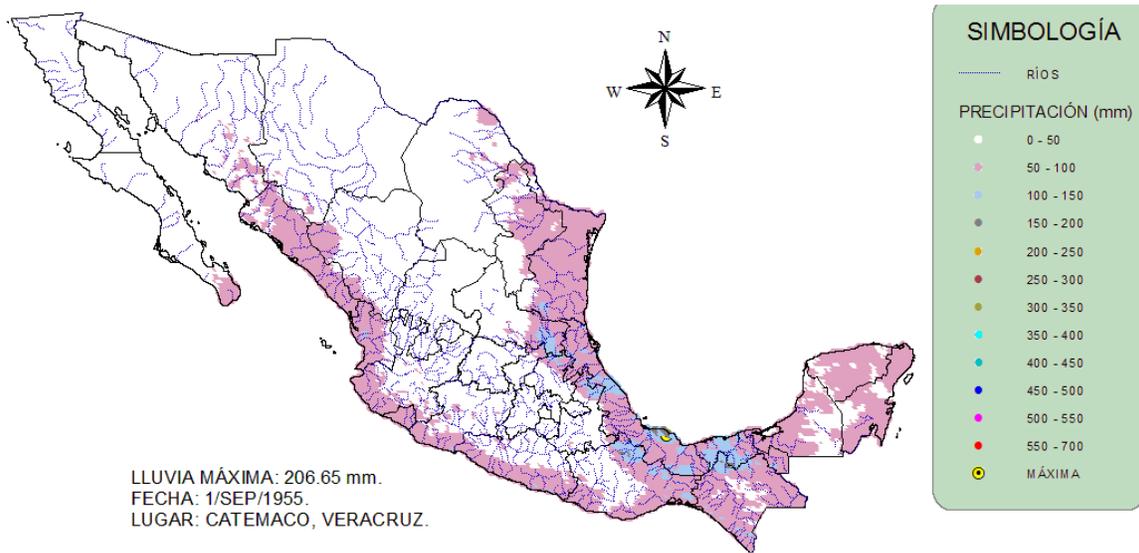
El mapa de periodo de retorno para 30 años, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 191.24 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Angel R. Cabada, Veracruz con 149.72 mm y San Andrés Tuxtla, Veracruz con 141.71 mm (**Figura 65**).



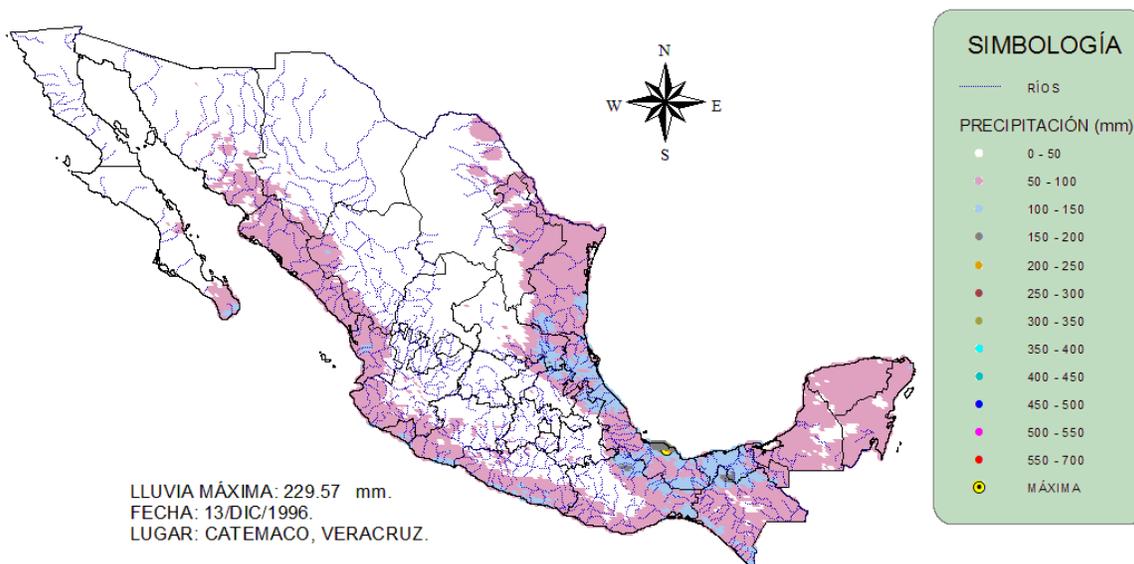
**Figura 65.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 30 años.

El mapa de periodo de retorno para 35 años, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 206.65 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Angel R. Cabada, Veracruz con 170.20 mm, Juárez, San Andrés Tuxtla, Veracruz con 161.31 mm y Teapa, Tabasco con 178.73 mm (**Figura 66**).

El mapa de periodo de retorno para 40 años, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 229.57 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Angel R. Cabada, Veracruz con 182.47 mm y San Andrés Tuxtla, Veracruz con 197.26 mm y Juárez, Chiapas con 184.25 mm (**Figura 67**).

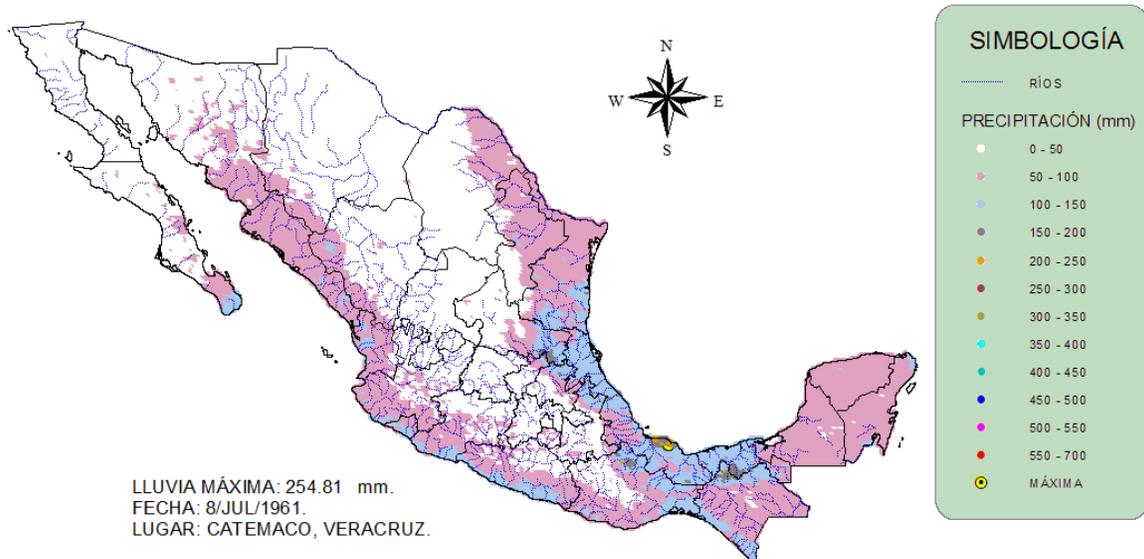


**Figura 66.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 35 años.



**Figura 67.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 40 años.

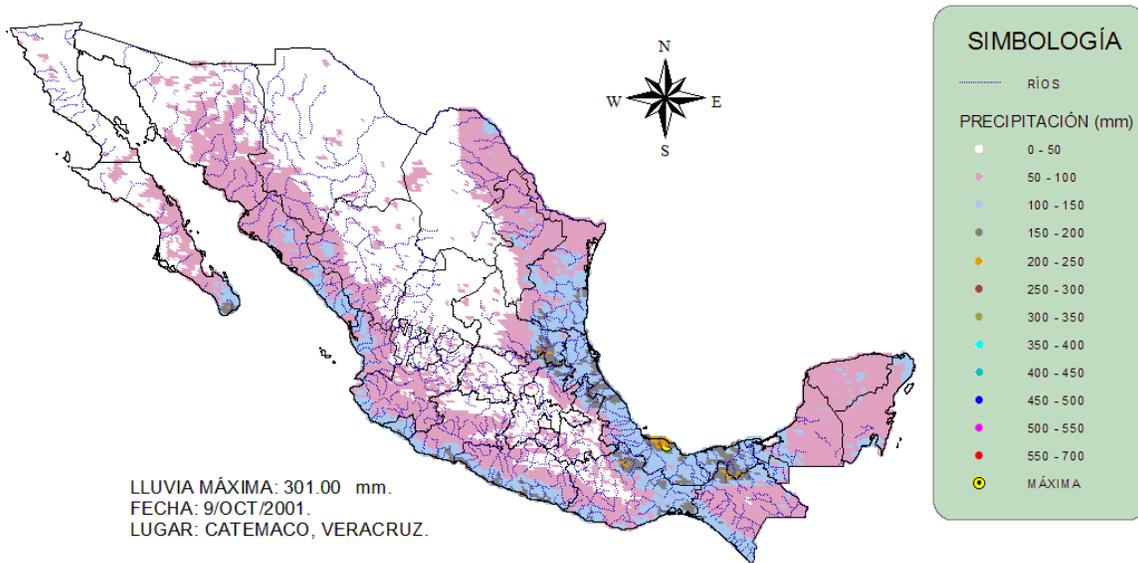
El mapa de *periodo de retorno para 45 años*, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 254.82 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Angel R. Cabada, Veracruz con 206.03 mm, Juárez, San Andrés Tuxtla, Veracruz con 219.25 mm y Alvarado, Veracruz con 201.30 mm (**Figura 68**).



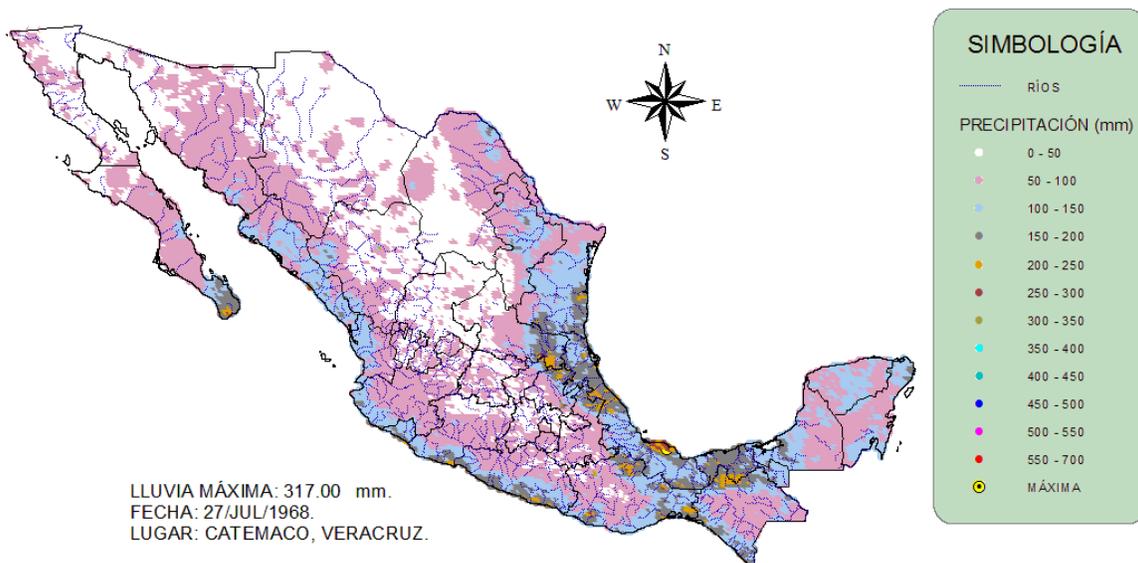
**Figura 68.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 45 años.

El mapa de *periodo de retorno para 50 años*, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 301.43 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Teapa, Tabasco con 240.48, Aquismon, San Luis Potosí con 246.94 mm y San Andrés Tuxtla, Veracruz con 250.78 mm (**Figura 69**).

El mapa de *periodo de retorno para 55 años*, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 317 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Catemaco, Veracruz. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Angel R. Cabada, Veracruz con 300 mm, San Andrés Tuxtla, Veracruz con 276.57 mm y Alvarado, Veracruz con 261.06 mm (**Figura 70**).



**Figura 69.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 50 años.

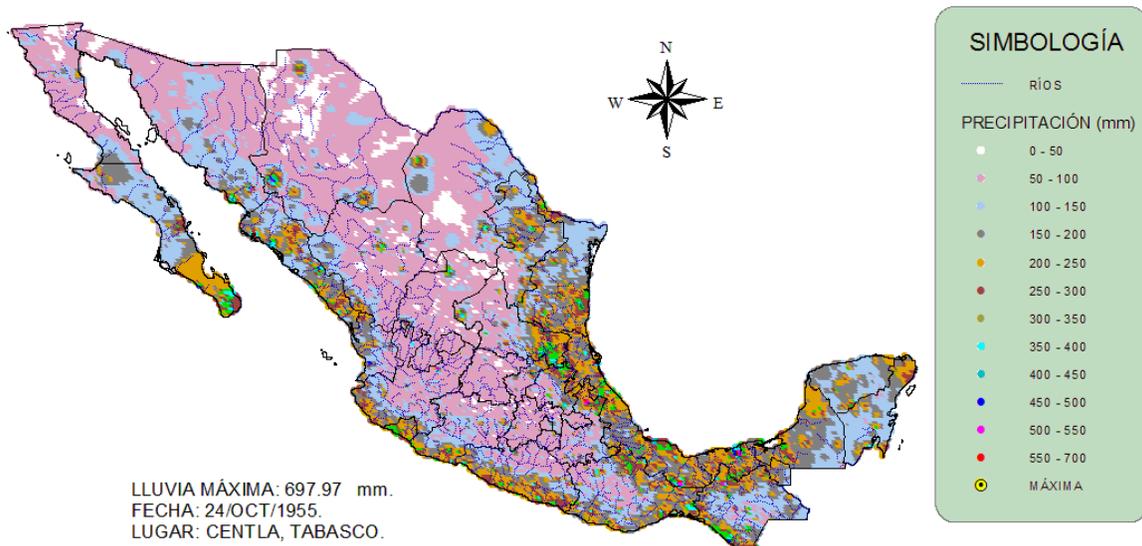


**Figura 70.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 55 años

El mapa de periodo de retorno para 59 años, muestra valores de las **lluvias máximas no mayores a 697 mm**, y el máximo se localizó en el municipio de Centla, Tabasco. Otros valores máximos se localizaron en los municipios de Chapultenango, Chiapas con 518 mm, Mapastepec, Chiapas con 470 mm,

Pijijiapan, Chiapas con 458.40 mm y Oastuacán, Chiapas con 405 mm (**Figura 71**).

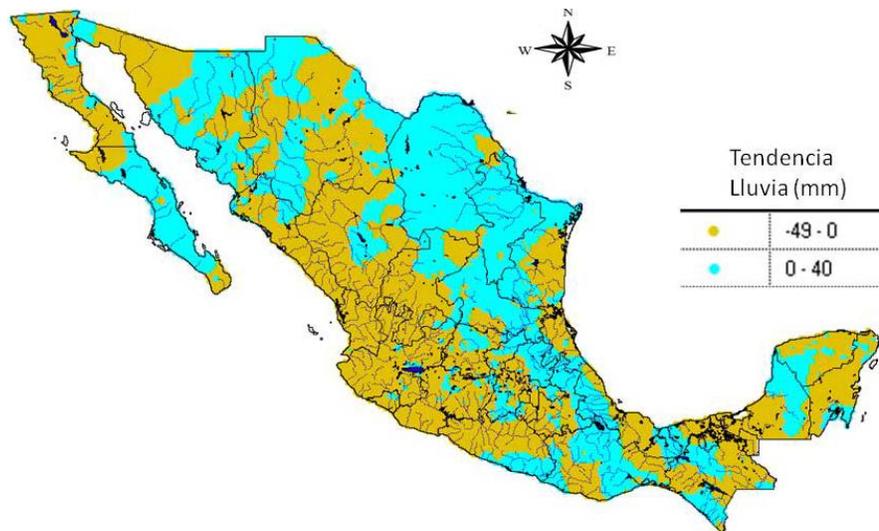
Esto parece indicar que las máximas extremas de lluvia en un día, superiores a los 350 mm, han ocurrido con un periodo de retorno superior a los 55 años, y se justifica considerando las inundaciones ocurridas en octubre del 2005 y 2007 en la costa de Chiapas y en la zona costera de Tabasco respectivamente.



**Figura 71.** Mapa que describe las lluvias con un periodo de retorno de 59 años.

#### 4.3.3. Tendencias de las lluvias.

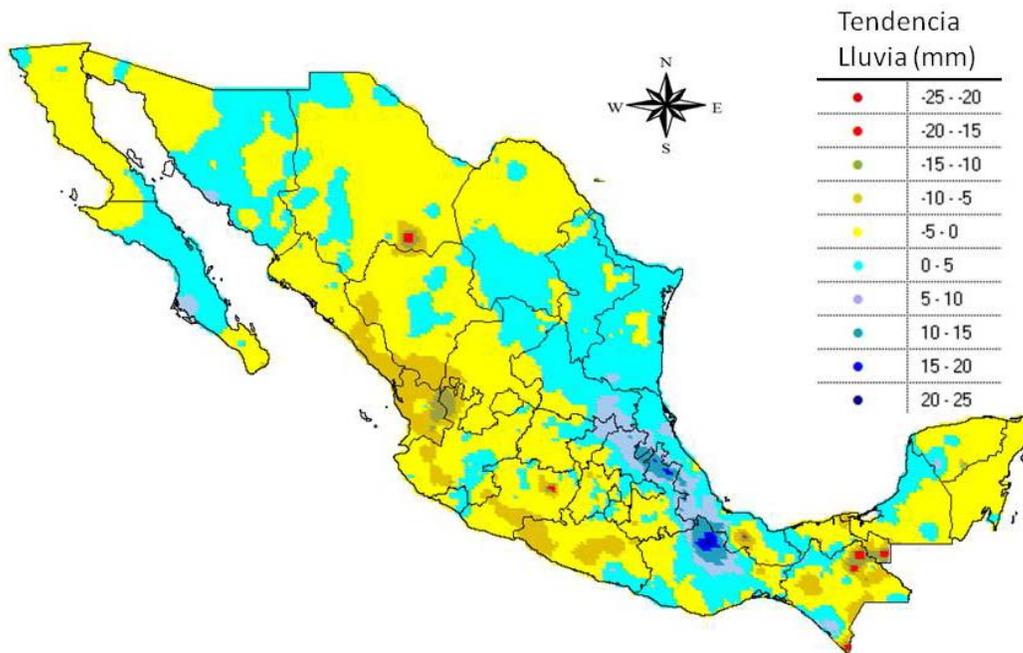
El análisis de las tendencias de la lluvia a partir de la serie histórica permitió identificar zonas con tendencia POSITIVA y NEGATIVA. A los datos acumulados de lluvia mensual en milímetros se les aplicó modelos diferenciales para identificar las tendencias o patrones. El 45% del territorio presenta una tendencia positiva y el 55% restante negativa (**Figura 72**).



**Figura 72.** Mapa anual de tendencias de las lluvias (1950-2008).

#### 4.3.3.1. Análisis de las tendencias estacionales.

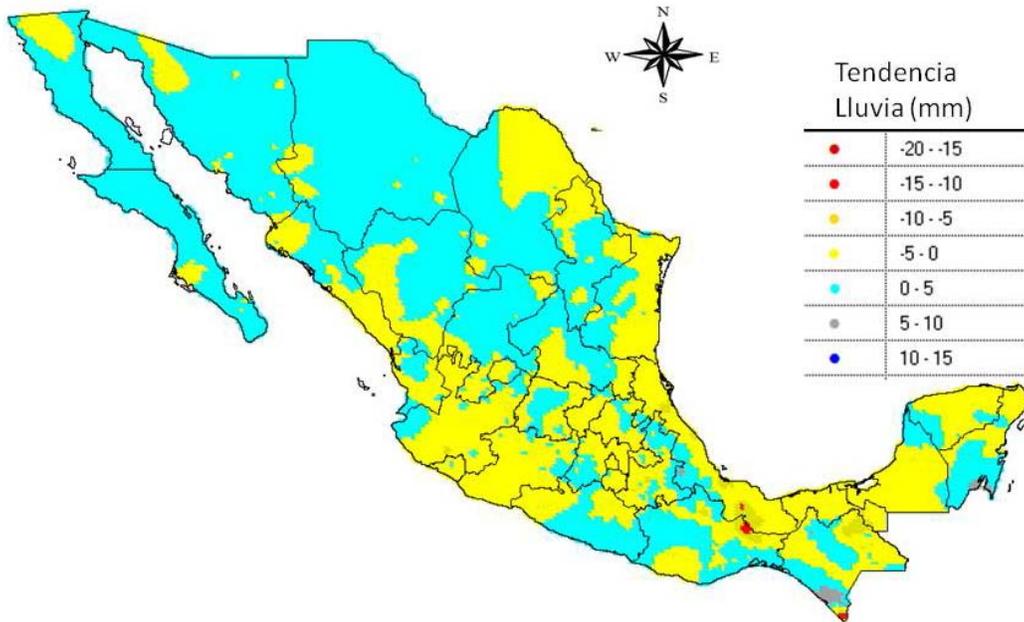
Si analizamos los porcentajes estacionales de lluvia anual acumulada, podemos observar que el 44.5% ocurre en el verano, 36% durante el otoño, 10% en primavera y 9% durante el invierno. En forma conjugada para cada estación, las tendencias más significativas se observan en el periodo más lluvioso del año, el cual corresponde a la estación de VERANO (julio, agosto y septiembre), con una tendencia anual entre +25 mm y -25 mm. Las pendientes negativas se observan en un 64% del territorio nacional. Se resalta la zona del sistema Cutzamala y una gran parte de los estados de Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Guerrero, Michoacán, Jalisco, México, Guanajuato, Nayarit, Zacatecas, Durango, Sinaloa, Aguascalientes, Distrito Federal, Chihuahua y Coahuila. El resto de México presenta una pendiente positiva y corresponde a un 36% del territorio nacional (**Figura 73**).



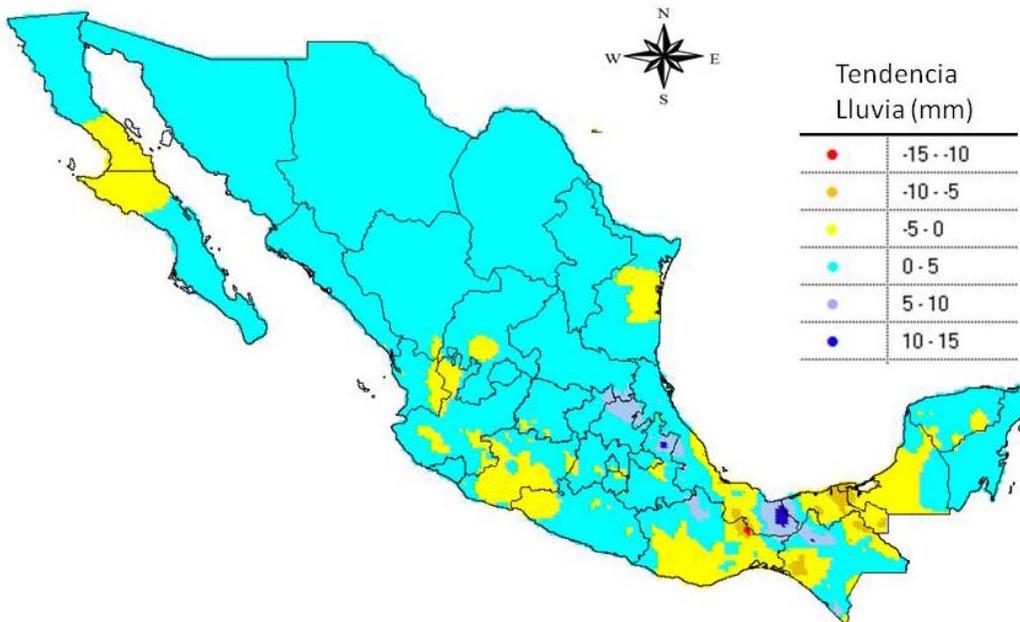
**Figura 73.** Mapa de tendencias de lluvias en la estación de verano (1950-2008).

En la PRIMAVERA se observa una tendencia de la lluvia entre -20 a 15 mm. El 42% del país presenta una tendencia negativa y cubre una gran parte de los estados de Yucatán, Campeche, Tabasco, Veracruz, Distrito Federal, Morelos, Aguascalientes, Michoacán, Jalisco y Colima. El resto de México presenta una tendencia positiva y corresponde al 58% del territorio nacional (**Figura 74**).

Durante el OTOÑO se observa una tendencia de la lluvia entre +15 y -15 mm. La pendiente negativa está localizada sobre el 15% del territorio sobre algunas porciones de los estados de Tabasco, Campeche, Oaxaca, y sur de Veracruz. El resto de México presenta pendientes con valores positivos y cubre el 85% del territorio nacional (**Figura 75**).



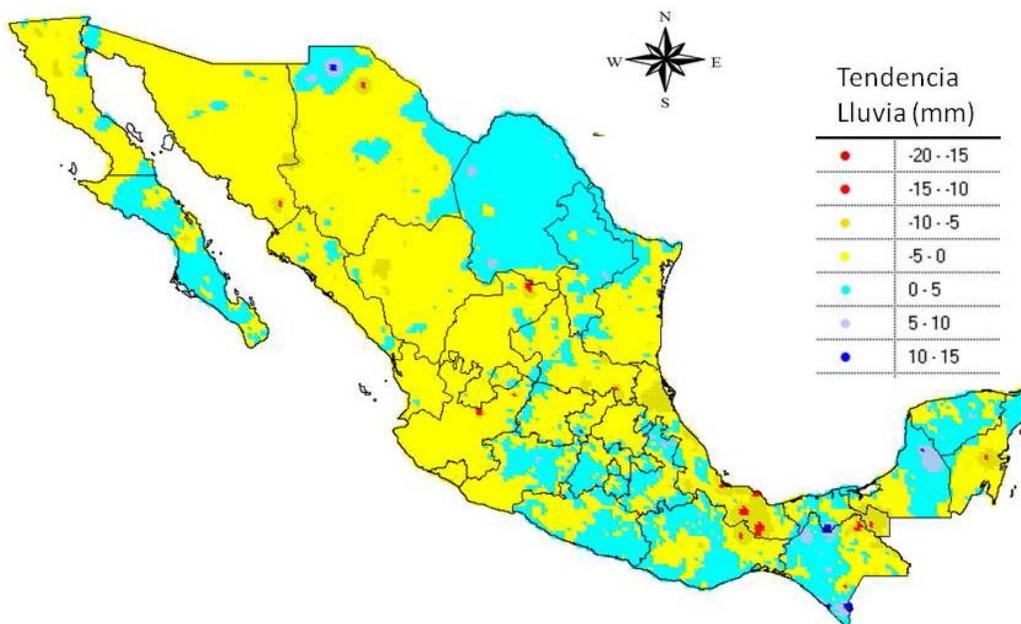
**Figura 74.** Mapa de tendencias de lluvias en la estación de primavera (1950-2008).



**Figura 75.** Mapa de tendencias de lluvias en la estación de otoño (1950-2008).

Durante el INVIERNO se observa una tendencia de la lluvia entre +15 y -20 mm. Las tendencias negativas cubren el 67% del territorio y se acentúa más sobre la porción occidental del país; Baja California, Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Colima, Zacatecas, Durango, San Luis Potosí, Tamaulipas, Guanajuato, Hidalgo, Querétaro y Veracruz, así como algunas porciones de Chiapas, Quintana Roo, Campeche, Puebla, Oaxaca y Guerrero. El resto de México presenta pendientes con valores positivos y cubre el 33% del territorio nacional (**Figura 76**).

En general, las tendencias positivas se acentúa más en los meses de más lluvia en verano (julio-agosto-septiembre), las tendencias negativas se acentúan en los meses de invierno (enero-febrero-marzo). La pendiente más baja se observa en la estación de verano con un valor de -22 mm por año, mientras que la pendiente más alta se observa también en la estación de verano con un valor de 21 mm por año.

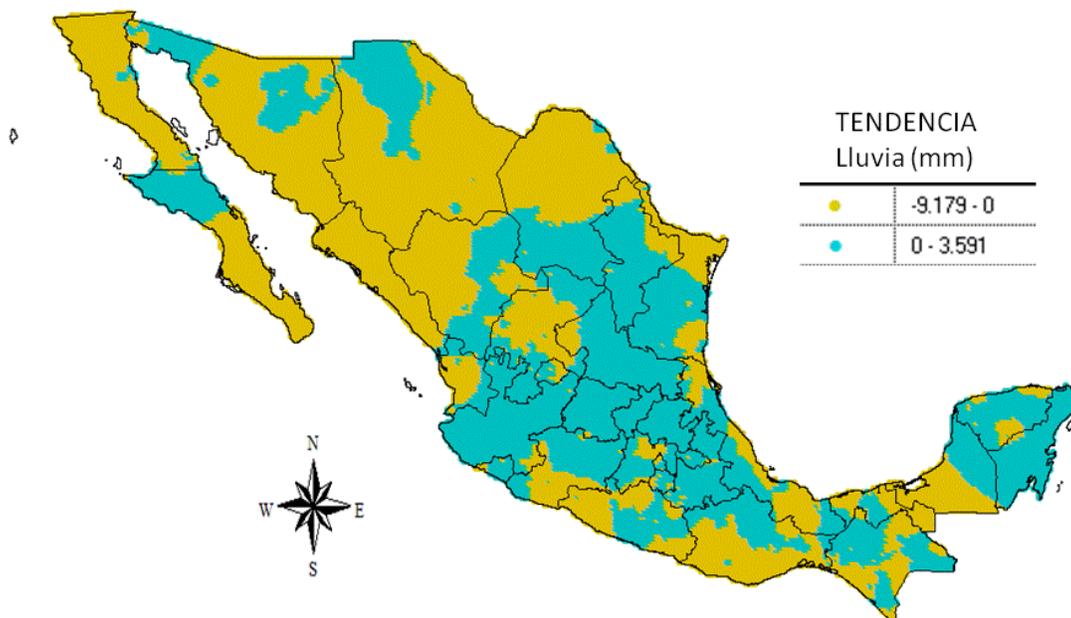


**Figura 76.** Mapa de tendencias de lluvias en la estación de invierno (1950-2008).

#### 4.3.3.2. Análisis de las tendencias mensuales.

Para conocer en forma más detallada las tendencias de la lluvia en México, estas se obtuvieron en forma mensual para los 12 meses del año.

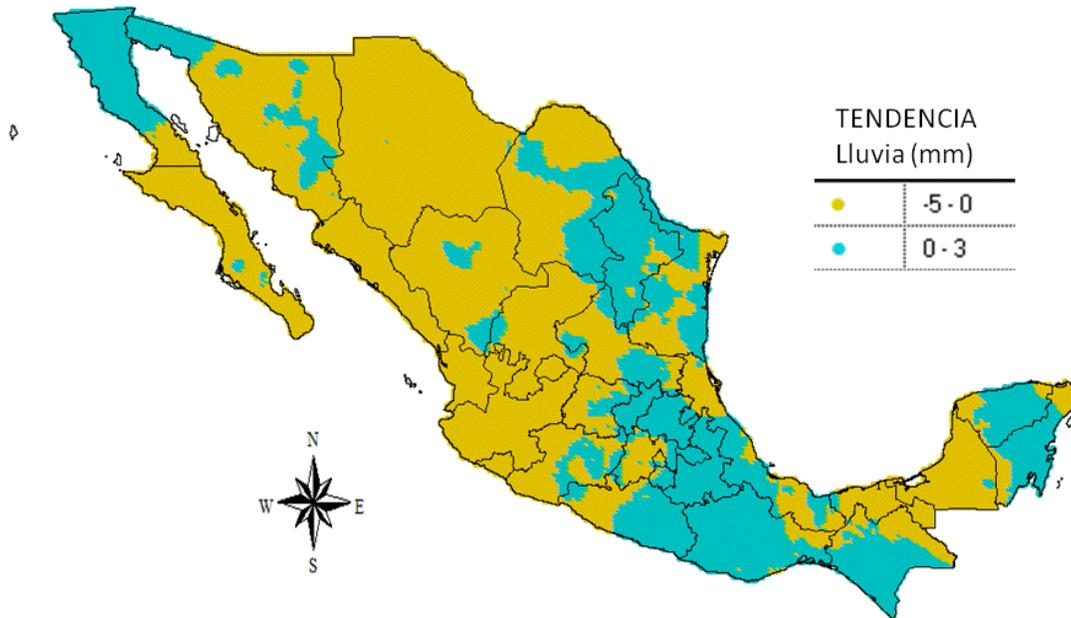
Las tendencias de la lluvia para el mes de ENERO, muestra que el 52% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -9.17 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 48% del territorio con valores entre 0 y +3.59 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Puebla, Tlaxcala, Morelos, Distrito Federal, México, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Colima, San Luis Potosí, Nuevo León, Chiapas, Yucatán y Quintana Roo, y en pequeñas porciones en los estados de Tabasco, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Nayarit, Chihuahua y Baja California. El resto de los estados presenta tendencia negativa (**Figura 77**).



**Figura 77.** Tendencias de la lluvia para el mes de ENERO (1950-2008).

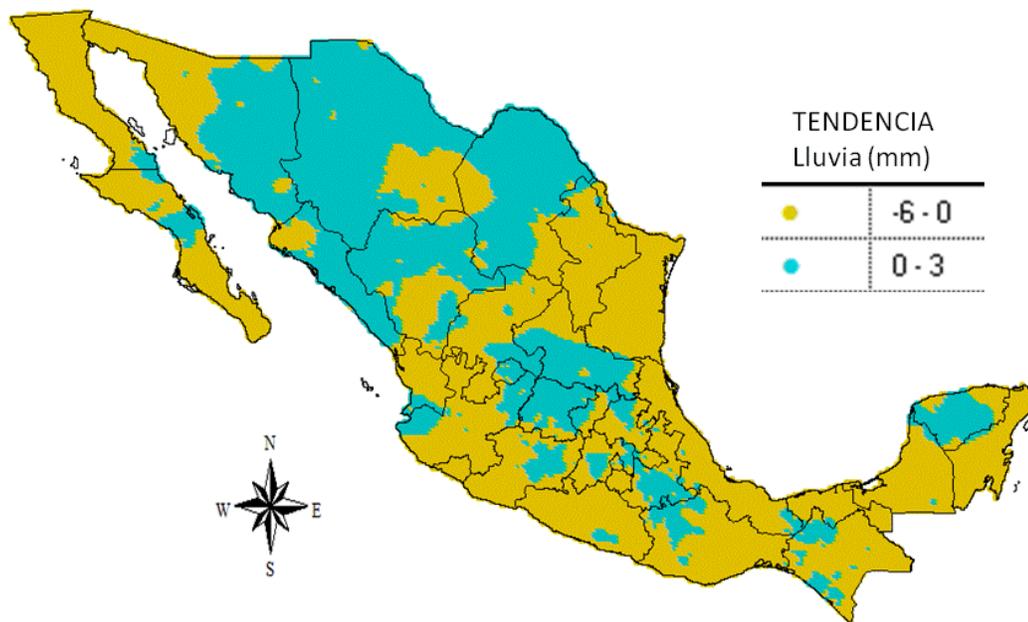
Las tendencias de la lluvia para el mes de FEBRERO, muestra que el 63% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -5 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 37% del territorio con valores entre 0 y +3 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Puebla, Tlaxcala, Morelos, Distrito Federal,

Querétaro, Hidalgo, Nuevo León, Chiapas, Oaxaca, Yucatán y Quintana Roo, y en pequeñas porciones en los estados de Veracruz, Tamaulipas, Coahuila, Sonora, Baja California, Zacatecas, Durango, Michoacán, Guanajuato y San Luis Potosí. El resto de los estados presenta tendencia negativa (**Figura 78**).



**Figura 78.** Tendencias de lluvia para el mes de FEBRERO (1950-2008).

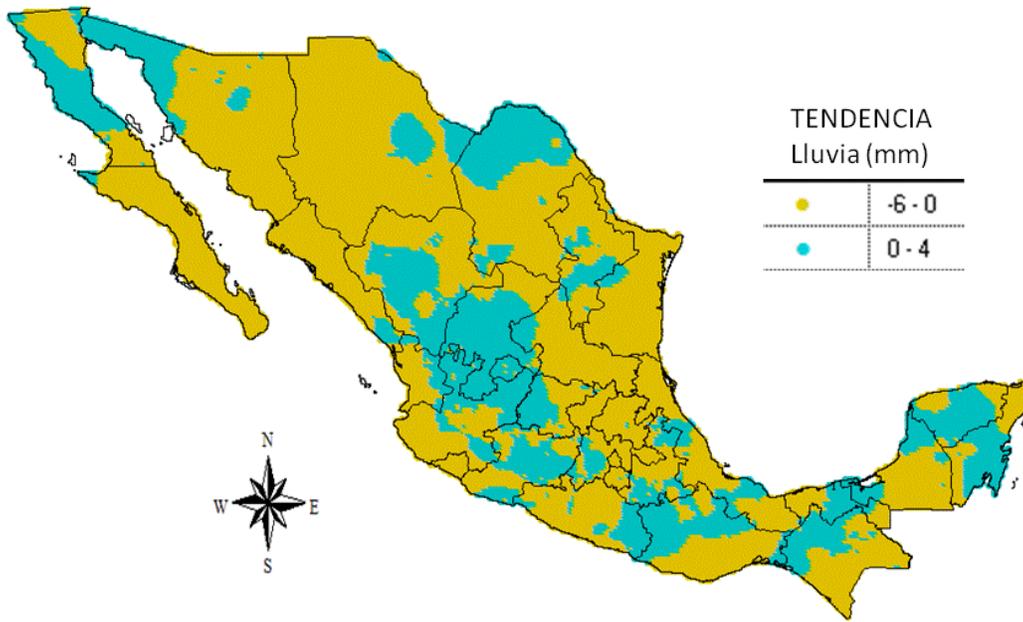
Las tendencias de la lluvia para el mes de MARZO, muestra que el 66% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -6 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 34% del territorio con valores entre 0 y +3 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Sinaloa, San Luis Potosí, Guanajuato y Yucatán, así como en pequeñas porciones en los estados de Chiapas, Veracruz, Puebla, México, Jalisco, Michoacán, Zacatecas, Durango, Nayarit y la Península de Baja California. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 79**).



**Figura 79.** Tendencias de la lluvia para el mes de MARZO (1950-2008).

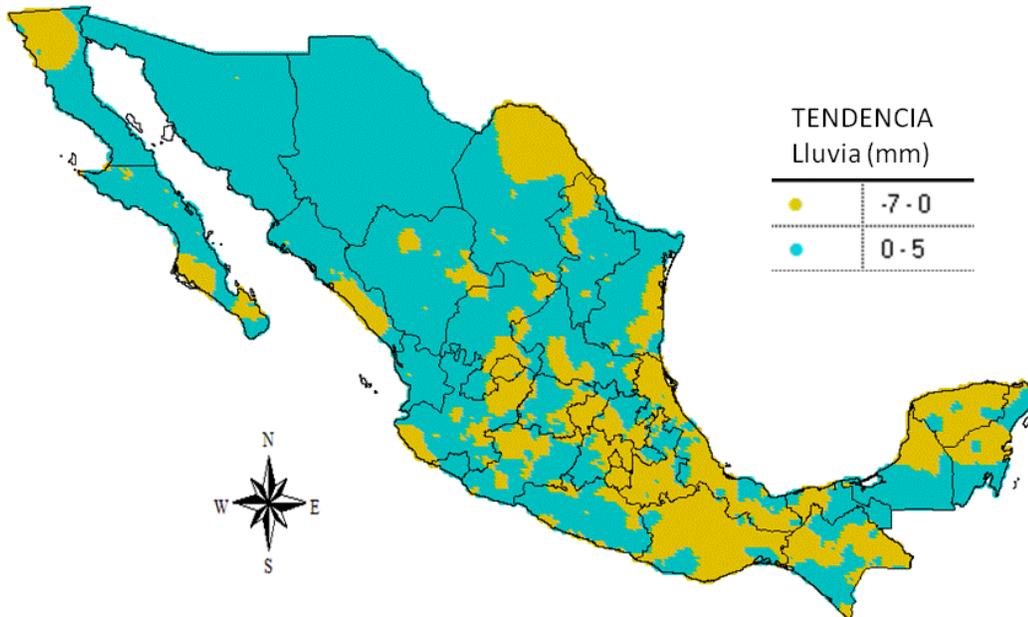
Las tendencias de la lluvia para el mes de ABRIL, muestra que el 60% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -6 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 40% del territorio con valores entre 0 y +4 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Zacatecas, Yucatán y Quintana Roo, así como en pequeñas porciones en los estados de Campeche, Tabasco, Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Puebla, Morelos, México, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Durango, Sinaloa, Nuevo León, Tamaulipas, Coahuila, Chihuahua, Sonora y Baja California. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 80**).

Las tendencias de la lluvia para el mes de MAYO, muestra que el 29% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -7 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 71% del territorio con valores entre 0 y +5 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa, Zacatecas, Durango, Nayarit, Colima, San Luis Potosí,



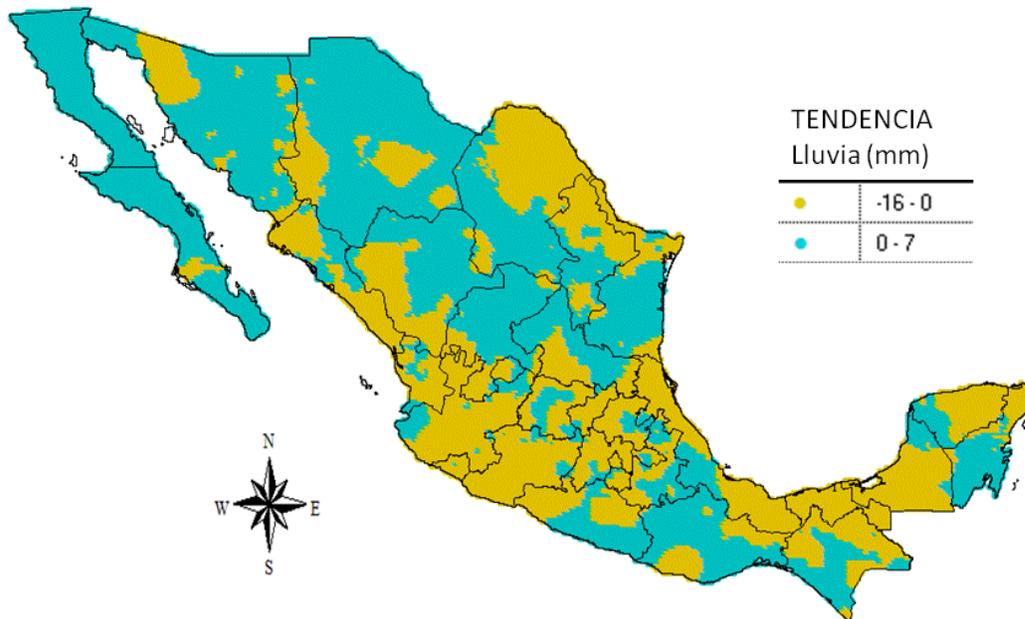
**Figura 80.** Tendencias de la lluvia para el mes de ABRIL (1950-2008).

Tlaxcala, Guerrero, Guanajuato, Campeche y Península de Baja California, así como en pequeñas porciones en los estados de Tabasco, Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Puebla, México, Jalisco, Michoacán, Hidalgo y Querétaro. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 81**).



**Figura 81.** Tendencias de la lluvia para el mes de MAYO (1950-2008).

Las tendencias de la lluvia para el mes de JUNIO, muestra que el 44% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -16 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 56% del territorio con valores entre 0 y +7 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Zacatecas, Durango, Tamaulipas, San Luis Potosí, Oaxaca, Quintana Roo y Península de Baja California, así como en pequeñas porciones en los estados de Yucatán, Campeche, Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Tlaxcala, México, Morelos, Puebla, Hidalgo, Guanajuato, Querétaro, Aguascalientes y Nuevo León. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 82**).



**Figura 82.** Tendencias de la lluvia para el mes de JUNIO (1950-2008).

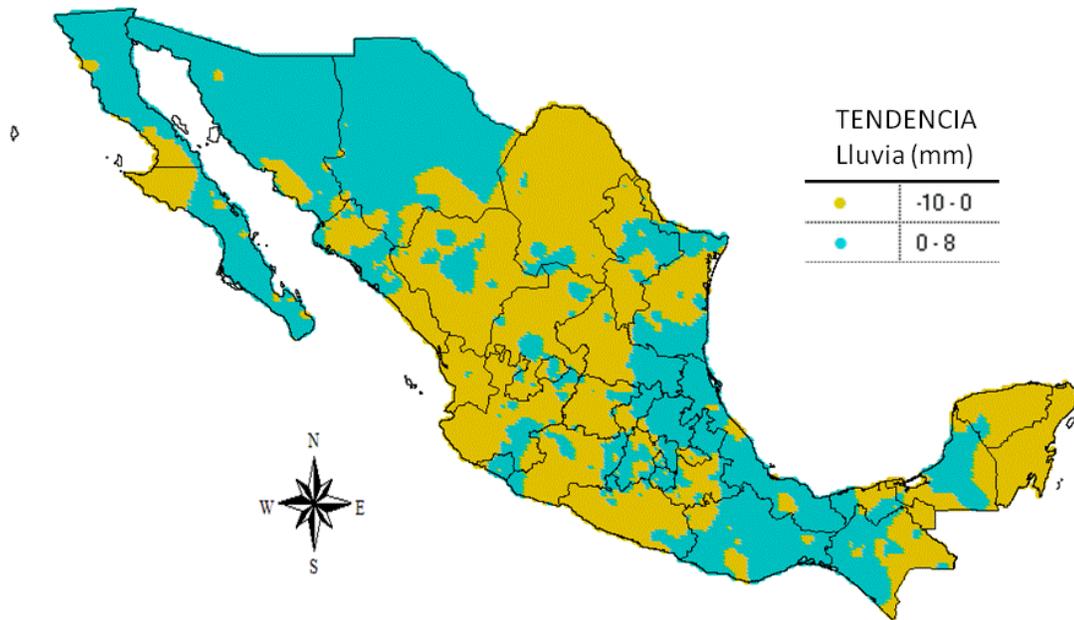
Las tendencias de la lluvia para el mes de JULIO, muestra que el 91% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -12 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 9% del territorio con valores entre 0 y +7 mm, y se localiza en pequeñas porciones de los estados de Veracruz, Oaxaca, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Hidalgo, San Luis Potosí, Tamaulipas, Coahuila, Chihuahua, Sonora, Península de Baja California, Sinaloa, Nayarit, Jalisco,

Michoacán, Colima, Puebla y Guerrero. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 83**).



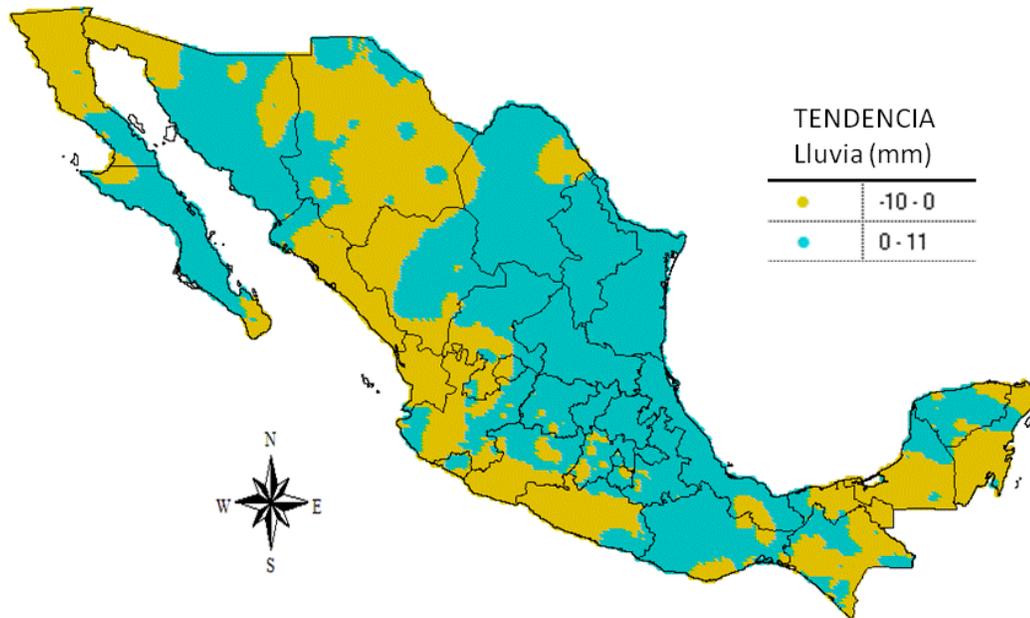
**Figura 83.** Tendencias de la lluvia para el mes de JULIO (1950-2008).

Las tendencias de la lluvia para el mes de AGOSTO, muestra que el 49% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -10 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 51% del territorio con valores entre 0 y +8 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Península de Baja California, Veracruz, Hidalgo, Colima, Querétaro, México, Distrito Federal y Oaxaca, así como en pequeñas porciones en los estados de Yucatán, Campeche, Chiapas, Tabasco, Puebla, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Tlaxcala, Guanajuato, Zacatecas, Durango, Nayarit, Aguascalientes, Coahuila y Nuevo León. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 84**).



**Figura 84.** Tendencias de la lluvia para el mes de AGOSTO (1950-2008).

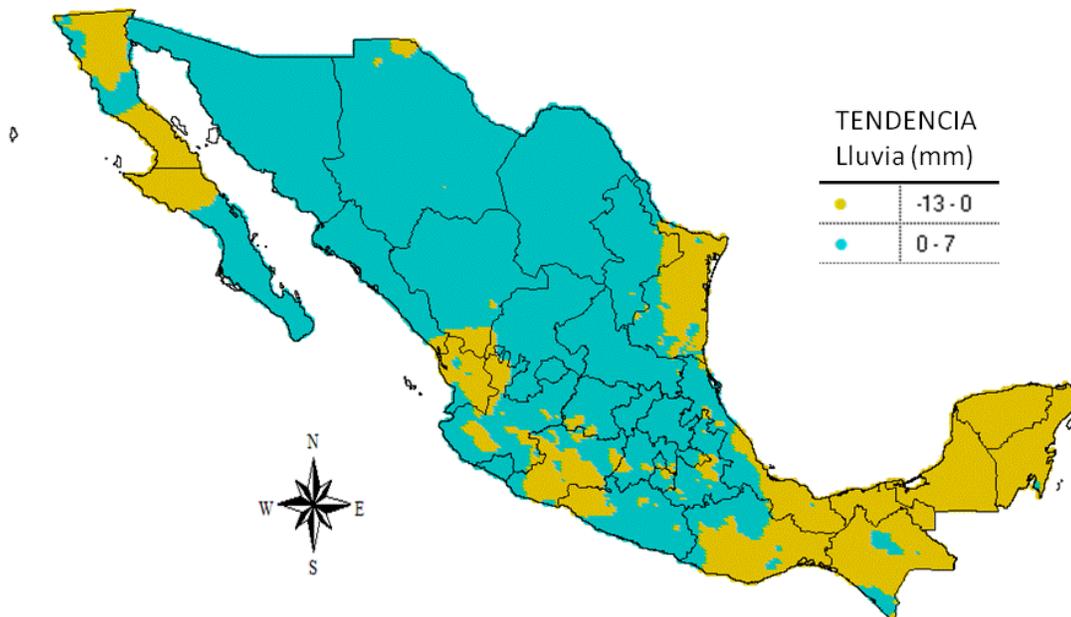
Las tendencias de la lluvia para el mes de SEPTIEMBRE, muestra que el 42% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -10 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 58% del territorio con valores entre 0 y 11 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Sonora, Península de Baja California, Coahuila,



**Figura 85.** Tendencias de la lluvia para el mes de SEPTIEMBRE (1950-2008).

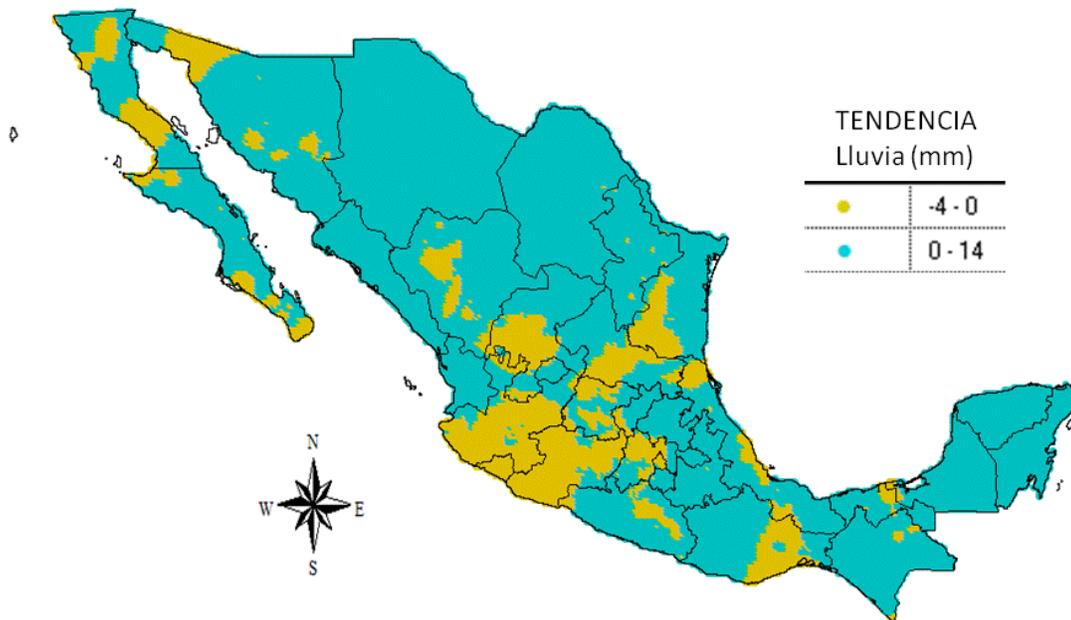
Tamaulipas, Nuevo León, Veracruz, San Luis Potosí, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Colima, Morelos, Distrito Federal, México, Puebla, Tlaxcala, Zacatecas, Durango y Oaxaca, así como en pequeñas porciones en los estados de Campeche, Chiapas, Tabasco, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Aguascalientes y Chihuahua. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 85**).

Las tendencias de la lluvia para el mes de OCTUBRE, muestra que el 29% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -13 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 71% del territorio con valores entre 0 y 7 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Colima, Morelos, Distrito Federal, México, Puebla, Tlaxcala, Zacatecas, Durango, Jalisco, Colima y Guerrero, así como en pequeñas porciones en los estados de Chiapas, Tabasco, Oaxaca, Veracruz, Nayarit, Michoacán, Tamaulipas y Península de Baja California. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 86**).



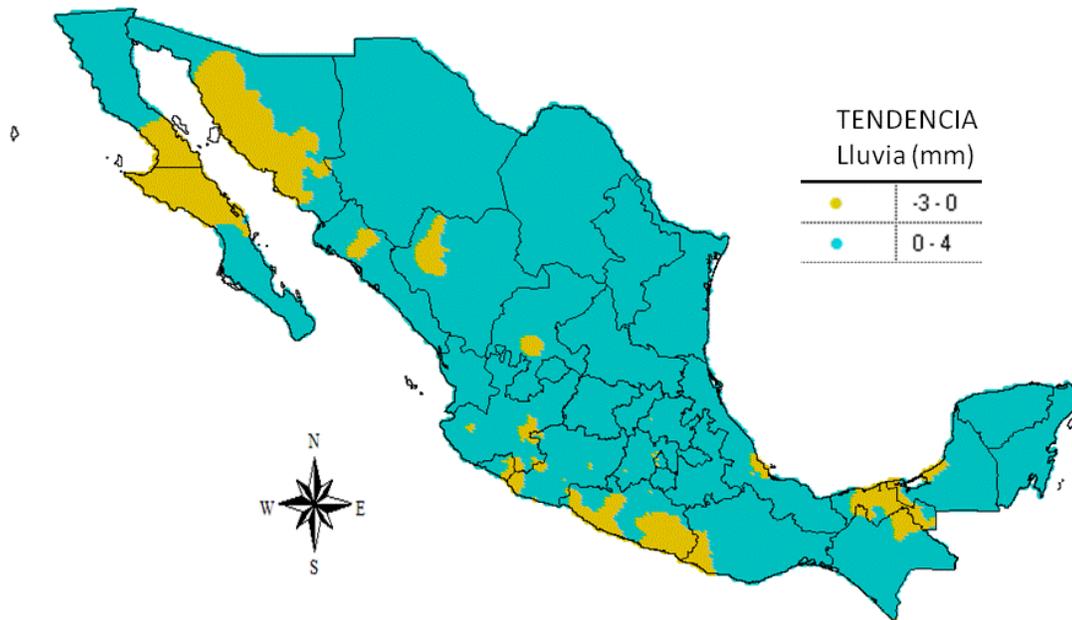
**Figura 86.** Tendencias de la lluvia para el mes de OCTUBRE (1950-2008).

Las tendencias de la lluvia para el mes de NOVIEMBRE, muestra que el 18% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -4 y 0 mm. Las tendencias positivas cubren el 82% del territorio con valores entre 0 y 14 mm, y se localiza en una gran parte de los estados de Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Península de Baja California, Sinaloa, Nayarit, Durango, Aguascalientes, Tamaulipas, San Luis Potosí, Hidalgo, Querétaro, Morelos, México, Puebla, Tlaxcala, Zacatecas, Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Chiapas y la Península de Yucatán, así como en pequeñas porciones en los estados de Michoacán, Jalisco y Guanajuato. El resto de los estados presenta una tendencia negativa (**Figura 87**).



**Figura 87.** Tendencias de la lluvia para el mes de NOVIEMBRE (1950-2008).

Las tendencias de la lluvia para el mes de DICIEMBRE, muestra que el 12% del país tiene una tendencia negativa con valores entre -3 y 0 mm, y se localiza en pequeñas porciones en los estados de Michoacán, Jalisco, Oaxaca, Guerrero, Tabasco, Campeche, Veracruz, Zacatecas, Durango, Sinaloa, Sonora, Península de Baja California y Colima. El 88% del territorio nacional restante presenta una tendencia positiva (**Figura 88**).



**Figura 88.** Tendencias de la lluvia para el mes de DICIEMBRE (1950-2008).

#### **4.4. Caso de estudio: Análisis del comportamiento de la lluvia en la inundación en Tabasco y Chiapas octubre 2007**

La intensa lluvia provocado por el Frente Frío No. IV ocurrido a partir del día 28 de Octubre y los primeros 5 días de Noviembre del año 2007, provocaron las inundaciones en Tabasco, además de los deslaves en el poblado de Juan de Grijalva en el municipio de Ostucán, Chiapas. Esto propició la idea de analizar datos históricos de lluvia sobre la región, y comparar los datos con la cantidad de lluvia que se presentó. Además se utilizaron técnicas de percepción remota para observar otras variables que pudieron contribuir en la inundación.

Bajo esta perspectiva, se analizó la base de datos MALLA-SIG y fueron procesados en un formato de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Los datos de lluvia analizados sobre el área de estudio fueron sobre puestos a una imagen LANDSAT y poder observar las condiciones de deforestación en forma visual. Se sobrepuso la información de lluvia para identificar la región donde ocurrió la mayor concentración de lluvia en conjunto con las condiciones topográficas. El análisis estadístico de los datos de lluvia en conjunto con la

delimitación de los valores de lluvia que ocurrieron durante el evento, permitió conocer los valores máximos excedidos considerando la anomalía de lluvia. Los resultados mostraron que la lluvia ocurrida sobre la zona provocó la inundación dado que fue 10 veces más de lo que normalmente ocurre con la lluvia acumulada en el mes de Octubre, y superó los 57 años de análisis de la base de datos. Además, la cantidad de lluvia acumulada sobre la zona de estudio corresponde a un 25% del total acumulado en un año, lo que provocó además, una alta concentración de humedad y conllevó al arrastre de sedimentos sobre las cauces de los ríos, reduciendo la capacidad de carga y provocando las inundaciones. Además, las zonas donde se presentaron los deslaves, presentan un cambio de uso del suelo en donde la vegetación primaria fue sustituida por agricultura, y por lo tanto los niveles de deforestación fue un factor importante en las inundaciones de Tabasco y Chiapas.

Los datos fueron procesados en programación "C", y su integración y análisis fue realizado a través del sistema de información geográfica ARC-VIEW Ver. 3.2. Esto permitió sobreponer datos de ríos, cuerpos de agua, imágenes de satélite, y apoyar el proceso de validación de la base de datos lluvia, mayor información relacionada con la aplicación del análisis de lluvia en este periodo y región se presenta en el artículo de investigación desarrollado en esta investigación que se adjunta en el **ANEXO C**.

Este caso de estudio fue muy ilustrativo de cómo las técnicas de SIG aplicadas al análisis simultáneo de distintas variables ambientales posibilitó: a) la integración simultanea de datos orográficos, poblacionales y de lluvia de la región; b) la descripción del patrón espacio temporal de lluvias asociadas al evento de inundación en la región de Chiapas y Tabasco y c) la identificación de zonas susceptibles de riesgo futuro de inundación a través de la construcción de mapas espaciales. Este tipo de información será de gran utilidad en el futuro, dado que deja información de las características actuales de una región que debe ser atendida en forma prioritaria por las autoridades correspondientes.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La reconstrucción histórica y perspectivas del régimen de lluvias tiene un gran valor en distintos estudios de la investigación científica y una amplia aplicación en diversos sectores de la sociedad, debido a que: a) proporciona información crítica para el uso y manejo de los recursos hídricos; b) es una fuente de elementos y argumentos para la toma de decisiones relacionadas con la agricultura, el sector hidroeléctrico, de protección civil entre otros; c) se constituye en la base de los planes de emergencia y de manejo de recursos tanto en sectores privados como gubernamentales (Silva et al., 2007).

El primer conjunto de resultados permitió la construcción de una base de datos de lluvia MALLA – SIG confiable y consistente que a su vez apoyo la caracterización del comportamiento y distribución espacio-temporal de la lluvia en México para el periodo 1950-2008. Dada la situación que implica poseer una base consistente en el espacio y en el tiempo, esta nueva base de datos de lluvia permitió subsanar la inconsistencia, irregularidad y datos perdidos que poseen la base oficial de datos climatológicos (CLICOM) del Servicio Meteorológico Nacional, y estimar datos interpolados de lluvia en zonas donde no se poseían registros de lluvia. Es de importante apoyo a diferentes usuarios del SMN, dado que actualmente pueden entender y manipular los datos de la climatología de lluvia con base a los mapas diarios de lluvia interpolados y bajo un sistema de georeferenciación, por supuesto de acuerdo a sus recursos disponibles en el manejo de los sistemas de información geográfica.

Es importante mencionar que se generaron los 365 archivos diarios de lluvia en los 59 años analizados, dando un total de 21,535 archivos que constituyen la nueva base de datos MALLA-SIG. Los resultados se muestran en forma gráfica y cuantitativa considerando que la climatología del país se construyó en formato SHAPE también. Lo importante de haber generado esta información, es que los diferentes usuarios que requieren la información pueden adquirirla y formarse una idea del comportamiento espacio temporal de la lluvia. Los

resultados han sido integrados en un servidor de mapas que actualmente se está implementando en la Coordinación del Servicio Meteorológico Nacional, y podrán ser analizados en línea a través de internet.

El problema de la escasez de registros en México, hacia muy difícil por no decir imposible la caracterización detallada en intervalos horarios o de minutos, aunado a esto el despliegue de los sistemas automatizados es muy reciente; y por esta razón la escala temporal del presente trabajo fue utilizando datos diarios. Esto permitió obtener calcular la climatología del país en forma mensual y anual, así como determinar los valores de lluvias máximas diarias en cada año de la serie analizada de 59 años (1950-2008), y calcular los mapas de periodos de retorno.

Para el caso de los escenarios, se puede discutir que las lluvias máximas extremas dentro del contexto del “Cambio Climático Global”, los eventos extremos es uno de los aspectos más debatidos tanto en sus características (Gajic-Capka, 1991; Miroslava, 1991; Capka y Gajic-Capka, 1992, Nobilis et al., 1991; Svensson y Berndtsson, 1996; Loukas y Quick, 1996; Kieffer y Bois, 1997; White et al., 1997; Bradley, 1998; Pagliara et al., 1998, McGuffie et al., 1999; Abbs, 1999), como en la evaluación de sus consecuencias (Gallart, 1995; Wainwright, 1996; Mulligan, 1998; Pagliara et al., 1998; Puigdefábregas y Mendizábal, 1998; Nyberg y Rapp, 1998; De Luís et al., 2000). Sin embargo, en el análisis de la distribución de los sucesos extremos en el territorio nacional, y especialmente en las zonas costeras, debe considerarse por un lado el gran efecto que tiene el relieve topográfico local en la distribución de las lluvias y la elevada frecuencia de procesos convectivos, los cuales generan fuertes lluvias sobre los que la oposición de la topografía acentúa el mecanismo de desarrollo (Camarasa, 1993; Martín-Vide, 1994). Esto se comprueba sobre el comportamiento anual de las tendencias positivas de las lluvias en México, principalmente sobre las Sierra Madre Oriental.

Por otra parte, el entendimiento de las variaciones estacionales, los cambios interanual, los patrones de distribución espacio temporal, la aparición de anomalías o similitudes interanuales es un tema en continuo e intenso debate

dada la relevancia que tiene el manejo de recursos hídricos con el desarrollo de las regiones. Cuando analizamos los resultados de la climatología mensual para el país, se pudo identificar al mes de septiembre como el más lluvioso con una lámina de lluvia promedio de 138.85 mm en donde el municipio de Tapachula, Chiapas presentó la mayor concentración de lluvia con 681.46 mm. El mes más seco corresponde al mes de Marzo con una lámina de lluvia promedio de 14.07 mm, en donde el municipio que alcanzó la mayor humedad fue Ixtapangajoyá, Chiapas con 129.41 mm. Podemos concluir que el estado de Chiapas en épocas de los meses más seco y húmedo es el estado donde existe la mayor concentración de lluvia. Además, la relación entre el mes más húmedo y el más seco es 48 veces más la cantidad lluvia entre uno y otro mes.

Por otra parte, si analizamos que las zonas más húmedas se localizan en la porción sureste del país, implica resaltar que las demandas por uso son diferentes en el norte, centro y sur del país. La mayor concentración de la población se localiza en el centro del país con casi el 30% de la población total del país, y constituye más del 40% del producto interno bruto del país. La climatología anual de la lluvia, muestra que la mayor concentración de humedad se registra en la porción sureste del país, siendo los estados de Chiapas y Tabasco los más húmedos. La climatología de lluvia anual es de 755.57 mm. La concentración de lluvia máxima se registró en el municipio de Tapachula, Chiapas con 3873.60 mm. La zona más seca del país corresponde al municipio de Mexicali, Baja California con una lámina de lluvia anualizada de 60.61 mm. La relación entre la zona más seca y la más húmeda es 64 veces más, y con respecto a la población, la relación es 2 veces más en Mexicali.

Los resultados de las tendencias señalan que el 55% del territorio nacional posee una tendencia negativa, y el 45% restante positiva. La zona de mayor alerta se localiza sobre la zona centro del país, y es por el hecho que aquí se concentra cerca del 30% de la población total del país y presenta una tendencia negativa del régimen de lluvia. Solamente hay que recordar que actualmente el Distrito Federal

abastece a un 20% de la población del sistema Cutzamala comprendida por las presas Villa Victoria y Valle de Bravo en el estado de México, así como la presa El Bosque localizada en el estado de Michoacán, y cuya localización presentan tendencias negativas de la lluvia. Esto va en contra de una población que crece año con año.

Por otro lado, existe un alto riesgo de incrementarse las inundaciones en los estados de Tabasco y Chiapas, y es por el hecho de observar una tendencia positiva de las lluvias sobre la Sierra Alta de Chiapas, donde se concentra la mayor humedad del país y escurre aguas abajo sobre las costas de Chiapas y Tabasco. Podemos concluir que los sistemas meteorológicos que impactan la porción oriental del país, han sido de mayor intensidad, o bien, el aporte de humedad ha sido mayor sobre esta zona. La porción occidental podemos mencionar que los sistemas meteorológicos han sido de menor intensidad, o bien, asociarlo a una menor presencia de humedad que provoca lluvias con menor frecuencia.

La estación de **invierno** comprendida por los meses de enero, febrero y marzo, es la más seca con el 7.45% del total de la lluvia anual, y el análisis de su tendencia identificó al municipio de Cuquío, Jalisco como la zona con la tendencia negativa más significativa en el país con una razón de cambio anualizada de -17.58 mm. La zona con la tendencia positiva más significativa ocurre en el municipio de Tacotalpa, Tabasco con una razón de cambio anualizada de 14.69 mm. Se observa que la zona que cubre el sistema Cutzamala y la zona centro, así como la sierra alta de Chiapas presentan tendencias positivas. Además, la presencia de los sistemas invernales como los frentes fríos, han impactado a los estados del Norte, Centro y Sur del país, ya que las tendencias positivas se presentan en gran parte de los estados de Nuevo León, Coahuila, y Baja California Sur, así como pequeñas porciones de los estados de Yucatán, Campeche, Chiapas, Tabasco, Oaxaca, Guerrero, México, Distrito Federal, Puebla, Tlaxcala,

Tamaulipas y Sonora. Se puede concluir que los sistemas meteorológicos invernales han sido de mayor magnitud con la presencia de las lluvias.

La estación de **primavera** representa una climatología de lluvia acumulada anual del 21.34%, y el análisis de la tendencia de la lluvia identificó al municipio de Tapachula, Chiapas como la zona con la tendencia negativa más significativa con una razón de cambio anualizada de -19.73 mm, así como al municipio de Villa Comaltitlán, Chiapas con la tendencia positiva más significativa con una razón de cambio anualizada de 9.59 mm. Se puede concluir que el impacto de los sistemas invernales afectó más a los estados localizados en la porción Noroeste del país, ya que la tendencia positiva de la lluvia se observa sobre los estados de Sonora, Chihuahua, Baja California, Durango y Zacatecas. Los estados con una tendencia negativa en forma más evidente se observa en Tabasco, Campeche, Jalisco, Michoacán, Nuevo León y Colima.

Considerando que la estación más húmeda ocurre en la estación de **verano** (julio-agosto-septiembre), con una climatología de lluvia que representa el 54.4% de la lámina de lluvia acumulada anual en el país, fue importante observar el comportamiento de las tendencias de las lluvias. Se pudo determinar que la zona con la tendencia negativa más significativa en el país ocurre en el municipio de Palenque, Chiapas con una razón de cambio anualizada de -22.43 mm, y la zona con la tendencia positiva más significativa ocurre en el municipio de San Juan Bautista Valle Nacional, Oaxaca con una razón de cambio anualizada de 21.06 mm. Los estados que presentaron tendencias positivas de las lluvias en su mayor parte fueron los en la porción oriental del país; Tamaulipas, Nuevo León, Veracruz, Tlaxcala, Hidalgo, San Luis Potosí y Oaxaca. El resto de los estados presentaron tendencia negativa. Se puede observar también que las tendencias positivas de la lluvia ocurren en la porción oriental del país, afectando principalmente a los estados de Veracruz, Tamaulipas, Nuevo León, y la Sierra Alta de Chiapas. Así como pequeñas porciones de los estados de Hidalgo, Puebla, Oaxaca, Coahuila, Sonora y Campeche.

La climatología de lluvia para la estación de **otoño** representa el 54.4% de la lámina de lluvia acumulada anual en el país, y las tendencias positivas de la lluvia existe en el 85% del territorio nacional, lo que permite establecer que la presencia de los sistemas meteorológicos que afectan al país durante esta época (octubre a diciembre), han sido de mayor intensidad, o bien de mayor frecuencia. Se puede mencionar lo ocurrido en octubre del 2005 y el 2007 en las inundaciones ocurridas en los estados de Chiapas y Tabasco, donde la presencia de sistemas tropicales y frentes fríos han sido los responsables. Este tipo de sistemas afectan al país desde el norte hasta la porción sureste de México.

Además durante la estación de otoño, la zona con la tendencia negativa más significativa ocurre en el municipio de Matías Romero, Oaxaca con una razón de cambio anualizada de -14.31 mm, y la zona con la tendencia positiva más significativa ocurre en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, con una razón de cambio anualizada de 13.76 mm. Los estados que presentaron tendencias negativas en pequeñas porciones fueron Tabasco, Campeche, Oaxaca, Veracruz, Tamaulipas, Michoacán y Jalisco. El resto de los estados presentaron tendencias positivas.

Los resultados del análisis de las tendencias de lluvia mensual, permitió determinar al mes con tendencia negativa de mayor significancia, y corresponde al mes de julio con una cobertura del 91% del territorio nacional. Los meses con tendencia positiva de mayor significancia son diciembre y noviembre, ya que cubren el 88% y el 82% del territorio nacional respectivamente.

Los meses que cubren al territorio nacional en más del 50% con una tendencia negativa son enero, febrero, marzo, abril, y julio. Lo que quiere decir que estos meses la cantidad de lluvia acumulada en forma mensual tiende a disminuir. Por otra parte, los meses con más del 50% con una tendencia positiva son mayo, junio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, e implica decir que la lámina de lluvia acumulada en forma mensual tiende a incrementarse.

En conclusión, los meses más secos tienden a ser más secos, y los meses con más lluvia tienden a presentar un incremento en la cantidad de lluvia registrada. De esto se separa al mes de Julio que tiende a ser más seco (considerado de los más húmedos), y los meses de noviembre y diciembre que tienden a ser más húmedos (considerados de los más secos).

En el caso de los valores máximos extremos de lluvia, y para un periodo de retorno de 59 años en el territorio nacional, se identificó que el valor mínimo ocurrió en Chihuahua, Chihuahua el 14 de septiembre del 1961 con un valor de 30.51 mm, y el máximo se localizó en el municipio de Centla, Tabasco con un valor de 697 mm ocurrido el 24 de octubre de 1955. Para valores de lluvia máxima superiores o iguales a los 500 mm se observan en los estados de Tabasco, Chiapas, Veracruz, Puebla, Jalisco, Sinaloa, Sonora y Chihuahua.

Esto no significa que deban de pasar 59 años para provocar una inundación como las provocadas en la Costa de Chiapas por una perturbación tropical en octubre del 2005, dado que las lluvias registradas en ese entonces fueron menores a los 300 mm. Pese a lo elevado de estas predicciones, existen ejemplos recientes que demuestran esta posibilidad, como los 250 mm/24 h, caídos en la zona de la Costa de Chiapas en Octubre del 2007. En este sentido, la metodología desarrollada en el presente trabajo parece mostrarse como una buena alternativa de establecer escenarios de lluvia. Su sencillez matemática y la posibilidad de trabajar con series de tiempo seleccionadas en función de cuál sea el objetivo del estudio pueden convertirla en una herramienta de gran utilidad. En nuestro caso particular, al menos los resultados se manifestaron óptimos en los diferentes escenarios climáticos y periodos de retorno considerados.

En consecuencia, se observa que los estados costeros al Golfo de México y Océano Pacífico son los más vulnerables a la presencia de las lluvias máximas extremas, y está asociado a la presencia de sistemas meteorológicos extremos como los huracanes, frentes fríos, Nortes y la actividad de ondas tropicales. Los estados más afectados por estos sistemas son por el lado del Golfo de México;

Nuevo León, Tamaulipas, Veracruz, San Luís Potosí, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo y Chiapas, y por el Océano Pacífico los estados de Oaxaca, Guerrero, Michoacán Jalisco, Colima, Nayarit, Sinaloa y Baja California Sur.

Luego entonces si consideramos los resultados de las tendencias y las lluvias máximas extremas, se debe de recomendar a las autoridades responsables hagan un seguimiento continuo de monitoreo de las lluvias en donde se han presentado inundaciones y deslaves en México en los últimos años. Además se debe de evitar el crecimiento de la mancha urbana sobre zonas consideradas como cauces naturales de los ríos. Esto obedece al hecho que la información de escenarios climatológicos de lluvia como la conjunción de resultados de las tendencias de las lluvias y la presencia de lluvias máximas extremas y su correspondiente periodo de retorno, permitirá a las autoridades observar las zonas de mayor peligro a la población.

Por ejemplo, podemos mencionar que las tendencias de las lluvias están aumentando en zonas donde se han presentado desastres naturales por inundaciones, tal es el caso de las lluvias ocurridas en abril del 2004 en Piedras Negras, Coahuila, en donde el mapa de tendencias para el mes de abril, señala la misma área con una tendencia positiva. Por otra parte, si analizamos las inundaciones ocurridas en Tabasco y Chiapas en el 2005 y el 2007 ocurridas en el mes de octubre en ambos casos, podemos decir que las tendencias de las lluvias es negativo, pero en gran medida depende de la saturación de humedad de los suelos que ocurre en días anteriores. Si esto se considera, podemos decir que los meses previos a octubre presentan una tendencia positiva, y pueden ser los meses que sean factor clave para que ocurra una inundación sobre las costas de Chiapas y Tabasco. Además, la tendencia anual de la lluvia en la Sierra Alta de Chiapas es positiva, y se debe de considerar que los valores de lluvia máxima extrema del país ocurren en este lugar, y son provocados por la presencia de sistemas meteorológicos extremos como los huracanes y frentes fríos. Se debe de

mencionar que esta zona es la más húmeda del país debido a la convergencia de los vientos con humedad que provienen del Golfo de México, El mar del Caribe, y del Istmo de Tehuantepec.

En el caso del Centro de México, las tendencias de lluvia anual permiten establecer que los estados de México, Distrito Federal, Morelos y Michoacán presentan tendencias negativas de lluvia, motivo por el cual se deben de tomar las medidas necesarias para el abastecimiento de agua en la zona más poblada de México donde se concentra casi el 30% de la población nacional. Además, debemos de resaltar la situación que actualmente se vive en la Zona Metropolitana del Valle de México, en donde la escases de agua ha afectado a un 25% de la población, y dependen del abastecimiento que proporciona el sistema Cutzamala, el cual es un sistema hidráulico de almacenamiento, conducción, potabilización de agua dulce para la población e industria del distrito Federal y el estado de México. Las principales presas que integran al sistema Cutzamala son Valle de Bravo, Villa Victoria y el Bosque, y contribuyen con el 25% del total del consumo urbano de agua en la Zona Metropolitana del Valle de México ( $64 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Es importante considerar que la proyección de la población en el Valle de México al 2020 es de 5 millones más de personas, lo que implica mayor demanda de los recursos hídricos los cuales tienden a disminuir. Esto provoca implementar nuevas alternativas de abastecimiento que permitan el desarrollo y crecimiento a una de las ciudades más grandes del mundo, y en donde se concentra más del 40% del producto interno bruto. Se debe de mencionar que en 1950 la disponibilidad per cápita por habitante era de  $18,000 \text{ m}^3$ , y en el 2008 fue de casi  $4,000 \text{ m}^3$  por habitante. En los próximos 5 años se tendrá una disponibilidad de  $1,000 \text{ m}^3$ .

Finalmente podemos concluir que de acuerdo al análisis de las tendencias NEGATIVAS abarcaron el 55% del territorio nacional, y el 45% tuvo una tendencia POSITIVA. Si estos valores se sobreponen a los valores de lluvia máximas extremas, podemos decir que la estación de INVIERNO abarcó el 6% del territorio nacional, mientras que la estación de VERANO abarcó el 60%. Si se

proporcionará una clasificación en función de la cobertura sobre el país, la ocurrencia de lluvias máximas extremas y su impacto, podemos mencionar que la estación de VERANO es la más peligrosa, en segundo lugar la estación de OTOÑO, la tercera se considera la estación de PRIMAVERA, y la última por considerar es el INVIERNO. Si se considera una clasificación en función de las lluvias máximas extremas ocurridas, el primero sería la estación de VERANO, en segundo lugar la estación de OTOÑO, en tercer lugar la estación de INVIERNO, y finalmente la estación de PRIMAVERA.

Podemos mencionar que las lluvias intensas afectan el uso del suelo, y ocasiona importantes daños como la degradación de la estructura del suelo, inundaciones, daños a las zonas agrícolas del país, etc. Es importante mencionar que aún cuando se analizan las lluvias máximas ocurridas en 24 h, en ocasiones son más importantes las lluvias máximas en periodos de tiempo más cortos, por lo que se debe de analizar las lluvias en periodos de retorno más cortos.

También, es importante mencionar que estos resultados permiten apoyar las decisiones hidro-agrícolas del país, ya que se puede observar el comportamiento de las tendencias de las lluvias sobre las zonas agrícolas del país, e implica decir que la frontera agrícola en el caso de la agricultura de temporal, este siendo afectada por la tendencias negativas de las lluvias, es decir, las zonas con cultivos de temporal las lluvias disminuyen, y en zonas donde no existen actividades agrícolas las lluvias están incrementando.

## 6. CONCLUSIONES

El estudio realizado en esta investigación se enfocó principalmente en el análisis espacio temporal del régimen de las lluvias en la Republica Mexicana en los últimos 59 años, con el propósito final de identificar similitudes y diferencias entre los distintos escenarios climatológicos de lluvia que se han presentado en esta región. Los resultados y los productos generados durante el desarrollo del trabajo permitieron cumplir con los objetivos de la tesis y probar la hipótesis de trabajo, así mismo proporcionaron evidencias que apoyan las siguientes conclusiones:

- a. El desarrollo de la base de datos de lluvia en formato SIG (MALLA-SIG), permitió procesar datos de lluvia en forma rápida, confiable y con mayor grado de resolución espacio temporal.
- b. La base MALLA-SIG mostro su aplicabilidad en:
  - i. La obtención de información de lluvia en zonas donde no existen estaciones de monitoreo del parámetro.
  - ii. La integración de información físico – ambiental en sistemas de información geográfica.
  - iii. La generación de escenarios climatológicos de lluvia que proporcionan elementos de toma de decisiones.
  - iv. La identificación de zonas de mayor riesgo hidrometeorológico
- c. El régimen espacio temporal de lluvias, en el periodo de estudio en la Republica Mexicana, se caracterizó por:
  - i. Dos periodos uno seco y otro húmedo asociados ambos con la variabilidad climática global y algunas ocasiones la relación se estableció con el fenómeno de El niño.
  - ii. Un mayor incremento de las tendencias de las lluvias en la zona oriental de México y un decremento en la zona occidental.

- iii. Climatológicamente el verano se tipifica como el periodo más húmedo del año, así como el invierno como el periodo más seco.
  - iv. Las lluvias máximas extremas con un periodo de retorno de 59 años se localizaron principalmente en las zonas costeras al Golfo de México y del Pacífico, identificándose los valores máximos en las regiones de Tabasco y Chiapas.
- d. Los escenarios de lluvia permitieron la identificar valores extremos máximos de eventos lluviosos en todo el país.
- e. Por último la información y productos generados en esta investigación proporcionan elementos e información de gran utilidad para diferentes subsectores sociales, productivos y federales como son: agricultura, sector hidroeléctrico, protección civil a quienes particularmente les permitiría establecer valores umbrales como alerta temprana ante una posible inundación o deslave.

## 7. PERSPECTIVAS FUTURAS y RECOMENDACIONES

Una pregunta que se deriva del trabajo se relaciona con los factores preponderantes en la variabilidad del patrón de lluvias en México; ¿los debidos a fenómenos naturales locales, regionales y globales? o ¿la influencia de las actividades antropogénicas?. Para dar respuesta a estas interrogaciones es necesaria la profundización del conocimiento en esta área, algunos estudios que pueden proporcionar elementos para dar respuesta son:

- a. Continuar con el análisis de las series de datos de lluvia generados por el sistema desarrollado, para optimizar los tiempos de respuesta y estar en posibilidad de proporcionar en un futuro información en tiempo real.
- b. Comparación de la base de datos histórica y los escenarios de lluvia generados a través de la base MALLA-GIS con otros procedimientos de evaluación de lluvia, hidroestimador o dendrocronología.

Por otra parte, es altamente recomendable difundir ampliamente entre la comunidad científica, académica, gubernamental y civil las bondades de contar con información relacionada con los escenarios de lluvia en México, para estimular la instrumentación de acciones y tomas de decisiones relacionadas con el manejo de recursos hídricos, desastres hidrometeorológicos y de continuidad de estudios relacionados con cambios en el clima fundamentadas en la información obtenida.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Abbs D.J. (1999). A numerical modeling study to investigate the assumptions used in the calculation of probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35: 785-796.
2. Aguilar E., Peterson T.C., Ramírez O.P., Frutos R., Retana J.A., Solera M., González S.I., Araujo R.M., Rosa S.A., Valle V.E., Brunet I.M., Aguilar L., Álvarez L., Bautista M., Castañón C., Herrera L., Ruano, E. Siani J.J., Obed F., Hernández O.G.I., Salgado J.E., Vázquez J.L., Baca M., Gutiérrez M., Centella C., Espinosa J., Martínez D., Olmedo B., Ojeda E.C.E., Haylock M., Núñez R., Benavides H., and Mayorga R. (2005), Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and Northern South America, 1961-2003, *Journal of Geophysical Research*, 110(D23107): 15.
3. Álvarez A. (2004). Sobre la Evaluación de Riesgo de Desastres Naturales y Vulnerabilidad de la Comunidad Utilizando Sistemas de Información Geográficos. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 5 (2): 101-105.
4. Barrul E. (1994). Apuntes de Análisis y Cálculo. Biopsychology.org.
5. Beck C., Grieser J., Rudolf B. (2005): A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000. – Climate status report 2004, 181–190, German Weather Service, Offenbach, Germany. Reprint available at <http://gpcc.dwd.de>.
6. Beck, U. (1999). *What Is Globalization?*. Cambridge: Polity Press.
7. Bernknopf R.L. (2005). Geospatial decision support systems for societal decision making. *Boletín Geológico y Minero*, 116 (4): 325-330.
8. Bradley A.A. (1998). Regional frequency analysis methods for evaluating changes in hydrologic extremes. *Water Resources Research*, 34: 741-750.

9. Brooks C.E.P. and Hunt T.M. (1930). The zonal distribution of rainfall over the earth. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, 3 (28): 139-158.
10. Camarasa A. (1993): La estructura interna de las tormentas mediterráneas. *Cuadernos Geografía*, 54:169–188.
11. Campos A.F.D. (2007). Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. Ed. Daniel Francisco Campos Aranda. pp: 90-98.
12. Capka B. and Gajic-Capka M. (1992). A case analysis of heavy rainfall causing flash floods. *Theoretical and Applied Climatology*, 45: 77-82.
13. Cavazos T. and Hastenrath S. (1990). “Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation”, *International Journal of Climatology*, 10: 377-386.
14. CENAPRED. (2003). Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en el año 2002
15. CENAPRED. (2008). Impacto Socioeconómico de los Principales DESASTRES Ocurridos en la República Mexicana en el año 2007.
16. Chow T. 1988. Hidrología Aplicada. Editorial. Mc Graw-Hill. pp: 65-72.
17. De Luís M., Raventós J., González-Hidalgo J.C., Sánchez J.R., Cortina J. (2000): Spatial analysis of rainfall trends: a case study in Valencia Region (E Spain). *International Journal of Climatology*, 20: 1451-1469.
18. Diaz H.F. and Markgraf V. (2000). El Niño and the Southern Oscillation. Multiscale Variability and Global and Regional Impacts, Cambridge University Press.
19. Dore M.H.I. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? *Environment International*, 31: 1167 – 1181.
20. EEA (European Environment Agency). (2005.) Vulnerability and adaptation to climate change in Europe, Briefing Technical report No 7/2005

21. Englehart P.J. and Douglas A.V. (2002). México's summer rainfall patterns: an analysis of regional modes and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera* 15: 147 – 164.
22. Freund J.E., Millar I. and Miller M. (2000). Estadística Matemática con Aplicaciones. Sexta Edición. Prentice Hall. pp: 360-378.
23. Gajic-Capka M. (1991): Short-term precipitation maxima in different precipitation climate zones of Croatia, Yugoslavia. *International Journal Climatololgy*, 11:677–687.
24. Gallart F. (1995). The relative geomorphic work affected by four processes in rainstorms: A conceptual approach to magnitude and frequency. *Catena*, 25: 353-364.
25. Gandin L.S. (1988): Complex quality control of meteorological observations. *Monthly Weather Review*, 116: 1137–1156.
26. García E.A. (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*. UNAM, 50: 67-76.
27. Gilbert R.O. (1988). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*, Van Nostrand Reinhold, New York.
28. Haagenson P.L. (1982). "Review and evaluation of methods for objective analysis of meteorological variables" *Papers in Meteorological Research*, 5 (2): 113-133.
29. Herath S., Ratnayake U. (2004). Monitoring rainfall trends to predict adverse impacts—a case study from Sri Lanka (1964–1993). *Global Environmental Change*, 14:71–79.
30. Hulme M., Osborn T.J. and Johns T.C. (1998). "Precipitation sensitivity to global warming: comparison of observations with HADCM2 simulations", *Geophysical Research Letters*, 25: 3379-3382.

31. Hurrell J.W. (1995). "Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation", *Science*, 296: 676-679.
32. Johnson G.T. (1982). "Climatological Interpolation Functions for Mesoscale Wind Fields". *Journal of Applied Meteorology*, 21(8): 1130-1136.
33. Jones P.D. and Hulme M. (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations *International Journal of Climatology*, 16: 361-377.
34. Kieffer A. and Bois P. (1997). Variability of the statistical characteristics of extreme rainfall values in the French Alps. *Revue des sciences de l'eau*, 10: 199-216.
35. Kirschbaum M.U.F, Guo L.B., Gifford R.M. (2008). Why does rainfall affect the trend in soil carbon after converting pastures to forests?. A possible explanation based on nitrogen dynamics. *Forest Ecology and Management*, 255: 2990–3000.
36. Klaus D. and Juaregui E. (1975). Variaciones seculares de la circulación general y su relación con la sequía en el N. de México. (Regional features of the atmospheric circulation and their relation to drought in North Mexico). *Ingeniería Hidráulica en México*, IV, 580 – 593.
37. Kruger A.C. (2006). Observed Trends In Daily Precipitation Indices In South Africa: 1910–2004. *International Journal of Climatology*, 26: 2275–2285.
38. Landa R., Magaña V., Neri C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático SEMARNAT-UNAM, México.
39. Loukas A. and Quick M.C. (1996). Spatial and temporal distribution of storm precipitation in southwestern British Columbia. *Journal of Hydrology*, 174: 37-56.

40. Maderey R. and Jimenez R. (2005). Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico. Instituto de Geografía, UNAM. Serie de Textos Universitarios, Num. 1. pp: 18-21.
41. Martín-Vide J. (1994). Precipitaciones: máximos diarios probables e irregularidad. En: Atlas climàtic de la Comunitat Valenciana. Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transports. Generalitat Valenciana, *Col.leció Territorio*, 4: 94-96.
42. McGuffie K., Henderson-Sellers A., Holbrook N., Kothavala Z., Balachova O. and Hoekstra J. (1999). Assessing simulations of daily temperature and precipitation variability with global climate models for present and enhanced greenhouse climates. *International Journal of Climatology*, 19: 1-26.
43. Méndez G.J., Návar Ch. J. de J., González R.H., Jurado Y.E. y Treviño E.J.G. (2007). "Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México", *Revista Ciencia UANL*, 2: 290-298.
44. Méndez G.J., Návar Ch.J. de J., González R.H. y Jurado Y.E. (2005). "Tendencias de precipitación, temperatura máxima y mínima de décadas recientes en México", *VII Congreso Mexicano de Recursos Forestales*, noviembre, Chihuahua, México.
45. Méndez J.G., Návar J.J. Ch. y González V.O. (2008). Análisis de tendencias de precipitación (1920-2004) en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 65: 38-55.
46. Miroslava U. (1991). The extreme value distribution of 5-min. rainfall data at Belgrade. *Theoretical and Applied Climatology*, 44: 223-228.
47. Monroe A. (1997). Bringing the Power of Knowledge to the Desktop. Risk and Insurrance. Risk Management & Online Resources Spotlight Report December 1, Horsham P.A. pp: 1-7.
48. Monsalve S.G. (2000). Hidrología en la Ingeniería. 2da. Edición. Ed. Alfaomega. México, D.F. pp: 87-90.

49. Mosiño P. and Morales. (1988). Los ciclones tropicales. El Niño y las lluvias en Tacubaya, (Tropical Cyclones. El Niño and rainfall in Tacubaya). *Geofísica Internacional* 27(1): 61 – 82.
50. Mulligan M. (1998). Modelling the geomorphological impact of climatic variability and extreme events in a semi-arid environment. *Geomorphology*, 24: 59-78.
51. Narisma G.T., Foley J.A., Licker R. and Ramankutty N. (2007). Abrupt changes in rainfall during the twentieth century. *Geophysical Research Letters*, 34: L06710, doi:10.1029/2006GL028628.
52. Nobilis F., Haiden T. and Kerschbaum M. (1991). Statistical considerations concerning probable maximum precipitation (PMP) in the alpine country of Austria. *Theoretical and Applied Climatology*, 44: 89-94.
53. Nyberg R. and Rapp A. 1998. Extreme erosional events and natural hazards in Scandinavian mountains. *Ambio*, 27: 292-299.
54. ONU. (2001). Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD) América Latina y el Caribe, Número 4, 2001
55. Pagliara S., Viti C., Gozzini B., Meneguzzo F. and Crisci A. (1998). Uncertainties and trends in extreme rainfall series in Tuscany, Italy: Effects on urban drainage networks design. *Water Science and Technology*, 37: 195-202.
56. Pavia E.G., Graef F. and Reyes J. (2006). PDO-ENSO effects in the climate of México. *Journal of Climate* 19: 6433 – 6438.
57. Pederson N., Jacoby G.C., D'Arrigo R. D., Cook E.R., and Buckley B.M. Dugarjav C., Mijiddorj R. (2001). Hydrometeorological Reconstructions for Northeastern Mongolia Derived from Tree Rings: 1651–1995. *Journal of Climate*, 14 (5): 872 -881.

58. PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). (2006). *Developing a Disaster Risk Profile for Maldives: Volume 1 Main Report*
59. Puigdefábregas J. and Mendizabal T. (1998). Perspectives on desertification: Western Mediterranean. *Journal of Arid Environments*, 39: 209-224.
60. Ropelewski C.F.; and Halpert M.S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño–Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115:1606–1626.
61. Rosengaus M. (1998). Efectos destructivos de los ciclones tropicales. Editorial, MAPFRE.
62. Rubin D.B. (1987). *Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys*. J. Wiley & Sons, New York.
63. Salas M.A.F. (2008). Assessing the variability of long-term Mexican instrumental records and the Enso modulating force. Thesis for degree of Doctor of Philosophy at the University of East Anglia.
64. Sarmiento J.F.; Sávio E.; Martins P.R. (1990). "Cálculo dos coeficientes de Thiessen em microcomputador". En Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay (6-10 Nov., 1990). V 2: 715-724.
65. Scofield R.A. and Kuligowski R.J. (2003). Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme precipitation events. *Wea. Forecasting*, 18: 1037-1051.
66. Silva V.B. S., Kousky V.E., Shi W., AND Higgins W.R. (2007). An Improved Gridded Historical Daily Precipitation Analysis for Brazil *Journal of Hydrometeorology* 8: 847 – 861.

67. Svensson C. and Berndtsson R. (1996). Characterization of extreme rainfall in an East Asian monsoon-climate catchment in the upper reaches of the Huai River, China. *International Journal of Climatology*, 16: 321-337.
68. Terán A. e Ibarra M. (2006). Impacto de la Deforestación en la Cuenca Alta de Chiapas. Reunión Nacional de Seguridad de Presas. Monterrey, N.L. Julio de 2006.
69. USDA (United States Department of Agriculture). (2007). California Freeze. California Farm Service Agency.
70. Vaes G.W., Berlamont P.J. (2002). 100 years of rainfall registration: are there trends?, *Water Science and Technology*, 45(2): 55-61.
71. Vakis R. (2006). Complementing Natural Disasters Management: The Role of Social Protección. The World Bank. SP Discussion Paper No. 0543. 20.
72. Wainwright J. (1996). Infiltration, runoff and erosion characteristics of agricultural land in extreme storm events, SE France. *Catena*, 26: 27-47.
73. White S., García-Ruiz J.M., Marti C., Valero B., Errea M.P. and Gómez-Villar A. (1997). The 1996 Biescas campsite disaster in the central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context. *Hydrological Processes*, 11: 1797-1812.
74. Xu K.-M., Wong T., Wielicki B.A., Parker L., and Eitzen Z.A. (2005): Statistical analyses of satellite cloud object data from CERES. Part I: Methodology and preliminary results of 1998 El Niño/2000 La Niña. *Journal of Climate*, 18: 2497-2514.
75. Zhang X., Zwiers F.W., Hegerl G.C., Lambert F.H., Gillett N.P., Solomon S., Stott P.A. and Nozawa T. (2007). Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature Letters* 448 doi:10.1038.
76. Zlatanova S. and Basta C. (2005). Geographical Information System (GIS) as a tool for Disaster Management (DM): a comparative study on the role of

GIS in the Dutch and the English decision-making procedures. Sustainable Urban Areas Research Centre, Research Proposal. EU Commission.

## ANEXOS

### ANEXO - A

1. El programa CREA\_GRD.C realiza la interpolación de los registros diarios de lluvia proporcionados por el sistema CLICOM.

**Forma de compilación : QCL /AM CREA\_GRD.C /F 7500**

```
#include <d:\qc25\include\conio.h>
#include <d:\qc25\include\string.h>
#include <d:\qc25\include\graph.h>
#include <d:\qc25\include\pgchart.h>
#include <d:\qc25\include\direct.h>
#include <d:\qc25\include\errno.h>
#include <d:\qc25\include\dos.h>
#include <d:\qc25\include\stdio.h>
#include <d:\qc25\include\math.h>
#include <d:\qc25\include\stdlib.h>
#include <d:\qc25\include\process.h>
#include <d:\qc25\include\fcntl.h>
#include <d:\qc25\include\io.h>
#include <d:\qc25\include\sys\types.h>
#include <d:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <d:\qc25\include\time.h>
```

```
char *filename;
int year2000;
```

```
void main(void)
{
```

```
char *zal;
char CadInic1[100], bandera;
unsigned int i;
```

```
char _month[10], _day[10], _year[10];
```

```
struct dosdate_t datepc;
struct dostime_t timepc;
struct find_t c_name;
```

```
_dos_getdate (&datepc);
if(datepc.month == 1)
strcpy(_month, "EN");
if(datepc.month == 2)
strcpy(_month, "FE");
if(datepc.month == 3)
strcpy(_month, "MZ");
if(datepc.month == 4)
strcpy(_month, "AB");
if(datepc.month == 5)
strcpy(_month, "MY");
if(datepc.month == 6)
strcpy(_month, "JU");
if(datepc.month == 7)
strcpy(_month, "JL");
if(datepc.month == 8)
strcpy(_month, "AG");
if(datepc.month == 9)
strcpy(_month, "SE");
if(datepc.month == 10)
strcpy(_month, "OC");
```

```

    if(datepc.month == 11)
        strcpy(_month,"NO");
    if(datepc.month == 12)
        strcpy(_month,"DI");

    if(datepc.day >= 10 )
        sprintf(_day,"%d",datepc.day);
    else
        sprintf(_day,"0%d",datepc.day);

if (datepc.year<2000)
{
    year2000=datepc.year-1900;
    sprintf(_year,"%d",year2000);
}
else
{
    year2000=datepc.year-2000;
    if(year2000 >= 10 )
        sprintf(_year,"%d",year2000);
    else
        sprintf(_year,"0%d",year2000);
}

strcpy(zal,"LL");
zal = strcat(zal, _day);
zal = strcat(zal, _month);
zal = strcat(zal, _year);
zal = strcat(zal, ".dat");
_chdrive(3);
chdir("\\lluvia\\datos");
strcpy(CadInic1,"GRID /ACTION=RANDOMGRID /grxcol=1 /grycol=2 /grzcol=4
/grdnglx=320 /grdngly=200 ");
strcat(CadInic1,zal);
printf("%s\n",CadInic1);
system(CadInic1);
/* for(i=5; i<=26; i++)
{
    bandera=(char)(i+64);
    if(_chdrive(i)==0)
    if(chdir("\\lluvia\\producto\\temp")==0)
        break;
}*/
zal[9]='G';
zal[10]='R';
zal[11]='D';
printf("%s",zal);
_chdrive(3);
chdir("\\admon");
}      /* Termina PROGRAMA GREA_GRD.C */

```

## 2. El programa GEOREF1.C georeferencia los datos de la interpolación obtenida en CREA\_GRD.C.

Forma de compilación : QCL /AM GEOREF1.C /F 7500

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>

long offset1, offset, offset3;
double datos[6];
FILE *archivo3, *archivo1,*archivo2;
unsigned char pixels[640];
int i,j,k, np, n,m,out=0,
    x_repeticion, y_repeticion,
    nx, ny,ban = 1;
    datos_ent[2];

int ajus_col=0,ajus_lin=1, dia, year2000;
char _month[5],_day[5], _year[10], *zal;
    struct dosdate_t datepc;
    struct dostime_t timepc;
float z, z1, calc;
char *typo, salida;
char arch11[15], arch22[15], arch33[15];

main()

{
for(i=0; i<15; i++){
    arch11[i]=0;
    arch22[i]=0;
    arch33[i]=0;
}
    _dos_getdate(&datepc);
    if(datepc.month == 1){
        strcpy(_month,"EN");
    }
    if(datepc.month == 2){
        strcpy(_month,"FE");
    }
    if(datepc.month == 3){
        strcpy(_month,"MZ");
    }
    if(datepc.month == 4){
        strcpy(_month,"AB");
    }
    if(datepc.month == 5){
        strcpy(_month,"MY");
    }
    if(datepc.month == 6){
        strcpy(_month,"JU");
    }
    if(datepc.month == 7){
        strcpy(_month,"JL");
    }
    if(datepc.month == 8){
        strcpy(_month,"AG");
    }
    if(datepc.month == 9){
```

```

strcpy(_month,"SE");
}

if(datepc.month == 10){
strcpy(_month,"OC");
}
if(datepc.month == 11){
strcpy(_month,"NO");
}
if(datepc.month == 12){
strcpy(_month,"DI");
}
dia=datepc.day;
if(dia >= 10 )
sprintf(_day,"%d",dia);
else
sprintf(_day,"0%d",dia);
if (datepc.year<2000)
{
year2000=datepc.year-1900;
sprintf(_year,"%d",year2000);
}
else
{
year2000=datepc.year-2000;
if(year2000 >= 10 )
sprintf(_year,"%d",year2000);
else
sprintf(_year,"0%d",year2000);
}
strcpy(zal,"LL");
zal = strcat(zal, _day);
zal = strcat(zal,_month);
zal = strcat(zal, _year);

strcpy(arch11, zal);
strcat(arch11, ".grd");
strcpy(arch33, arch11);
strcpy(&arch33[8], " ");
strcpy(&arch33[8], ".iso");

strcpy(arch22, "mex_bln.img");
_chdrive(3);
chdir("\\lluvia\\datos");
if((archivo1=fopen(arch11, "rb"))==NULL){
printf("No se encontro el archivo: %s",arch11);
exit(0);
}
if((archivo2=fopen(arch22, "rb"))==NULL){
printf("No se encontro el archivo: %s",arch22);

exit(0);
}

if((archivo3=fopen(arch33, "wb"))==NULL){
printf("Error al crear el archivo: %s",arch33);

exit(0);
}

for(i=0; i<640; i++) pixels[i]=0;
typo = malloc(10);
fread(typo, 4, 1, archivo1);
fwrite(typo, 4, 1, archivo3);
fread(datos_ent, 2, 2, archivo1);
fwrite(datos_ent, 2, 2, archivo3);
nx = datos_ent[0];
ny = datos_ent[1];
printf("%d %d\n",nx,ny);
x_repeticion = 640/nx; /*640*/

```

```

y_repeticion = 480/ny;

fread(datos, sizeof(double), 6, archivo1);
fwrite(datos, sizeof(double), 6, archivo3);
  for(m=0; m<(ny+ajus_lin); m++)
  {
for(n=0; n<(nx+ajus_col); n++)
  {
    if((m<ajus_lin))
    {
      z=0.0;
    }
    else
    {

if(n<nx)
  {
    fread(&z,sizeof(float) , 1, archivo1);
  }
  else
  z=0.0;

    }

    if( (n>(ajus_col-1)) && (m<ny))
    {
      fread(&z1,sizeof(float) , 1, archivo2);
/*      printf(" %5f ",z1);*/
    }
    else
    z1=0.0;

if(z1==10.0)
  {
    calc=z;
  }

if(z1==255.0)
  {
    calc=1.70141e38; /*el valor anterior era 1.70141e38*/
    /* z1;*/
  }

    if( (n> (ajus_col-1)) && (m<ny))
    {
      fwrite(&calc, sizeof(float), 1, archivo3);
    }
  }
  printf("m=%d\n",m);
}
fclose(archivo1);
fclose(archivo2);
fclose(archivo3);

_chdrive(3);
chdir("\\admon");

}/* Termina PROGRAMA GEOREF.C */

```

3. El programa ISO.C, permite generar un archive raster de 640x480 y rotado 180° para poder leer los pixels de NW a SE. Esto es por el hecho de que el programa CREA\_GRD lo genera en una forma que los pixels se leen en una posición de SE a NW.

Forma de compilación : QCL /AM ISO.C /F 7500

```
#include <direct.h>
#include <errno.h>
#include <dos.h>
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <fcntl.h>
#include <errno.h>
#include <io.h>
#include <sys\types.h>
#include <sys\stat.h>
#include <conio.h>
#include <process.h>
#include <string.h>
#include <time.h>
```

```
FILE *fpar, *fpw,*fpwl;
char valor;
char fecha[783], fechal;
unsigned int i, dia, row, col;
char _month[5],_day[5], yearr[6];
    struct dosdate_t datepc;
    struct dostime_t timepc;
    struct find_t c_name;
```

```
void main(void)
{
```

```
char *zal;
```

```
    _dos_getdate(&datepc);

    switch(datepc.month)
    {
    case 1:
        strcpy(_month,"EN");
        break;
    case 2:
        strcpy(_month,"FE");
        break;
    case 3:
        strcpy(_month,"MZ");
        break;
    case 4:
        strcpy(_month,"AB");
        break;
    case 5:
        strcpy(_month,"MY");
        break;
    case 6:
        strcpy(_month,"JU");
        break;
    case 7:
        strcpy(_month,"JL");
```

```

break;
case 8:
strcpy(_month,"AG");
break;
case 9:
strcpy(_month,"SE");
break;
case 10:
strcpy(_month,"OC");
break;
case 11:
strcpy(_month,"NO");
break;
case 12:
strcpy(_month,"DI");
}

dia=datepc.day;
if(dia >= 10 )
    sprintf(_day,"%d",dia);
else
    sprintf(_day,"0%d",dia);

itoa(datepc.year-2000, yearr, 10);
if(datepc.year<2000)
    sprintf(yearr,"%d",datepc.year-1900);
else
    sprintf(yearr,"0%d",datepc.year-2000);

strcpy(zal,"lluvia");

/*zal = strcat(zal, _day);
zal = strcat(zal,_month);
zal = strcat(zal, yearr);*/
zal = strcat(zal, ".BIN");

_chdrive(3);
chdir("\\lluvia\\datos");

/* INICIA LA GENERACION DEL ARCHIVO TOPO.CMD */
if((_dos_findfirst(zal,_A_SUBDIR,&c_name)) == 0)
{
    if ( (fpar=fopen(zal,"rb")) == NULL)
    {
        printf("No se pudo abrir el archivo %s\n", zal);
        _chdrive(3);
        chdir("\\admon");
        exit(0);
    }
    if ( (fpw=fopen("malla.img","wb")) == NULL)
    {
        printf("No se pudo abrir el archivo MALLA.IMG\n");
        _chdrive(3);
        chdir("\\admon");
        exit(0);
    }
    if ( (fpw1=fopen("malla1.img","wb")) == NULL)
    {
        printf("No se pudo abrir el archivo MALLA1.IMG\n");
        _chdrive(3);
        chdir("\\admon");
        exit(0);
    }
}
else
{
    printf("No se ha generado el archivo %s\n", zal);
}

```

```
        _chdrive(3);
        chdir("\\admon");
        exit(0);

    }
    fread(&fecha,1,782,fpar);

    for(row=1; row<401; row++)
    {
        for (col=1; col<641; col++)
        {
            fread(&valor,1,1,fpar);
            fwrite(&valor,1,1,fpw);

        }
    }

    fclose(fpar);
    fclose(fpw);
    _chdrive(3);
    chdir("\\lluvia\\datos");
    if(system("lineras x agricola malla")!=0)
        printf("No se pudo ejecutar MALLA1\n");
    if(system("lineras x mexico malla")!=0)
        printf("No se pudo ejecutar MALLA\n");

    _chdrive(3);
    chdir("\\admon");

}/* Termina PROGRAMA ISO.C */
```

**4. El programa SIG.C permite transformar los datos de los archivos RASTER a un formato VECTOR, así como cálculos de obtener los valores MÁXIMOS detectados en todo el archivos raster.**

**Forma de compilación : QCL /AM SIG.C /F 7500**

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

#define ext " "

min_max(long i);
realce();
    float x,x1,co_xmin,co_xmax,ban = 0.0;
    char histonum[50], imagen[50];
    float anho, banderal, sum, media_arit;
    float result1, numero, maximo=0.0, minimo=10000, resta=0.0;
    unsigned int col, row, coll, rowl, num;
    float contador, contador1, resta, numero1;
    float media, mediana, cont, k[10000], dato;
    long i, ii;
    float a, b, c, d, e, f, inc_x, inc_y, lat, lon;
    float valor;
    FILE *fphw, *fpar;
    double cabecera[6];
    int xy[2];
    float tipo[2];
void main(void)

{
    /* IDENTIFICA LA IMAGEN VISIBLE SI EXISTE */
        printf("Nombre del archivo de datos?=>\n");
        scanf("%s", histonum);
        printf("Nombre de la imagen a procesars?=>\n");
        scanf("%s", imagen);

    k[0]=0.0;
    fphw = fopen(histonum, "w+t");
    printf("\n\n Encontrando valores m ximo y m;nimo,.....\n\n");
        if((fpar = fopen(imagen, "rb"))==NULL)
        {
            fclose(fphw);
            exit(0);
        }

        fread(tipo,sizeof(float),1,fpar);
        fread(xy,2,2,fpar);
        coll=xy[0]+1.0;
        rowl=xy[1]+1.0;
        printf("coll = %d rowl = %d\n", coll, rowl);
        getch();
        fread(cabecera,sizeof(double),6,fpar);
```

```

        e=cabecera[4];
        f=cabecera[5];
        a=-117.08;
        b=-86.70;
        c=14.50;
        d=32.66;

        printf("longitud UL = %10.5f\n", a);
        printf("longitud DR = %10.5f\n", b);
        printf("latitud UL = %10.5f\n", c);
        printf("latitud DR = %10.5f\n", d);
        printf("Val. MIN. = %10.5f\n", e);
        printf("Val. MAX. = %10.5f\n", f);
        getch();

        printf("Detecta m ximo y m;nimo, ..... \n");

contador=1.0;
lat=c; /* antes d */
inc_y=(d-c)/(rowl-1.0);
lon=a;
inc_x=- (a-b)/(coll-1.0);
printf("lat=%10.8f inc_y = %10.8f\n", lat, inc_y);
printf("lon=%10.8f inc_x = %10.8f\n", lon, inc_x);

        fprintf(fphw, "Numero,Longitud,Latitud,Lluvia\n");
        contador=0.0;

        for(row=1; row<rowl; row++)
        {
            lat=lat+inc_y;
            lon=a;
            for (col=1; col<coll; col++)
            {
                contador=contador+1.0;

                resultl=fread(&valor,sizeof(float),1,fpar);
                if(valor<100000.0)
                {
                    fprintf(fphw, "%6.0f,%10.3f,%10.3f,%10.3f\n", contador, lon, lat, valor);
                }

                lon=lon+inc_x;
            }
        }

        /*
media_arit=media_arit/contador;
media=sqrt(media/contador);
mediana = (maximo-minimo)/10.0;
printf("media final MEDIA_ARIT = %f\n", media_arit);
printf("media final MEDIA_CUA = %f\n", media);
fprintf(fphw,"contador = %f \n", contador);
fprintf(fphw,"media= %f \n", media);
fprintf(fphw,"media_arit= %f \n", media_arit);
fprintf(fphw,"minimo= %f \n", minimo);
fprintf(fphw,"maximo= %5f \n", maximo);
fprintf(fphw,"mediana= %f \n", mediana);
printf("minimo = %5.5f maximo = %5.5f media = %5.5f\n", minimo, maximo, media);
        */

        fclose(fpar);
        fclose(fphw);
    }/* Termina PROGRAMA SIG.C */

```

5. El programa MED\_MES.C permite calcular la climatología de los 12 meses del año considerando un intervalo "X" de años. En este caso de calculó la climatología de 1950 al 2008.

Forma de compilación : QCL /AM MED\_MES.C /F 7500

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

unsigned char openfile[400], imagen[50];
unsigned int colf, contador=0;
unsigned int i, ii;
float cont=0.0, cont1=1.0, media, acumula=0.0;
char tipo[50];
char _month[10], _day[10], _day2[10], _year[10], newyear[10], newmonth[10];
int xx, yy, year2000;
FILE *fpw, *fpar2, *polig, *fpar4;
unsigned char numero[50], longi[50], lati[50], lluvia[50];
unsigned char numero4[50], longi4[50], lati4[50], lluvia4[50];
unsigned int suma, sumal, inicio=1;
unsigned char caden1[50], caden11[50], direct[50], mes[20], direct1[50];
unsigned char caden2[50], caden22[50], cabecera2[50], caden5[50];
unsigned char caden3[50], caden33[50], cabecera3[50], caden4[50], cabecera4[50];
unsigned char coma[3], coma2[3], coma3[3], coma4[3], coma5[3], coma6[3];
unsigned int DIAS, second, diferencia, longi1, lati1, ano_ini, ano_fin, ano_final;
unsigned char DIAS1[35], ruta[70];
unsigned char poligono[70], ano_sal[50], num_mes1[5];
unsigned int mes_ini, mes_fin, mes_final, diferencial;
unsigned int num11, numeroll, num_mes, month, numero44;
float num22, num33, num44, longi11, lati11, lluvial, cont11=0.0;
float longi44, lati44, longi44, lati44, lluvia44;

main()
{
/* IDENTIFICA LA IMAGEN VISIBLE SI EXISTE */
system("cls");
printf("Mes INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &mes_ini);
printf("Mes FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &mes_fin);
printf("Año INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_ini);
printf("Año FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_fin);
printf("Nombre del archivo de salida de MENSUAL? == ) ");
scanf("%s", ano_sal);
ano_final=ano_fin+1;
diferencia=ano_final-ano_ini;
mes_final=mes_fin+1;
diferencial=mes_final-mes_ini;
```

```

printf("Procesa puntos del archivo %s en salida %s.....\n", poligono, caden3);

/* DETERMINA EL MES */
for(month=mes_ini; month<mes_final; ++month)
{
if(month == 1)
strcpy(_month,"EN");
if(month == 2)
strcpy(_month,"FE");
if(month == 3)
strcpy(_month,"MZ");
if(month == 4)
strcpy(_month,"AB");
if(month == 5)
strcpy(_month,"MY");
if(month == 6)
strcpy(_month,"JU");
if(month == 7)
strcpy(_month,"JL");
if(month == 8)
strcpy(_month,"AG");
if(month == 9)
strcpy(_month,"SE");
if(month == 10)
strcpy(_month,"OC");
if(month == 11)
strcpy(_month,"NO");
if(month == 12)
strcpy(_month,"DI");
/* DETERMINA DIA */
for (DIAS=1; DIAS<32; ++DIAS)
{
second=DIAS+1;
if(second >= 10 )
sprintf(_day2,"%d",second);
else
sprintf(_day2,"0%d",second);
if(DIAS >= 10 )
sprintf(_day,"%d",DIAS);
else
sprintf(_day,"0%d",DIAS);
printf("\t Procesa DIA %d y tambien el DIA %d\n", DIAS, second);
}
}
/* DETERMINA ANHO */
for(colf=ano_ini; colf<ano_final; ++colf) /*inicia analisis de los 41 aos */
{
if (colf<2000)
{
year2000=colf-1900;
sprintf(_year,"%d",year2000);
}
else
{
year2000=colf-2000;
if(year2000 >= 10 )
sprintf(_year,"%d",year2000);
else
sprintf(_year,"0%d",year2000);
}
}

sprintf(newyear, "%d",colf);
_chdrive(5);
strcpy(direct, "\\sadllum\\gis\\");
strcat(direct, newyear);

```

```

/* SE CAMBIA AL MES DEL ANHO CORRESPONDIENTES */
    if(month==1)
    {
        strcat(direct, "\\enero");
    }
    if(month==2)
    {
        strcat(direct, "\\febre");
    }
    if(month==3)
    {
        strcat(direct, "\\marzo");
    }
    if(month==4)
    {
        strcat(direct, "\\abril");
    }
    if(month==5)
    {
        strcat(direct, "\\mayo");
    }
    if(month==6)
    {
        strcat(direct, "\\junio");
    }
    if(month==7)
    {
        strcat(direct, "\\julio");
    }
    if(month==8)
    {
        strcat(direct, "\\agost");
    }
    if(month==9)
    {
        strcat(direct, "\\septi");
    }
    if(month==10)
    {
        strcat(direct, "\\octub");
    }
    if(month==11)
    {
        strcat(direct, "\\novie");
    }
    if(month==12)
    {
        strcat(direct, "\\dicie");
    }
chdir(direct);
    if(inicio==1)
    {
        strcpy(caden3, "r:\\sadllum\\results\\A");
        strcat(caden3, caden22);
        strcat(caden3, ano_sal);
        strcat(caden3, _year);
        strcat(caden3, ".txt");
        strcpy(caden5, "r:\\sadllum\\results\\B");
        strcat(caden5, caden22);
        strcat(caden5, ano_sal);
        strcat(caden5, _year);
        strcat(caden5, ".txt");

        if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
        {
            fcloseall();
            exit(0);
        }
    }

```

```

        inicio=0;
    }

    else
    {

        strcpy(caden3, "r:\\sadllum\\results\\B");
        strcat(caden3, caden22);
        strcat(caden3, ano_sal);
        strcat(caden3, _year);
        strcat(caden3, ".txt");
        strcpy(caden5, "r:\\sadllum\\results\\A");
        strcat(caden5, caden22);
        strcat(caden5, ano_sal);
        strcat(caden5, _year);
        strcat(caden5, ".txt");
        if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
        {
            fcloseall();
            exit(0);
        }
        inicio=1;
    }
}
/* SE CONSTRUYEN DOS ARCHIVOS DE ENTRADA */
strcpy(caden4, "LL");
    strcat(caden4, _day2);
    strcat(caden4, _month);
    strcat(caden4, _year);
strcat(caden4, ".txt");
if(DIAS > 1)
{
    strcpy(caden2, caden5);
}
else
{
    strcpy(caden2, "LL");
    strcat(caden2, _day);
    strcat(caden2, _month);
    strcat(caden2, _year);
strcat(caden2, ".txt");
}

    /* open input file1 to process */
    if((fpar2 = fopen(caden2, "r+t"))==NULL)
    {
        continue;
    }
    if((fpar4 = fopen(caden4, "r+t"))==NULL)
    {
        exit(0);
    }
    fscanf( fpar2, "\t%s\n", cabecera2);
    fscanf( fpar4, "\t%s\n", cabecera4);
    fprintf(fpw, "\t%s\n", cabecera4);

while(fscanf(fpar2, "%s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia)!=EOF)
{
fscanf(fpar4, "%s %s %s %s\n", numero4, longi4, lati4, lluvia4);
    numeroll=atoi(numero);
    longill=atof(longi);
    latill=atof(lati);
    lluvia1=atof(lluvia);
    numero44=atoi(numero4);
    longi44=atof(longi4);
    lati44=atof(lati4);
    lluvia44=atof(lluvia4);
}

```

```
        if((numero11==numero44)&&(longi11==longi44) && (lati11==lati44))
        {
            acumula=lluvial+lluvia44;
/* INSERTA CABECERA DE DEFINICION DE CAMPOS */
/*
        printf("\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, media);*/
        fprintf(fpw, "\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, acumula);
        acumula=0.0;
        contador=1;
        cont=cont+1.0;
    }
    else
    {
        printf("\t NO CONCIDEN LOS PUNTOS\n");
        getch();
    }

}/* CIERRA la funcion WHILE */

    fclose(fpar2);
    fclose(fpw);
    fclose(fpar4);

} /* LOOP AÑOS */

} /* DIAS */

} /* MESES */

    cont=0;

} /* Termina programa: MED_MES.C */
```

6. El programa MED\_ANO.C permite calcular la climatología de los años considerando un intervalo "X" de años. En este caso de calculó la climatología de 1950 al 2008.  
Forma de compilación : QCL /AM MED\_ANO.C /F 7500

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

unsigned char histonum[50], imagen[50];
unsigned int colf;
unsigned int i, ii;
float cont=0.0, cont1=1.0, media, acumula=0.0;
char tipo[50];
char _month[10], _day[10], _year[10], newyear[10], newmonth[10];
int xx, yy, year2000;
FILE *fpw, *fpar2, *fpar3, *polig;
unsigned char numero[50], longi[50], lati[50], lluvia[50];
/* inicia declaracion de varaibales de este programa */
unsigned int suma, sumal;
unsigned char caden1[50], caden11[50], direct[50], mes[20], direct1[50];
unsigned char caden2[50], caden22[50], cabecera2[50];
unsigned char caden3[50], caden33[50], cabecera3[50];
unsigned char comal[3], coma2[3], coma3[3], coma4[3], coma5[3], coma6[3];
unsigned int DIAS, diferencia, longil, latil, ano_ini, ano_fin, ano_final;
unsigned char DIAS1[35], diferencial[35], ruta[70];
unsigned char poligono[70], ano_sal[50], num_mes1[5];
unsigned int num11, numero11, num_mes, month;
float num22, num33, num44, longi11, lati11, lluvia1, cont11=0.0;

void main(void)
{
    /* IDENTIFICA LA IMAGEN VISIBLE SI EXISTE */

    system("cls");
    printf("Nombre del POLIGONO.TXT a extraer? == ) ");
    scanf("%s", poligono);
    printf("Año INICIAL a procesar? == ) ");
    scanf("%d", &ano_ini);
    printf("Año FINAL a procesar? == ) ");
    scanf("%d", &ano_fin);
    printf("Nombre del archivo de salida de MED_ANO? == ) ");
    scanf("%s", ano_sal);
    ano_final=ano_fin+1;
    diferencia=ano_final-ano_ini;

    strcpy(caden3, "e:\\sadllum\\results\\");
    strcat(caden3, caden22);
    strcat(caden3, ano_sal);

    if((fpw = fopen(caden3, "a+t"))==NULL)
    {
```

```

        fcloseall();
        exit(0);
    }
    printf("Procesa puntos del archivo %s en salida %s.....\n", poligono, caden3);
    strcpy(caden1, poligono);
    /* open POLIGONO.TXT to process */
    if((fpar3 = fopen(caden1, "r+t"))==NULL)
    {
        fcloseall();
        exit(0);
    }
    fscanf( fpar3, "%s\n", cabecera2);
while(fscanf(fpar3, "\t%s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia) != EOF)
{
    num11=atoi(numero);
    num22=atof(longi);
    num33=atof(lati);
    num44=atof(lluvia);
    /* DETERMINA EL MES */
    for(month=1; month<13; ++month)
    {
        if(month == 1)
        strcpy(_month, "EN");
        if(month == 2)
        strcpy(_month, "FE");
        if(month == 3)
        strcpy(_month, "MZ");
        if(month == 4)
        strcpy(_month, "AB");
        if(month == 5)
        strcpy(_month, "MY");
        if(month == 6)
        strcpy(_month, "JU");
        if(month == 7)
        strcpy(_month, "JL");
        if(month == 8)
        strcpy(_month, "AG");
        if(month == 9)
        strcpy(_month, "SE");
        if(month == 10)
        strcpy(_month, "OC");
        if(month == 11)
        strcpy(_month, "NO");
        if(month == 12)
        strcpy(_month, "DI");
        /* DETERMINA DIA */
        for (DIAS=1; DIAS<32; ++DIAS)
        {
            if(DIAS >= 10 )
                sprintf(_day, "%d", DIAS);
            else
                sprintf(_day, "0%d", DIAS);
        }
    }
    /* DETERMINA ANHO */
    for(colf=ano_ini; colf<ano_final; ++colf) /*inicia analisis de los 41 aos */
    {
        if (colf<2000)
        {
            year2000=colf-1900;
            sprintf(_year, "%d", year2000);
        }
        else
        {
            year2000=colf-2000;
            if(year2000 >= 10 )
                sprintf(_year, "%d", year2000);
            else
                sprintf(_year, "0%d", year2000);
        }
    }
}

```

```

    }
    sprintf(newyear, "%d", colf);
    _chdrive(5);
    strcpy(direct, "\\sadllum\\gis\\");
    strcat(direct, newyear);
    /* SE CAMBIA AL MES DEL ANHO CORRESPONDIENTES */
    if(month==1)
    {
        strcat(direct, "\\enero");
    }
    if(month==2)
    {
        strcat(direct, "\\febre");
    }
    if(month==3)
    {
        strcat(direct, "\\marzo");
    }
    if(month==4)
    {
        strcat(direct, "\\abril");
    }
    if(month==5)
    {
        strcat(direct, "\\mayo");
    }
    if(month==6)
    {
        strcat(direct, "\\junio");
    }
    if(month==7)
    {
        strcat(direct, "\\julio");
    }
    if(month==8)
    {
        strcat(direct, "\\agost");
    }
    if(month==9)
    {
        strcat(direct, "\\septi");
    }
    if(month==10)
    {
        strcat(direct, "\\octub");
    }
    if(month==11)
    {
        strcat(direct, "\\novie");
    }
    if(month==12)
    {
        strcat(direct, "\\dicie");
    }
    chdir(direct);

    /* SE CONSTRUYE ARCHIVO DE ENTRADA */

    strcpy(caden2, "LL");
        strcat(caden2, _day);
        strcat(caden2, _month);
        strcat(caden2, _year);
    strcat(caden2, ".txt");
        /* open input file1 to process */
        if((fpar2 = fopen(caden2, "r+t"))==NULL)
        {
            continue;
        }

```

```

/* LEE CABECERA2 */
    if((cont>=0.0))
    {
        fscanf( fpar2, "\t%s\n", cabecera2);
    }

RE_LEE:
fscanf(fpar2, "%s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia);
    numeroll=atoi(numero);
    longi11=atof(longi);
    lati11=atof(lati);
    lluvia1=atof(lluvia);
if((numeroll==num11)&&(longi11==num22) && (lati11==num33))
    {
        longil=fabs(atof(longi)*100);
        sprintf(caden22, "%d",longil);
        if((fpw = fopen(caden3, "a+t"))==NULL)
            {
                fcloseall();
                exit(0);
            }
        acumula=acumula+lluvia1;

/* INSERTA CABECERA DE DEFINICION DE CAMPOS */
if((month==12) && (DIAS==31) && (colf==ano_fin))
    {
        media=acumula/diferencia;
        printf("\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, media);
        fprintf(fpw, "\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, acumula);
        acumula=0.0;
    }
fclose(fpar2);
fclose(fpw);
cont=cont+1.0;

    }
    else
    {
        goto RE_LEE;
    }
} /* LOOP AÑOS */

/* printf("ano %d acumula %f diferencia %d\n", colf, acumula, diferencia);
printf("\tProcesa punto : %s ACUMULADO = %f Media = %f\n", numero, acumula, media);

    fprintf(fpw, "\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, acumula);
    acumula=0.0; */

} /* DIAS */

} /* MESES */

} /* LOOP POLIGONO */
fclose(fpar3);

}/* Termina programa: MED_ANO.C */

```

7. El programa MAX\_MES.C permite calcular la climatología de los años considerando un intervalo "X" de años. En este caso de calculó la climatología de 1950 al 2008.  
Forma de compilación : QCL /AM MAX\_MES.C /F 7500

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

unsigned char openfile[400], imagen[50];
unsigned int colf, contador=0;
unsigned int i, ii, month;
unsigned int year6, month6, day6;
float cont=0.0, cont1=1.0, media, acumula=0.0;
char tipo[50];
char _month[10], _day[10], _day2[10], _year[10], newyear[10], newmonth[10];
int xx, yy, year2000, anomax=0, mesmax=0, diamax=0;
unsigned char month5[30], day5[30], year5[30];

FILE *fpw, *fpar2, *polig, *fpar4;
unsigned char numero[50], longi[50], lati[50], lluvia[50];
unsigned char numero4[50], longi4[50], lati4[50], lluvia4[50];
/* inicia declaracion de varaibales de este programa */
unsigned int suma, sumal, inicio=1;
unsigned char caden1[50], caden11[50], direct[50], mes[20], direct1[50];
unsigned char caden2[50], caden22[50], cabecera2[50], caden5[50];
unsigned char caden3[50], caden33[50], cabecera3[50], caden4[50], cabecera4[50];
unsigned char coma1[3], coma2[3], coma3[3], coma4[3], coma5[3], coma6[3];
unsigned int DIAS, second, diferencia, longi1, lati1, ano_ini, ano_fin, ano_final;

unsigned char DIAS1[35], ruta[70];
unsigned char poligono[70], ano_sal[50], num_mes1[5];
unsigned int mes_ini, mes_fin, mes_final, diferencial;
unsigned int num11, numeroll, num_mes, numero44;
float num22, num33, num44, longi11, lati11, lluvia1, cont11=0.0;
float longi44, lati44, longi44, lati44, lluvia44;

main()

{

/* IDENTIFICA LA IMAGEN VISIBLE SI EXISTE */

system("cls");
printf("Mes INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &mes_ini);
printf("Mes FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &mes_fin);
printf("Año INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_ini);
printf("Año FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_fin);
```

```
    ano_final=ano_fin+1;
    diferencia=ano_final-ano_ini;

    mes_final=mes_fin+1;
    diferencial=mes_final-mes_ini;

printf("Procesa puntos del archivo %s en salida %s.....\n", poligono, caden3);

    /* DETERMINA EL MES */

    for(month=mes_ini; month<mes_final; ++month)
    {
    if(month == 1)
    {
    strcpy(_month,"EN");
    strcpy(ano_sal, "ene");
    }
    if(month == 2)
    {
    strcpy(_month,"FE");
    strcpy(ano_sal, "feb");
    }
    if(month == 3)
    {
    strcpy(_month,"MZ");
    strcpy(ano_sal, "mar");
    }
    if(month == 4)
    {
    strcpy(_month,"AB");
    strcpy(ano_sal, "abr");
    }
    if(month == 5)
    {
    strcpy(_month,"MY");
    strcpy(ano_sal, "may");
    }
    if(month == 6)
    {
    strcpy(_month,"JU");
    strcpy(ano_sal, "jun");
    }
    if(month == 7)
    {
    strcpy(_month,"JL");
    strcpy(ano_sal, "jul");
    }
    if(month == 8)
    {
    strcpy(_month,"AG");
    strcpy(ano_sal, "ago");
    }
    if(month == 9)
    {
    strcpy(_month,"SE");
    strcpy(ano_sal, "sep");
    }
    if(month == 10)
    {
    strcpy(_month,"OC");
    strcpy(ano_sal, "oct");
    }
    if(month == 11)
    {
    strcpy(_month,"NO");
    strcpy(ano_sal, "nov");
    }
    if(month == 12)
```

```

{
strcpy(_month,"DI");
strcpy(ano_sal, "dic");
}
/* DETERMINA DIA */
for (DIAS=1; DIAS<32; ++DIAS)
{
second=DIAS+1;
if(second >= 10 )
    sprintf(_day2,"%d",second);
else
    sprintf(_day2,"0%d",second);
if(DIAS >= 10 )
    sprintf(_day,"%d",DIAS);
else
    sprintf(_day,"0%d",DIAS);
printf("\t Procesa MES %d y tambien el DIA %d\n", month, second);
}
/* DETERMINA ANHO */
for(colf=ano_ini; colf<ano_final; ++colf) /*inicia analisis de los 41 aos */
{
    if (colf<2000)
    {
        year2000=colf-1900;
        sprintf(_year,"%d",year2000);
    }
    else
    {
        year2000=colf-2000;
        if(year2000 >= 10 )
            sprintf(_year,"%d",year2000);
        else
            sprintf(_year,"0%d",year2000);
    }
    sprintf(newyear, "%d",colf);
    _chdrive(5);
    strcpy(direct, "\\sadllum\\gis\\");
    strcat(direct, newyear);

/* SE CAMBIA AL MES DEL ANHO CORRESPONDIENTES */
if(month==1)
{
    strcat(direct, "\\enero");
}
if(month==2)
{
    strcat(direct, "\\febre");
}
if(month==3)
{
    strcat(direct, "\\marzo");
}
if(month==4)
{
    strcat(direct, "\\abril");
}
if(month==5)
{
    strcat(direct, "\\mayo");
}
if(month==6)
{
    strcat(direct, "\\junio");
}
if(month==7)
{
    strcat(direct, "\\julio");
}
if(month==8)

```

```

{
strcat(direct, "\\agost");
}
if(month==9)
{
strcat(direct, "\\septi");
}
if(month==10)
{
strcat(direct, "\\octub");
}
if(month==11)
{
strcat(direct, "\\novie");
}
if(month==12)
{
strcat(direct, "\\dicie");
}
chdir(direct);
if(inicio==1)
{
strcpy(caden3, "e:\\sadllum\\results\\max\\A");
strcat(caden3, caden22);
strcat(caden3, ano_sal);
strcat(caden3, _year);
strcat(caden3, ".txt");
strcpy(caden5, "e:\\sadllum\\results\\max\\B");
strcat(caden5, caden22);
strcat(caden5, ano_sal);
strcat(caden5, _year);
strcat(caden5, ".txt");

if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
{
fcloseall();
exit(0);
}

inicio=0;
}
else
{
strcpy(caden3, "e:\\sadllum\\results\\max\\B");
strcat(caden3, caden22);
strcat(caden3, ano_sal);
strcat(caden3, _year);
strcat(caden3, ".txt");
strcpy(caden5, "e:\\sadllum\\results\\max\\A");
strcat(caden5, caden22);
strcat(caden5, ano_sal);
strcat(caden5, _year);
strcat(caden5, ".txt");
if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
{
fcloseall();
exit(0);
}

inicio=1;
}
}

```

```

/* SE CONSTRUYEN DOS ARCHIVOS DE ENTRADA */

strcpy(caden4, "LL");
    strcat(caden4, _day2);
    strcat(caden4, _month);
    strcat(caden4, _year);
strcat(caden4, ".txt");

if(DIAS > 1)
{
strcpy(caden2, caden5);

}
else
{

strcpy(caden2, "LL");
    strcat(caden2, _day);
    strcat(caden2, _month);
    strcat(caden2, _year);
strcat(caden2, ".txt");

}

/* open input file1 to process */
if((fpar2 = fopen(caden2, "r+t"))==NULL)
{
continue;
}
if((fpar4 = fopen(caden4, "r+t"))==NULL)
{
DIAS=31;
fcloseall();
break;
}

fscanf( fpar2, "%s\n", cabecera2);
fscanf( fpar4, "%s\n", cabecera4);
/* if(DIAS == 1) */
fprintf(fpw, "Numero,longitud,latitud,lluvia,dia,ano,mes\n");
/* else
fprintf(fpw,"%s\n", cabecera4); */
while(fscanf(fpar4, "%s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia)!=EOF)
{
year6=colf;
month6=month;
day6=DIAS+1;
if(DIAS>1)
{
fscanf(fpar2, "%s %s %s %s %s %s %s\n", numero4, longi4, lati4, lluvia4,
day5, year5, month5);
mesmax=atoi(month5);
diamax=atoi(day5);
anomax=atoi(year5);

}
else
{
mesmax=month;
diamax=DIAS;
anomax=colf;
fscanf(fpar2, "%s %s %s %s\n", numero4, longi4, lati4, lluvia4);
}

numero11=atol(numero);
longi11=atof(longi);
lati11=atof(lati);
lluvia1=atof(lluvia);

numero44=atoi(numero4);

```

```

longi44=atof(longi4);
lati44=atof(lati4);
lluvia44=atof(lluvia4);
if((numero11==numero44)&&(longi11==longi44) && (lati11==lati44))
{
    if(lluvia1>lluvia44)
    {
        lluvia44=lluvia1;
        anomax=year6;
        diamax=day6;
        mesmax=month6;
    }
    if(diamax == 0)
    diamax=1;
/*    fprintf(fpw, "%d, %4.3f, %4.3f, %4.3f, %d, %d, %d\n", numero11, longi11, lati11,
lluvia44, diamax, anomax, mesmax);*/
    fprintf(fpw, "%s %s %s %4.3f, %d, %d, %d\n", numero, longi, lati, lluvia44,
diamax, anomax, mesmax);

        lluvia44=0.0;
        anomax=0;
        mesmax=0;
        diamax=0;
        contador=1;
        cont=cont+1.0;
    }
    else
    {
        printf("\t NO CONCIDEN LOS PUNTOS\n");
        getch();
    }

}/* CIERRA la funcion WHILE */
acumula=0.0;
fclose(fpar2);
fclose(fpw);
fclose(fpar4);

} /* LOOP AÑOS */

} /* DIAS */

} /* MESES */

cont=0;

}/* Termina programa: MAX_MES.C */

```

8. El programa MAX\_ANO.C, genera el acumulado de lluvia en un intervalos de meses de cada año los datos de entrada se localizan en sadllum gis 1950 medias(de cada mes)el resultado se guardan en c:\sadllum\results\medias.

Forma de compilación : QCL /AM MAX\_ANO.C /F 7500

```

/***** programa que cuenta el numero de veces que se repite un valor en el archivo
*****/
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

    unsigned char openfile[400], imagen[50];
    unsigned int colf, contador=0;
    unsigned int i, ii;
    unsigned int dia5, mes5, anho5, dia6, mes6, anho6;
    unsigned int anomax, diamax, mesmax;
    float cont=0.0, cont1=1.0, media, acumula=0.0;
    char tipo[50];
    char _month[10], _day[10], _day2[10], _year[10], newyear[10], newmonth[10];
    int xx, yy, year2000;

    FILE *fpw, *fpar2, *polig, *fpar4;

    unsigned char copyfile[70], numero[50], longi[50], lati[50], lluvia[50];
    unsigned char numero4[50], longi4[50], lati4[50], lluvia4[50];
    unsigned char dia66[50], mes66[50], anho66[50];
    unsigned char dia55[50], mes55[50], anho55[50];

    /* inicia declaracion de varaibales de este programa */

    unsigned int suma, sumal, inicio=1;
    unsigned char caden1[50], caden11[50], direct[50], mes[20], direct1[50];
    unsigned char caden2[50], caden22[50], cabecera2[50], caden5[50];
    unsigned char caden3[50], caden33[50], cabecera3[50], caden4[50], cabecera4[50];
    unsigned char comal[3], coma2[3], coma3[3], coma4[3], coma5[3], coma6[3];

    unsigned int DIAS, second, diferencia, longi1, lati1, ano_ini, ano_fin, ano_final;
    unsigned char DIAS1[35], ruta[70];
    unsigned char poligono[70], ano_sal[50], num_mes1[5];
    unsigned int mes_ini, mes_fin, mes_final, diferencial;

    unsigned int num11, numero11, num_mes, month, numero44;
    float num22, num33, num44, longi11, lati11, lluvia1, cont11=0.0;
    float longi44, lati44, longi44, lati44, lluvia44;

main()
{

```

```

/* IDENTIFICA LA IMAGEN VISIBLE SI EXISTE */

system("cls");
printf("Mes INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &mes_ini);
printf("Mes FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &mes_fin);
printf("Año INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_ini);
printf("Año FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_fin);
printf("Nombre del PREFIJO de salida? == ) ");
scanf("%s", ano_sal);
ano_final=ano_fin+1;
diferencia=ano_final-ano_ini;
mes_final=mes_fin+1;
diferencial=mes_final-mes_ini;
printf("Procesa puntos del archivo %s en salida %s.....\n", poligono, caden3);
/* DETERMINA EL MES */

for(colf=ano_ini; colf<ano_final; ++colf) /*inicia analisis de los 41 años */
{
    year2000=colf-1900;
    if(year2000 >= 10 )
        sprintf(_year,"%d",year2000);
    else
        sprintf(_year,"0%d",year2000);

    sprintf(newyear, "%d",colf);
    _chdrive(5);
    strcpy(direct, "\\sadllum\\gis\\");
    strcat(direct, newyear);
    mes_ini=mes_ini+1;
    for(month=mes_ini; month<mes_final; ++month)
    {
/* SE CAMBIA AL MES DEL ANHO CORRESPONDIENTES */
if(month==1)
{
strcpy(caden22, "ene");
strcat(direct, "\\maxim");
}
if(month==2)
{
strcpy(caden22, "feb");
strcat(direct, "\\maxim");
}
if(month==3)
{
strcpy(caden22, "mar");
strcat(direct, "\\maxim");
}
if(month==4)
{
strcpy(caden22, "abr");
strcat(direct, "\\maxim");
}
if(month==5)
{
strcpy(caden22, "may");
strcat(direct, "\\maxim");
}
if(month==6)
{
strcpy(caden22, "jun");
strcat(direct, "\\maxim");
}
}
}
}

```

```

    if(month==7)
    {
        strcpy(caden22, "jul");
        strcat(direct, "\\maxim");
    }
    if(month==8)
    {
        strcpy(caden22, "ago");
        strcat(direct, "\\maxim");
    }
    if(month==9)
    {
        strcpy(caden22, "sep");
        strcat(direct, "\\maxim");
    }
    if(month==10)
    {
        strcpy(caden22, "oct");
        strcat(direct, "\\maxim");
    }
    if(month==11)
    {
        strcpy(caden22, "nov");
        strcat(direct, "\\maxim");
    }
    if(month==12)
    {
        strcpy(caden22, "dic");
        strcat(direct, "\\maxim");
    }

    chdir(direct);
    printf("\t Procesa MES %d y el ANO %d\n", month, colf);

/* DETERMINA ANHO */

    if(inicio==1)
    {
        strcpy(caden3, "e:\\sadllum\\results\\max\\A");
        strcat(caden3, ano_sal);
        strcat(caden3, _year);
        strcat(caden3, ".txt");
        strcpy(caden5, "e:\\sadllum\\results\\max\\B");
        strcat(caden5, ano_sal);
        strcat(caden5, _year);
        strcat(caden5, ".txt");
        if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
        {
            fcloseall();
            exit(0);
        }

        inicio=0;
    }
    else
    {
        strcpy(caden3, "e:\\sadllum\\results\\max\\B");
        strcat(caden3, ano_sal);
        strcat(caden3, _year);
        strcat(caden3, ".txt");
        strcpy(caden5, "e:\\sadllum\\results\\max\\A");
        strcat(caden5, ano_sal);
        strcat(caden5, _year);
        strcat(caden5, ".txt");
    }

```

```

        if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
        {
            fcloseall();
            exit(0);
        }

        inicio=1;
    }

    /* SE CONSTRUYEN DOS ARCHIVOS DE ENTRADA */

    if(month==2)
    {
        strcpy(caden4, "ENE");
        strcat(caden4, newyear);
        strcat(caden4, ".txt");
    }
    else
    {
        strcpy(caden4, caden5);
        strcpy(caden2, caden22);
        strcat(caden2, newyear);
        strcat(caden2, ".txt");

        /* open input file1 to process */
        if((fpar2 = fopen(caden2, "r+t"))==NULL)
        {
            continue;
        }
        if((fpar4 = fopen(caden4, "r+t"))==NULL)
        {
            month=3;
            fcloseall();
            break;
        }

        fscanf( fpar2, "\t%s\n", cabecera2);
        fscanf( fpar4, "\t%s\n", cabecera4);
        fprintf(fpw,"%s\n", cabecera4);

while(fscanf(fpar2, "%s %s %s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia, dia55, anho55,
mes55)!=EOF)
    {
fscanf(fpar4, "%s %s %s %s %s %s\n", numero4, longi4, lati4, lluvia4, dia66, anho66,
mes66);

        numeroll=atoi(numero);
        longi11=atof(longi);
        lati11=atof(lati);
        lluvia1=atof(lluvia);
        dia5=atoi(dia55);
        mes5=atoi(mes55);
        anho5=atoi(anho55);
        numero44=atoi(numero4);
        longi44=atof(longi4);
        lati44=atof(lati4);
        lluvia44=atof(lluvia4);
        dia6=atoi(dia66);
        mes6=atoi(mes66);
        anho6=atoi(anho66);
        if((numeroll==numero44)&&(longi11==longi44) && (lati11==lati44))
        {

            if(lluvia1>lluvia44)
            {
                lluvia44=lluvia1;
                anomax=anho5;
            }
        }
    }

```

```

        diamax=dia5;
        mesmax=mes5;
    }

    else
    {
        anomax=anho6;
        diamax=dia6;
        mesmax=mes6;
    }

    /* acumula=lluvial+lluvia44; */
    /* INSERTA CABECERA DE DEFINICION DE CAMPOS */
    fprintf(fpw, "%s %4.3f, %4.3f, %4.3f, %d, %d, %d\n", numero, longi11, lati11, lluvia44,
    diamax, anomax, mesmax);
    /*printf("%d, %4.3f, %4.3f, %4.3f, %d, %d, %d\n", numeroll, longi11, lati11, lluvia44,
    diamax, anomax, mesmax);*/

        contador=1;
        cont=cont+1.0;
    }
    else
    {
        printf("\t NO CONCIDEN LOS PUNTOS\n");
        printf("%s %4.3f, %4.3f, %4.3f, %d, %d, %d\n", numero, longi11, lati11, lluvia44, diamax,
        anomax, mesmax);
        printf("%s %4.3f, %4.3f, %4.3f, %d, %d, %d\n", numero4, longi44, lati44, lluvia44, diamax,
        anomax, mesmax);
        getch();
    }

    /* CIERRA la funcion WHILE */

    fclose(fpar2);
    fclose(fpw);
    fclose(fpar4);

    } /* Loop MESES */

    strcpy(copyfile, "copy ");
    strcat(copyfile, caden3);
    strcat(copyfile, "r:\\sadllum\\results\\max\\max");
    strcat(copyfile, newyear);
    strcat(copyfile, ".txt");
    system(copyfile);

    } /* Loop AnOS */

    cont=0;

}/* Termina programa: MAX_ANO.C */

```

**9. El programa MAXTRMES.C, genera un archivo con las maximas extremas del año. Los datos se localizan en el directorio c:\sadllum\results\max\ retorno. Los resultados se generan en el mismo directorio del programa, y requiere el prefijo de los archivos localizados en el mismo directorio.**

**Forma de compilación : QCL /AM MAXTRMES.C /F 7500**

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

unsigned char openfile[400], imagen[50];
unsigned int colf, contador=0;
unsigned int anomax, diamax, mesmax;
unsigned int i, ii;
float cont=0.0, cont1=1.0, media, acumula=0.0;
unsigned int dia5, mes5, anho5, dia6, mes6, anho6;
char tipo[50];
char _month[10], _day[10], _day2[10], _year[10], newyear[10], newmonth[10];
int xx, yy, year2000;

FILE *fpw, *fpar2, *ftr, *fpar4;
unsigned char copyfile[70], numero[50], longi[50], lati[50], lluvia[50];
unsigned char numero4[50], longi4[50], lati4[50], lluvia4[50];
unsigned char dia66[50], mes66[50], anho66[50];
unsigned char diaftr[50], mesftr[50], anhoftr[50];
unsigned char dia55[50], mes55[50], anho55[50];
unsigned int suma, suma1, inicio=1;
unsigned char caden1[50], cadenftr[50], direct[50], mes[20], direct1[50];
unsigned char caden2[50], caden22[50], cabecera2[50], caden5[50];
unsigned char caden3[50], caden33[50], cabeceraftr[50], caden4[50], cabecera4[50];
unsigned char coma1[3], coma2[3], coma3[3], coma4[3], coma5[3], coma6[3];
unsigned int second, diferencia, longi1, lati1, ano_ini, ano_fin, ano_final, ini1;
unsigned char DIAS1[35], ruta[70];
unsigned char poligono[70], ano_sal[50], num_mes1[5];
unsigned int mes_ini, mes_fin, mes_final, diferencial;
unsigned int numero4ftr1, numero11, num_mes, month, numero44;
unsigned int diaftr1, mesftr1, anhoftr1;
float num22, num33, num44, longi11, lati11, lluvial, cont11=0.0;
float longi44, lati44, longi44, lati44, lluvia44;
float longiftr1, latiftr1, lluviaftr1;

main()
{
    system("cls");
    printf("Mapa de Periodo de Retorno (Tr) a generar? == ) ");
    scanf("%d", &mes_fin);
    printf("AÑO INICIAL a procesar? == ) ");
}
```

```

scanf("%d", &ano_ini);
printf("AÑO FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_fin);
printf("Nombre del PREFIJO de entrada? == ) ");
scanf("%s", ano_sal);
ano_final=ano_fin+1;
diferencia=ano_final-ano_ini;
sprintf(newmonth,"%d",mes_fin);
mes_final=mes_fin+1;
sprintf(_month,"%d",mes_final);
diferencial=mes_final-mes_ini;

printf("Procesa puntos del archivo %s en salida %s.....\n", poligono, caden3);

/* DETERMINA EL MES */

ano_inil=ano_ini+1;
for(colf=ano_inil; colf<ano_final; ++colf) /*inicia analisis de los 41 aos */
{
sprintf(_year,"%d",colf);
sprintf(newyear, "%d", (colf-1));

_chdrive(5);
strcpy(direct, "\\sadllum\\results\\max\\retorno");
chdir(direct);
printf("\t Procesa PEFIJO %s y el ANO %d\n", ano_sal, colf);

    if(inicio==1)
    {
strcpy(caden3, "e:\\sadllum\\results\\max\\retorno\\T");
strcat(caden3, ano_sal);
strcat(caden3, _year);
strcat(caden3, ".txt");
strcpy(caden5, "e:\\sadllum\\results\\max\\retorno\\R");
strcat(caden5, ano_sal);
strcat(caden5, newyear);
strcat(caden5, ".txt");
if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
    {
fcloseall();
exit(0);
}

    inicio=0;
}
else
{
strcpy(caden3, "e:\\sadllum\\results\\max\\retorno\\R");
strcat(caden3, ano_sal);
strcat(caden3, _year);
strcat(caden3, ".txt");
strcpy(caden5, "e:\\sadllum\\results\\max\\retorno\\T");
strcat(caden5, ano_sal);
strcat(caden5, newyear);
strcat(caden5, ".txt");
if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
    {
fcloseall();
exit(0);
}
    inicio=1;
}
}
/* SE CONSTRUYEN DOS ARCHIVOS DE ENTRADA */
if(colf==ano_ini+1)
{
strcpy(caden4, ano_sal);
strcat(caden4, newyear);
strcat(caden4, ".txt");

```

```

}
else
strcpy(caden4, caden5);
strcpy(caden2, ano_sal);
strcat(caden2, _year);
strcat(caden2, ".txt");
strcpy(cadenftr, "maxrt");
strcat(cadenftr, _month);
strcat(cadenftr, ".txt");

/* open input file1 to process */
if((fpar2 = fopen(caden2, "r+t"))==NULL)
{
continue;
}
if((fpar4 = fopen(caden4, "r+t"))==NULL)
{
month=3;
fcloseall();
break;
}
/* open input file1 to process */
if((ftr = fopen(cadenftr, "r+t"))==NULL)
{
continue;
}

fscanf( fpar2, "%s\n", cabecera2);
fscanf( fpar4, "%s\n", cabecera4);
fscanf( ftr, "%s\n", cabeceraftr);
fprintf(fpw,"%s\n", cabecera4);

while(fscanf(ftr, "%s %s %s %s %s %s %s\n", numeroftr, longiftr, latiftr, lluviaftr, diaftr,
anhoftr, mesftr)!=EOF)
{
fscanf(fpar2, "%s %s %s %s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia, dia55, anho55, mes55);
fscanf(fpar4, "%s %s %s %s %s %s %s\n", numero4, longi4, lati4, lluvia4, dia66, anho66,
mes66);
numerosftr1=atoi(numeroftr);
longiftr1=atof(longiftr);
latiftr1=atof(latiftr);
lluviaftr1=atof(lluviaftr);
diaftr1=atoi(diaftr);
mesftr1=atoi(mesftr);
anhoftr1=atoi(anhoftr);
numero11=atoi(numero);
longi11=atof(longi);
lati11=atof(lati);
lluvia1=atof(lluvia);
dia5=atoi(dia55);
mes5=atoi(mes55);
anho5=atoi(anho55);
numero44=atoi(numero4);
longi44=atof(longi4);
lati44=atof(lati4);
lluvia44=atof(lluvia4);
dia6=atoi(dia66);
mes6=atoi(mes66);
anho6=atoi(anho66);

if((numero11==numero44)&&(longi11==longi44) && (lati11==lati44))
{
if(lluvia44>=lluviaftr1)
{
lluvia44=lluvia1;
diamax=dia5;
anomax=anho5;
}
}
}

```

```

        mesmax=mes5;
        goto graba;
    }
    if(lluvial>=lluviaftr1)
    {
        lluvial=lluvia44;
        diamax=dia6;
        anomax=anho6;
        mesmax=mes6;
        goto graba;
    }
    if(lluvial>lluvia44)
    {
        lluvia44=lluvial;
        anomax=anho5;
        diamax=dia5;
        mesmax=mes5;
    }
    else
    {
        anomax=anho6;
        diamax=dia6;
        mesmax=mes6;
    }
}

/* INSERTA CABECERA DE DEFINICION DE CAMPOS */

graba:
/* printf("%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, media);*/
fprintf(fpw, "%s %4.3f, %4.3f, %4.3f, %d, %d, %d\n", numero, longi11, lati11, lluvia44,
diamax, anomax, mesmax);
    contador=1;
    cont=cont+1.0;
}
else
{
    printf("\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, media);
    printf("\t NO CONCIDEN LOS PUNTOS\n");
    getch();
}
} /* Loop WHILE */
fclose(fpar2);
fclose(fpw);
fclose(fpar4);
fclose(ftr);
} /* Loop AnOS */
strcpy(copyfile, "copy ");
strcat(copyfile, caden3);
strcat(copyfile, "r:\\sadllum\\results\\max\\retorno\\maxRT");
strcat(copyfile, newmonth);
strcat(copyfile, ".txt");
system(copyfile);
cont=0;

}/* Termina programa: MAXTRMES.C */

```

10. El programa SLP\_MES.C, calcula la primera y segunda derivada utilizando la lluvia acumulada en forma mensual. Los datos se localizan en el directorio `c:\sadllum\results\media\meses`. Los resultados se generan en el mismo directorio. El programa requiere el prefijo de los meses que se van a procesar (primeras 3 letras de cada mes).

Forma de compilación : `QCL /AM SLP_MES.C /F 7500`

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

unsigned char openfile[400], imagen[50];
unsigned int colf, contador=0;
unsigned int i, ii;
float cont=0.0, cont1=1.0, media, acumula=0.0;
char tipo[50];
char _month[10], _day[10], _day2[10], _year[10], newyear[10], newmonth[10], newyear1[10];
int xx, yy, year2000;

FILE *fpw, *fpar2, *polig, *fpar4;
unsigned char numero[50], longi[50], lati[50], lluvia[50];
unsigned char numero4[50], longi4[50], lati4[50], lluvia4[50];

/* inicia declaracion de varaibales de este programa */

unsigned int suma, suma1, inicio=1;
unsigned char caden1[50], caden11[50], direct[50], mes[20], direct1[50];
unsigned char caden2[50], caden22[50], cabecera2[50], caden5[50];
unsigned char caden3[50], caden33[50], cabecera3[50], caden4[50], cabecera4[50];
unsigned char coma1[3], coma2[3], coma3[3], coma4[3], coma5[3], coma6[3];
unsigned int second, diferencia, longi1, lati1, ano_ini, ano_fin, ano_final,
ano_inil;
unsigned char DIAS1[35], ruta[70];
unsigned char poligono[70], ano_sal[50], num_mes1[5];
unsigned int mes_ini, mes_fin, mes_final, diferencial;
unsigned int num11, numero11, num_mes, month, numero44;
float num22, num33, num44, longi11, lati11, lluvia1, cont11=0.0;
float longi44, lati44, longi44, lati44, lluvia44;

main()
{
/* IDENTIFICA LA IMAGEN VISIBLE SI EXISTE */
system("cls");
printf("Numero del MES a procesar? == ) ");
scanf("%d", &month);
printf("Año INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_ini);
printf("Año FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_fin);
printf("Nombre del PREFIJO de entrada? == ) ");
```

```

scanf("%s", ano_sal);
ano_final=ano_fin+1;
diferencia=ano_final-ano_ini;
mes_final=mes_fin+1;
diferencial=mes_final-mes_ini;

printf("Procesa puntos del archivo %s en salida %s.....\n", poligono, caden3);

/* DETERMINA EL MES */
ano_inil=ano_ini+1;
for(colf=ano_inil; colf<ano_final; ++colf) /*inicia analisis de los 41 años */
{
    if (colf<2000)
    {
        year2000=colf-1900;
        sprintf(_year,"%d",year2000);
    }
    else
    {
        year2000=(colf-2000)+100;
        if(year2000 >= 10 )
        sprintf(_year,"%d",year2000);
    }
    else
        sprintf(_year,"0%d",year2000);
}
/* se genera nombre del primer archivo */

sprintf(newyear, "%d", (colf-1));
sprintf(newyear1, "%d", (colf));
sprintf(mes, "%d", mes_ini);

_chdrive(18);

strcpy(direct, "\\sadllum\\results\\medias\\");

if(month == 1)
{
    strcpy(_month, "EN");
    strcpy(ano_sal, "ene");
    strcpy(newmonth, "enero");
}
if(month == 2)
{
    strcpy(_month, "FE");
    strcpy(ano_sal, "feb");
    strcpy(newmonth, "febre");
}
if(month == 3)
{
    strcpy(_month, "MZ");
    strcpy(ano_sal, "mar");
    strcpy(newmonth, "marzo");
}
if(month == 4)
{
    strcpy(_month, "AB");
    strcpy(ano_sal, "abr");
    strcpy(newmonth, "abril");
}
if(month == 5)
{
    strcpy(_month, "MY");
    strcpy(ano_sal, "may");
    strcpy(newmonth, "mayo");
}
if(month == 6)
{
    strcpy(_month, "JU");

```

```

strcpy(ano_sal, "jun");
strcpy(newmonth, "junio");
}
if(month == 7)
{
strcpy(_month, "JL");
strcpy(ano_sal, "jul");
strcpy(newmonth, "julio");
}
if(month == 8)
{
strcpy(_month, "AG");
strcpy(ano_sal, "ago");
strcpy(newmonth, "agost");
}
if(month == 9)
{
strcpy(_month, "SE");
strcpy(ano_sal, "sep");
strcpy(newmonth, "septi");
}
if(month == 10)
{
strcpy(_month, "OC");
strcpy(ano_sal, "oct");
strcpy(newmonth, "octubre");
}
if(month == 11)
{
strcpy(_month, "NO");
strcpy(ano_sal, "nov");
strcpy(newmonth, "noviem");
}
if(month == 12)
{
strcpy(_month, "DI");
strcpy(ano_sal, "dic");
strcpy(newmonth, "diciem");
}
strcat(direct, newmonth);

chdir(newmonth);
chdir(direct);

printf("\t Procesa PEFIJO %s y el ANO %d\n", ano_sal, colf);

strcpy(caden3, "M");
strcat(caden3, ano_sal);
strcat(caden3, _year);
strcat(caden3, ".txt");

if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
{
fcloseall();
exit(0);
}

/* SE CONSTRUYEN DOS ARCHIVOS DE ENTRADA */

strcpy(caden2, ano_sal);
strcat(caden2, newyear);
strcat(caden2, ".txt");
strcpy(caden4, ano_sal);
strcat(caden4, newyear1);
strcat(caden4, ".txt");

/* open input file1 to process */
if((fpar2 = fopen(caden2, "r+t"))==NULL)

```

```

        {
        continue;
        }
        if((fpar4 = fopen(caden4, "r+t"))==NULL)
        {
        month=3;
        fcloseall();
        break;
        }

        fscanf( fpar2, "\t%s\n", cabecera2);
        fscanf( fpar4, "\t%s\n", cabecera4);
        fprintf(fpw, "%s\n", cabecera4);

while(fscanf(fpar2, "%s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia)!=EOF)
{
fscanf(fpar4, "%s %s %s %s\n", numero4, longi4, lati4, lluvia4);
numero11=atoi(numero);
longi11=atof(longi);
lati11=atof(lati);
lluvia1=atof(lluvia);
numero44=atoi(numero4);
longi44=atof(longi4);
lati44=atof(lati4);
lluvia44=atof(lluvia4);
if((numero11==numero44)&&(longi11==longi44) && (lati11==lati44))
{
        if(lluvia1==lluvia44)
        acumula=0.0;
        if(ano_fin=ano_final-1)
        acumula=(lluvia44-lluvia1)/(ano_final-1);
        else
        acumula=lluvia44-lluvia1;

        /* INSERTA CABECERA DE DEFINICION DE CAMPOS */
        printf("%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, acumula); */
        fprintf(fpw, "%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, acumula);

        acumula=0.0;
        contador=1;
        cont=cont+1.0;
}
else
{
printf("\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, media);
printf("\t NO CONCIDEN LOS PUNTOS\n");
getch();
}

} /* Loop WHILE */

fclose(fpar2);
fclose(fpw);
fclose(fpar4);

} /* Loop AnOS */

cont=0;

}}/* Termina programa: SLP_MES.C */

```

11. El programa SLP\_ANO.C, calcula la primera y segunda derivada utilizando la lluvia acumulada en forma mensual. Los datos se localizan en el directorio `c:\sadllum\results\media\meses`. Los resultados se generan en el mismo directorio. El programa requiere el prefijo del ).  
**Forma de compilación : QCL /AM SLP\_ANO.C /F 7500**

```
#include <c:\qc25\include\stdio.h>
#include <c:\qc25\include\stdlib.h>
#include <c:\qc25\include\malloc.h>
#include <c:\qc25\include\pgchart.h>
#include <c:\qc25\include\conio.h>
#include <c:\qc25\include\graph.h>
#include <c:\qc25\include\math.h>
#include <c:\qc25\include\string.h>
#include <c:\qc25\include\direct.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\dos.h>
#include <c:\qc25\include\fcntl.h>
#include <c:\qc25\include\errno.h>
#include <c:\qc25\include\sys\types.h>
#include <c:\qc25\include\sys\stat.h>
#include <c:\qc25\include\io.h>
#include <c:\qc25\include\time.h>

unsigned char openfile[400], imagen[50];
unsigned int colf, contador=0;
unsigned int i, ii;
float cont=0.0, cont1=1.0, media, acumula=0.0, acumula_fin=0.0;
char tipo[50];
char _month[10], _day[10], _day2[10], _year[10], newyear[10], newmonth[10];
int xx, yy, year2000;
FILE *fpar1, *fpar2, *fpar4, *fpar6, *fpar7;
unsigned char numero[50], longi[50], lati[50], lluvia[50];
unsigned char numero4[50], longi4[50], copyfile[50], lati4[50], lluvia4[50];
unsigned char numero6[50], longi6[50], lati6[50], lluvia6[50];

/* inicia declaracion de varaibales de este programa */

unsigned int suma, suma1, inicio=1, inicio1=0;
unsigned char caden1[50], caden11[50], direct[50], mes[20], direct1[50];
unsigned char caden2[50], caden22[50], cabecera2[50], caden5[50];
unsigned char caden6[50], caden66[50], cabecera6[50];
unsigned char caden3[50], caden33[50], cabecera3[50], caden4[50], cabecera4[50];
unsigned char coma[3], coma2[3], coma3[3], coma4[3], coma5[3], coma6[3];
unsigned int second, diferencia, longi1, lati1, ano_ini, ano_fin, ano_final,
ano_inil;
unsigned char DIAS1[35], ruta[70];
unsigned char poligono[70], ano_sal[50], num_mes1[5];
unsigned int mes_ini, mes_fin, mes_final, diferencial;
unsigned int num11, numero11, num_mes, month, numero44;
float num22, num33, num44, longi11, lati11, lluvial, cont11=0.0;
float longi44, lati44, longi44, lati44, lluvia44;
float longi66, lati66, longi66, lati66, lluvia66, numero66;

main()
{

printf("Año INICIAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_ini);
printf("Año FINAL a procesar? == ) ");
scanf("%d", &ano_fin);
printf("Nombre del PREFIJO de entrada? == ) ");
scanf("%s", ano_sal);

ano_final=ano_fin+1;
```

```

diferencia=ano_final-ano_ini;
mes_final=mes_fin+1;
diferencial=mes_final-mes_ini;

printf("Procesa puntos del archivo %s en salida %s.....\n", poligono, caden3);

/* DETERMINA EL AÑO */

ano_inil=ano_ini+1;
for(colf=ano_inil; colf<ano_final; ++colf) /*inicia analisis de los 41 años */
{
/* se genera nombre del primer archivo */
sprintf(_year,"%d",colf);
sprintf(newyear, "%d", (colf-1));
_chdrive(3);
strcpy(direct, "\\sadllum\\results\\medias\\");
strcpy(_month, "ME");
strcpy(ano_sal, "med");
strcpy(newmonth, "anual");

strcat(direct, newmonth);
chdir(newmonth);
chdir(direct);

printf("\t Procesa PEFIJO %s y el AÑO %d\n", ano_sal, colf);

if(inicio==1)
{
strcpy(caden3, "A");
strcat(caden3, ano_sal);
strcat(caden3, _year);
strcat(caden3, ".txt");

strcpy(caden5, "B");
strcat(caden5, ano_sal);
strcat(caden5, newyear);
strcat(caden5, ".txt");

if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
{
fcloseall();
exit(0);
}
inicio=0;
}
else
{
strcpy(caden3, "B");
strcat(caden3, ano_sal);
strcat(caden3, _year);
strcat(caden3, ".txt");

strcpy(caden5, "A");
strcat(caden5, ano_sal);
strcat(caden5, newyear);
strcat(caden5, ".txt");

if((fpw = fopen(caden3, "w+t"))==NULL)
{
fcloseall();
exit(0);
}
inicio=1;
}

if(inicio1>0)
{

```

```

        strcpy(caden6, ano_sal);
        strcat(caden6, newyear);
        strcat(caden6, ".txt");
    }

/* SE CONSTRUYEN DOS ARCHIVOS DE ENTRADA */

if(colf==ano_ini+1)
{
    strcpy(caden4, ano_sal);
    strcat(caden4, newyear);
    strcat(caden4, ".txt");
}
else
strcpy(caden4, caden5);
strcpy(caden2, ano_sal);
strcpy(caden2, _year);
strcat(caden2, ".txt");

        /* open input file1 to process */
        if((fpar2 = fopen(caden2, "r+t"))==NULL)
        {
            continue;
        }
        if((fpar4 = fopen(caden4, "r+t"))==NULL)
        {
            month=3;
            fcloseall();
            break;
        }
        if((fpar7 = fopen("salida.txt", "w+t"))==NULL)
        {
            fcloseall();
            break;
        }
        if(inicio1>0)
        if((fpar6 = fopen(caden6, "r+t"))==NULL)
        {
            fcloseall();
            exit(0);
        }
        fscanf( fpar2, "\t%s\n", cabecera2);
        fscanf( fpar4, "\t%s\n", cabecera4);
        fprintf(fpw,"%s\n", cabecera4);

while(fscanf(fpar2, "%s %s %s %s\n", numero, longi, lati, lluvia)!=EOF)
{
    fscanf(fpar4, "%s %s %s %s\n", numero4, longi4, lati4, lluvia4);

    if(inicio1 > 0)
    {
        fscanf(fpar6, "%s %s %s %s\n", numero6, longi6, lati6, lluvia6);
        numero66=atoi(numero6);
        longi66=atof(longi6);
        lati66=atof(lati6);
        lluvia66=atof(lluvia6);
    }
    numero11=atoi(numero);
    longi11=atof(longi);
    lati11=atof(lati);
    lluvial=atof(lluvia);
    numero44=atoi(numero4);
    longi44=atof(longi4);
    lati44=atof(lati4);
    lluvia44=atof(lluvia4);

```

```

if((numero11==numero44)&&(longi11==longi44) && (lati11==lati44))
{
    if(colf==ano_fin)
    {
        acumula=(lluvial)-(lluvia66);
        acumula_fin=((acumula)+(lluvia44))/diferencia;
    }
    else
    {
        if(iniciol== 0)
        {
            acumula=(lluvial)-(lluvia44);
            acumula_fin=acumula;
        }
        else
        {
            acumula=(lluvial)-(lluvia66);
            acumula_fin=((acumula)+(lluvia44));
        }
    }

    /* INSERTA CABECERA DE DEFINICION DE CAMPOS */

if((numero11==2182)&&(numero44==2182))
{
printf("%d %f %f %f\n", numero, lluvial, lluvia44, acumula);

fprintf(fpar7, "%d %f %f %f\n", numero, lluvial, lluvia44, acumula);
}
fprintf(fpw, "%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, acumula_fin);

acumula=0.0;
acumula_fin=0.0;
contador=1;
cont=cont+1.0;
}
else
{
printf("\t%s %s %s %f\n", numero, longi, lati, media);
printf("\t NO CONCIDEN LOS PUNTOS\n");
getch();
}

} /* Loop WHILE */

fclose(fpar2);
fclose(fpw);
fclose(fpar4);
fclose(fpar6);
inicio=0;
iniciol=iniciol+1;
} /* Loop AnOS */
strcpy(copyfile, "copy ");
strcat(copyfile, caden3);
strcat(copyfile, " TOTMED");
/* strcat(copyfile, newmonth);*/
strcat(copyfile, ".txt");
system(copyfile);
fclose(fpar7);

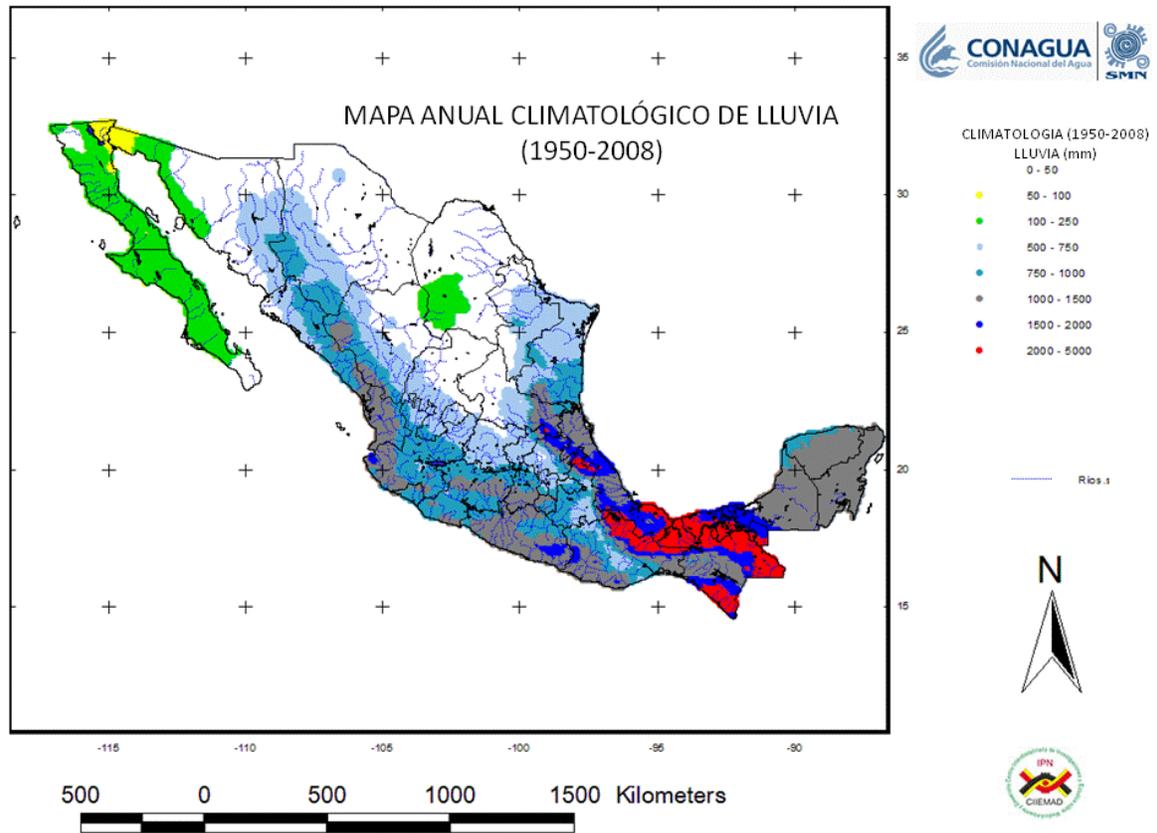
cont=0;

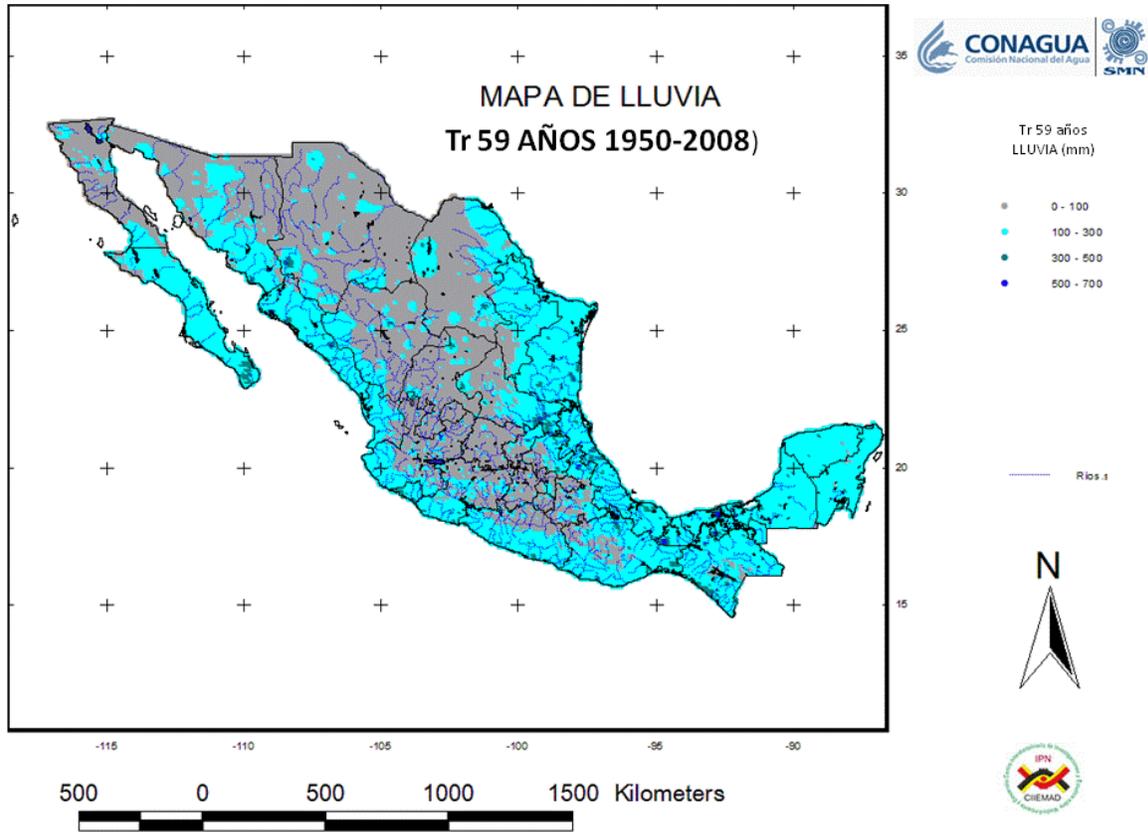
}/* Termina programa: SLP_ANO.C */

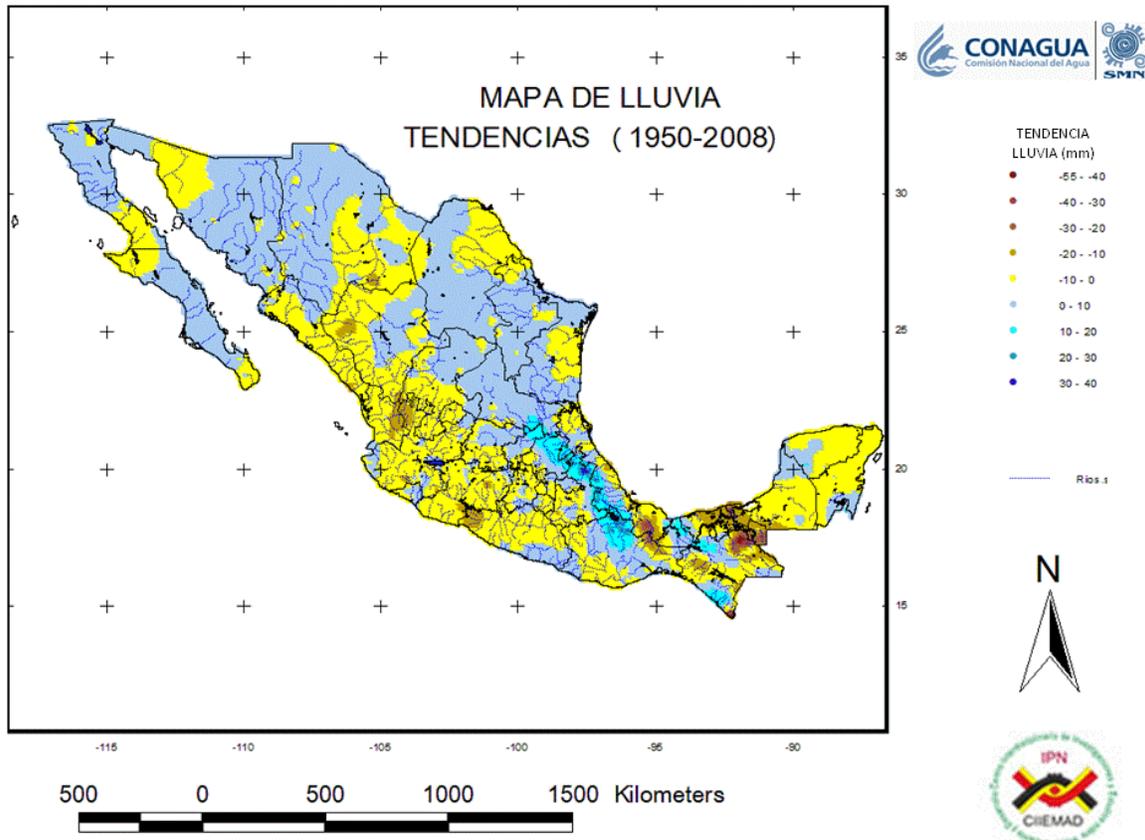
```

## ANEXO - B

### Mapas de ESCENARIOS climatológicos de lluvia







## **A N E X O - C**

**Articulo científico derivado del trabajo de tesis**

## **RAINFALL ANALYSIS BY USING A GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM DURING THE FLOODING OF TABASCO AND CHIAPAS IN 2007**

<sup>1,2</sup>TERAN ANGEL R., <sup>1</sup>RAMOS J. CARLOS, <sup>1</sup>DAVYDOVA VALENTINA-BELITZCAYA AND <sup>2</sup>GUTIÉRREZ-CASTILLO M. EUGENIA

<sup>1</sup>Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, CGSMN  
Av. Observatorio No. 192. Col. Observatorio, México, D.F. C.P. 11860  
Corresponding Author Email: [angel.teran@conagua.gob.mx](mailto:angel.teran@conagua.gob.mx)

<sup>2</sup>Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo, CIIEMAD-IPN  
Calle 30 de Junio de 1520, Barrio La Laguna Ticomán, México, D.F. C.P. 07340

### **ABSTRACT**

The last flooding occurred in Tabasco and Chiapas in October of 2007, makes necessary the development of new tools to identify and understand the rainfall behave against landslides and flooding. For the climatology analysis, it was necessary to build a consistent and long term rainfall database from 1950 to 2006 by using a Geographic Information System (GIS). The data comes from the official database of the National Weather Service, CLICOM (CLImatology COMputarized). Then, the data was interpolated in a  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  grid and converted to Geographic Information Systems (GIS) format. The rainfall analysis was carried out to calculate the annual and monthly climatology, the rainfall period return, and the rainfall tendencies by applying the first and second derivate. Beside a comparison was done between the rainfall climatology analysis and the rainfall occurred during the last October of 2007 which allowed to estimate the rainfall anomaly. The tendency analyze allowed to forecast the rainfall behave for October during the last 10 years, and it was observed a positive tendency. The results indicate that flooding in Tabasco and the landslides in Chiapas were provoked by a high rainfall concentration in a short time due to meteorological system.

**Keywords:** Tabasco and Chiapas, Severe Flooding Rainfall, geographic information systems, annual mean, monthly mean, return period.

### **INTRODUCTION**

During the last years in the world, the destructive effects of extreme rainfall events caused severe floods and landslides, and are magnified because the high vulnerability of different populations which are derived from a variety of factors. Among others such as the inadequate preventive and mitigation measures at the level of regions or vulnerable areas, the lack of measures which lead to a safer location of human settlements, the inadequate management of watersheds and low operating systems early warning. Beside, historical landslides triggered and inundation disasters due a combination of intense rainfall and lack of sewer capacity at the same time as high flows in rivers have directly affected human's lives, producing high social impacts by leaving a trail of deaths and huge economic losses in addition to the influence on community activities and adverse effects on the environment. So, that information is required with high spatial resolution to integrate all the possible variables, such as permitted into the geographic information systems, GIS.

Then, different methods have been presented in the literature to evaluate the stability of slopes under rainfall conditions, and explain the relationship between rainfall and slope failures (Carrara et al. 1991, 1999; Montgomery and Dietrich 1994; Wu and Sidle 1995; Burton and Bathurst 1998; Guzzetti et al. 1999; Wilkinson et al. 2002; D'Odorico and Fagherazzi 2003; Lan et al. 2003). Some researches addressed with the maximum rainfall threshold values have been adopted for warning systems and to establish alarm networks in some endangered areas. The rapid infiltration of rainfall, causing soil saturation is the mechanism by which most shallow landslides are triggered during rainfall storms (Baum and Reid 1995; Montgomery and Dietrich 1997, 2002; Guimaraes et al. 2003). The identification and assessment of extreme rainfall event is a complex process outstanding includes the measurement of several factors such as the intensity, duration, frequency analysis and probability, and rainfall types that vary with time. The slopes composed of either soil and/or rock respond differently as a function of their geological, physical, mechanical and hydraulic characteristics during a rainfall process, and is a responsible factor for mass movements. Therefore, it is somewhat imprecise and often misleading to use single rainfall factor for landslide hazard analysis and forecasting (Franks 1997).

Another problem is the lack of meteorological weather measurements over the mountainous zones which avoid the rainfall monitoring to develop different methods to estimate the rainfall intensity in a certain region, and the frequency of extreme events that often cause flash flooding. The notable developments in the areas of database technology, GIS datasets, modeling jointly with networking information, rainfall intensity-duration thresholds, and information related to land surface susceptibility can provide valuable inputs on inundations/damage analysis due by flash flooding in remote and inaccessible areas. Therefore, it is very important to apply tools such as Geographic Information System since allow understanding the slope stability behavior during the rainfall process, and its hydrological and physical process influence on the location, timing, and rates of movement (Iverson 2000). This could be helpful in predicting the temporal and spatial characteristics of landslide hazards and how these functions might change in response to rainfall. The outcome may provide systematic information for evaluating slope failure mechanisms, effective risk assessment, and warning system establishment and operation (Lan 2005). Characteristics of rain as daily, monthly and annually data are basic in the management processes that are under pressure from increasing demand due to both population growth and economic development of different regions, such is the case of hydrological simulations, supplementary irrigation requirements and engineering studies related to management of water reservoirs, water storage and analysis (Herath and Ratnayakeb, 2004).

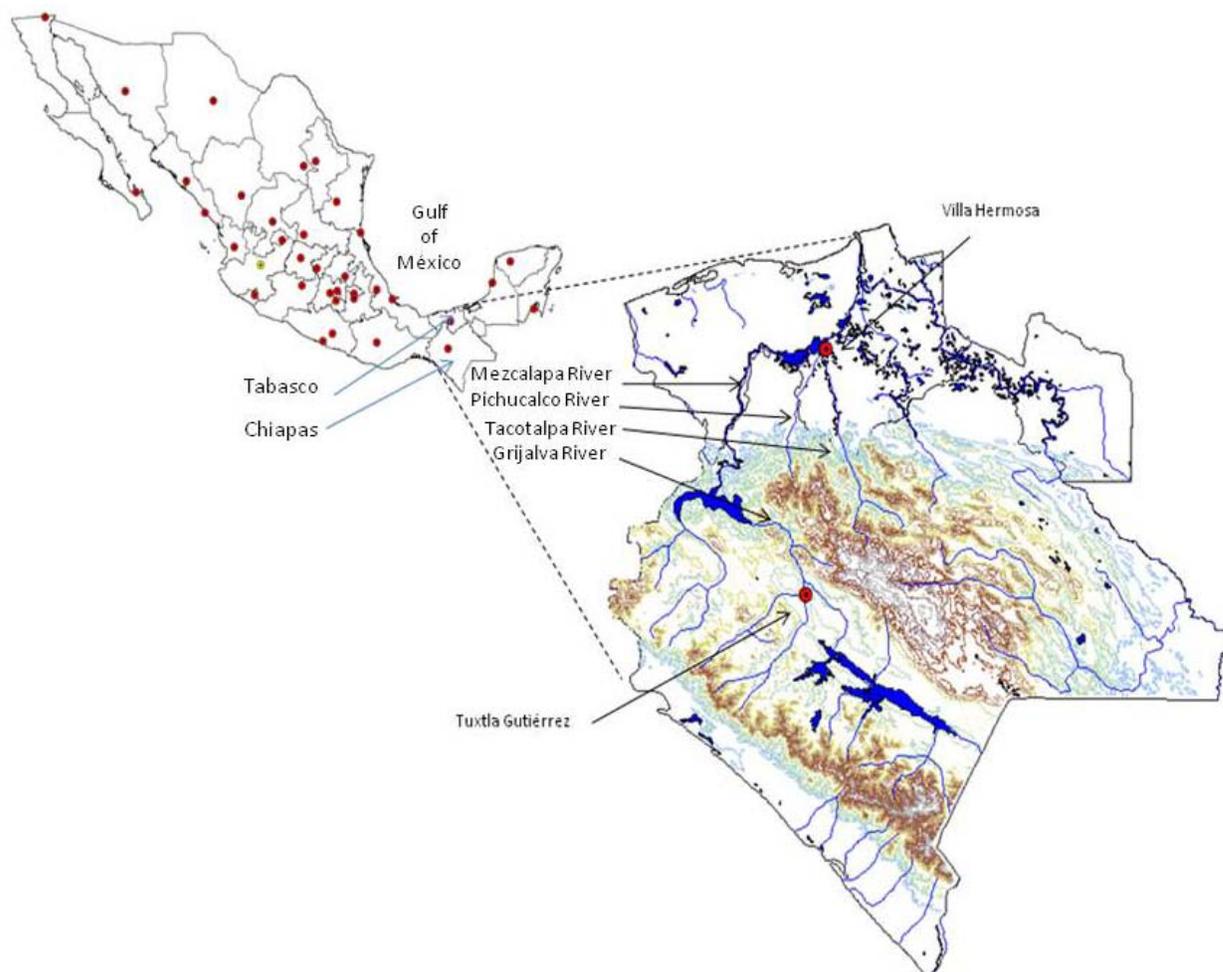
To mitigate the devastating consequences of natural disasters, some scientific organizations and state agencies have incorporated the existing information technologies like GIS for natural disaster mitigation, and where researchers have suggested that GIS technology can play an important role and integral in reducing the adverse impacts of natural hazards on society. The use of GIS to understand the complexity of natural hazards in the context of geo-spatial and time is with most importance in the management and exploitation of information with high spatial resolution for integrating all possible variables by geographical information systems, GIS (Alvarez, 2004). Therefore, the integration of thematic information such as rainfall, and stored in the GIS through geo-referenced database known as geo-databases, is established as an essential tool for any research which aims to determine the risk posed by phenomena natural hazards such as those caused by extreme rainfall maximum (Terán and Ibarra, 2005). The use of advanced technologies associated with the analysis of historical rainfall data by location, it will enhance opportunities for flood management and the impact of extreme events. The products and analysis schemes are developed, and provide undoubtedly social, economic and environmental, as they would support a more consistent prediction of likely risk areas, planning in disaster management and assistance to decision makers to assess the impact of disasters.

This research was focused on the rainfall analysis over Tabasco and Chiapas applying a GIS data base from 1950 until 2006. A climatology analysis was done to estimate the anomaly rainfall over the study area, and it was added a tendency analysis to forecast the rainfall behave during the month of October for the last 10 years. The main purpose of this paper was estimating temporally and spatially-distributed rainfall properties with a more accuracy as possible and evaluating the applicability on the generation of a map involving potential areas of flash flooding risk in Tabasco and Chiapas. The use of GIS to understand the complexity of natural hazards in the context of geo-spatial and time is with most importance in the management and exploitation of information with high spatial resolution for integrating all possible variables by geographical information systems, GIS (Alvarez, 2004). The combination of results was conducted through geographic information systems, and allowed to show the different levels of government in a descriptive way through maps, so they were well understood by any authority, and the implementation of risk mitigation measures that the authorities may determine. The results represent an effort to ensure an understanding by the authorities concerned about the origin and behavior of the effects of extreme hydrometeorological phenomena, such as river and coastal flooding by using a geo-based rainfall data. And based on this knowledge and the use of geographic information systems is possible to estimate the risk of people

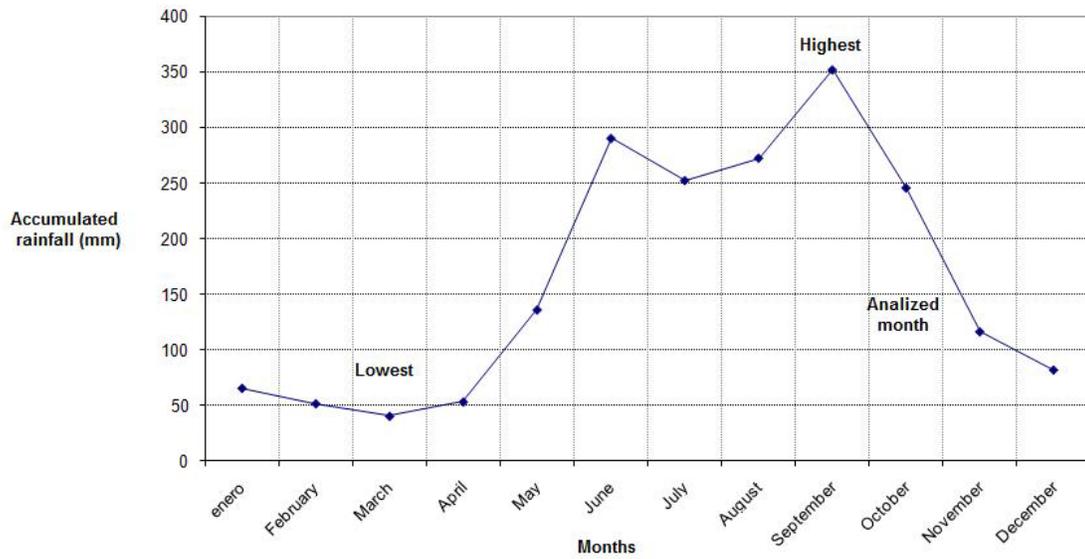
and property. Finally, we attempt to explain and provide well understood estimates to help the implementation of risk mitigation measures that the authorities may determine.

From this background, this paper analyzes historical rainfall data by using MALLA-SIG, and it was an important component in the scene of flooding during the presence of the cold front passed No. 4 in October 2007 in Chiapas and Tabasco, and helped to understand the causes of the disaster. The analysis is based by using geographic information systems, and overlapping thematic mapping to identify areas of greatest potential risk of flooding.

**STUDY AREA:** The study area includes Tabasco and Chiapas (**Figure 1**). The state of Tabasco is characterized such as a warm region with an average annual temperature of 27 °C, with a maximum average temperature of 36 °C reached in May. The minimum temperature is reached in January with 18 °C. The average annual rainfall is 2,550 mm, and most of the year is rainy. The highest rainfall happens between June and October. Tabasco is forming a coastal plain where the highest areas are in the borders with Chiapas and Guatemala with a highest altitude of 900 msnm. The affected area for the flash flooding in Tabasco corresponded to 5442.36 km<sup>2</sup>, and it was added to the wetlands with 9895.2 km<sup>2</sup>. In the case of Chiapas, the total area is 73289 km<sup>2</sup>. The temperature varies with the altitude. The annual average temperature over the highest zones is 18 °C, and over the coastal plains is 28 °C. The maximum average temperature is 30 °C, and the minimum is 17.5 °C. The north of Chiapas is rainy all the year, and the rest of the state only during the summer. The average annual rainfall varies between 1200 mm and almost 4000 mm in the Soconusco Mountains. The disaster during the first days of November was over the stream of Rio Grijalva due by a landslide over Ostuacán Municipality. The highest altitude is 1800 msnm with a slope toward Usumacinta River. Over the center of the state there are calcareous rocks with big fractures and falls provoking different big drains and canyons (an example is the Sumidero Canyon). The main rivers crossing over the study are the Río Grijalva and the Río Usumacinta. They are converging at north of the capital of Tabasco, Villahermosa, through the wildlife-rich wetlands known as the Pantanos de Centla before draining into the Gulf of Mexico. The climatology description over the study area has an annual average rainfall mean of 1958 mm. The maximum rainfall happen between June and October with a monthly mean over 250 mm. The minimum rainfall records are between March and April with a monthly mean below 60 mm (**Figure 2**).



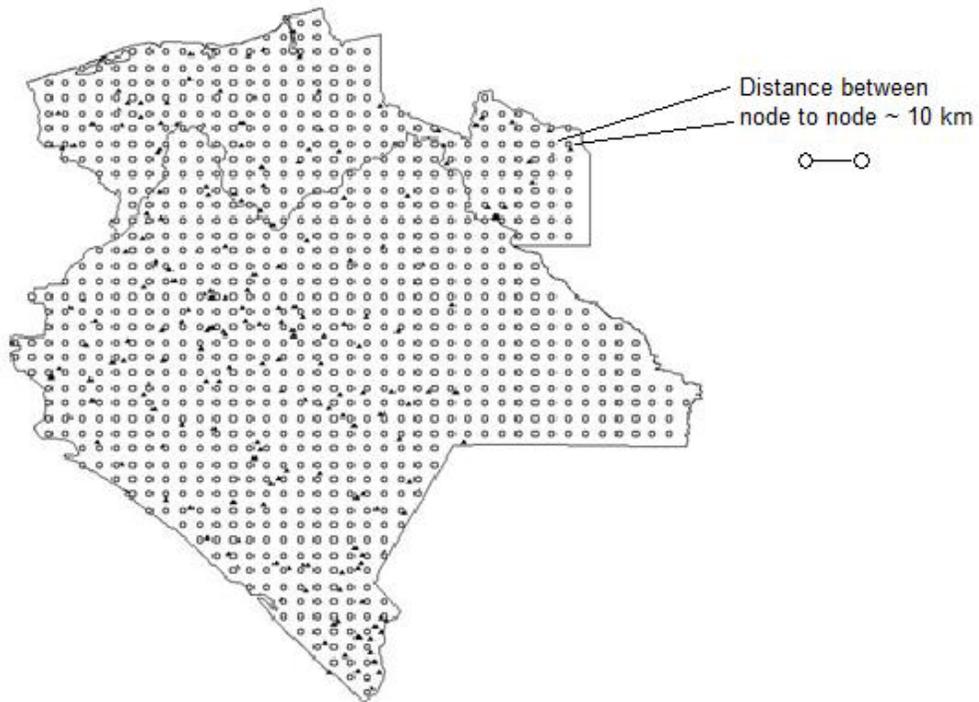
**Figure 1.** Study area of Tabasco and Chiapas.



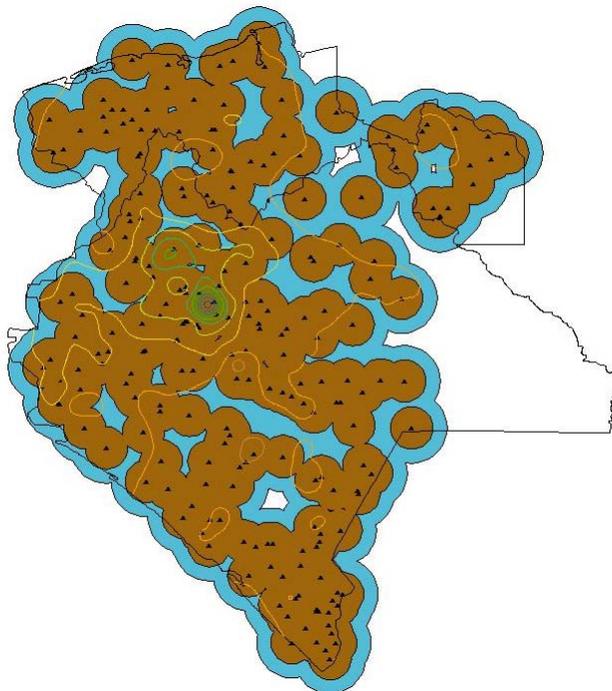
**Figure 2.** Accumulated rainfall by month over Tabasco and Chiapas. September is the highest and March is the lowest.

## INPUT DATA

Considering the problem of spatial and temporal gaps in the rain gauge data in the states of Tabasco and Chiapas, an alternative solution was to interpolate the data recorded by the system CLICOM. The considered data to be interpolated was from 1950 to 2006, and later transforms into a format of geographic information systems. The distance between nodes into the grid was every 10 km (**Figure 3**). The greater number of recorded data by the system during the 80's, was a coverage of 401 stations, and was quite acceptable for an analysis of the degree of confidence at the discretion of a coverage radius of 15 considering the topography, and 25 km for flat areas which each station has to be extrapolated on ground conditions (recommendations made by the World Meteorological Organization, WMO). The station coverage was quite acceptable for the rainfall analysis since just only 227 were considered since those are operational (**Figure 4**). The number of stations to monitor rainfall in the highlands of Chiapas (topographically rugged area), as well in the coastal plain of Tabasco had a high degree of confidence (flat area).



**Figure 3.** Data interpolation with a equidistance of 10 km between nodes.



**Figure 4.** The figure shows the buffers 15 and 25 km radius (brown and blue color respectively), around the stations used on the study area for the interpolation. The black triangles represent the number of rainfall records used for the interpolation.

## METHODOLOGY

The methodology was based on a historical analysis of rainfall using GIS on an interpolated georeferenced database, MALLA-SIG (**Figure 5**), which enabled calculation of the anomaly in the observed rainfall during the flooding in Tabasco and Chiapas. The used rainfall records from the formal basis of SMN includes data from 1950 to 2006, and are those that have registered and available to the general public. **Figure 6** shows the amount of annual highs records, and the highest occurred in 1982 with 3858 records, and the minimum amount of records occurred in 1950 with 603 records. The data had to be interpolated to remove the inconsistency in time and space on the country, and shape mesh 320 columns by 200 lines. Interpolation provided a separation between node and node in the mesh of  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , and 21,170 files were generated with these characteristics. The database was validated to know the degree of reliability. The correlation of the data was carried out between the actual observed records and interpolated mesh 10% of the total population of. The results show that in dry periods, the correlation factor decreases, while for files in the rainy season increases the correlation factor. The wettest months showed the factor was 0.67 (August-October), while the coefficient in the driest months of 0.633 was (from February to April). The evaluation results are shown in **Table 1**.

<b>Table 1.</b> Correlation coefficients calculated for the interpolated mesh and daily records of rainfall.											
Nov	Dic	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
0.66	0.65	0.65	0.67	0.64	0.59	0.63	0.67	0.70	0.65	0.69	0.67
r = 0.653			r = 0.633			r = 0.666			r = 0.670		
<b>TOTAL coefficient= 0.655</b>											

Then, these files were converted to a GIS format, and create a new database called MALLA-SIG, Ver. 2007. After this, there was a sufficient evidence of daily rainfall records for the past 57 years in a geographic information format. The rainfall analysis was geared to calculate monthly and annual climatology to know a normal behavior of the rainfall in Tabasco and Chiapas. Therefore, it was necessary to calculate the accumulated rainfall occurred during the event (October) in Tabasco and Chiapas. After this, it was done the calculation of the rainfall anomaly, and to know how much it had rained more compared to the normal. Likewise, we calculated the rainfall return period. Beside, a tendency analysis was done by using the annual accumulated rainfall and applying the first and second derivate over the last 57 years. The process can be seen of **Figure 7**.

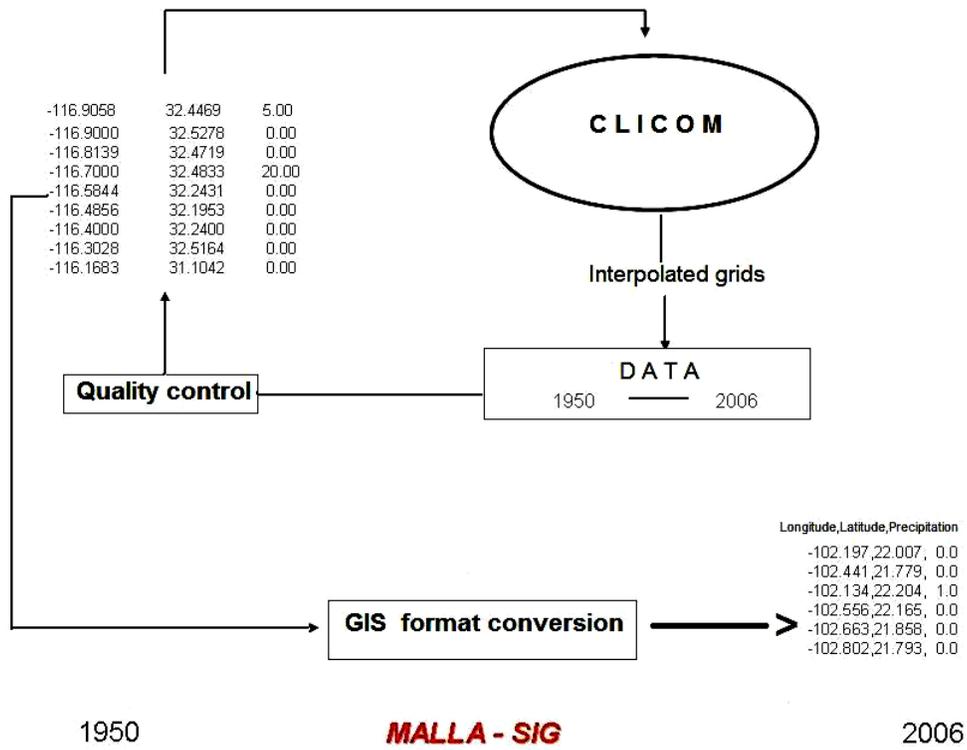


Figure 5. Construction of MALLA – SIG (1950-2006).

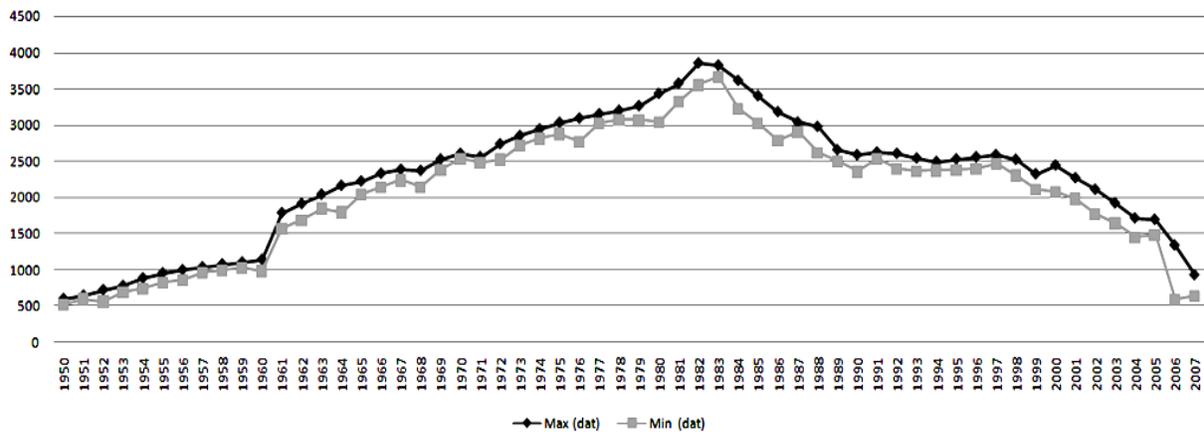
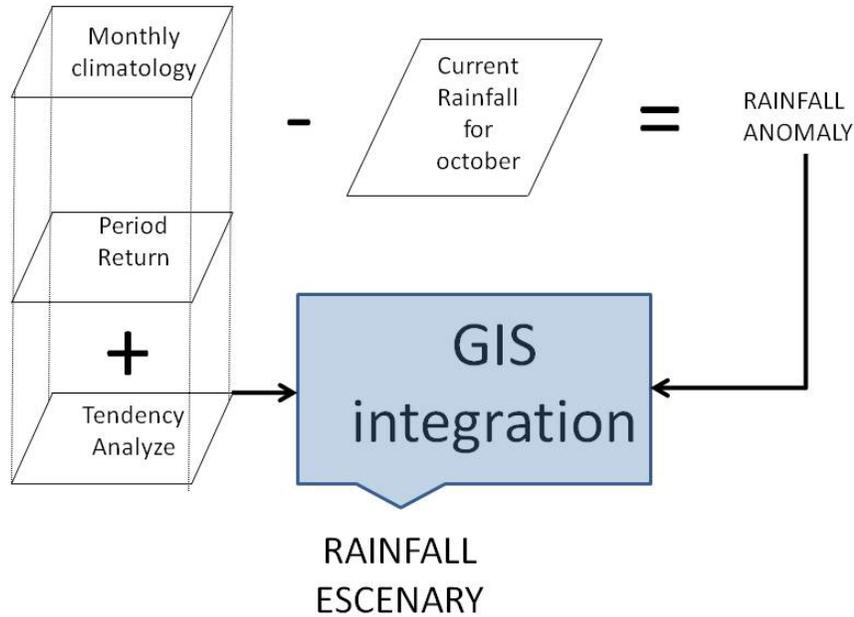


Figure 6. Maximum and minimum annual rainfall records from 1950 to 2007.

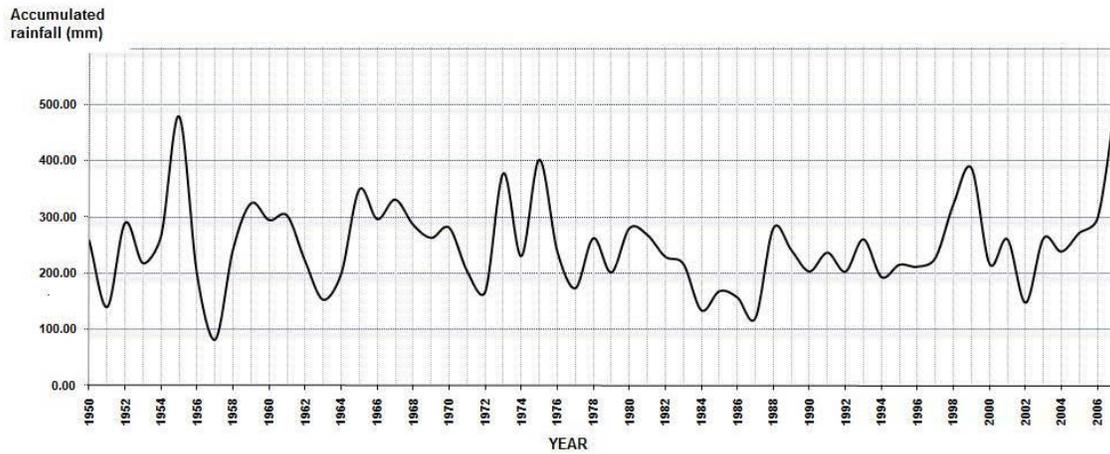


**Figure 7.** Rainfall analysis by using a Geographic Information System.

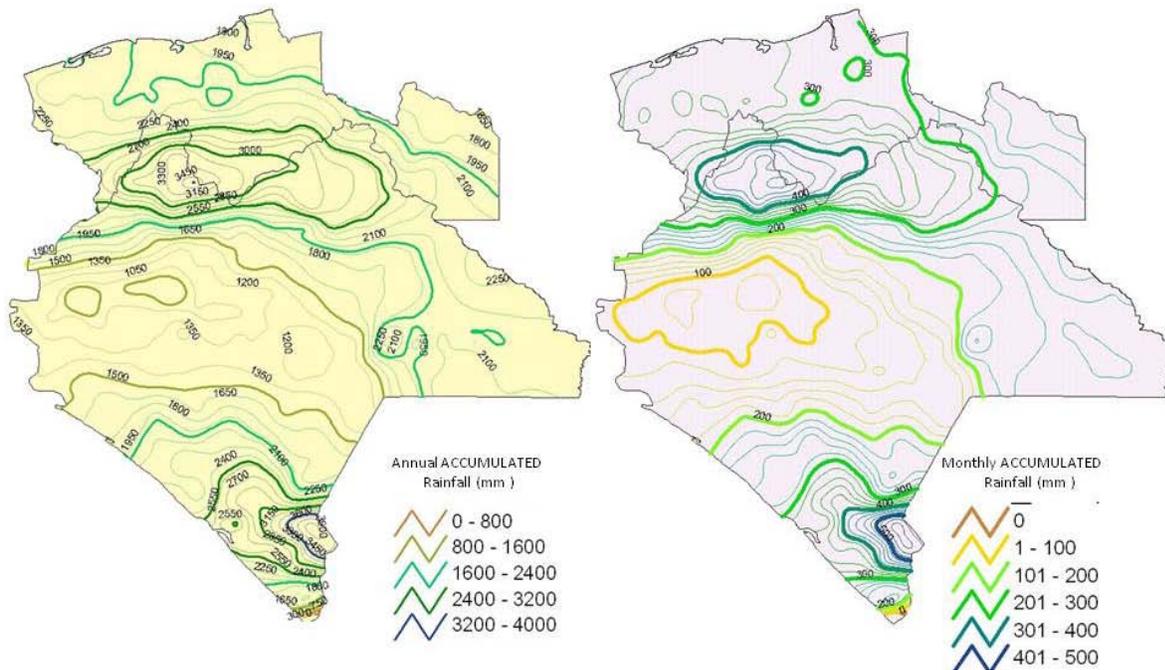
## RESULTS

The results of the analysis show that flooding in Tabasco and Chiapas was the result of a heavy rainfall. The monthly climatology analysis showed that September is the wettest with a slightly higher average of 350 mm, and the monthly climatology for October gave 246 mm. The highest accumulated rainfall for October occurred during 2007 with 497 mm (**Figure 8**). The rainfall climatology map shows that the most humid area is over the highest area between Tabasco and Chiapas (**Figure 9, left**), and it is below the accumulated rainfall of June, July and August with higher than 250 mm. The annual climatology gave 1958 mm (**Figure 9, right**). For some portions located at the high mountains of Chiapas reach almost 4000 mm. With regards what happened in the month of October 2007, the accumulated rainfall was 498 mm (**Figure 10, left**), and it was double compared with the monthly climatology of the last 57 years. The amount of rainfall observed over the study area was due the cold front No. 4, which began to cause effects on the country since October 18th. The conditions were unusual because the front was considered stationary, and caused winds with heavy moisture over the states of Tabasco and Chiapas. The most critical days for rainfall occurred during the last days of October (28 to 31), which the maximum value occurred on October 29 in Chiapas with 403 mm (**Figure 10, right**). The analysis of the

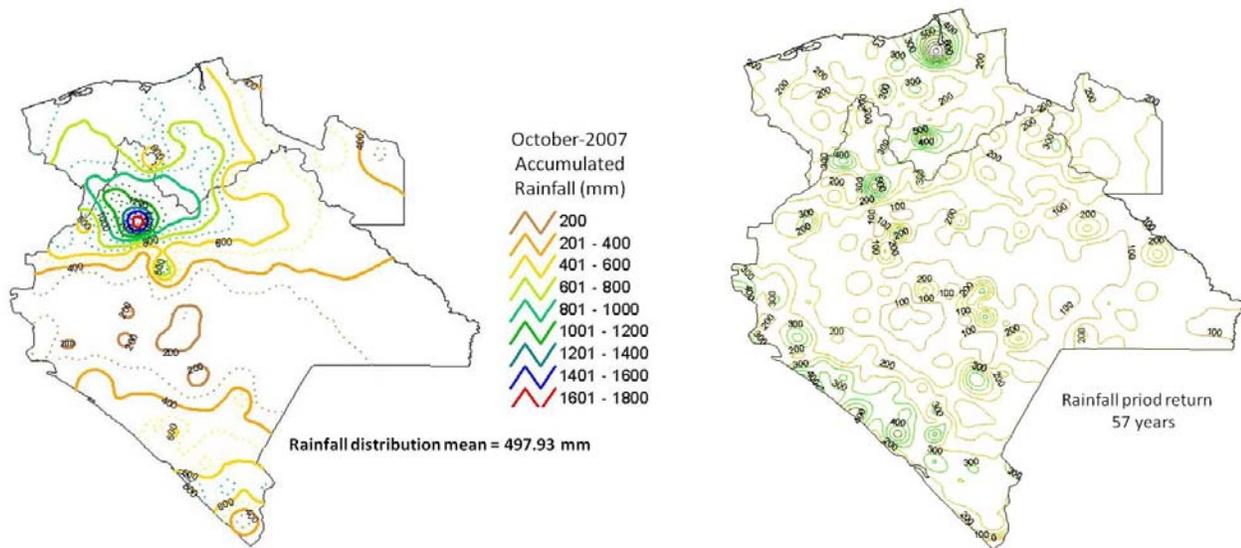
rainfall period return indicates that maximum rainfall value had a period of 57 years or more. This is because there is not another maximum value into the analyzed period of time.



**Figure 8.** Accumulated rainfall for October during the last 57 years (1950-2007).



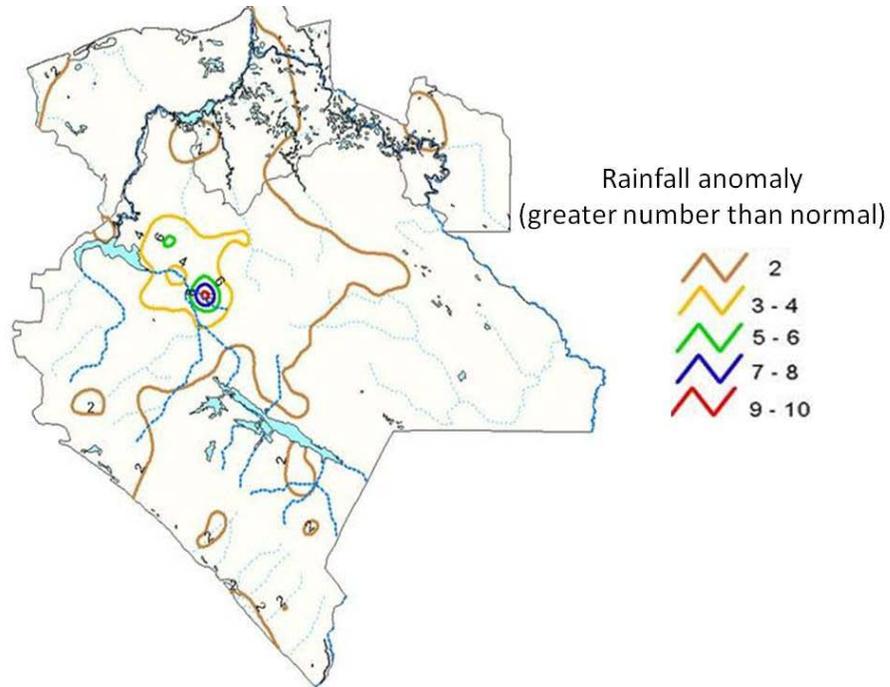
**Figure 9.** Annual (left) and monthly (right) rainfall climatology of the past 57 years.



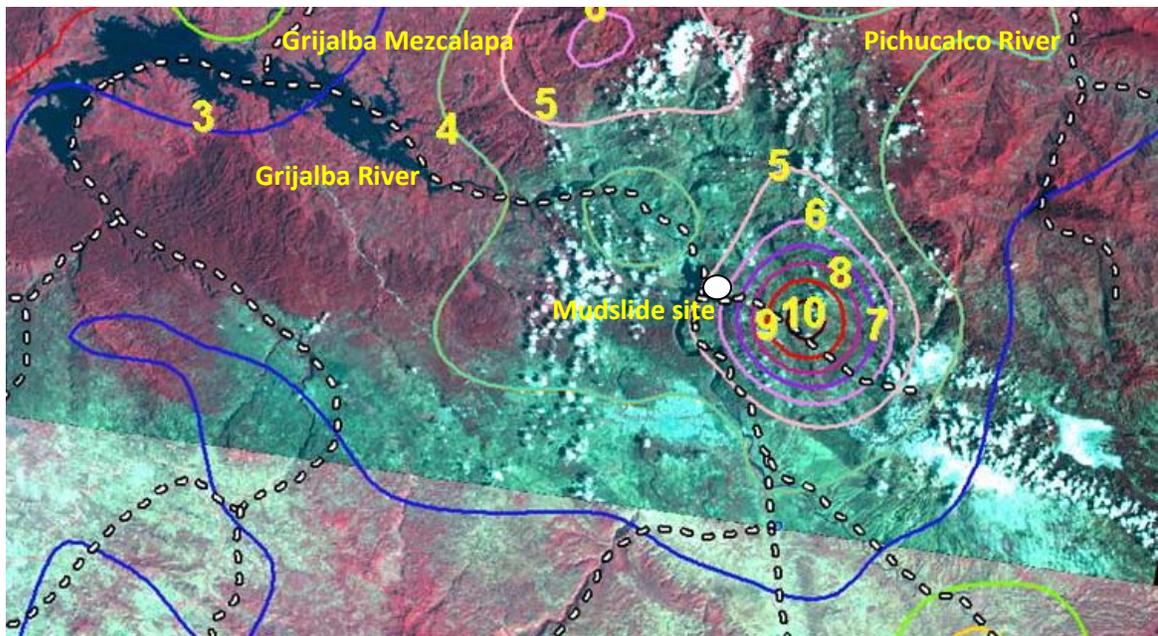
**Figure 10.** Accumulated rainfall for October 2007 (left), and the rainfall period return of the last 57 years (right).

Another important result was the analysis of the rainfall anomaly between the monthly climatology and what happened in October of 2007. The occurred rainfall over the area was 10 times greater than what usually happens (**Figure 11**). The rainfall concentration area was upstream on Mezcalapa, Tacotalpa, Pichucalco and Grijalva rieviers, which crossed the greatest rainfall concentration area. This caused an overflow downstream over Tabasco plain causing a severe flooding downstream. Beside, the heavy rainfall provoked a landslide in the Chiapas Range and close up the natural drainage of the Grijalva river.

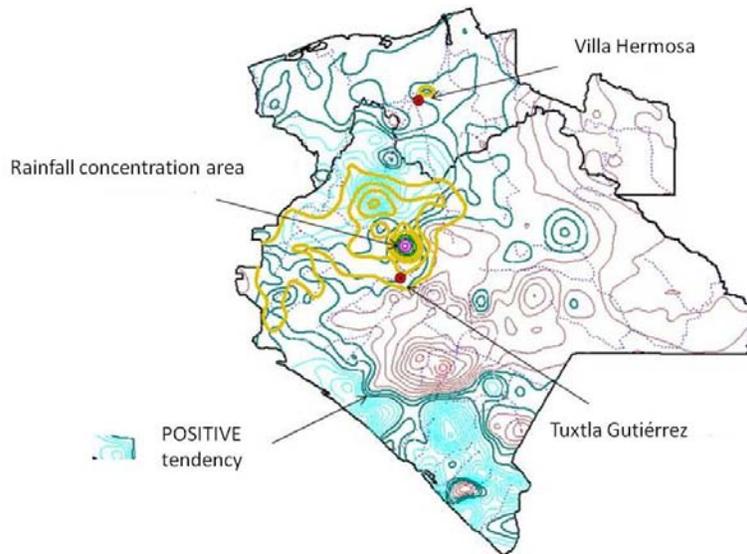
In addition, the flooding caused by the high concentration of rainfall provoked mudslides that occurred in the high mountains of Chiapas due the large amount of water infiltration, and causing the rolling motion there. A high deforestation level was observed by satellite image over the high rainfall concentration area, and shows a land cover change; agricultural activities instead the primary vegetation which was a tropical forest (**Figure 12**). The estimated tendency shows an increase about 40 mm up for October over the area with the highest concentration area (**Figure 13**).



**Figure 11.** Rainfall anomaly.



**Figure 12 .** Localization of the high rainfall concentration on a LANDSAT false color image (Image taken on May 2003).



**Figure 13.** Rainfall scenario for Tabasco and Chiapas(2000-2009).

## CONCLUSIONS

The benefits offered by MALLA - GIS and its application, allowed a rainfall analysis combining historical and current information during the flooding event occurred in October of 2007. Therefore, it is required fast and reliable information that can overcome and generated by other institutions, such as requested by most institutions like the National Housing Commission (CONAFOVI), and the National Institute of Statistics, Geography and Informatics (INEGI), since they want to know exactly what happened with rainfall during the event compared what usually happens, and without discrediting the hypothesis of some authors about the event occurred was due by a storm surge caused by the cold front and kept the surface drainage of rivers into coastal zone. What this study is shown that rainfall surpassed the historical statistics of the past 57 years. Moreover, according to the analysis of tendencies in Tabasco and Chiapas (the most humid area of the country), it was estimated a positive tendency, and means that the area of Tabasco and Chiapas should be prepared for the upcoming rainy season.. Beside, the anthropogenic activities can be added since a strongest agricultural activity is causing a high level of deforestation. And it is important to mention that the concentration of populations was found out located on the banks of rivers, and most areas is based on a wealth flowing rivers, and should be expected another similar disaster since the people is not prepared against the extreme meteorological phenomena, and the main recommendation for the authorities is to take the necessary steps requirements.

## REFERENCES

- Álvarez A. 2004. Sobre la Evaluación de Riesgo de Desastres Naturales y Vulnerabilidad de la Comunidad Utilizando Sistemas de Información Geográficos. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. 5 (2), 101-105.
- Baum RL and Reid ME 1995 Geology, hydrology and mechanics of a slow-moving, clay-rich landslide, Honolulu, Hawaii, in *Clay and Shale Slope Instability*, edited by W. C. Haneberg and S. A. Anderson, pp. 79–105.
- Burton A and Bathurst JC 1998 Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale *Environmental Geology* 35, 89–99.
- Carrara A, Cardinali M, Detti R, Guzetti F, Pasqui V and Reichenbach P 1991 GIS techniques and statistical-models in evaluating landslide hazard *Earth Surface Processes and Landforms* 16, 427-45.
- Carrara A, Guzetti F, Cardinali M and Reichenbach P 1999 Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard *Natural Hazards* 20, 117-35.
- D'Odorico P and Fagherazzi S 2003 A probabilistic model of rainfall-triggered shallow landslides in hollows: a long-term analysis *Water Resources Research* 39, 1262.
- Franks CAM 1997 Study of rainfall induced landslides on natural slopes in vicinity of Tung Chung New Town, Lantau Island. *Geo Report No.57*, Engineering Office, Hong Kong, pp 102.
- Guimaraes RF, Montgomery DR, Greenberg HM, Fernandes NF, Trancoso RAG and de Carvalho OA, Jr 2003 Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro *Engineering Geology* 69, 99-108.
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M and Reichenbach P 1999 Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy *Geomorphology* 31, 181-216.
- Herath S, Ratnayake U. 2004. Monitoring rainfall trends to predict adverse impacts—a case study from Sri Lanka (1964–1993). *Global Environmental Change* 14, 71–79.
- Iverson R. 2000. Landslide triggering by rain infiltration *Water Resources Research* 36, 1897-1910.
- Lan HX, Lee FC and Martin DC 2005 Dynamic characteristics analysis of shallow landslides in response to rainfall event using GIS *Environmental Geology* 47, 254-255.
- Lan HX, Wu FQ and Zhou CH 2003 Rainfall-induced landslide Hazard spatial analysis and prediction using GIS *Chinese Science Bulletin* 48, 703-708.
- Montgomery DR and Dietrich WE. 1994. A physically-based model for the topographic control on shallow landsliding *Water Resources Research* 30, 1153-71.

- Terán A e Ibarra M. 2007. Impacto de la Deforestación en la Cuenca Alta de Chiapas. Reunión Nacional de Seguridad de Presas. Monterrey, N.L. Julio de 2006.
- Wilkinson PL, Anderson MG and Lloyd DM. 2002. An integrated hydrological model for rain-induced landslide prediction *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 1285-129.
- Wu W and Sidle RC 1995 A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins *Water Resources Research* 31, 2097–211.