

Tesis defendida por  
**Nancy Pérez Morga**  
y aprobada por el siguiente Comité

---

Dr. Thomas Günter Kretschmar  
Director del Comité

---

Dra. María Tereza Cavazos Pérez  
Miembro del Comité

---

Dr. Adán Mejía Trejo  
Miembro del Comité

---

Dr. Francisco Muñoz Arriola  
Miembro del Comité

---

Dr. Antonio González Fernández  
Coordinador  
Programa de Posgrado en Ciencias de  
la Tierra

---

Dr. Jesús Favela Vara  
Encargado de despacho de la  
Dirección de Estudios de Posgrado

Agosto 2013

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
DE ENSENADA**



---

Programa de Posgrado en Ciencias  
de la Tierra

---

Hidroclimatología de las cuencas del Sureste Mexicano con énfasis en los flujos  
superficiales, precipitación y teleconexiones

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

Doctor en Ciencias  
Presenta:

Nancy Pérez Morga

Ensenada, Baja California, México  
2013

Resumen de la tesis de Nancy Pérez Morga, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Hidroclimatología de las cuencas del Sureste Mexicano con énfasis en los flujos superficiales, precipitación y teleconexiones

Resumen aprobado por:

---

Dr. Thomas Günter Kretzschmar

Se realizó un estudio sobre la variabilidad interanual de la lluvia de verano y los flujos de agua superficial en cuencas costeras de Sur de Oaxaca, México (Río Verde, Río Tehuantepec, y la región costera del Sur), así como su relación con El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP). Mediante la aplicación de un análisis de Componentes Principales (ACP) se llevó a cabo una regionalización a partir de datos de precipitación correspondientes a 47 estaciones climatológicas entre 1961 a 1990. El ACP dio como resultado cuatro regiones. Veinte estaciones hidrológicas fueron analizadas y agrupadas de acuerdo a las regiones derivadas del ACP. En las cuatro regiones la variabilidad de los flujos de agua estuvo significativamente correlacionada (95 % nivel de confianza) con la lluvia anual. El volumen de la escorrentía anual fue mayor en la región 1 (Río Verde y costa de Oaxaca), mientras que durante los eventos extremos de precipitación diaria, el máximo flujo fue observado en la región 3 (Río Tehuantepec). Se encontró una correlación negativa, al 95 % nivel de confianza, entre las anomalías de precipitación en la región 3 y el índice Oceánico El Niño (ONI). A partir de las anomalías de precipitación anual, se identificaron años húmedos y secos ( $\pm 1$  desviación estándar). Los años húmedos fueron asociados principalmente con anomalías de Temperatura Superficial del Mar (TSM,  $\geq -0.6^{\circ}\text{C}$ ) similares a una Niña débil y condiciones frías neutrales, mientras que los años secos con anomalías positivas, similares a condiciones neutrales cálidas ( $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ). La mayor diferencia al inicio de la canícula fue observada en el valle de Oaxaca. En cada región derivada del ACP, se evaluó el umbral del percentil 95 de los eventos de precipitación diaria y se clasificaron como aquellos derivados de ciclones tropicales (CTs) del Pacífico Tropical y los no causados por ciclones (no-CTs). La contribución mayor derivada de estos CTs a la lluvia anual se observó en la región 3. Esta contribución mostró una tendencia positiva y significativa en la región 1 (Bajo Río Verde) y una tendencia negativa en la región 4 (Valle de Oaxaca).

Palabras clave: **Hidroclimatología, precipitación, escorrentía, ENOS, ODP, “Canícula”.**

Abstract of the thesis presented by Nancy Pérez Morga as a partial requirement to obtain the Doctor in Science degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

Hydroclimatology of coastal river basins in Southern Mexico with emphasis in streamflow, precipitation and teleconnections

Abstract approved by:

---

Dr. Thomas Günter Kretzschmar

Abstract

Interannual variability of summer rainfall and streamflow in coastal river basins in Southern Oaxaca, Mexico (Río Verde, Río Tehuantepec, and the Southern Coast) were compared and the relationship with El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Pacific Decadal Oscillation (ODP) were evaluated. A regionalization based on an oblique-rotated component analysis (PCA) was applied to 47 climatological stations, in the period from 1960 to 1990, and four precipitation regions were defined. Twenty streamflow stations were clustered according to the four regions derived from the PCA. A correlation between annual precipitation and annual streamflow in each region was carried out; in the four regions, streamflow variability was significantly correlated (95% level) with annual rainfall. Higher runoff was found in region 1 (Río Verde and South coast), while in extreme daily precipitation events, a higher peak flow was found in region 3 (Río Tehuantepec). A significant negative correlation at the 95 % level was only found with the Oceanic El Niño Index (ONI) in rainfall Region 3. Wet years were mainly associated with sea surface temperature (SST) anomalies ( $\geq -0.6^{\circ}\text{C}$ ) similar to weak La Niña and Neutral cool conditions, while dry years with positive SST anomalies similar to Neutral warm conditions ( $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ). This rainfall-streamflow relationship with ENSO means that during La Niña conditions, the streamflow is expected to show the highest levels, which may affect the regional water resource management. Main difference at the “canícula” start was observed in Oaxaca Valley. In each derived PCA region, the top 95 percentile (P95) of daily precipitation events were also evaluated and separated into tropical cyclone- (TC) derived rainfall extremes of the Eastern Tropical Pacific (EPAC), and non-tropical cyclone (NTC) rainfall events. The largest contribution from TCs to the annual precipitation was observed in Region 3. A significant upward trend in the contribution of TC-derived precipitation to the annual precipitation was found only in Region 1 (Low Río Verde), and a significant downward trend, in Region 4 (the Oaxaca Valley).

**Keywords: hydroclimatology, precipitation, streamflow, runoff, ENSO, ODP, Mid Summer Drought.**

## Dedicatorias

A mi mamá<sup>†</sup>, por su gran ejemplo y amor.

A mi papá, por su generosidad y apoyo.

A Juan, por su apoyo incondicional.

A Juan David, Lucía, y la pequeña Darani, por llenarme de energía cada día, por sus sonrisas que siempre me acompañan y su paciencia.

## Agradecimientos

A los miembros del Comité de Tesis por sus valiosas aportaciones y sugerencias para mejorar este trabajo.

Un especial agradecimiento al Dr. Stephen V. Smith por todas sus enseñanzas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por las facilidades otorgadas y apoyo económico proporcionado.

Al instituto de Oceanografía SCRIPSS de la Universidad de California, San Diego, División de Ciencias Atmosféricas y Oceanografía Física, por las facilidades otorgadas durante la estancia realizada en su institución bajo la inspección y tutoría del Dr. Francisco Muñoz Arriola.

Al Instituto Nacional de Ecología por el apoyo económico y facilidades otorgadas durante la estancia en los talleres de cambio climático, bajo la coordinación del Lic. Uriel Bando Murrieta.

A Martha Barrera, Magda Chávez, Enid Morán, e Ivonne Pedrín por el apoyo administrativo proporcionado dentro de CICESE.

A una lista innumerable de amigas y amigos cuyo apoyo ha sido invaluable.

## Contenido

	Página
Resumen español.....	ii
Resumen inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tablas.....	xii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos.....	4
1.2. Hipótesis.....	5
1.3. Área de estudio.....	6
Capítulo 2. Antecedentes.....	12
2.1. <i>Geología</i> .....	12
2.2. <i>Hidrogeología</i> .....	13
2.3. <i>Precipitación</i> .....	17
Capítulo 3. Metodología.....	20
3.1. Diseño experimental.....	20
3.1.1. Análisis de Precipitación.....	21
3.1.1.1. Datos y calidad de datos.....	21
3.1.1.2. Análisis de componentes principales.....	25
3.1.1.3. Sequía de medio verano.....	26
3.1.1.4. Eventos extremos.....	26
3.1.2. Análisis de la hidrología superficial.....	27
3.1.2.1. Datos y calidad de datos.....	27
3.1.2.2. Análisis de correlación y componentes principales.....	28
3.1.2.3. Características morfológicas de las cuencas.....	28
3.1.2.4. Escorrentía.....	31
3.1.3. Hidroclimatología.....	34
Capítulo 4. Precipitación.....	35
4.1. Patrón de precipitación.....	35
4.2. Regionalización derivada del ACP.....	37
4.3. Serie temporal y relación con los índices ONI y ODP.....	41
4.4. Sequía de medio verano.....	46
4.5. Eventos extremos de precipitación diaria.....	49
4.6. Anomalías de temperatura superficial del mar durante años húmedos y secos.....	52

	Página
Capítulo 5. Hidrología.....	55
5.1. Flujos de agua superficial.....	55
5.2. Patrones de escorrentía para cada región derivada del ACP.....	66
Capítulo 6. Hidroclimatología.....	69
6.1. Correlaciones entre la precipitación y los flujos de agua superficial.....	69
6.2. Relación con eventos extremos relacionados con ciclones tropicales a escala diaria.....	72
Capítulo 7. Discusiones.....	74
7.1 Efectos locales.....	74
7.2 Precipitación y relación con el ENOS y la ODP.....	74
7.3 Eventos extremos diarios asociados a CTs y No-CTs.....	75
7.4 Hidroclimatología.....	76
Capítulo 8. Conclusiones.....	78
Referencias bibliográficas.....	80
Apéndices.....	86

## Lista de figuras

Figura		Página
1	Área de estudio, elevación, cuencas hidrológicas y regiones fisiográficas.....	7
2	Pendiente del terreno calculada para las tres cuencas.....	8
3	Tipo de suelo del área de estudio.....	10
4	Uso de suelo y vegetación del área de estudio.....	11
5	Tectono-estratigrafía del Sur de México (Ortega Gutiérrez <i>et al.</i> , 1999), señalado con un recuadro azul el área de estudio.....	13
6	Tipo de roca del área de estudio.....	14
7	Redes hidrológicas, ríos principales y ubicación de estaciones hidrológicas.....	16
8	Promedio estacional para los meses de mayo a octubre de a)- f) respectivamente.....	19
9	Distribución de estaciones climatológicas e hidrológicas.....	21
10	Diagrama que indica el proceso de calidad realizado.....	23
11	Diagrama de la metodología utilizada en este estudio en donde el producto final es la Hidroclimatología regional (HC).....	24
12	Distribución espacial de la precipitación anual (mm/año) y localización de estaciones durante el periodo de 1961 a 1990.....	36
13	Precipitación media anual (mm) sobre el área de estudio derivada de 47 estaciones climatológicas.....	36
14	Cuatro regiones principales de precipitación derivadas del ACP usando el contorno de 0.4.....	38
15	Precipitación media anual sobre todas las estaciones en cada una de las regiones.....	40

Figura		Página
16	Anomalías de precipitación (Z) de mayo a octubre en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando ONI >0.5 (flecha hacia arriba), La Niña ONI < -0.5 (flecha hacia abajo) y neutral, ONI entre -0.5-0.5 (f).....	42
17	Anomalías de precipitación (Z) de junio en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando ONI >0.5 La Niña ONI <-0.5 y neutral, ONI entre -0.5-0.5 (f).....	43
18	Anomalías de precipitación (Z) de julio a agosto en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando ONI >0.5 La Niña ONI <-0.5 y neutral, ONI entre -0.5-0.5 (f).....	44
19	Anomalías de precipitación (Z) de septiembre a octubre en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando ONI >0.5, La Niña ONI <-0.5 y neutral, ONI entre -0.5-0.5 (f).....	45
20	Precipitación de junio menos julio (inicio de la canícula) para cada región y valores de ONI. La media climatológica para cada región se indica con una línea intermitente.....	47
21	Inicio de la canícula. Diferencia entre la precipitación de junio y julio para el periodo de 1961 a 1990.....	48
22	Inicio de la canícula estandarizada con la media. Diferencia entre la precipitación de junio y julio entre la media climatológica de mayo a octubre para el periodo de 1961 a 1990.....	48
23	Fuerza de la canícula estandarizada con la media. Diferencia entre el máximo de mayo a octubre menos el mínimo entre la media climatológica para el periodo de 1961 a 1990.....	49

Figura		Página
24	Contribución del P95 (%) de eventos extremos de precipitación diaria derivados de CT (negro) y N-CT (gris) a la lluvia anual. (a-d) contribución del P95 de la CP1 a la CP4, respectivamente. (e) Contribución promedio para las cuatro regiones. Se muestra una línea de tendencia significativa ( $p < 0.05$ ).....	50
25	Promedio de los eventos extremos ocurridos para las todas las estaciones, con negro los asociados a ciclones tropicales (CTs) y con gris a otros orígenes (No- CTs).....	52
26	Promedio de junio a octubre de anomalías de TSM para los años secos (a) y húmedos (b).....	54
27	Flujos de agua superficial en las estaciones hidrológicas ubicadas en las tres regiones derivadas del ACP.....	55
28	Componente 1 para los flujos de agua, la cual explica 86 % de la varianza.....	56
29	Componente 2 de los flujos de agua, la cual explica 7 % de la varianza.....	56
30	Proyección de la componente 1 y 2, los círculos muestran los grupos que se separan.....	57
31	Componente 1 de los flujos de agua, obtenidos sin la estación de mayor varianza. El porcentaje explicado es del 70 %.....	58
32	Flujos superficiales de agua para las estaciones hidrológicas dentro de la región 1 derivada de ACP.....	60
33	Flujos superficiales de agua para las estaciones hidrológicas dentro de la región 2 derivada de ACP.....	60
34	Flujos superficiales de agua para las estaciones hidrológicas dentro de la región 3 derivada de ACP.....	61
35	Ciclo anual para flujos de agua superficial (periodo promedio de 1961 a 1990) para la región 1.....	62
36	Ciclo anual para flujos de agua superficial (periodo 1961 a 1990) para la región 3.....	63

Figura		Página
37	Ubicación de las estaciones hidrológicas en la región 3.....	63
38	Ciclo anual para flujos de agua superficial (periodo 1972 a 1990) para la región 4.....	64
39	Ciclo anual del flujo de agua para las tres regiones.....	65
40	Secciones en las que se dividieron las cuencas para evaluar la escorrentía en las cuatro regiones.....	66
41	Escorrentía anual (Mm <sup>3</sup> ). a) hasta c) muestran la escorrentía anual para la R1, R2 y R3 respectivamente.....	68
42	Correlaciones entre los flujos de agua superficial, y la precipitación para promedios de mayo a octubre (correlaciones promedio).....	69
43	Diagrama para ilustrar algunos de los principales resultados climatológicos encontrados en este estudio.....	70
44	Coeficientes canónicos para la variante 1 y 2 entre dos regiones diferentes.....	71
45	Trayectoria del huracán Orlene.....	72
46	Precipitación y flujo de agua para el huracán Orlene; en la parte superior la precipitación de la vertiente del Río Yolotepec, en la parte inferior, la del Río Atoyac.....	73

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Características generales de las cuencas hidrológicas.....	17
2	Tamaño de una cuenca de acuerdo a su área.....	29
3	Promedios de precipitación (mm) anual y estacional regionales.....	38
4	Correlaciones entre las anomalías de precipitación Z en las cuatro regiones y los índices ONI y ODP.....	46
5	Umbrales (P95) utilizados para clasificar eventos diarios extremos y porcentaje de contribución de CTs y no CTs....	51
6	Corrientes principales y sus gastos anuales máximos y mínimos.....	59
7	Escorrentía calculada para cada una de las regiones.....	67

# Capítulo 1

---

## Introducción

El estudio hidrológico de cuencas costeras en el estado de Oaxaca y su relación con la precipitación es importante debido a la demanda de agua que el sector turístico y agrícola presentan para la región; en los últimos años esta demanda de agua se ha acrecentado debido al aumento de la población, principalmente en la zona costera, en el estado de Oaxaca, el mayor número de habitantes se concentra en las ciudades de Oaxaca de Juárez, Tuxtepec, Juchitán, y Salinacruz (INEGI, 2010).

Entre las actividades económicas principales en el estado están: comercio y servicios, 47.6 %, agricultura 32.4 %, y construcción, 19 % (INEGI, 2010). En el sector agricultura, el agua es de particular interés ya que de él dependen las cosechas que se producen y, en el caso de los cultivos de temporal (95 %), el conocimiento de la precipitación se vuelve un factor primario. Esta actividad se desarrolla principalmente en los valles, en las llanuras costeras del Sur y en el Noreste de la entidad, siendo el maíz uno de sus principales cultivos (INEGI, 2010). Este cultivo en el valle de Oaxaca data desde 1400 A. C., fecha a partir de la cual ha sido implantado como una actividad de significativa subsistencia (Hodges, 1987). Los cultivos extensivos principales en Oaxaca además del maíz son: pastos, frijol, trigo, melón, sandía (cultivos de temporal) y el café (cultivos perennes), de los cuales sólo el maíz representa el 9 % de la siembra de este cultivo a nivel nacional (INEGI, 2009). En el estado de Oaxaca el consumo de agua del sector agrícola en 2009 fue de 875 hm<sup>3</sup>/año, lo que representa el 78 % del total de agua utilizada, del cual el agua superficial contribuye con 658 hm<sup>3</sup>/año (59% del total; CONAGUA, 2011).

Este estudio se enfoca en tres cuencas hidrológicas las cuales son consideradas como regiones prioritarias para el país definidas así por los servicios ambientales que representan y su biodiversidad; estas regiones son: a) región hidrológica Río Verde-Laguna Chacahua, b) las regiones marítimas de Chacahua-Escobilla, Puerto Angel-Mazunte y Huatulco y c) las regiones terrestres, Bajo Río Verde-Chacahua y Sierra Sur y Costa de Oaxaca (CONABIO, 2012 a). Entre los servicios ambientales que representan estas cuencas, además de su disponibilidad como recurso hídrico, se encuentran su funcionamiento como reservorios de carbono y como protección de la costa durante eventos extremos como ciclones tropicales y huracanes, actuando como barreras naturales en donde la vegetación y el sedimento que albergan estas cuencas costeras, amortiguan la energía del viento y oleaje durante estos fenómenos (CONABIO, 2012 b). En el Sureste de México, desde la mitad del siglo pasado se ha notado un incremento en la precipitación diaria extrema, pero la falta de datos es uno de los principales problemas que se tiene para estudiar a fondo estos eventos (Easterling *et al.*, 2000); sin embargo, a escala regional, las cuencas hidrológicas del estado no han sido evaluadas, por lo que este estudio se enfoca en cubrir este hueco de información en esta región.

El impacto de los huracanes sobre la costa de Oaxaca ha sido documentado desde una perspectiva ecológica (Villegas Romero *et al.*, 2009, Villegas Romero *et al.*, 2004) y socio-económica (Endfield *et al.*, 2004, Bitrán Bitrán, 2002). Por ejemplo, el huracán Paulina causó pérdidas económicas de \$450 millones de dólares (Bitrán Bitrán, 2002). En un estudio sobre las ocurrencias de huracanes para el periodo de 1993 al 2007 en la región del Pacífico Oriental, 53% de estos fueron clasificados como huracanes mayores y una tercera parte de ellos se acercaron a las costas mexicanas; la localización de los huracanes más intensos (según la categoría de Saffir-Simpson) varió de acuerdo al progreso de la estación de lluvia, observándolos cerca del Sur de México durante el mes de junio, luego alejándose durante julio y agosto y regresando a tierra en septiembre, pero

más alejados que durante junio (Sánchez *et al.*, 2009). En la laguna Pastoría, en el Bajo Río Verde, estudios con núcleos de sedimentos han asociado eventos de El Niño con la presencia de huracanes durante el Holoceno (Goman *et al.*, 2005).

En su mayoría, los estudios de eventos extremos (de sequía y lluvia) en México se han enfocado principalmente en el Noroeste y parte Central de México (e.g. Magaña *et al.*, 2003; Cavazos *et al.*, 2008; Arriaga Ramírez y Cavazos, 2010; Méndez y Magaña, 2010), mientras que sólo pocos estudios se enfocan en el Sur de México (Dilley, 1996; Mendoza *et al.*, 2006; Peralta Hernández *et al.*, 2009).

Mediante el análisis de índices de lluvia extrema en el Sureste de México se ha encontrado un incremento en los eventos de precipitación diaria de 1960 al 2004, con un salto a inicios de los 70's, en donde la variación de los eventos extremos fue significativamente relacionada con El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y con la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), con la mayor parte de la lluvia diaria ocurriendo durante La Niña (ENOS Negativo) y la fase positiva de la ODP (Peralta Hernández *et al.*, 2009). En contraste, eventos de El Niño (ENOS positivo) han favorecido condiciones de humedad (anomalías mensuales estandarizadas mayores a un valor umbral de 0.5) en el Sur de México, pero durante los veranos de la fase negativa de la ODP (Pavía *et al.*, 2006).

En el caso de los eventos de sequías, en el valle de Oaxaca, estos eventos han sido asociados con condiciones de El Niño, observándose una reducida producción de maíz (Dilley, 1997). Estos eventos coincidieron con un desplazamiento hacia el Sur de la Zona Inter-tropical de Convergencia (ZITC) durante la fase negativa de la Oscilación del Sur y una disminución de las frecuencias de las tormentas en el Golfo de México (Dilley, 1996). En el Noroeste de México esta asociación de El Niño con condiciones de sequía han sido encontradas durante la fase positiva de la ODP en cuencas continentales del Golfo de California (Brito Castillo *et al.*, 2003). Por otro lado, en costas mexicanas, un número reducido de ciclones tropicales tocando tierra durante El Niño fue también observado durante 1961 a 1990 (Jáuregui, 1995).

El estudiar la precipitación y su relación con el ENOS y la ODP a nivel regional, de una manera integral, no sólo como cuencas hidrológicas individuales sino estudiando las relaciones e interacciones que entre el clima y entre estas mismas pueda haber es importante para evaluar la variabilidad de los flujos de agua superficial en la región, conocer de qué variables dependen y porqué fenómenos está siendo modulado, con el fin de prever la disponibilidad de agua en la región, principalmente durante eventos extremos que es cuando se tiene un mayor impacto en las actividades económicas.

Las cuencas hidrológicas costeras de Oaxaca que fueron estudiadas se extienden desde la costa hasta cientos de kilómetros adentro del continente atravesando diferentes tipos de ambientes, vegetación, altitud y relieve. Los ríos de estas cuencas desembocan en el Océano Pacífico, y su estudio es de gran interés debido a su ubicación al Sur de la región del monzón mexicano, en los límites de la Zona Inter-tropical de Convergencia (ZITC), y particularmente, frente a la región de la alberca cálida en el Golfo de Tehuantepec (Lavín *et al.*, 1996; Magaña *et al.*, 1999), estas albercas han sido asociadas a convección y precipitación (Webster, 1994). Por lo que es de interés estudiar cómo la variabilidad en los flujos de agua superficial y escurrimientos en esta región es regulada por la variabilidad climática que es caracterizada por eventos como ENOS, ODP, y ciclones tropicales.

## **1.1 Objetivos**

### **Objetivo general:**

Estudiar la respuesta de la hidrología superficial de las cuencas de la costa de Oaxaca a la variabilidad estacional e interanual de la precipitación medida a través de su relación con fenómenos como ENOS y la ODP.

**Objetivos particulares:**

- Regionalizar la precipitación y estudiar la variabilidad estacional e interanual en las cuencas costeras de Oaxaca.
- Determinar la relación entre la variabilidad estacional, interanual, e interdecadal de la precipitación regional con los fenómenos ENOS y la ODP.
- Estudiar los efectos locales debido a la topografía de la región.
- Estudiar la variabilidad interanual del inicio de la sequía de medio verano así como su variabilidad espacial.
- Evaluar los eventos extremos de precipitación diaria y su contribución a la variabilidad de la precipitación interanual.
- Analizar la variabilidad interanual de los flujos de agua superficial y la escorrentía, así como el efecto de la vegetación y tipo de suelo.
- Determinar la relación entre la variabilidad interanual de los flujos de agua superficial y la precipitación.

**1.2 Hipótesis**

La variabilidad temporal de los flujos de agua superficial en Oaxaca dependen de la variabilidad estacional e interanual de la precipitación, la cual a su vez es modulada por eventos regionales y por teleconexiones de gran escala. Sobre el Sur de México se esperan flujos de agua mayores durante La Niña y la fase negativa de la ODP, mientras que se esperan periodos más secos durante El Niño. Se estima que haya una diferenciación regional de la precipitación debido a la diferencia en vegetación y topografía entre cuencas, la cual también se verá reflejada en la escorrentía. También se espera observar una precipitación mayor

asociada al efecto de la alberca cálida en el Golfo de Tehuantepec sobre las cuencas costeras cercanas.

### 1.3 Área de estudio

El área de estudio se localiza en la región Sureste del Pacífico Mexicano (Fig. 1), abarca las cuencas hidrológicas costeras del estado de Oaxaca: (1) Río Verde, (2) Río Tehuantepec, y (3) la región Costa del Sur; esta última región incluye varias pequeñas cuencas (Río Colotepec, Río Copalita, Río Astata, entre otras, las cuales cubren 60 % de esta región). Estas cuencas se definieron a partir de un modelo de elevación digital de la zona estudiada y mediante el uso de herramientas de ArcGIS (Spatial Analysis>Hydrology) se delimitaron sus fronteras.

La región de estudio (Figura 1) se extiende desde las planicies costeras hasta las montañas y cubre un área alrededor de 39,000 km<sup>2</sup>. La cuenca de Río Verde abarca un área de 18, 332 km<sup>2</sup>, la cuenca del Río Tehuantepec, 10, 346 km<sup>2</sup> y la región de la Costa del Sur, 10, 672 km<sup>2</sup>. Estas cuencas se localizan entre los 15° 39' y 17° 35' de latitud N y 95° 7' y 97° 55' de longitud W, están limitados al Norte por la Mixteca Alta, al Noreste, por las Sierras Orientales, al Oeste, por el estado de Guerrero y al Sur por el Océano Pacífico. El Golfo de México y Océano Pacífico enmarcan la región, aledaña al Golfo de Tehuantepec. El clima predominante es sub-húmedo y cálido en la costa y semiárido en el valle; la región tiene alrededor de 2, 500, 000 habitantes (INEGI, 2010).

Dentro del área de estudio, existen dos presas (Fig. 2), la presa “El estudiante” al Noreste de la cuenca de Río Verde y la presa “Benito Juárez” en la cuenca del Río Tehuantepec. La Presa “Benito Juárez”, conocida también como “El Marques”, es una de las presas principales de México, la cual abarca un área promedio de 3,982 Ha, con una superficie máxima de inundación de 7,845 Ha en los meses de julio a septiembre; su capacidad de almacenamiento máximo es de 946.5 millones de m<sup>3</sup> (SARH, 1964) 827 Hm<sup>3</sup>( <http://siga.conagua.gob.mx/presas/geopresas.html>) La presa “El Estudiante” es

una pequeña laguna, que se utiliza con fines recreativos y cuya área es de 0.1 km<sup>2</sup>.

Los mapas que se muestran a continuación para describir el área de estudio, muestran la información obtenida de los metadatos extraídos del portal del INEGI. Se utilizaron herramientas de ARCGIS para su clasificación y extracción de información como el porcentaje y áreas.

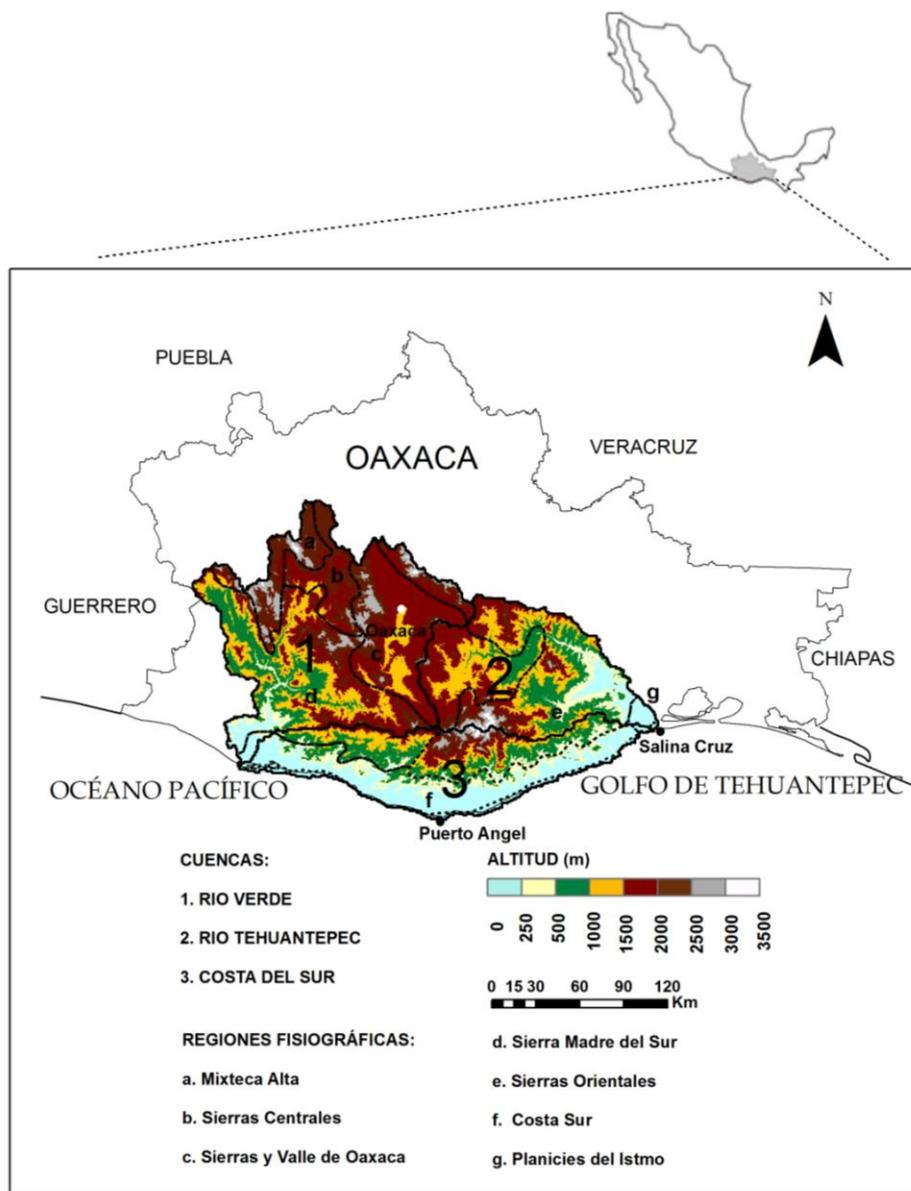
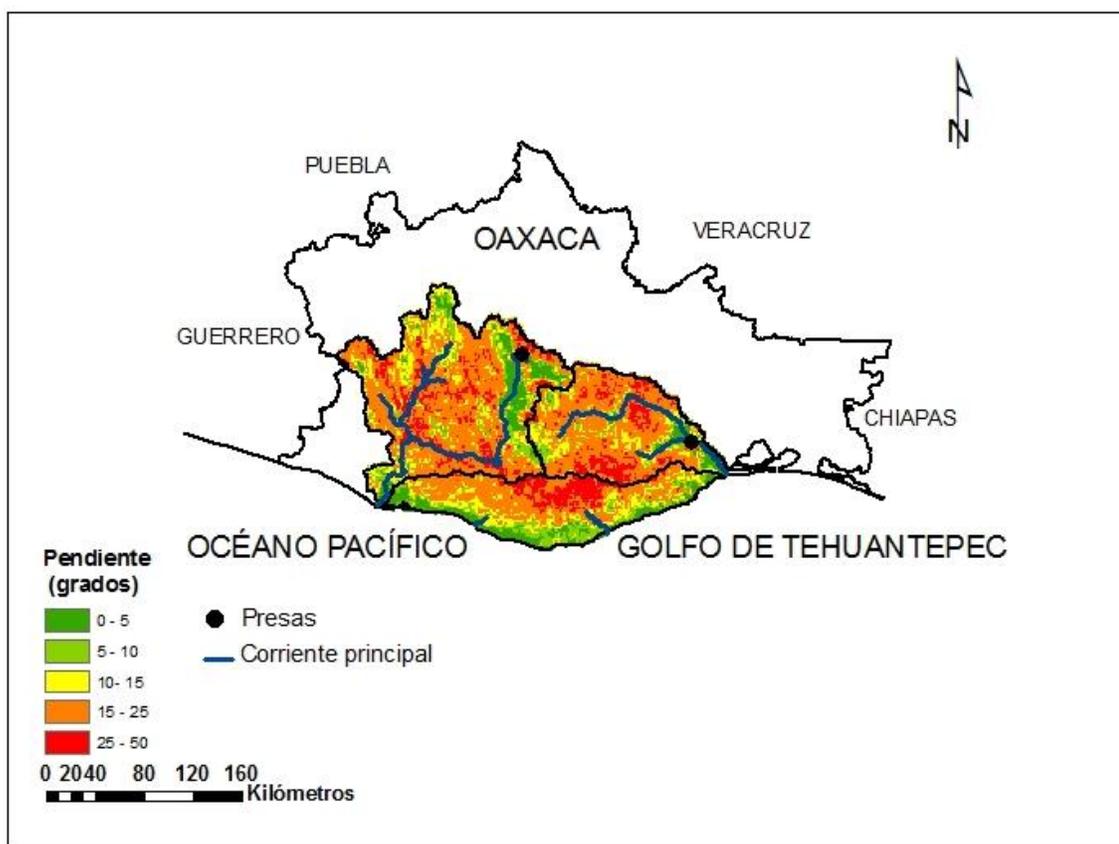


Figura 1. Área de estudio, elevación, cuencas hidrológicas y regiones fisiográficas.

El área de estudio incluye varias provincias fisiográficas (Cervantes Zamora *et al.*, 1990) mostradas en la figura 1: las planicies costeras localizadas sobre los 300 m sobre el nivel medio del mar, la Sierra Madre del Sur (sobre los 2,000 m), el valle de Oaxaca (sobre los 1,500 m), la Sierra Madre de Oaxaca (sobre 2,500 m), y las planicies del Istmo (arriba de los 400 m).

El relieve es variable (Fig. 2), con una pendiente promedio de 17°; 30 % del área de estudio presenta una pendiente de 15- 25°, en donde las pendientes mayores a 25° se localizan en las sierras y cubren 12 % de la región. En las planicies costeras y el valle de Oaxaca se observan las pendientes menores, de 0 a 5° cubriendo el 15 % de la región.



**Figura 2. Pendiente del terreno calculada para las tres cuencas.**

El principal tipo de suelos (47 %) es Regosol (Fig. 3). Es el segundo tipo de suelo del cual está compuesto la mayor parte del territorio nacional (INEGI, 2009), se encuentra en la cuenca de Río Verde y en la costa, tanto en un área montañosa como en planicies, con textura media y fina. Son suelos de color claro o pobres en materia orgánica, sobre materiales sueltos principalmente arenas, en su mayoría reposa sobre rocas ígneas intrusivas, el grosor aproximado es de 30 cm, tienen poco desarrollo por lo que no presentan capas muy diferenciadas entre sí (INEGI, 2009).

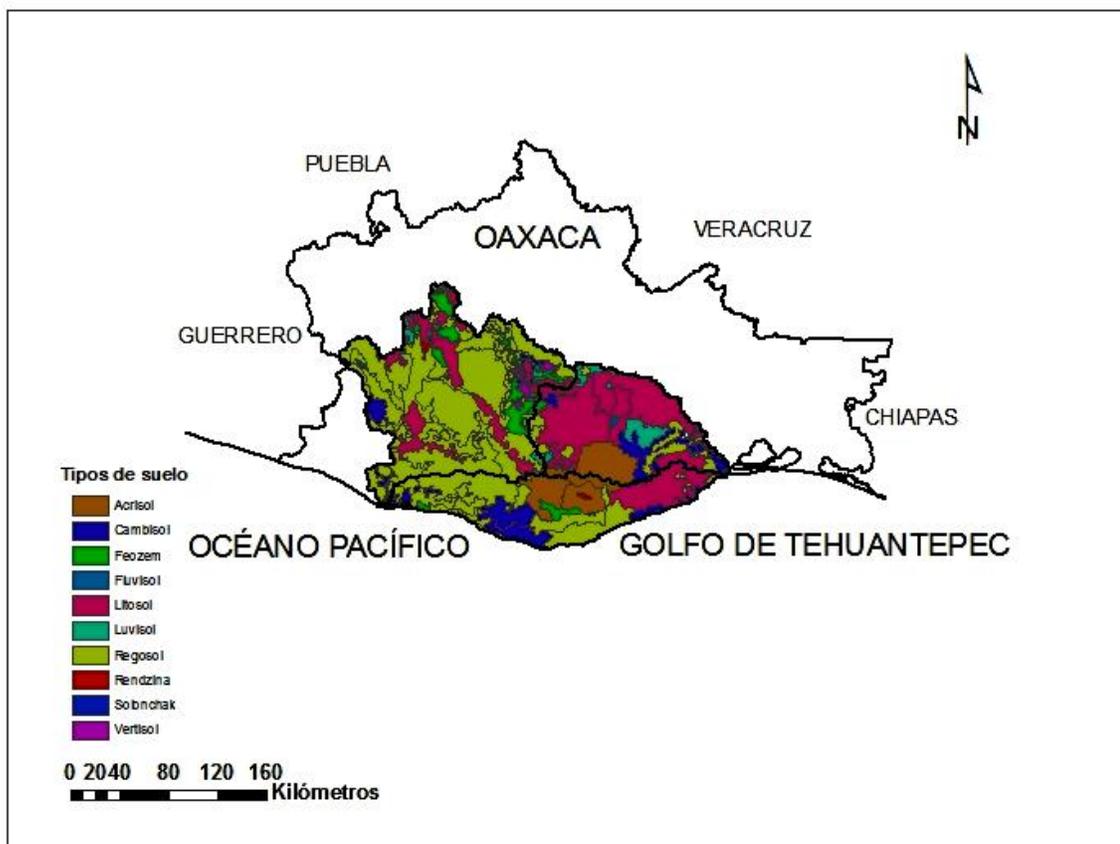
El litosol cubre el 27 % de suelos, es el más abundante del país, se caracterizan por ser suelos delgados, su espesor es menor de 10 cm y están influidos por el tipo de roca madre sobre la que descansan, con una alta susceptibilidad a la erosión, de textura media y fina. Se encuentran principalmente en la cuenca del Río Tehuantepec.

El Acrisol, es un suelo arcilloso que cubre 8 % de la región, de colores rojos y amarillos, muy ácidos y pobres en nutrientes. Moderadamente susceptibles a la erosión.

El Cambisol, cubre 9 % del suelo, estos son suelos jóvenes, poco desarrollados, de textura media a fina, de color claro, presenta cambios en su consistencia debido a su exposición a la intemperie, con buena capacidad de retención de humedad, con alta porosidad y buen drenaje interno.

El Feozem cubre 5% del suelo, este tipo de suelos es de consistencia suave, ricos en materia orgánica y nutrientes, suelos oscuros con un espesor variable, de vocación agrícola. Ubicados principalmente en el valle de Oaxaca, en la costa Sur y en la Mixteca Alta.

Otros tipos de suelos observados en menor proporción son: el luvisol, vertisol, fluvisol, rendzina y solonchek.



**Figura 3. Tipo de suelo del área de estudio.**

El uso principal del suelo es para la agricultura, tanto de riego como de temporal (30 %) y de pastizal (5 %), desarrollándose principalmente en la cuenca de Río Verde y hacia la costa (Fig. 4). La vegetación natural predominante es el bosque de pino-encino (42%) en las sierras y zonas de selva mesófila, seguida por la caducifolia (22%) sobre la costa.

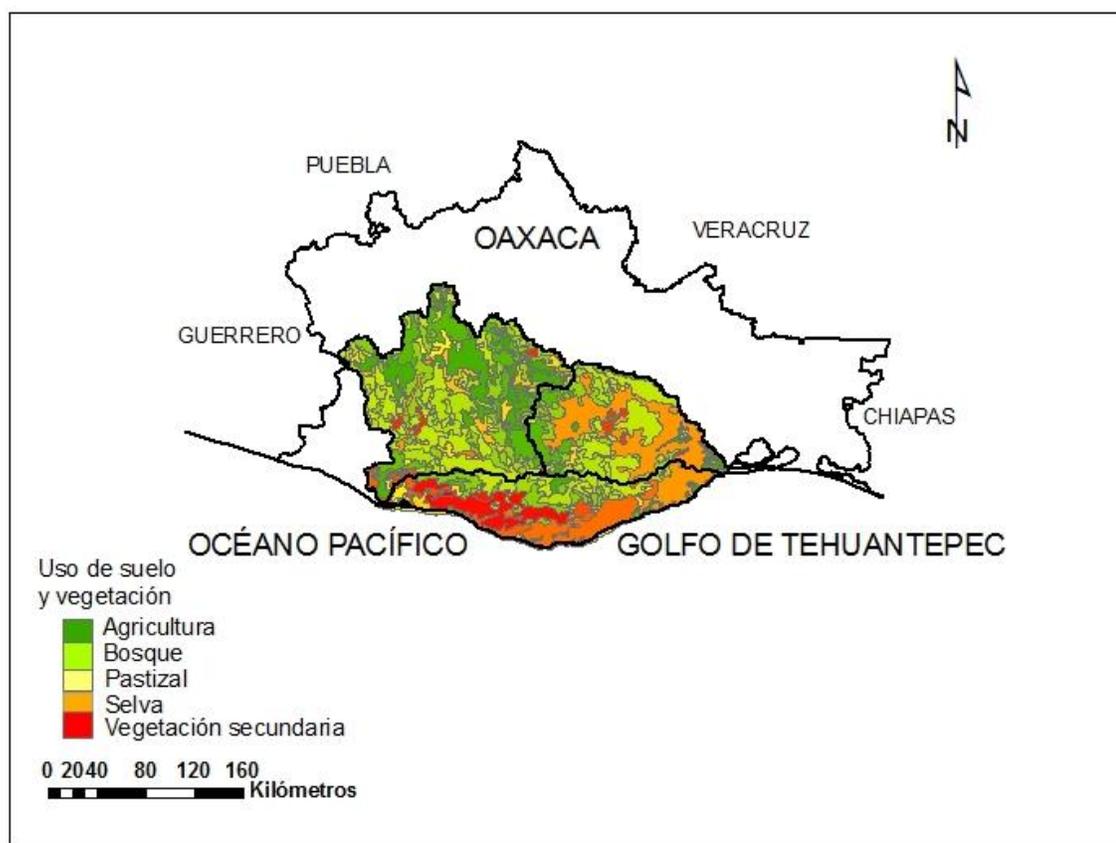


Figura 4. Uso de suelo y vegetación del área de estudio.

## Capítulo 2

---

### Antecedentes

#### 2.1 Geología

El complejo Acatlán (basamento del terreno Mixteco) junto con el complejo Oaxaca al Este (Fig. 5), definen el bloque continental sobre el cual los terrenos del Paleozoico y Mesozoico formaron el Sur de México (Ortega Gutiérrez *et al.*, 1999). Diferentes estudios relacionados con la Geología del Sur de México (Hernández Santana *et al.*, 2009, Ortega Gutiérrez *et al.*, 1999, Yañez *et al.*, 1991) discuten sobre sus orígenes y características.

El complejo Acatlán es un complejo polimetamórfico del Paleozoico, representa el basamento del terreno Mixteco, el cual está rodeado por los terrenos Xolapa (al Sur) y Guerrero (al Oeste) y traslapado con el eje Neovolcánico (al Norte). El recuadro azul de la figura 5 enmarca el área de estudio establecida sobre el terreno Mixteco, Zapoteco (Oaxaca), Cuicateco y Chatino (Xolapa). El terreno Mixteco está rodeado al Este por el terreno Oaxaca, el cual consiste en rocas débilmente deformadas a no deformadas, del Paleozoico y del Mesozoico, que caen sobre un basamento granulorítico de edad Grenviliana. Los terrenos Oaxaca y Mixteco están cubiertos por rocas sedimentarias de la edad Pensilvania-Pérmica. El terreno Sur del Mixteco cae en el terreno Chatino (Xolapa), el cual está pobremente datado, posiblemente del Mesozoico y de roca metamórfica del terciario y rocas plutónicas. Los terrenos Guerrero, Cuicateco y Chatino son de edad Mesozoica y los terrenos Zapoteca y Maya de basamento Greviliano granulorítico (Ortega Gutiérrez *et al.*, 1999).

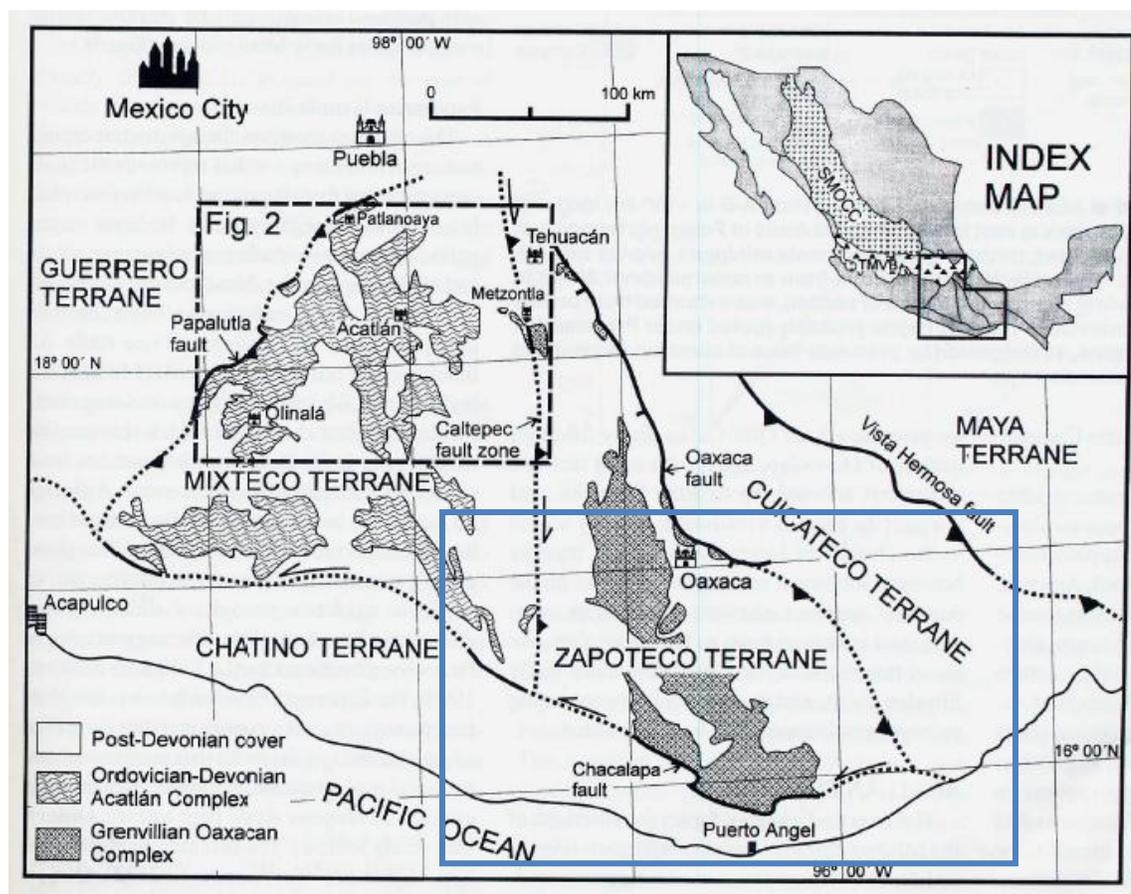


Figura 5. Tectono-estratigrafía del Sur de México (Ortega Gutiérrez *et al.*, 1999, p.719), señalado con un recuadro azul el área de estudio.

## 2.2 Hidrogeología

El estudio de la hidrología superficial en Oaxaca ha sido desarrollado principalmente con fines administrativos del recurso hídrico, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y otros organismos como la CFE (Comisión Federal de Electricidad) realizan estudios y monitorean la hidrología superficial del estado. Entre los objetivos de estos estudios que realizan, está el crear acuerdos para la planeación del uso del

agua, los cuales son publicados en el Diario Oficial de la Federación a través de la SEMARNAT.

Las cuencas estudiadas (Fig. 1) pertenecen a la región hidrológica administrativa número 20, Costa Chica de Guerrero; 21, Costa de Oaxaca y 22, Tehuantepec, todas ellas administradas bajo el organismo de cuenca Pacífico Sur. El tipo de roca sobre el cual se desarrollan estas cuencas (Fig. 6), están formadas por 39 % de roca metamórfica, 35 % de roca ígnea (intrusiva y extrusiva) y 25 % de roca sedimentaria.

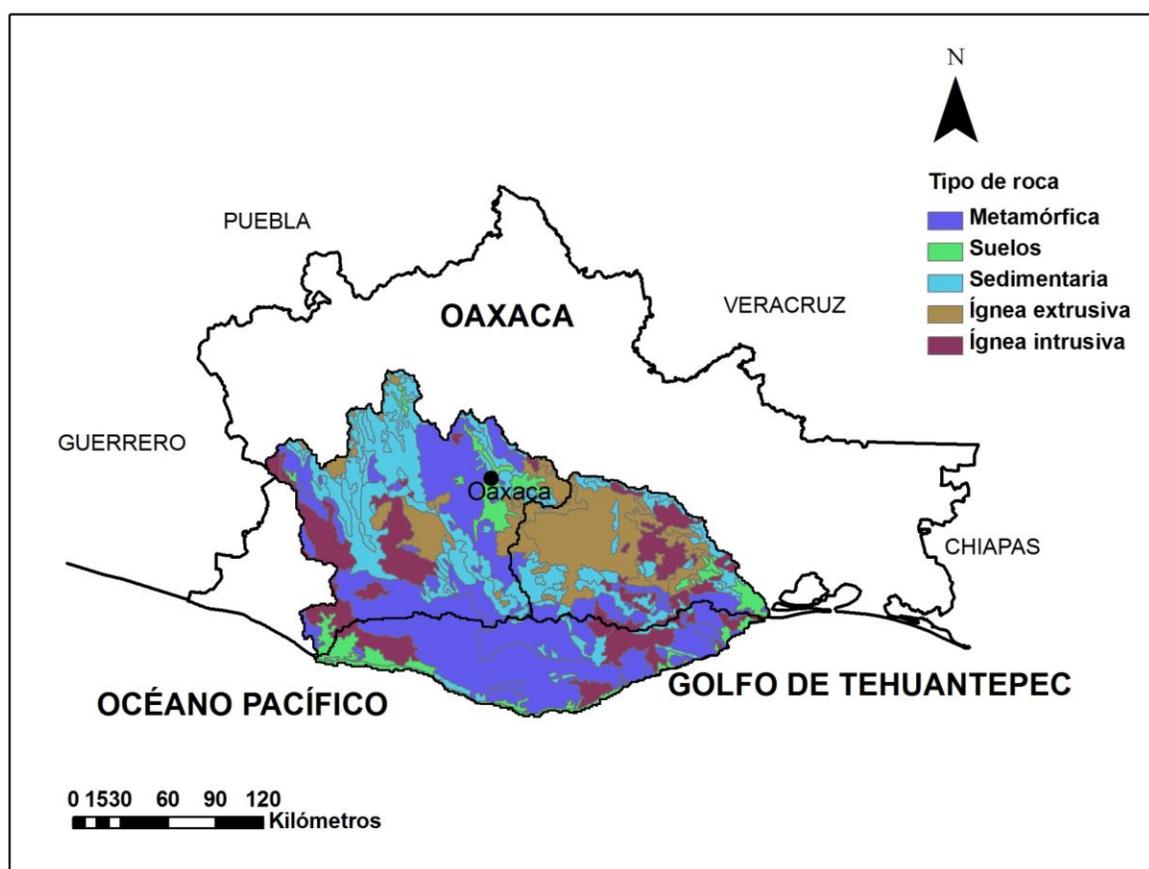


Figura 6. Tipo de roca del área de estudio.

La cuenca del Río Verde presenta dos vertientes, al NE una vertiente que pasa a través de las sierras y valles de Oaxaca sobre el Río Salado y Río Atoyac, y una vertiente W que proviene de la Mixteca Alta, que pasa a través de las montañas de la Sierra Madre del Sur y que desemboca en el mar a través del Río Yolotepec y Río Verde (Fig. 7). Es la cuenca de mayor área, considerada como grande, de acuerdo a la clasificación de Campos Aranda; con un modelo de drenaje dendrítico y con una diferencia de pendientes notoria (Tabla 1). Se observa una red de drenaje de orden 5 (Fig. 7) lo que la refiere como una cuenca hidrológica bien drenada con numerosos meandros y elongada (Tabla 1).

La región costera del Sur está formada por varias pequeñas cuencas, todas ellas con salida al mar; sólo se trazó la red hidrológica para los tres ríos principales: Colotepec, Copalita y Tonameca. El Río Colotepec tiene un área de 1681 km<sup>2</sup>, es uno de los ríos más grandes en esta región, considerada como una cuenca intermedia-grande (Campos Aranda, 1998); el área total de todas las cuencas se indica en la Tabla 1. En general, todas las cuencas que se encuentran en esta región varían de tamaño de intermedio-grande a intermedio-pequeño. Estas cuencas son de orden 3, menor que la cuenca de Río Verde y Río Tehuantepec, lo que indica un menor drenado. Aunque la cuenca del Río Copalita presenta un alto cambio de pendiente, ya que limita con la sierra Sur, en general, en el resto de las cuencas se observan pendientes menos escarpadas.

La cuenca del Río Tehuantepec es una cuenca con una red de drenaje dendrítico y elongada, con un valor de compacidad menor que la del Río Verde; es decir, es una cuenca más compactada que Río Verde (Fig. 7, Tabla 2), de orden 4, con meandros que favorecen la escorrentía. Es alimentada por dos principales vertientes: el Río Tehuantepec al Norte y el Río Tequisistlán al Sur, en cuya unión se localiza la Presa Benito Juárez.

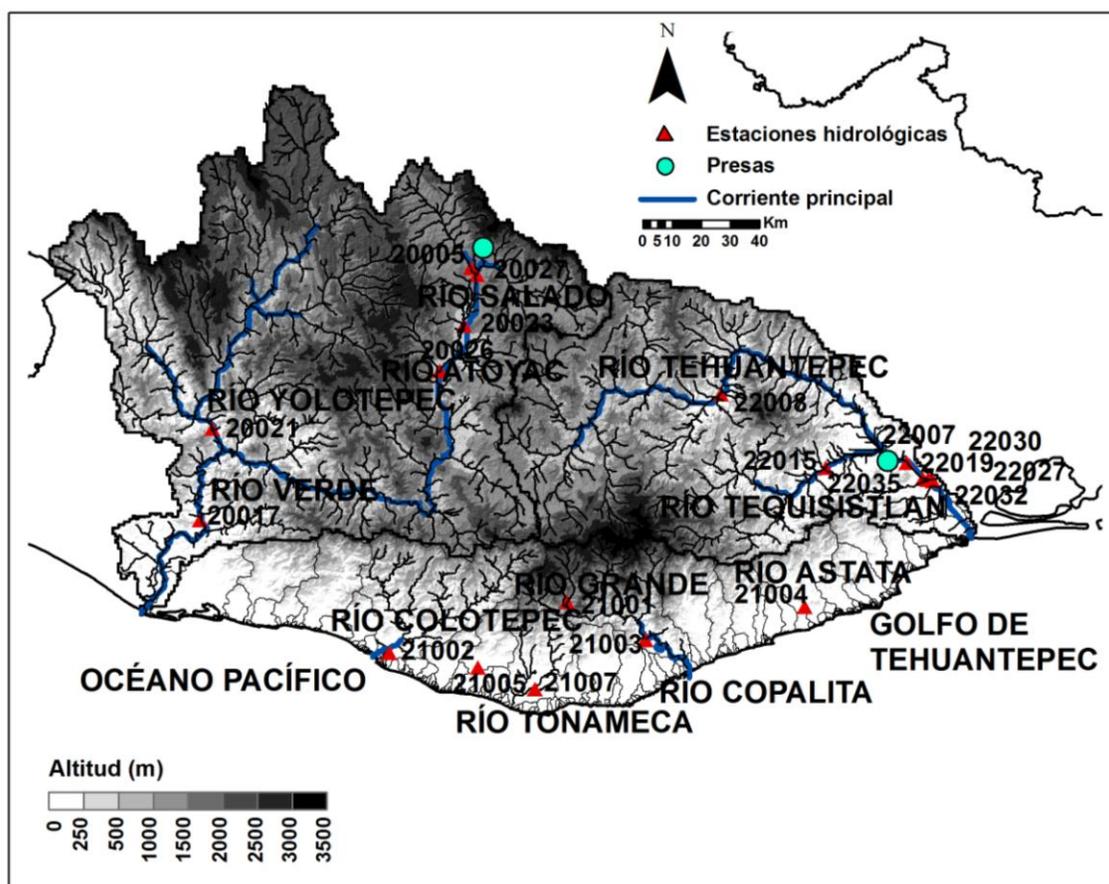


Figura 7. Redes hidrológicas, ríos principales y ubicación de estaciones hidrológicas.

**Tabla 1. Características de las cuencas hidrológicas.**

CUENCA	ÁREA (KM)	PERÍMETRO (KM)	ALTITUD MEDIA (KM)	Cc	PENDIENTE MEDIA/MÁX (°)	ORDEN	Lc (km)/ Tc (hora)
RÍO VERDE	18332	1086	1.7	2.2	20/50	5	253/33
RÍO							
TEHUANTEPEC	10347	632	1.2	1.7	17/40	4	189/25
REGIÓN							
COSTERA DEL SUR	10672	848	0.7	2.3	15/30	3	RCol 63/7

Cc= coeficiente de compacidad  
Lc= Longitud del cauce  
Tc= Tiempo de concentración  
Rcol= Río Colotepec

## 2.3 Precipitación

En México se han realizado numerosos estudios sobre clima y precipitación (i.e. Mosiño y García, 1974, Cortéz, 1999; Englehart y Douglas, 2002; Valdés, 2005), sin embargo a nivel regional, estos estudios se encuentran mejor definidos en la zona NW del país, por ello la necesidad de hacer estudios regionales en el Sureste mexicano.

En general, el clima en nuestro país se divide en dos estaciones principales: húmeda y seca; la húmeda, ocurre desde finales de mayo hasta noviembre y el resto del año es la temporada seca, con excepciones tales como el Sureste del Golfo de México y el Noroeste (Mosiño y García, 1974). Existen otro tipo de variaciones climáticas en México como el monzón mexicano en el Pacífico (Adams y Comrie, 1997), los Nortes en el Golfo de México (Mosiño, 1958) y el clima mediterráneo en el Noroeste. Particularmente, la región del Sureste mexicano se caracteriza por una estación lluviosa que inicia en mayo y finaliza en octubre, presenta una distribución bimodal con dos picos máximos uno en junio y otro en septiembre-octubre, con un mínimo relativo conocido como la sequía de

medio verano o “canícula” en los meses de julio y agosto (Mosiño y García, 1966; Magaña *et al.*, 1999; Curtis, 2004; Magaña y Caetano, 2005).

La época de lluvias en el Sureste de México ha sido descrita como una respuesta al establecimiento y movimiento de la Zona Inter-tropical de Convergencia sobre el Pacífico Oriental (Cortéz-Vázquez, 1999; Manzanilla *et al.*, 2005; Valdés *et al.*, 2005; Amador *et al.*, 2006). Durante el invierno (en el hemisferio Norte), Cortéz-Vázquez (1999) señala que la zona de máxima convección se encuentra ubicada sobre la cuenca del Amazonas; en el mes de abril, se produce un periodo de transición e inicia el desplazamiento hacia el Norte y su establecimiento sobre el Pacífico oriental, ocurriendo también otro periodo de transición en octubre, pero con desplazamiento hacia el Sur.

En el mes de junio, la Zona Inter-tropical de Convergencia (ZITC) se establece sobre nuestra región. Después de iniciada la estación de lluvias, hay un marcado descenso en la convección, con duración de dos meses aproximadamente, correspondiente a la canícula. A finales de agosto se observa el retroceso de la nubosidad sobre el Noroeste del país y la estación húmeda empieza a disminuir a finales de septiembre, pocos días después se da el retiro de la estación principal de lluvias en el Surde México y América Central y la zona de convección inicia su desplazamiento hacia el hemisferio Sur. Sin embargo, en octubre y noviembre también es común tener la influencia de ciclones tropicales, por lo que la estación de lluvias se extiende en el Pacífico Mexicano hasta mediados o finales de noviembre.

La canícula ha sido explicada mediante cambios en la circulación atmosférica y condiciones oceánicas (Mosiño y García, 1966), mientras otros autores proponen un mecanismo que envuelve procesos atmosféricos, oceánicos y terrestres, mediante fluctuaciones en el flujo convergente de baja altura, con fluctuaciones estacionales en la temperatura superficial del mar (TSM), moduladas por los vientos alisios y la radiación, los cuales actúan en conjunto para producir una distribución bimodal de precipitación durante la estación de verano (Magaña *et al.*, 1999).

En nuestra área de estudio, la figura 8 muestra un promedio mensual de la estación lluviosa desde su llegada a finales de mayo hasta el mes de octubre (Fig. 8), en donde se observa la precipitación máxima en el mes de junio y septiembre y su disminución en el mes de octubre, con una diferenciación espacial principalmente sobre dos núcleos de la región, al Noroeste y sobre la costa, donde se observan un aumento mayor de la precipitación.

Además de la lluvia establecida por la ZITC en el Sureste de México, otros procesos atmosféricos influyen, como son los vientos del Este llamados “Easterlies” o vientos alisios que traen humedad del Golfo de México y a partir de julio-agosto, el incremento de los ciclones tropicales en el Pacífico y Golfo de México (Mosiño y García, 1974, Dilley, 1997).

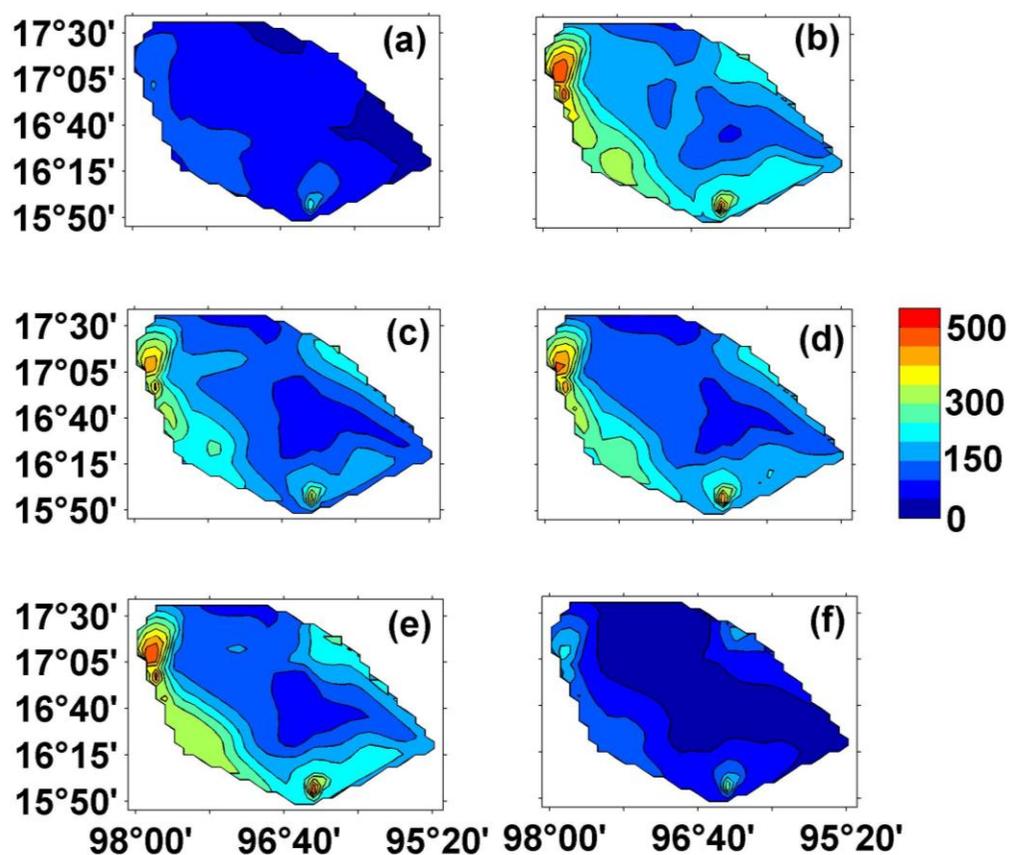


Figura 8. Promedio estacional de lluvia (mm) para los meses de mayo a octubre de a)- f) respectivamente, para el periodo de 1961 a 1990.

## Capítulo 3

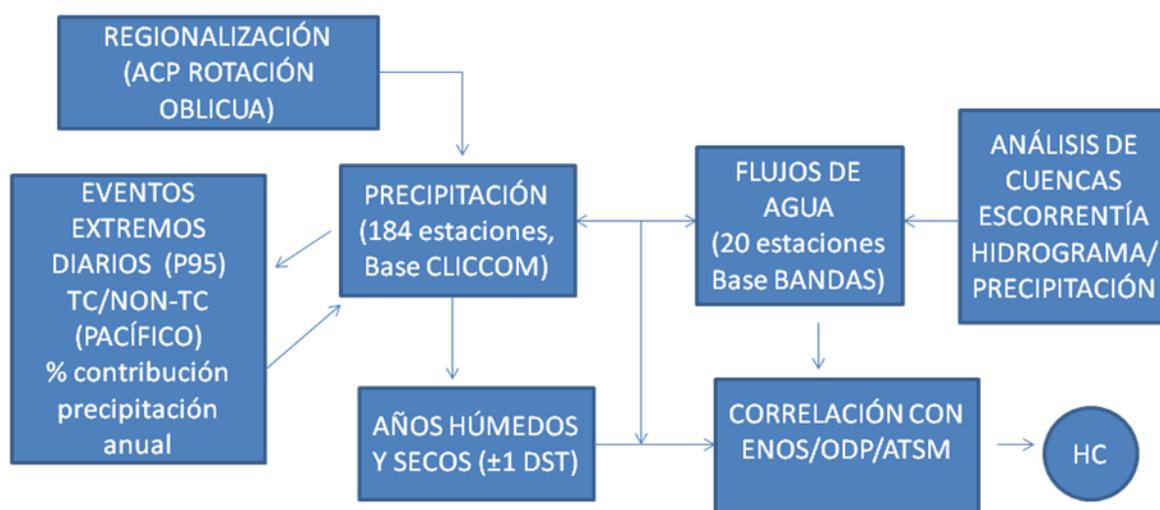
---

### Metodología

#### 3.1 Diseño experimental

Se analizaron estaciones climatológicas e hidrológicas de cuencas costeras del estado de Oaxaca, con el fin de observar la relación de los flujos de agua superficial con la precipitación. Primero se obtuvo la regionalización de la precipitación mediante un análisis de componentes principales (ACP), a partir del cual se obtuvieron regiones de precipitación. Para cada región se obtuvo la variabilidad temporal de la precipitación, para lo cual se calcularon las anomalías de precipitación y se obtuvieron los años húmedos y secos. En seguida se analizaron las condiciones de temperatura superficial del mar (TSM) para el promedio de mayo a octubre de los tres años más húmedos y los tres más secos en toda la región, como un parámetro para conocer las condiciones del ENOS. De forma paralela se analizaron los flujos de agua superficial de dos maneras, primero agrupando las estaciones hidrológicas disponibles, en cada región derivada del ACP, con el fin de caracterizar hidrológicamente cada región y segundo, realizando un ACP a los flujos de agua para analizar la máxima varianza. También se realizó un análisis de la escorrentía, con el fin de estudiar la diferenciación entre las cuencas debido a factores como vegetación y tipo de suelo. Se analizaron también dos puntos importantes de la precipitación que han afectado la disponibilidad de agua en estas cuencas hidrológicas, uno relacionado con la sequía de medio verano, analizando el periodo inicial de la canícula y otro analizando los eventos extremos diarios asociados a ciclones tropicales del Pacífico Tropical. Finalmente se realizaron análisis de correlación para identificar la relación entre las anomalías de los flujos de agua superficial y las anomalías de precipitación, así como entre las anomalías de precipitación y su relación con el

ENOS y la ODP a través de los índices ONI y el índice ODP. En las siguientes subsecciones se detalla cada uno de los análisis realizados, la Fig. 9 muestra un diagrama de la metodología utilizada.



**Figura 9. Diagrama de la metodología utilizada en este estudio en donde el producto final es la hidroclimatología regional (HC).**

### 3.1.1 Análisis de precipitación

#### 3.1.1.1 Datos y calidad de datos

Se analizaron 184 estaciones de precipitación diaria (mm) para el periodo de 1950 a 2008 (Fig. 10, apéndice A) de la base de datos CLICOM (por sus siglas en inglés, CLImate COMputing project) administrada por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN); de éstas, 61 estaciones cumplieron con el control de calidad realizado, las cuales fueron utilizadas para el análisis de datos con el periodo de mayor continuidad de la base de datos: 1961-1983 (Apéndice B, B'). Posteriormente el periodo del análisis se extendió de 1961- 1990, en donde finalmente 47 estaciones fueron utilizadas.

El control de calidad utilizado fue realizado de la siguiente manera, primero se identificaron errores y huecos, donde estaciones con menos del 75 % de datos fueron descartadas. Además, se utilizó un umbral de 4 desviaciones estándar arriba de la media climatológica para identificar datos anómalos. Se hicieron análisis de histogramas usando R-Climdex y el paquete estadístico R de dominio público (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>); la mediana, comparación entre estaciones vecinas y el tipo de eventos relacionados, tales como el paso de huracanes, fueron usados para determinar la validez de los datos extremos, los cuales fueron rechazados después de una inspección manual (Fig. 11). Las estaciones se revisaron individualmente.

Como se menciona anteriormente, un parámetro para aceptar o descartar una estación fue la continuidad de la serie. El mejor periodo de observaciones diarias fue 1961 a 1983; a partir de esta fecha la continuidad de la mayoría de las series se deteriora rápidamente, de tal forma que de 1983 a 1990 sólo el 33 % de las estaciones tienen una base de datos completa. Después de 1990 la base de datos para el Estado de Oaxaca mostró continuas interrupciones. Inicialmente se utilizó el periodo de mayor continuidad, pero para incrementar el periodo de tiempo de 1961 a 1990 se aceptaron estaciones con el 70 % de datos. Cuando se realizó la regionalización de la precipitación, no se encontraron diferencias en la distribución regional de los dos grupos de datos analizados (utilizando la base de datos de 61 estaciones para 1961-1983 y 47 para 1961-1990), por lo que este trabajo se basa en el periodo de 1961 a 1990.

De las 47 estaciones analizadas, 39 se utilizaron para la regionalización de la precipitación, las 8 estaciones que fueron descartadas, se localizaron en la frontera entre las regiones y presentaron valores similares de los eigenvectores para dos componentes, es decir, una sola estación presentó un valor igual a 0.4 para dos componentes, por lo que podían pertenecer a una u otra región, por ello se decidió quitarlas.

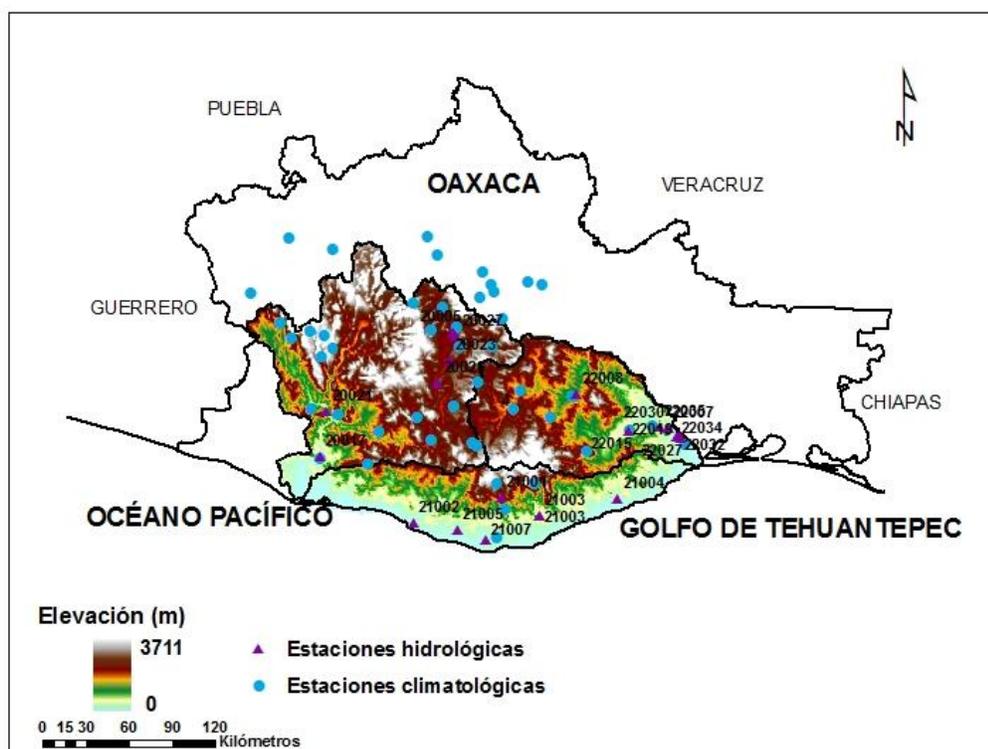


Figura 10. Distribución de estaciones climatológicas e hidrológicas en el área de estudio.

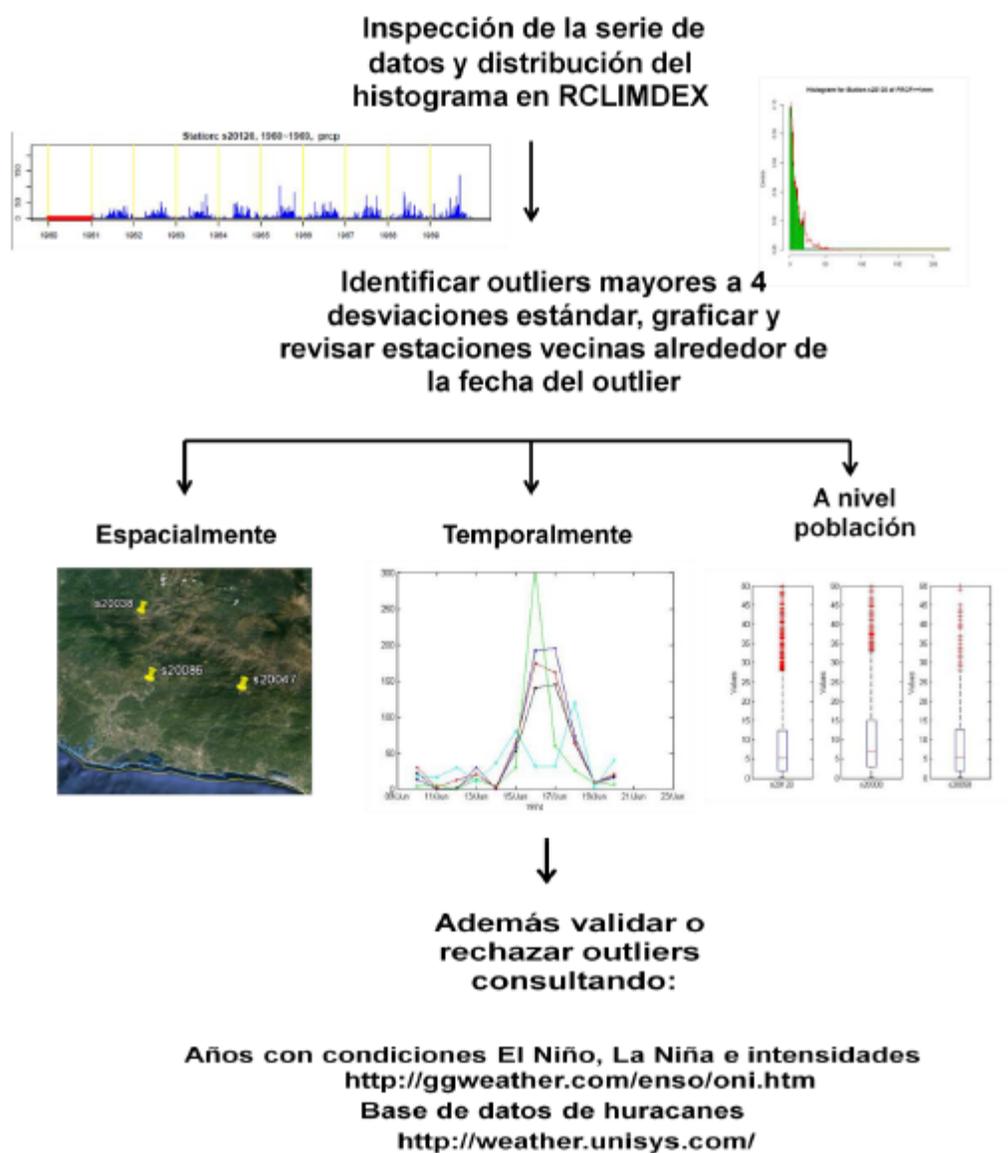


Figura 11. Diagrama que indica el proceso de calidad realizado.

### 3.1.1.2 Análisis de componentes principales (ACP)

Se realizó una regionalización de la precipitación a partir de un análisis de componentes principales (ACP-S) con una matriz de 184 columnas (estaciones climatológicas) por 30 renglones (tiempo de 1961 a 1990) con el fin de obtener regiones de precipitación en las cuencas estudiadas. Se utilizó una rotación ortogonal (varimax) y una rotación oblicua (oblimin,  $\delta=0$ ), con la matriz de correlación.

El análisis de componentes principales finalmente se llevó a cabo con una rotación oblicua de acuerdo a la metodología utilizada por algunos autores aplicada a regionalizaciones climatológicas (White *et al.* 1991; Comrie y Glenn, 1998; Englehart y Douglas, 2002; Guirguis y Avissar, 2008; Arriaga Ramírez y Cavazos, 2010); White *et al.* (1991) realizó un análisis para diferentes rotaciones, en la que la rotación oblicua presentó mejores resultados para las regionalizaciones climatológicas. Se retuvieron 4 componentes de acuerdo a la prueba de Cattell, 1966, delineándolas con el contorno  $\gamma=0.4$ , los cuales explicaron el 97 % de la varianza total de la precipitación.

Una vez obtenida la regionalización de la precipitación, se caracterizó cada una de las regiones con base a su climatología estacional y su variabilidad temporal mediante anomalías estandarizadas Z, con estas últimas se determinaron años secos y húmedos. Las anomalías estandarizadas se calcularon como promedios entre todas las estaciones que pertenecían a cada región, calculando un valor estandarizado:

$$Z = (x - X) / \sigma \quad (1)$$

Para caracterizar las regiones se analizaron diferentes periodos utilizando los promedios: anuales, mayo a octubre, julio a agosto, julio a septiembre, y noviembre a diciembre.

### 3.1.1.3 Sequía de medio verano

Para estudiar uno de los eventos a mitad de verano que han afectado la disponibilidad de agua en el estado (Dilley, 1996), se evaluó el inicio de la canícula en cada región derivada del ACP. Para ello, se obtuvo la diferencia regional entre el mes de junio (el primer pico máximo de verano) y julio (el primer mínimo de verano), con el fin de analizar el gradiente inicial de la precipitación durante estos meses. Los valores arriba de la media regional estuvieron asociados con una fuerte canícula mientras que los valores menores a cero (diferencias negativas) fueron años donde no hubo canícula. También se obtuvo un promedio espacial sobre todo el área de estudio dividiendo la diferencia de los meses de junio menos julio, entre el promedio climatológico de mayo a octubre. Otro ejercicio similar se realizó calculando la fuerza de la canícula realizando el siguiente cálculo:

Valor de la canícula= (Promedio máximo entre junio a octubre – Promedio mínimo entre junio a octubre)/ media de junio a octubre.

### 3.1.1.4 Eventos extremos

La variabilidad de los eventos extremos fue estudiada en cada región derivada del análisis de componentes principales (ACP). Primero se analizaron los eventos húmedos y secos en la escala anual y estacional, y posteriormente se analizaron eventos extremos diarios asociados a ciclones tropicales (CTs) y no ciclones tropicales (No-CTs) en el Pacífico Tropical.

A escala anual, los años húmedos y secos se clasificaron usando anomalías de precipitación estandarizada (Z) utilizando  $\pm 1$  desviación estándar (Z); donde la anomalía está definida como la precipitación media anual de las estaciones en cada región menos la climatología media para el periodo de 1961 a 1990 dividida entre su desviación estándar. De tal forma que se produjeron anomalías anuales y estacionales; estacionales, durante la estación de lluvias (mayo a octubre), la temporada seca del invierno (DJF), durante la sequía de medio verano (JA) y cuando la ZITC se acerca más a la región (junio).

A escala diaria, la lluvia extrema de cada estación se evaluó y separó en

lluvia derivada de CTs y No-CTs, de acuerdo a la frecuencia del paso de CTs cercanos a la región (~500 km), como lo hicieron Cavazos *et al.* (2008) para la zona del monzón en el Noroeste de México. Un evento de precipitación extrema diaria se definió cuando la lluvia diaria sobrepasaba el valor del umbral del percentil 95 (P95). Los percentiles se evaluaron considerando sólo eventos húmedos (precipitación > 1 mm) para el periodo de junio a octubre y noviembre-mayo.

Cada estación fue analizada individualmente y luego agrupada de acuerdo a la región derivada del ACP. La contribución estacional del P95 se definió como la suma de todos los eventos extremos diarios de junio a octubre arriba del umbral de P95 dividido por la precipitación anual. Para la clasificación de los eventos de lluvia extrema diaria asociados a CTs y No-CTs se utilizó la base de datos histórica de huracanes del Pacífico tropical de Unysis Weather ([http://weather.unisys.com/hurricane/e\\_pacific/index.html](http://weather.unisys.com/hurricane/e_pacific/index.html)).

Las tendencias de las contribuciones anuales de la precipitación de los eventos superiores al P95 fueron evaluadas usando una prueba no paramétrica Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1955) con una aproximación normal. El nivel de confianza usado para el análisis de tendencia fue del 95 % ( $p < 0.05$ ). La pendiente de la tendencia se determinó usando el estimador Sen (Sen, 1968).

### **3.1.2 Análisis de la hidrología superficial**

#### **3.1.2.1 Datos y calidad de datos**

Se analizaron 20 estaciones hidrológicas (Fig. 8, apéndice C) del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, de la cual se extrajeron las variables de flujos de agua superficial diaria ( $m^3/s$ ). El control de calidad se realizó con una comparación entre estaciones vecinas dentro de la misma red de flujo y tomando en cuenta que hay una diferencia entre las estaciones aguas arriba que las encontradas por abajo de ellas o en otra cuenca. El periodo analizado fue variable entre las estaciones, encontrándose periodos desde 1945 a 1990 en el Río Tehuantepec

hasta acortarse, con periodos de 1972 a 1990 en el valle de Oaxaca.

### **3.1.2.2 Análisis de correlación y componentes principales**

Se evaluaron flujos de agua superficial de acuerdo a las regiones obtenidas del ACP, agrupando y obteniendo los coeficientes de correlación entre la anomalía de precipitación y las anomalías de los flujos de agua (gastos) por región. Para obtener la varianza máxima entre las estaciones hidrológicas, se realizó un ACP sin rotar a la matriz de correlación.

### **3.1.2.3 Características morfológicas de la cuenca**

La cuenca hidrológica funciona como un gran colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos (Campos Aranda, 1998). Entre la precipitación y el escurrimiento ocurren varios procesos que condicionan su relación controlados por las características morfológicas de la cuenca, así como su urbanización, tipo de suelo y vegetación. Para este fin se identificaron las cuencas hidrológicas mediante sus características morfológicas, las cuales pueden ser de dos tipos, las que condicionan el volumen de escurrimiento, como el área de la cuenca y el tipo de suelo y las que condicionan la velocidad de la respuesta como son el orden de la corriente, pendiente y los cauces (Tabla 1). A continuación se indican las características medidas.

#### **Tamaño de la cuenca**

Las cuencas se pueden clasificar tomando en cuenta las superficies de las mismas (Campos Aranda, 1998); la Tabla 2 muestra cómo es esta clasificación.

**Tabla 2. Tamaño de una cuenca de acuerdo a su área.**

<b>Tamaño de la cuenca (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Descripción</b>
<25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-Pequeña
500 a 2500	Intermedia-Grande
2500 a 50000	Grande
> 50000	Muy grande

### **Área de la cuenca**

Es el área plana en proyección horizontal incluida dentro del parteaguas o línea divisoria de la cuenca (Campos Aranda, 1998). Esta fue calculada utilizando las herramientas de ARCGIS a partir de un modelo de elevación digital. En general, entre más larga el área de la cuenca será mayor la cantidad de escorrentía superficial generada.

### **Perímetro de la cuenca**

Es el contorno de la superficie de la cuenca, delimitado por el parteaguas de la misma. Entendiéndose el parteaguas como la línea imaginaria del contorno de una cuenca hidrográfica, que las separa de las adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación en el sistema de cauces que fluye hacia la salida de tal cuenca (Campos Aranda, 1998). Calculado utilizando las herramientas Hydrology de ARCGIS.

### **Forma de la cuenca.**

La forma de la cuenca afecta la descarga de la corriente principalmente en los eventos de flujo máximo, para caracterizarla se calculó el coeficiente de

compacidad. El coeficiente de compacidad o índice de Gravelius se define como el cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y la circunferencia (Pc) de un círculo con área igual al tamaño (A) de la cuenca en km<sup>2</sup>, es decir,

$$C_c = P/P_c = 0.282 P / \sqrt{A} \quad (2)$$

El coeficiente de compacidad tendrá como límite inferior la unidad, indicando que la cuenca es circular y conforme su valor crece indicará una mayor distorsión en su forma, es decir, se vuelve alargada o asimétrica. (Campos Aranda, 1998). Cuencas del mismo tamaño, pero de forma diferente (circular o elongada) producen diferentes respuestas en la forma del hidrograma observándose picos más suaves en las cuencas elongadas.

#### **Longitud de la cuenca**

Se define como la más grande dimensión de la cuenca a lo largo de una línea recta, desde la salida hasta la divisoria en su punto más alejado, paralela al cauce principal. Esta es calculada con herramientas de ARCGIS.

#### **Longitud del cauce (Lc)**

Es la longitud del cauce principal de la cuenca. Una vez trazada la red de drenaje, se midió con herramientas de ARCGIS.

#### **Tiempo de concentración (Tc)**

El tiempo de concentración es un concepto de interés para calcular el escurrimiento máximo instantáneo; se ha definido como una aproximación al tiempo que tarda el agua en recorrer la distancia existente entre el punto más alejado y la salida de la cuenca (SARH, 1977 en Becerra Moreno, 1999). Tc se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.02 L^{1.15} / H^{0.385} \quad (3)$$

Donde:

Tc= tiempo de concentración, en minutos

L= longitud del cauce principal, en metros

H= Desnivel entre el punto más alejado de la cuenca y el sitio de salida, en metros

### **Pendiente media**

Esta representa el promedio de las pendientes de la cuenca, calculada en ARCGIS a través de un modelo de elevación digital.

### **Red de drenaje**

Se llama red de drenaje de una cuenca, al sistema de cauces por el que fluyen los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, de manera temporal o permanente.

### **Orden de corriente**

El orden de corrientes es una clasificación que refleja el grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca (Campos Aranda, 1998). R.E. Horton clasificó el orden de corrientes de la siguiente manera:

Orden 1: son aquellas que no están ramificadas

Orden 2: aquellas que sólo tienen ramificaciones o tributarios de orden 1.

Orden 3: aquellas con dos o más tributarios de orden 2 o menores.

n orden: aquellas con dos o más tributarios de n-1 orden o menores.

El orden de corriente de la cuenca será el orden más alto de todas las corrientes que componen la red de drenaje.

### **3.1.2.4. Escorrentía**

Se estimó la escorrentía media de las tres cuencas estudiadas, para lo cual

se utilizó el método de curvas numeradas (USDA-SCS, 1972). Inicialmente se calculó el volumen precipitado de acuerdo a los resultados del análisis de precipitación, para finalmente simular el volumen escurrido superficial dado por la siguiente ecuación:

$$Q = (P-P_o)^2/((P-P_o)+S) \quad (4)$$

Donde:

$P_o$ = umbral de escorrentía. Este parámetro se calcula con base al tipo de vegetación, pendiente y característica hidrológicas, el cual es evaluado mediante el uso de tablas (apéndice D).

El parámetro de retención  $S$  es el potencial máximo de retención de humedad del suelo antes de iniciar la escorrentía, dado por:

$$S = (1000/CN)-10 \quad (5)$$

Donde:

CN= curva numerada

El valor de la curva numerada (apéndice E) está en función de la permeabilidad del suelo, la cobertura vegetal y las condiciones hidrológicas del suelo. En cuanto a la cubierta vegetal se establecen distintas clases con gradaciones, de pobres a buenas para la infiltración, en sus condiciones hidrológicas. Cuanto más denso es el cultivo, por ejemplo, mejor es su condición hidrológica para la infiltración y menor es el valor del número  $N$  representativo de la escorrentía. Ordenados de menor a mayor potencial de escurrimiento y de mayor a menor infiltración, los suelos pueden ser clasificados en uno de los cuatro grupos **A, B, C y D**.

**Grupo A** (Baja escorrentía): Es el que ofrece menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad incluso cuando están saturados. Son terrenos profundos, sueltos, con predominio de arena o grava y con muy poco

limo o arcilla.

**Grupo B** (Moderada baja escorrentía): son suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados, terrenos arenosos menos profundos que los del grupo I incluyendo aquellos de textura franco-arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.

**Grupo C** (Moderada alta escorrentía): suelos que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados, suelos con un sustrato que impiden el movimiento del agua hacia abajo, textura moderadamente fina a fina.

**Grupo D** (Alta escorrentía): suelos que ofrecen mayor escorrentía, suelos con mayor impermeabilidad, tales como terrenos altamente arcillosos profundos. Algunos presentan una capa impermeable sobre la superficie o cerca de la misma.

Tanto el valor de la CN como de la Po se obtuvieron para condiciones de humedad previa intermedia (condiciones II de humedad precedente), si en el momento de producirse la precipitación el suelo está saturado debido a lluvias precedentes, la escorrentía esperada será mayor (condición III) o por el contrario, si el suelo está seco, la escorrentía será menor (condición I).

También se calculó el volumen escurrido por año, sobre la cada una de las cuencas, mediante la siguiente ecuación:

$$V = \text{Área} * \text{Precipitación media anual} * C_e$$

en donde el Coeficiente de escorrentía ( $C_e$ ) fue calculado por:

$$C_e = K(P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 \quad (6)$$

Donde:

El parámetro K está en función de la clasificación hidrológica de suelos y del uso de suelo (apéndice F).

$$\text{Cuando } K < 0.15 \quad C_e = K(P-250)/2000 \quad (7)$$

$$\text{Cuando } K > 0.15 \quad C_e = K(P-250)/2000 + (K-0.15)/1.5 \quad (8)$$

Cada cuenca se evaluó individualmente y se calcularon los umbrales de escorrentía ( $P_o$ ), curvas numeradas (CN) y el coeficiente de escorrentía ( $C_e$ ) por secciones con condiciones similares, pesadas en porcentajes, para así obtener la escorrentía media ponderada para cada cuenca.

### 3.1.3 Hidroclimatología

La relación entre los flujos de agua superficial y la precipitación se obtuvo mediante un análisis de correlación entre las anomalías de cada uno de ellos para cada región derivada del ACP. La relación entre los eventos de precipitación y el ENOS y la ODP fueron analizados a través de un análisis de correlación con los índices de la ODP y el ONI.

El índice ONI está definido como un promedio corrido de tres meses de anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) en la región El Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W). Se utilizaron dos promedios, un promedio anual de estos valores (basado en promedios de tres meses) y otro con un promedio para los tres meses de julio-agosto-septiembre (JAS). Estos valores fueron obtenidos del Centro de Predicción Climático de la NOAA de Estados Unidos ([http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml))

El índice de la ODP (Mantua *et al.*, 1997) fue obtenido de <http://www.atmos.washington.edu/~mantua/TABLES2.html>.

Las temperaturas superficiales del mar (TSM) y sus anomalías fueron usadas para mostrar las condiciones en años húmedos y secos utilizando los datos reconstruidos de TSM de la NOAA y proveídos por la NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, de su página de internet: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>.

## Capítulo 4

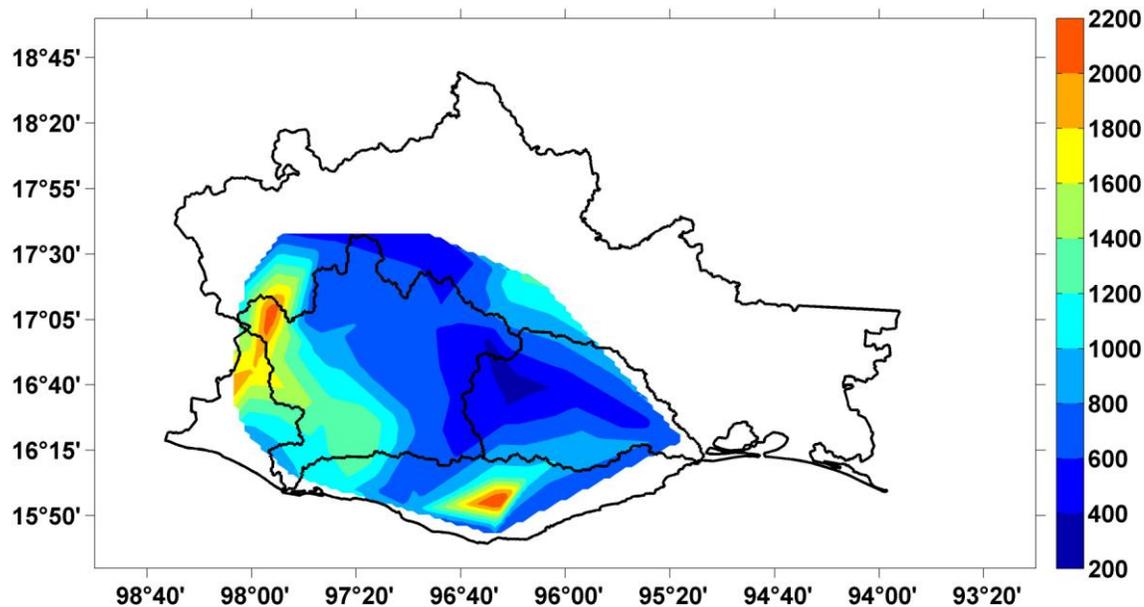
---

### Resultados (Precipitación)

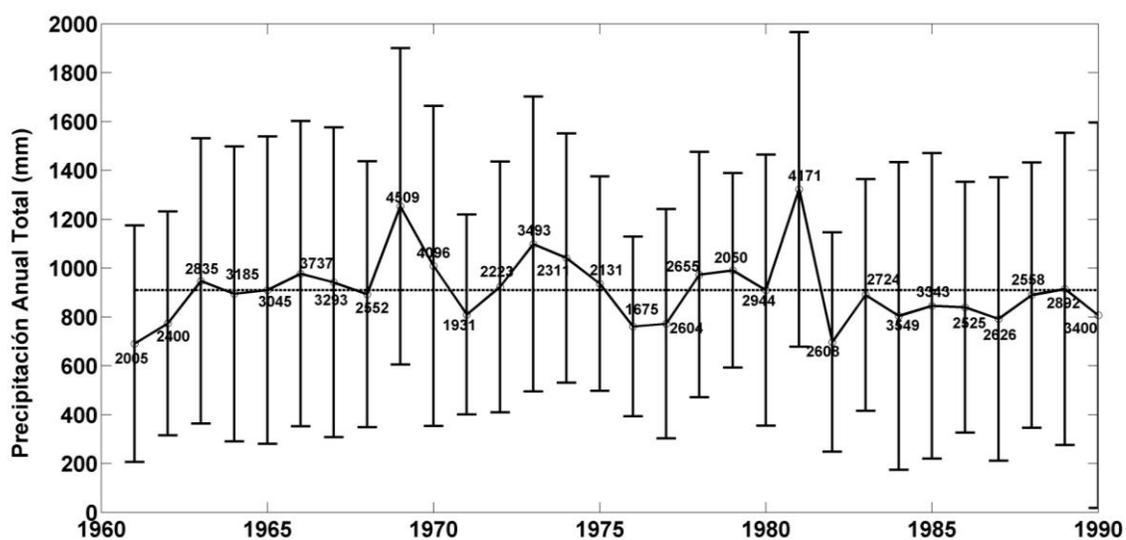
#### 4.1. Precipitación regional

El patrón espacial de precipitación anual y estacional, durante la estación lluviosa (mayo a octubre) es similar por lo que se muestra sólo la precipitación anual (Fig. 12). La precipitación ocurrida durante la estación de lluvias representa el 91 % de la precipitación anual, sobre todas las estaciones. La precipitación más alta se observa en la parte Oeste de la cuenca del Río Verde. Hay dos áreas aparentes de máxima precipitación una sobre el Noroeste del Río Verde (2000 mm/año) y otra en medio de las cuencas costeras (1600 mm/año). La precipitación mínima se observa en la cuenca del Río Tehuantepec y en el valle de Oaxaca (600 mm/año).

La precipitación media para las 47 estaciones fue de 909 mm/año, este es un valor típico de ambientes tropicales y húmedos (Challenger y Soberón, 2008). La serie temporal del promedio anual sobre todas las estaciones en el área de estudio muestra un periodo seco relativo en 1961 y 1962, seguido por un periodo con precipitación alrededor de la media con picos en 1969, 1973 y 1981; para terminar con un periodo relativamente seco de 1982 a 1990 (Fig. 13). No se observa tendencia en la lluvia anual, sin embargo, el número de años con valores arriba de la media histórica anual es mayor durante la fase fría de la ODP (antes de 1977-1969 en la Fig. 13). El cambio de fase de la ODP, de fase negativa a positiva en nuestro periodo de estudio ha sido establecido en 1977 (Mantua *et al.*, 1997).



**Figura 12. Distribución espacial de la precipitación anual (mm/año) y localización de estaciones durante el periodo de 1961 a 1990.**



**Figura 13. Precipitación media anual (mm) sobre el área de estudio derivada de 47 estaciones climatológicas. Se muestra en barras la desviación estándar entre estaciones y en números el valor máximo encontrado en mm/año.**

## 4.2 Regionalización derivada del ACP

Las cuatro componentes derivadas del ACP muestran cuatro diferentes patrones regionales de precipitación (Fig. 14) donde la climatología mensual de la precipitación para cada región se ilustra en la Fig. 15. La contribución de cada componente a la varianza total está distribuida de la siguiente manera: CP1: 32.7, CP2: 29.8, CP3: 25.6, y CP4: 9.3.

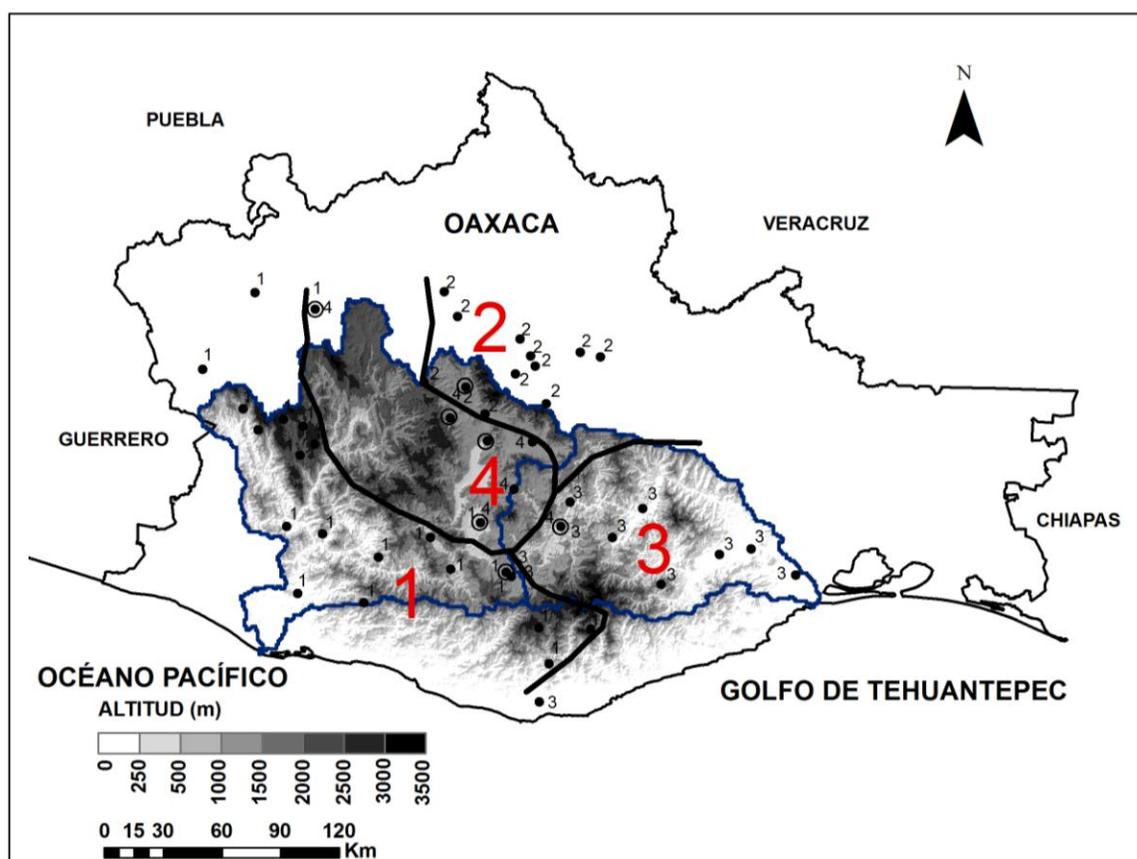
En la cuenca de Río Verde se observaron tres diferentes patrones de precipitación: la CP1, que abarca la región de máxima precipitación anual (Fig. 14) y la de mayor altitud (Fig. 1) incluyendo la Sierra Mixteca Alta y la Sierra Madre del Sur; la CP2, en el límite NE del Río Verde, que abarca las Sierras Orientales; y la CP4, que abarca las sierras y valle de Oaxaca. De tal forma que las regiones de mayor altitud fueron en donde se concentró la mayor precipitación, excepto en la región 4.

La topografía de la región 4, varía de 500 a 3000 m, desafortunadamente las estaciones disponibles se concentraron en las regiones planas sin tener datos en las regiones altas, por lo que este patrón de la precipitación-orografía no fue observado. De tal manera que en el valle (donde hubo 2 estaciones), localizado en la sombra orográfica de las montañas, se presentó la región con menor precipitación de las cuatro regiones, sin embargo, la parte alta que puede tener una mayor precipitación en esta región, no pudo ser evaluada (Tabla 3).

La cuenca del Río Tehuantepec abarcó las planicies del Istmo, con un sólo patrón de precipitación, la CP3. Las diferentes cuencas que forman la región costa del Sur se caracterizaron por dos diferentes patrones, la CP1 al Oeste y la CP3, al Este, regiones con precipitación alta y media respectivamente (Tabla 3).

**Tabla 3. Promedios de precipitación (mm) anual y mensual (mm/mes) regionales.**

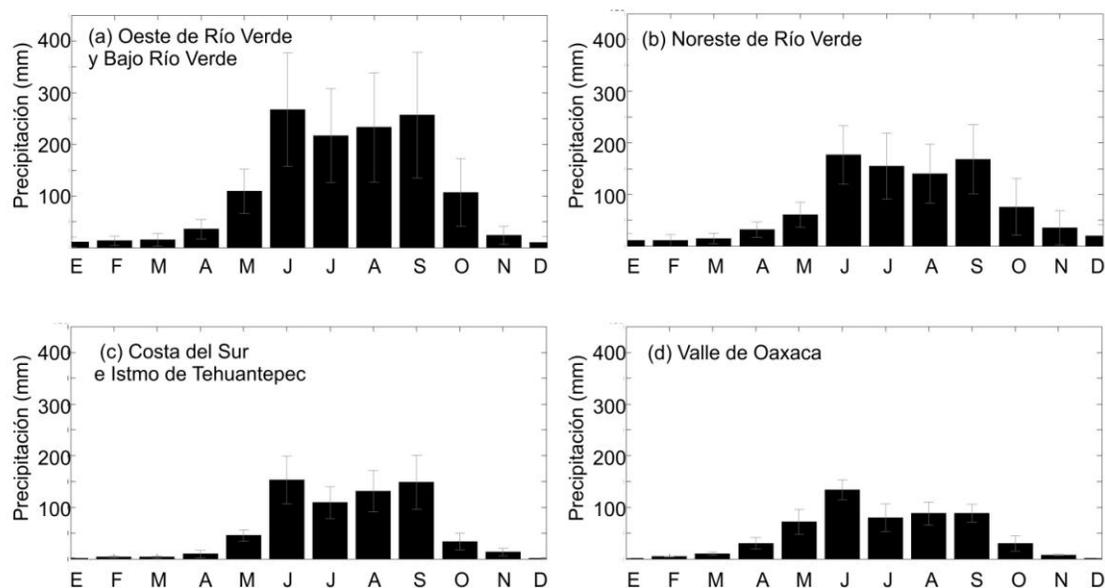
	R1	R2	R3	R4
Promedio mensual (Ene a Dic 1961-1990, en mm/mes)	115.3	79	62.7	52.9
Promedio anual (1961-1990, en mm)	1257	870	646.6	546.8



**Figura 14. Cuatro regiones principales de precipitación derivadas del ACP usando el contorno de 0.4.**

Las cuatro regiones evaluadas se caracterizan por una precipitación máxima en verano (mayo a octubre) y una precipitación considerablemente menor en el resto del año (Fig. 14 y 15). Las diferencias principales entre las cuatro regiones son el patrón de distribución de precipitación y la precipitación media anual durante 1961-1990 (Tabla 3). El Bajo-Río Verde (CP1) y el Istmo de Tehuantepec (CP3), experimentan un verano temprano en el mes de junio debido al establecimiento y movimiento hacia el Norte de la ZITC sobre la EPAC (García *et al.*, 1990, Cortéz-Vázquez, 1999; Valdés *et al.*, 2005, Amador *et al.*, 2006), y continúa así hasta los meses de julio y agosto.

En ambas regiones CP1 y CP3 se observa un régimen de precipitación con una distribución bimodal (Fig. 15 a and 15 c), con dos picos máximos en junio y septiembre y un mínimo en julio-agosto. Después de la “canícula” (sequía de medio verano) la precipitación se incrementa en parte debido a la influencia de los huracanes alcanzando un máximo en septiembre; a partir de agosto, la influencia de estos huracanes en la lluvia del Sureste ha sido observada (Mosiño y García, 1974, Dilley, 1997) Las diferencias en la media anual para las dos regiones está dada por la topografía y su localización geográfica (Fig. 14). Mientras que la región CP1 abarca las planicies costeras y áreas con una altitud alrededor de 2200 metros, la región CP3 abarca solamente las planicies costeras pegadas al Golfo de Tehuantepec (Fig. 14).



**Figura 15. Precipitación media anual sobre todas las estaciones en cada una de las regiones.**

La región CP2 se localiza en el límite NE de la cuenca de Río Verde sobre las sierras orientales. Esta región está influenciada por los vientos alisios provenientes del Golfo de México y los ciclones tropicales durante el verano e invierno (García *et al.*, 1990); el mínimo en julio esperado, se retrasa al mes de agosto con enriquecimiento de humedad proveniente del Golfo de México, y en el mes de septiembre se observa un máximo de precipitación debido al periodo de huracanes (Fig. 15 b).

La región CP4 contribuye con el 9 % a la varianza total. La lluvia media anual es sólo 45 % de lo observado en la región 1. El máximo de precipitación ocurre en junio, mientras que en julio la precipitación disminuye y permanece así durante los meses de julio, agosto y septiembre, no observándose el segundo pico máximo de precipitación que aparece en las otras regiones (Fig. 15 d). Este comportamiento puede deberse a la presencia de la Sierra del Sur, que funciona

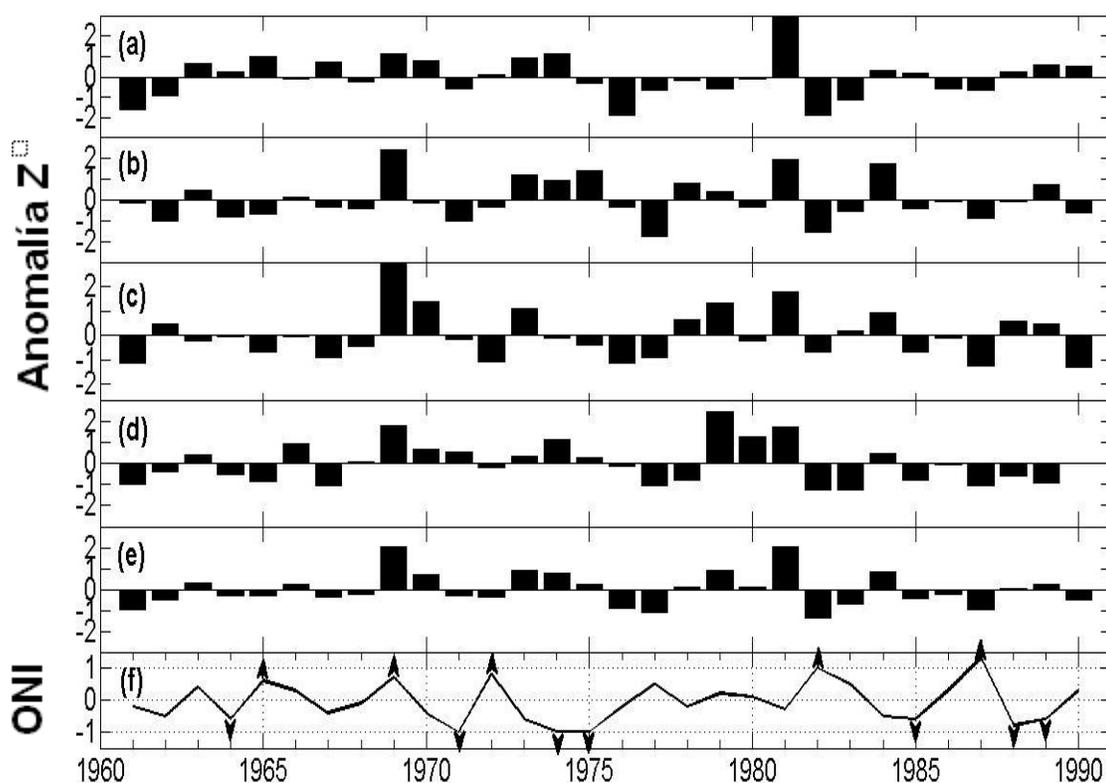
como una barrera en la sección media de la cuenca del Río Verde y presenta un patrón de lluvia intermontano, con una precipitación plana, con una mínima influencia de los CTs.

### **4.3 Serie temporal y relación con la ODP y el ONI**

La variabilidad temporal de la precipitación fue evaluada regionalmente a través de anomalías estandarizadas de la precipitación (Z), utilizando diferentes promedios para algunos periodos estacionales.

Durante el periodo de la estación de lluvia (Fig. 16) se observaron dos anomalías positivas principales: en 1969 y en 1981. Comparando las cuatro regiones, la región que mostró una anomalía mayor fue la región 3 en 1969 y la región 1 en 1981. Ambas regiones son fuertemente influenciadas por la ZITC y por su proximidad con el Océano Pacífico.

En otros años también se observaron anomalías positivas (> 1 desviación estándar): 1973, 1974, y 1979, en una región particular; pero 1969 y 1981 fueron observadas en las cuatro regiones. Los periodos con años secos fueron observados de 1961 a 1965 (excepto 1963), de 1976 a 1977 y de 1982 a 1990 (excepto 1984).

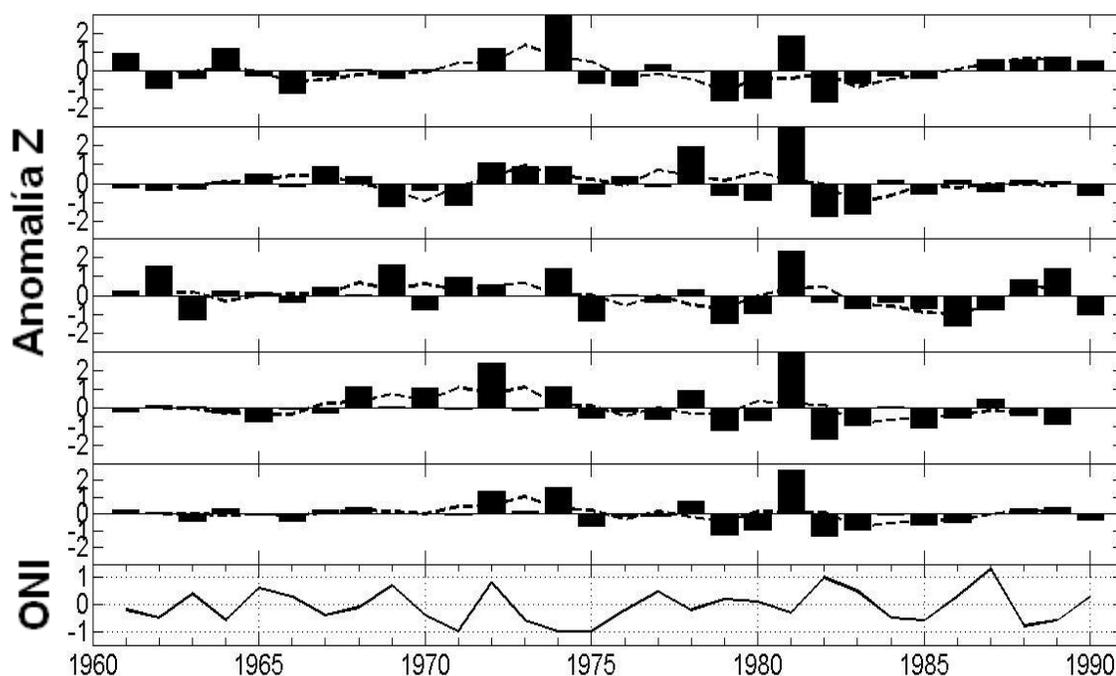


**Figura 16. Anomalías estandarizadas de precipitación (Z) de mayo a octubre en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando ONI > 0.5 (flecha hacia arriba), La Niña ONI < -0.5 (flecha hacia abajo) y neutral, ONI entre -0.5-0.5 (f).**

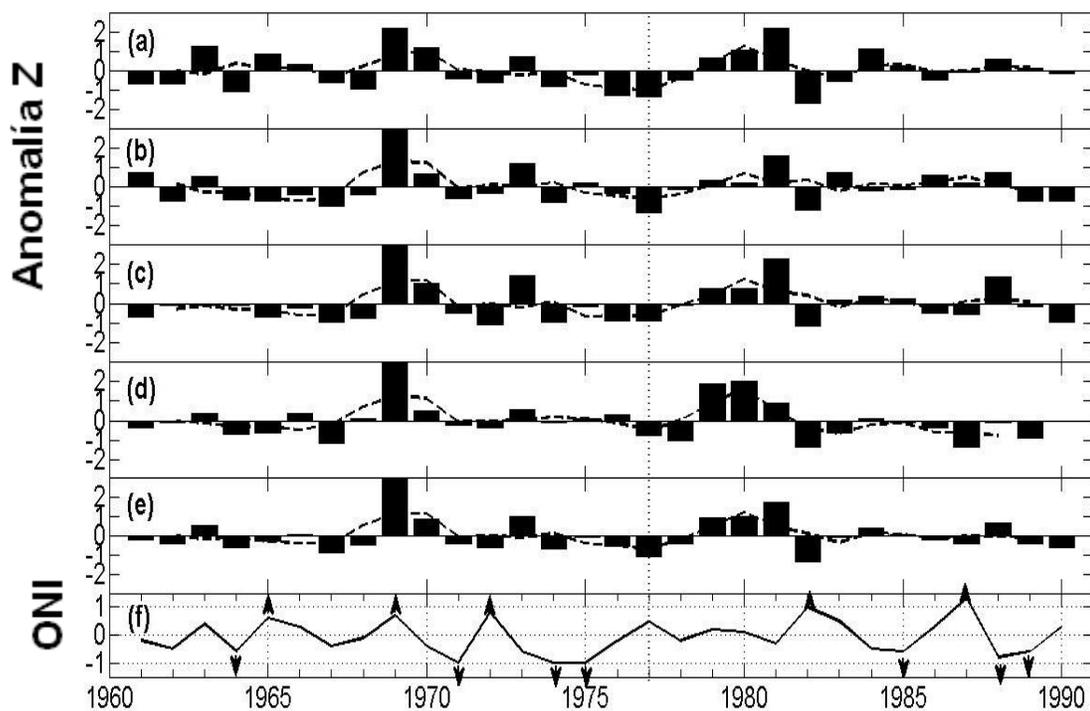
Considerando la anomalía media Z en el inicio de la estación de lluvia, sólo durante el mes de junio, el primer pico en 1969 sólo se observa en la región 3, la región de Tehuantepec y costa Sur; sin embargo, el pico de 1981 se observa en todas las regiones, con valores relativos más altos en la CP2 y las regiones cercanas al Golfo de México (Fig. 17). De julio a agosto, durante el periodo de la Sequía de medio verano, el pico de 1969 se extiende a todas las regiones, no sólo las más costeras, sin embargo, el pico de 1981 comienza a disminuir en todas las

regiones (Fig. 18). Ambas anomalías positivas desaparecen durante septiembre-octubre (Fig. 19).

Los resultados de la correlación entre la anomalía Z en diferentes periodos con el ONI y la ODP se muestran en la Tabla 4. No se encontraron correlaciones significativas entre las anomalías de precipitación y la ODP. El índice ONI estuvo significativamente correlacionado (correlación negativa) sólo con las anomalías de la precipitación en la región 3 (Tabla 4). Esta correlación significa que para la región 3, por ejemplo, eventos de El Niño están relacionados con anomalías de precipitación negativa. Por lo que sólo la región 3 fue asociada al ENOS.



**Figura 17. Anomalías de precipitación (Z) de junio en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. La línea intermitente muestra un promedio corrido cada tres años. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando ONI > 0.5, La Niña ONI < -0.5 y neutral, ONI entre -0.5-0.5 (f).**



**Figura 18. Anomalías de precipitación (Z) de julio a agosto en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. La línea intermitente muestra un promedio corrido cada tres años. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando  $ONI > 0.5$ , La Niña  $ONI < -0.5$  y neutral,  $ONI$  entre  $-0.5-0.5$  (f).**

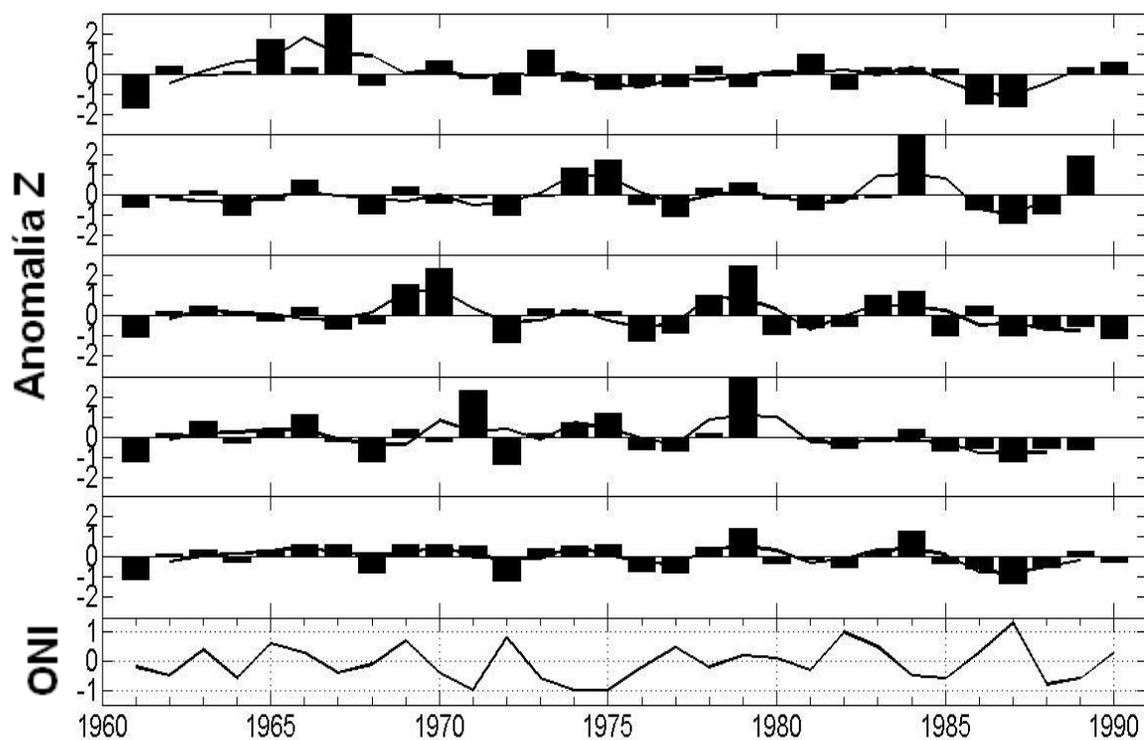


Figura 19. Anomalías de precipitación (Z) de septiembre a octubre en las cuatro regiones derivadas del ACP (a-d), (e) Z media de las cuatro regiones. Índice anual El Niño (ONI), El Niño cuando  $ONI > 0.5$ . La línea continua muestra un promedio corrido cada tres años. La Niña  $ONI < -0.5$  y neutral,  $ONI$  entre  $-0.5-0.5$  (f).

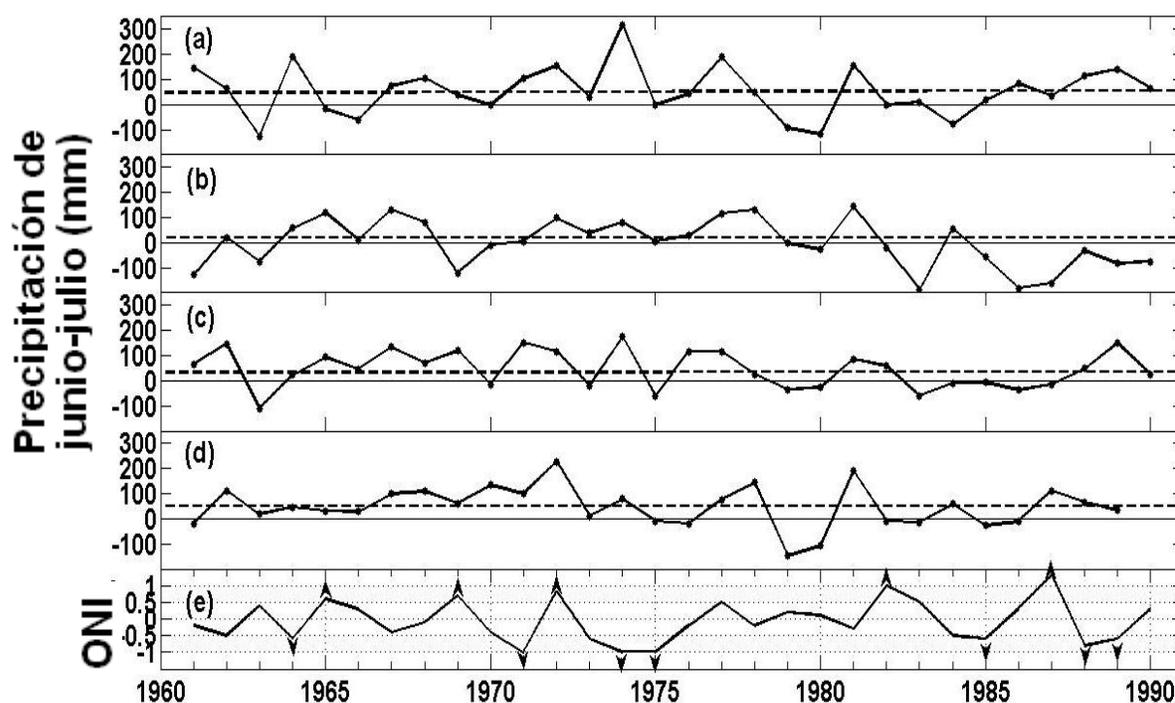
**Tabla 4. Correlación de la precipitación con los índices ONI y ODP. En negritas se resaltan las correlaciones significativas al 95%.**

<b>Regio derivada del ACP</b>	<b>ONI (JAS)</b>	<b>ODP</b>
<b><i>Promedio anual</i></b>		
R1: Bajo Río Verde y costa	-0.03	-0.02
R2: Golfo de México	-0.23	-0.17
R3: Tehuantepec y costa	<b>-0.4</b>	0.07
R4: Valle de Oaxaca (Río Verde NE)	-0.1	-0.12
<b><i>Promedio mayo a octubre</i></b>		
R1: Low Rio Verde y costa	-0.2	-0.04
R2: Golfo de México	-0.32	0.03
R3: Tehuantepec y costa	<b>-0.37</b>	0.08
R4: Valle de Oaxaca (Rio Verde NE)	-0.18	-0.07
<b><i>Promedio julio a agosto</i></b>		
R1: Low Rio Verde y costa	-0.1	0.17
R2: Golfo de México	-0.13	0.21
R3: Tehuantepec y costa	<b>-0.39</b>	0.19
R4: Valle de Oaxaca (Rio Verde NE)	-0.13	-0.01

#### **4.4 Sequía de medio verano**

Otro de los puntos que se evaluó de la precipitación en Oaxaca fue la sequía de medio verano, el mínimo de precipitación durante los meses de julio y agosto que ocurre entre los dos picos máximos. La sequía de medio verano (o canícula) mostró una variabilidad interanual, la cual fue observada en todas las regiones, pero no se encontró ninguna relación entre el inicio de la sequía de medio verano (junio menos julio) y el ENOS (a través del índice ONI (Fig. 20)). Los valores por arriba de la media climatológica de cada región, como se mencionó en la metodología (línea intermitente, Fig. 20), indican la presencia de la canícula y por abajo, que no hay canícula. Se observó un menor número de años sin la

influencia de la canícula a partir de 1977, donde el ODP cambia a fase positiva (Fig. 20).



**Figura 20. Precipitación de junio menos julio (inicio de la canícula) para cada región y valores de ONI. La media climatológica para cada región se indica con una línea intermitente.**

Espacialmente, se observa una diferencia positiva entre la precipitación entre de los meses de junio y julio, mayor tanto en la costa como en el valle (Fig. 21); que al compararla con la media climatológica para la época de lluvia (Fig. 22), el valle de Oaxaca mostró una diferencia mayor. En ambos ejercicios realizados (Fig. 22 y 23) se observó el efecto de la canícula siendo mayor en el valle de Oaxaca.

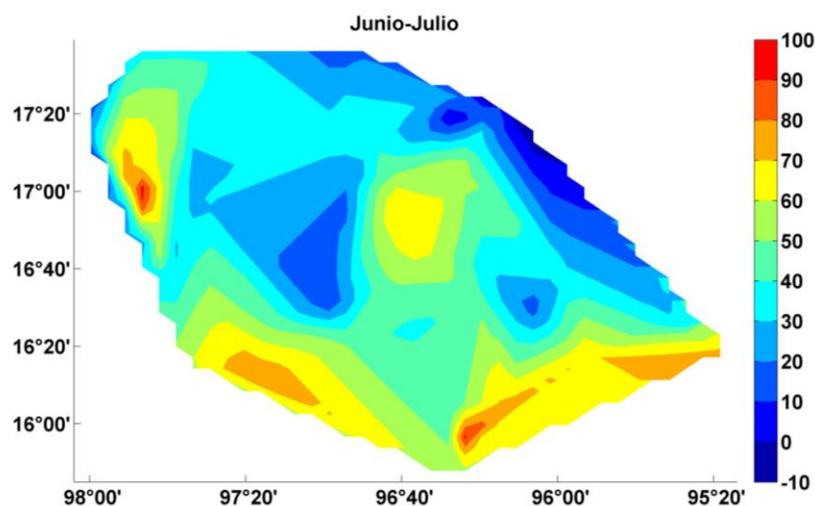


Figura 21. Inicio de la canícula. Diferencia entre la precipitación de junio y julio para el periodo de 1961 a 1990.

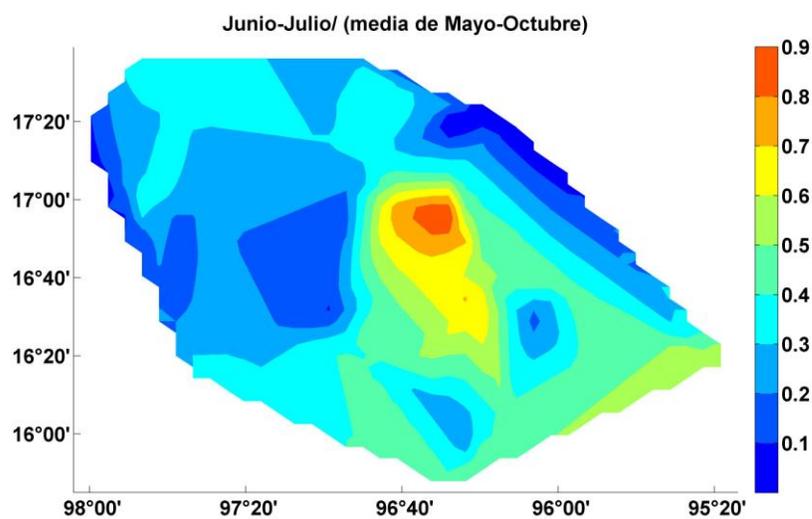
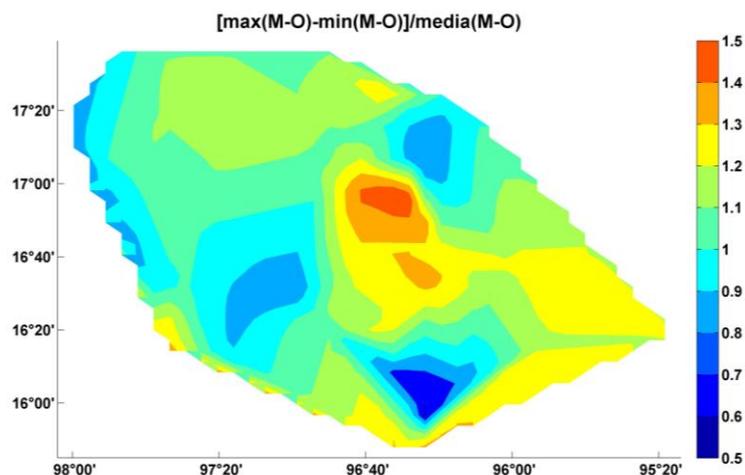


Figura 22. Inicio de la canícula estandarizada con la media. Diferencia entre la precipitación de junio y julio entre la media climatológica de mayo a octubre para el periodo de 1961 a 1990.



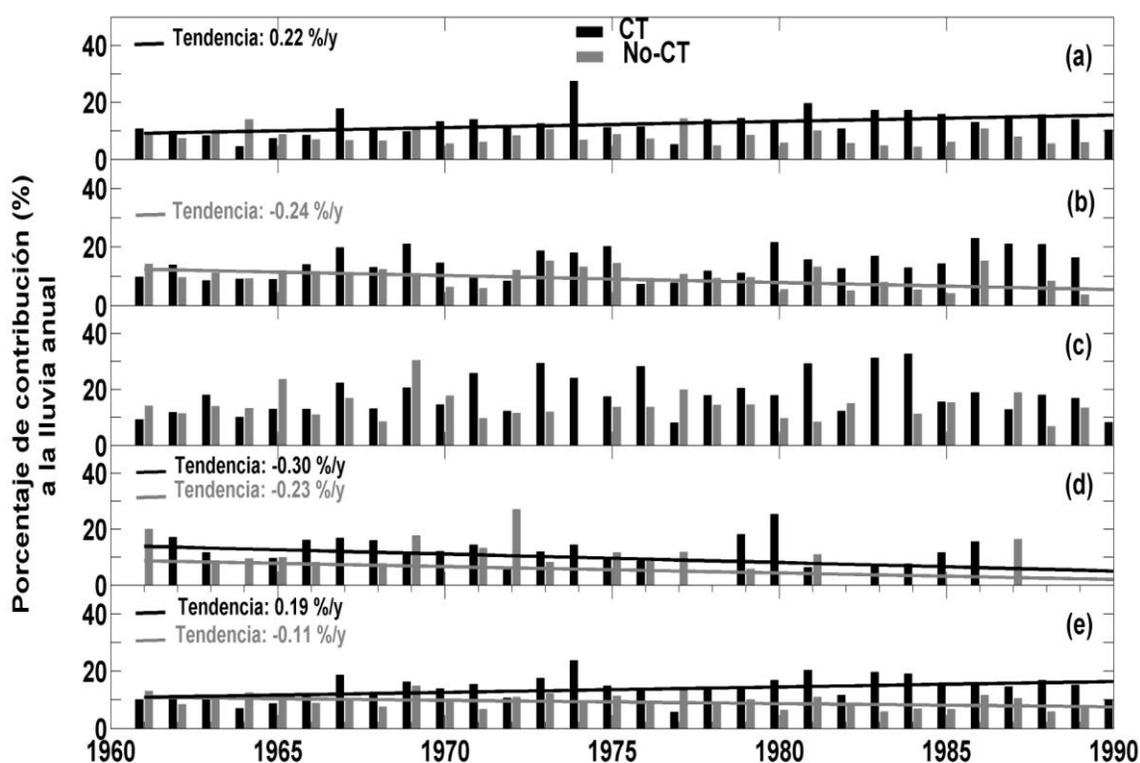
**Figura 23. Fuerza de la canícula estandarizada con la media. Diferencia entre el máximo de mayo a octubre menos el mínimo entre la media climatológica para el periodo de 1961 a 1990.**

#### 4.5 Eventos extremos de precipitación diaria

El segundo pico máximo de precipitación en septiembre, el cual ha sido asociado a ciclones tropicales y que se observó en el ciclo medio anual para la región 1, 2 y 3 (sección 4.2. Fig. 15), fue evaluado particularmente mediante un análisis de eventos extremos de precipitación diaria asociadas a ciclones tropicales en el Pacífico tropical.

La contribución anual de los eventos de lluvia extrema derivada del paso de CTs y de los No-CTs durante verano (junio a octubre) se presenta en la Fig. 24 para las cuatro regiones; en algunos años la contribución de estos eventos es nula. La contribución media anual de los eventos extremos a la lluvia anual en las cuatro regiones fue baja, 23 %, donde 14% correspondieron a eventos extremos relacionados con TCs del Pacífico Tropical y 9 % a otras causas. De tal forma que, la mayoría de la lluvia anual (77%) viene de eventos menos intensos.

Los umbrales de P95 y P99 para identificar eventos extremos, así como la contribución media de CTs y no-CTs para cada una de las regiones se muestran en la Tabla 5. En ambos casos, la región 3 (Istmo de Tehuantepec y parte de la costa Sur) es la región con una mayor contribución de eventos extremos derivados de CTs y no-CTs a la lluvia anual.

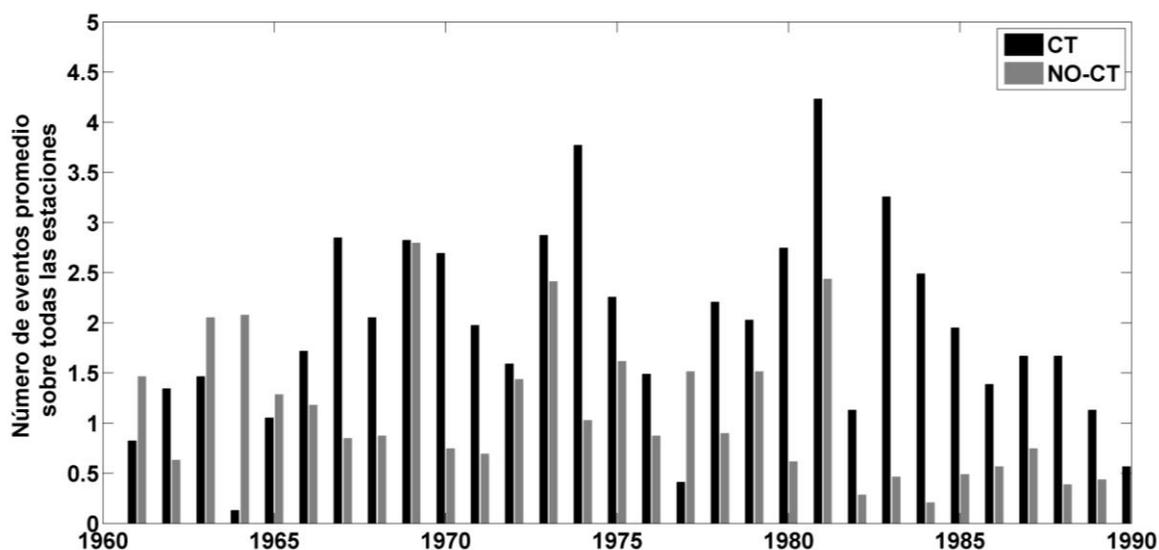


**Figura 24. Contribución del P95 (%) de eventos extremos de precipitación diaria derivados de CT (negro) y N-CT (gris) a la lluvia anual. (a-d) contribución del P95 de la CP1 a la CP4, respectivamente. (e) Contribución promedio para las cuatro regiones. Se muestra una línea de tendencia significativa ( $p < 0.05$ ).**

**Tabla 5. Umbrales (P95) utilizados para clasificar eventos diarios extremos y determinar el porcentaje de contribución de la lluvia estacional derivada de CT y no-CT a la lluvia anual.**

	R1	R2	R3	R4
<b>P95 (mm/d)</b>	40.5	33.4	51.5	35.8
<b>P99 (mm/d)</b>	63.5	55.3	86.3	58.2
<b>CT (% de contribución media)</b>	12.7	14.4	18	8.9
<b>No-CT (% de contribución media)</b>	7.8	9	14	6.5

Para los CTs se encontró una tendencia positiva significativa en la región 1 (al 95 % de confianza, Fig. 24a) y una tendencia significativa negativa en la región 4, el valle de Oaxaca (Fig. 24d). Para no-TCs, una tendencia significativa negativa fue encontrada en la región 2 y región 4. Eventos frecuentes de CTs y no-CTs durante el periodo de 1961-1990 fueron evaluados (Fig. 25) y los años con valores sobre la media más 1 desviación estándar para CTs fueron: 1967, 1981, condiciones neutrales; 1969, 1983, durante El niño y 1973, 1974, durante La Niña. Para No-CTs: 1969, 1973 and 1981.



**Fig. 25. Promedio de los eventos extremos diarios ocurridos para las todas las estaciones; con negro los asociados a ciclones tropicales (CTs) y con gris a otros orígenes (No-CTs)**

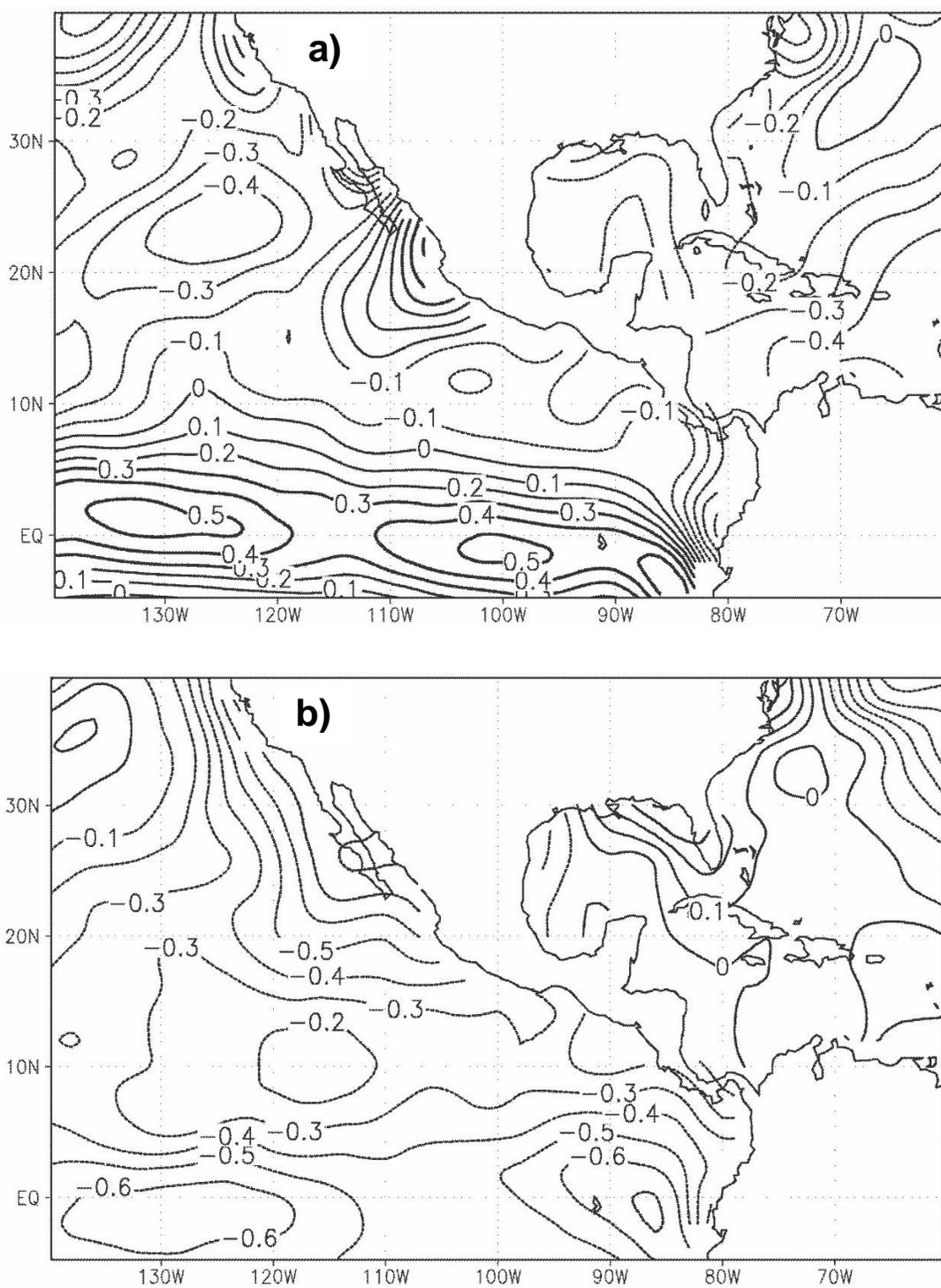
#### **4.6 Anomalías de temperatura superficial del mar asociadas a eventos de precipitación extrema.**

El comportamiento de las anomalías de la TSM (anTSM) durante eventos extremos en años húmedos y secos es observado en la Fig. 26. Estas anomalías fueron comparadas para años húmedos (1969, 1973 y 1981, Fig. 16d) y secos (1961, 1976 and 1982, Fig. 16 d). Se observaron anomalías negativas ( $\sim -0.6^{\circ}\text{C}$ ) en la EPAC cerca del ecuador durante años húmedos las cuales fueron asociadas a una Niña débil y condiciones neutrales, mientras que se observaron anomalías positivas ( $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ ) en el Pacífico Oriental Ecuatorial, durante años secos las cuales fueron asociadas a condiciones El niño débiles y neutrales positivas.

La precipitación en Oaxaca está ligada a la posición y establecimiento de la ZITC, la cual se ha encontrado es modulada por la época de huracanes, así como por el fenómeno ENSO (Magaña *et al.*, 2004). En este estudio se observaron que

los años con anomalías negativas de precipitación en el Pacífico Oriental ecuatorial, estuvieron asociados a la presencia de huracanes.

La ZITC se caracteriza por una gran cantidad de nubes profundas, durante El Niño, la ZITC tiende a permanecer más cercana al ecuador (Walliser y Gautier, 1993), por lo que esta convergencia de humedad tiende a ser mayor en el Pacífico Ecuatorial Oriental que frente a la costa Oeste de México (Magaña *et al.*, 2004). Hu y Feng (2002) de manera similar relacionaron el cambio del movimiento hacia el Norte de la ZITC con anomalías de TSM frías, mientras que hacia el Sur, anTSM cálidas. Es este mecanismo el que se observa en nuestra área de estudio, en el cual las anomalías de TSM negativas, están asociadas al movimiento hacia el Norte de la ZITC produciendo lluvia (Fig. 26 b) en nuestra zona de estudio y con anTSM positivas, su desplazamiento hacia el Sur, disminuyendo la lluvia (Fig. 26 a).



**Figura 26. Promedio de junio a octubre de anomalías de TSM para los años secos (a) y húmedos (b).**

## Capítulo 5

### Resultados (Hidrología)

#### 5.1. Flujos de agua superficial

La región 2 derivada del ACP se localiza en la frontera con la región hidrológica del Papaloapan y no hay estaciones hidrológicas disponibles en estos límites, por lo que sólo analizaremos las regiones 1, 3 y 4 que incluyen las cuencas hidrológicas estudiadas (Fig. 1). En el mapa mostrado en la Fig. 7 se muestra la altitud, cauce principal y la red de drenaje sobre las tres cuencas hidrológicas, con el fin de observar la ubicación de las estaciones y sus condiciones hidrológicas.

El flujo de agua en las tres regiones (Fig. 27) presenta una variabilidad interanual, en donde se observan los mayores gastos en la región 1 y los menores en la región 4. La mayor varianza está dada por las estaciones hidrológicas correspondientes a la región 1 (86 % de varianza explicada, Fig. 28) y a la región 3 (7 % de varianza explicada, Fig. 29).

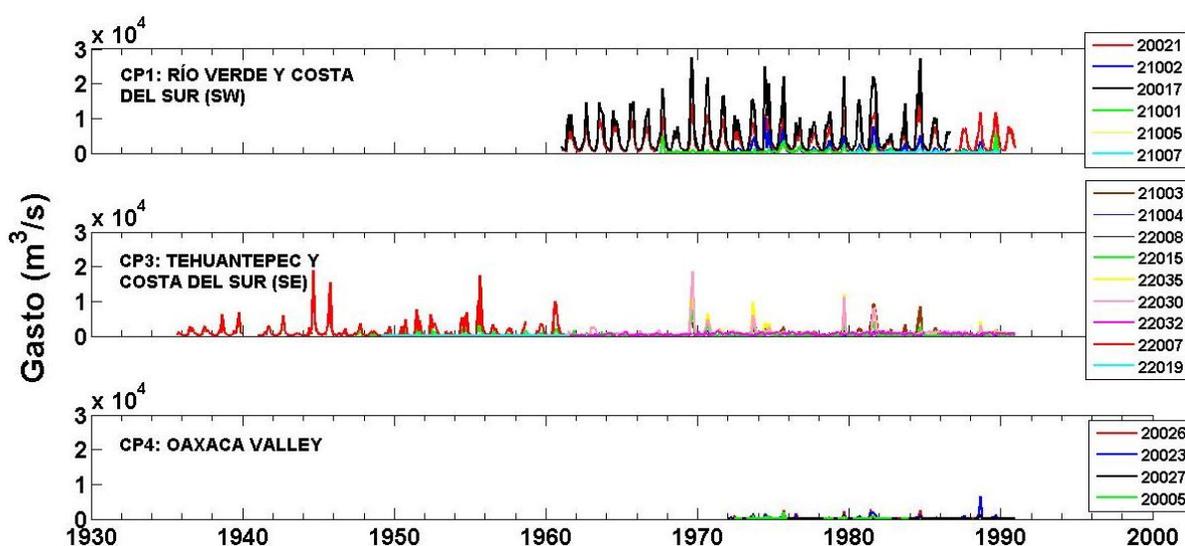


Figura 27. Flujos de agua superficial en las estaciones hidrológicas ubicadas en las tres regiones derivadas del ACP.

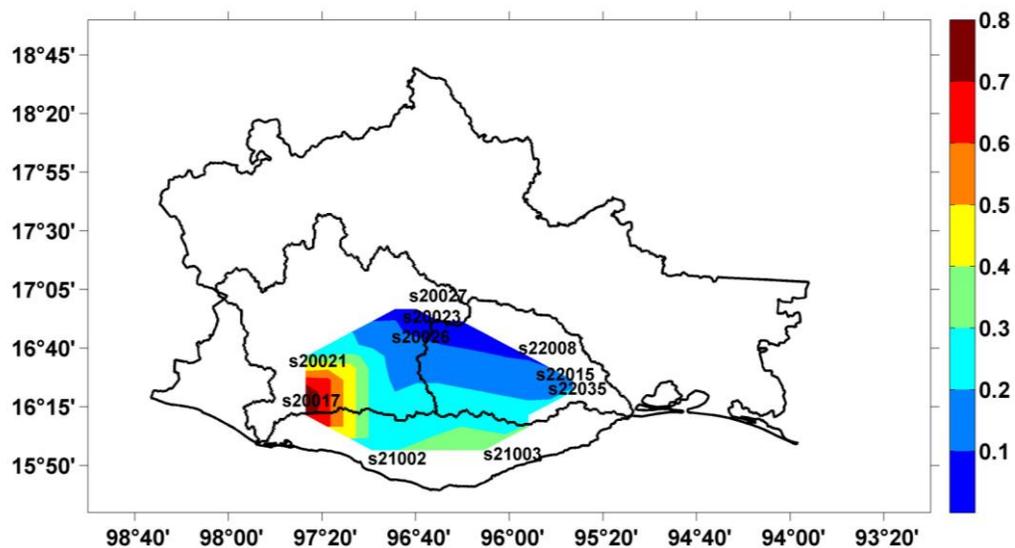


Figura 28. Componente 1 para los flujos de agua, la cual explica 86 % de la varianza.

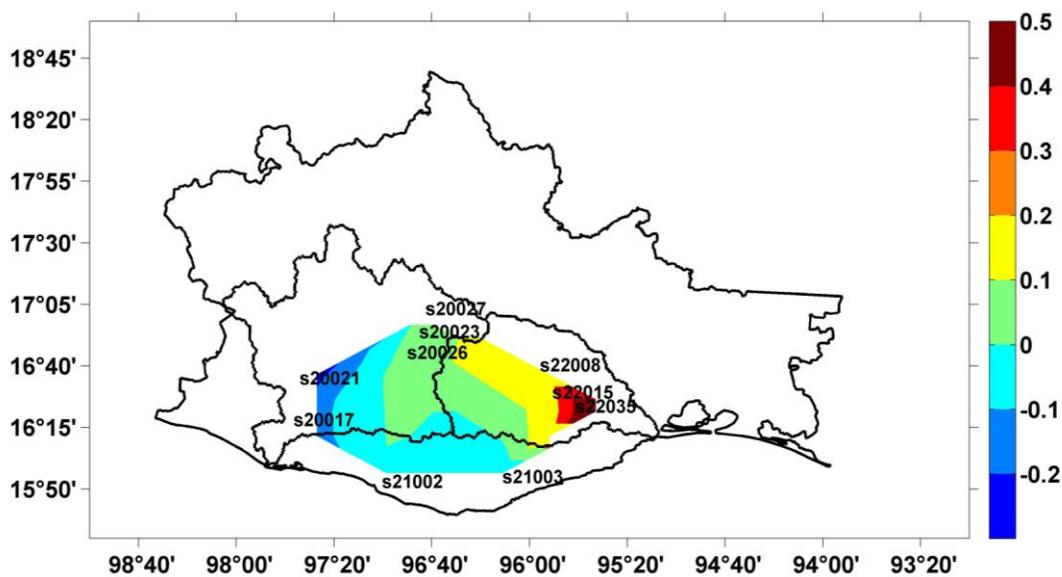
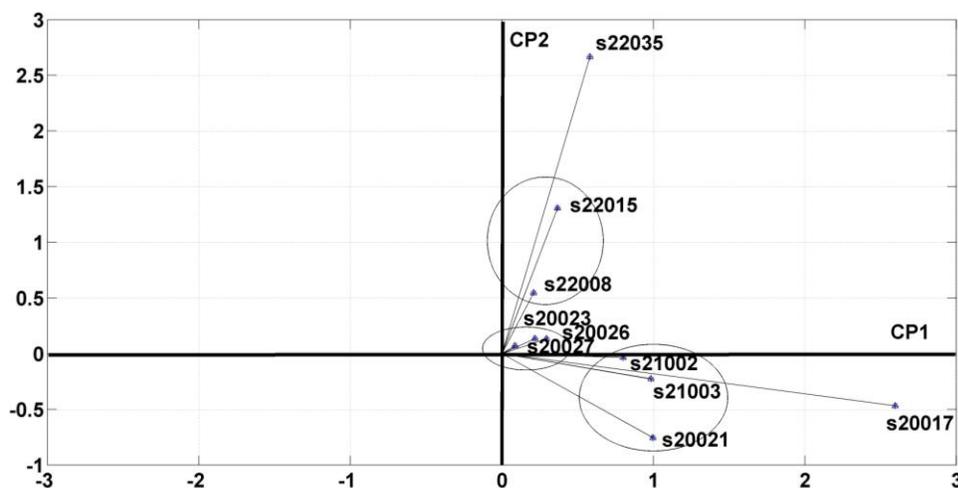


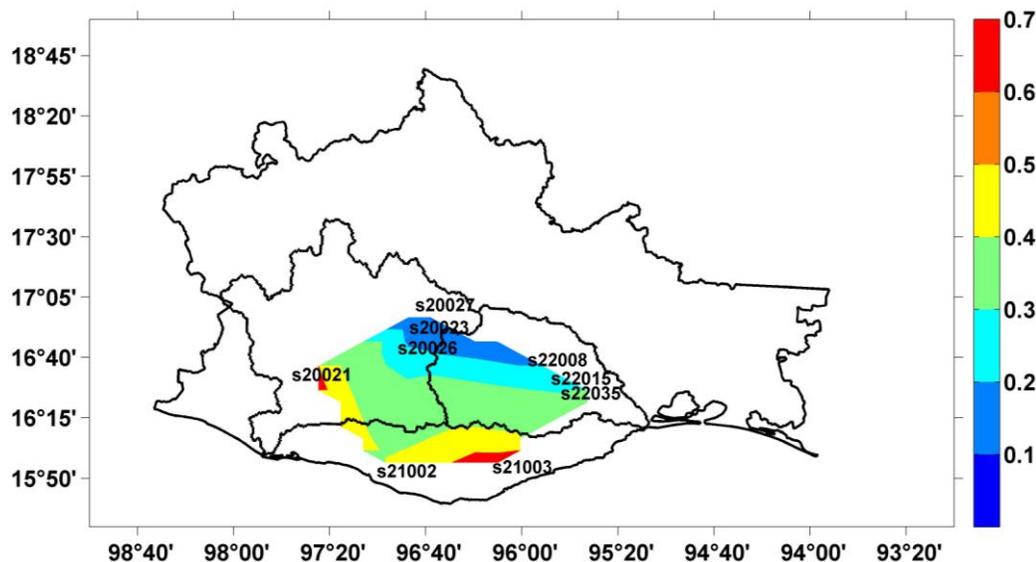
Figura 29. Componente 2 de los flujos de agua, la cual explica 7 % de la varianza.

La Fig. 30 muestra en espacio ambas componentes, se separan dos grupos, cada uno de los cuales obedece a diferentes procesos ligados a la componente 1 (región 1) y 2 (región 3) y un grupo más ubicado en la parte central y que corresponde a las estaciones con menor varianza explicada (región 4).



**Figura 30. Proyección de la componente 1 y 2, los círculos muestran los grupos que se separan.**

La estación 20017 ubicada en Paso de la Reyna (Bajo Río Verde) fue la de mayor varianza, esta se encuentra ubicada aguas abajo de uno de los núcleos de máxima precipitación en el Noroeste de la cuenca de Río Verde, al quitarse esta estación y realizarse nuevamente el análisis de componentes, la costa también se observa incluida en la componente 1 (Fig. 31), explicando el 70 % de la varianza de los datos, mientras que la componente 2 explicó el 17 % de la varianza de los datos, ubicada en Río Tehuantepec.



**Figura 31. Componente 1 de los flujos de agua, obtenidos sin la estación de mayor varianza. El porcentaje explicado es del 70 %.**

En la Figs. 32 a 34 se observan los gastos de agua para las tres regiones, a una escala diferente de acuerdo a los valores en cada región. Para el periodo de 1961 a 1990, el flujo de agua para la región 1 tiene un valor promedio de 10000 m<sup>3</sup>/s, la región con mayor gasto (Fig. 32); seguido por la región 3 (Fig. 33), con 6000 m<sup>3</sup>/s y por último, la región 4 (Fig. 34), con un flujo promedio de 1000 m<sup>3</sup>/s (periodo de 1972 a 1990). La Tabla 6 muestra los gastos máximos y mínimos en cada una de las corrientes de las diferentes regiones. Las tres regiones muestran una distribución bimodal entre cada año, similar a la observada en la precipitación.

**Tabla 6. Corrientes principales y sus gastos anuales máximos y mínimos.**

<b>Región</b>	<b>Corriente</b>	<b>Máximo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Mínimo (m<sup>3</sup>/s)</b>
1	Bajo Río Verde	27,579	264
1	Región Costa Sur	10,145	0
3	Río Tehuantepec (corriente arriba)	7,744	0
3	Río Tehuantepec (confluencia- unión, canal principal)	18,720	14
3	Río Tehuantepec (canal lateral)	1,550	0
4	Río Atoyac	6348	0
4	Río Salado	2018	0

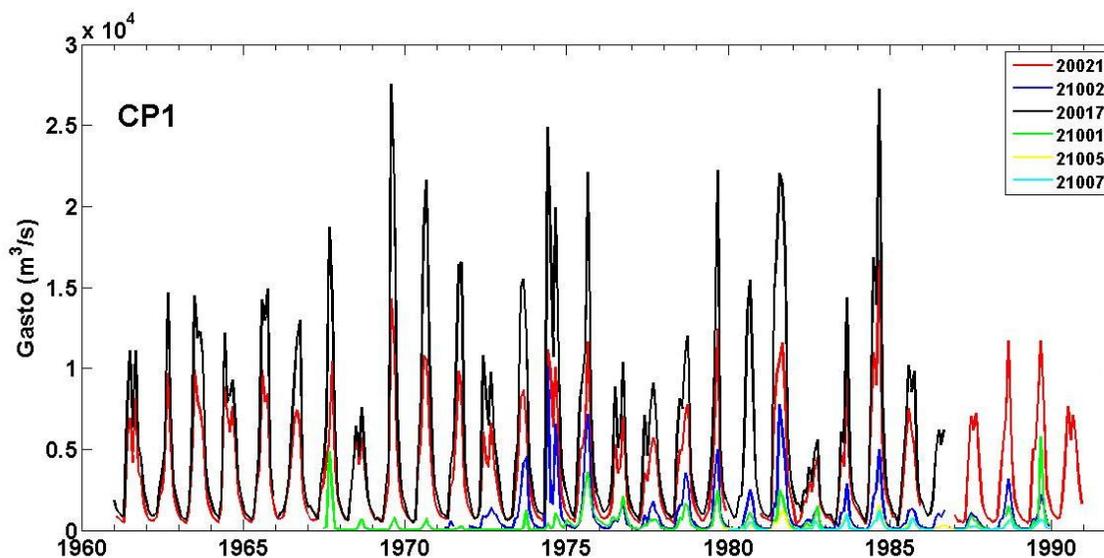


Figura 32. Flujos superficiales de agua para las estaciones hidrológicas dentro de la región 1 derivada de ACP.

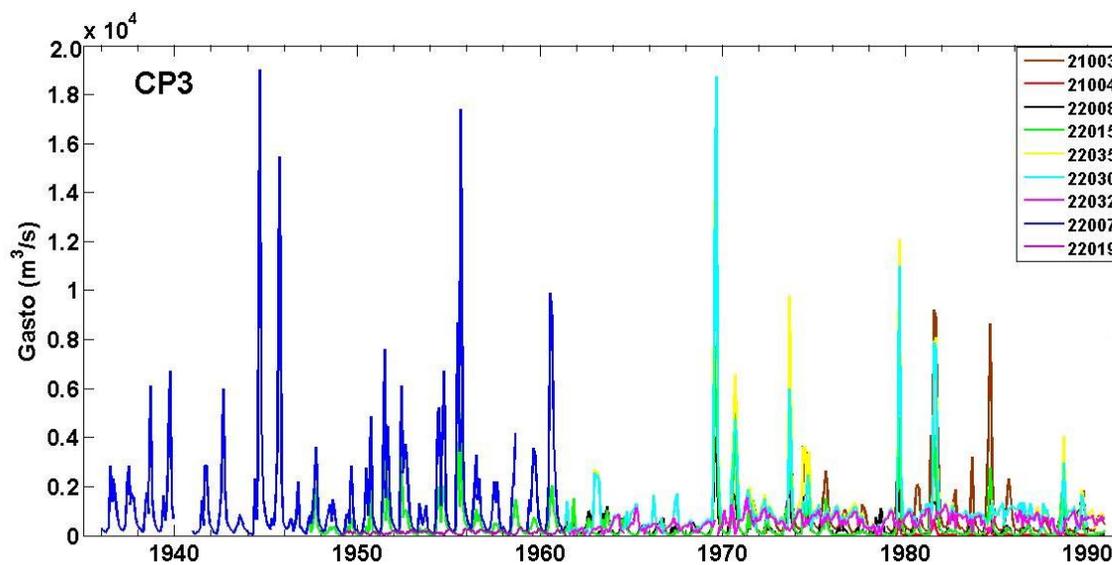
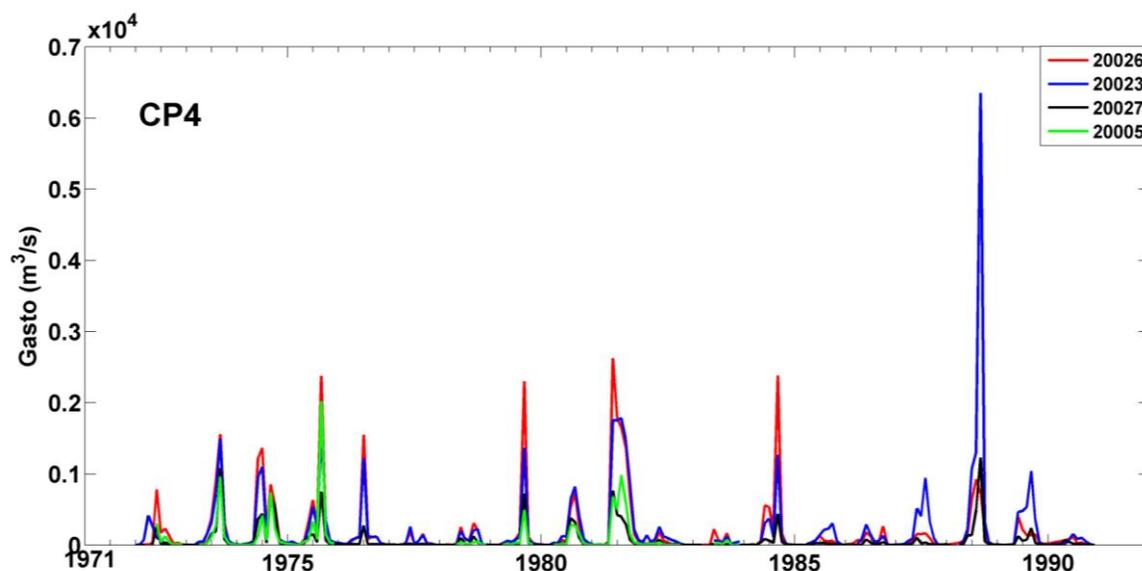


Figura 33. Flujos superficiales de agua para las estaciones hidrológicas dentro de la región 2 derivada de ACP.



**Figura 34. Flujos superficiales de agua para las estaciones hidrológicas dentro de la región 3 derivada de ACP.**

Para caracterizar el ciclo anual se utilizaron promedios hidrológicos sobre las estaciones de mejor calidad, se utilizó el periodo de 1961-1990 en la región 1 y región 3 y el periodo de 1972-1990 en la región 4, ya que era el periodo disponible de las estaciones hidrológicas. En las Figs. 35 a 37 se observa el ciclo anual con máximos en junio y septiembre.

La distribución bimodal se acentúa en la región 4, con un mínimo en el mes de julio-agosto (Fig. 37), la región con menor cantidad de precipitación recibida, lo cual se refleja en el flujo base de cero de enero hasta abril (Fig. 37) comparado con un flujo base de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 35) en la región 1, la región con mayor gasto.

En la región 3 (Fig. 36) se observan tres diferentes patrones, el primero, marcado por la estación 21003, la cual la integramos a esta región, sin embargo, junto con la estación 21001 forma la parte baja de la cuenca hidrológica del Río Copalita ubicado en la región costera del Sur, en los límites con la región 1 y 3, por lo cual la reagrupamos a la región 1. Los dos patrones siguientes son el grupo de la estación 22008 y 22015, con dos picos en junio y septiembre y un ligero mínimo

en el mes de julio en la estación 22008, ambos esperados con el patrón de precipitación. El segundo patrón, dados por la estación 22030 y 22035, ubicadas bajo la bifurcación de la red principal y en la presa “Benito Juárez”. Estas estaciones presentan un flujo base inicial en  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ , mantienen este valor hasta los meses de abril en que comienza a disminuir, alcanzando los valores observados en las estaciones superiores y un aumento nuevamente a partir del mes de junio, hasta alcanzar otro máximo en el mes de septiembre.

La estación 22032 es aguas abajo del canal principal, sin embargo, aguas arriba se localiza una presa, por lo que hasta el mes de junio se observa el mismo patrón de flujo base de agua, sin embargo, es a partir de este mínimo que se mantiene el flujo en este valor, pero no llega a alcanzar el máximo esperado. Además de ello, esta estación se encuentra ubicada en un canal lateral artificial, no dentro del cauce y donde además el área de la cuenca se acorta rápidamente (Fig. 37).

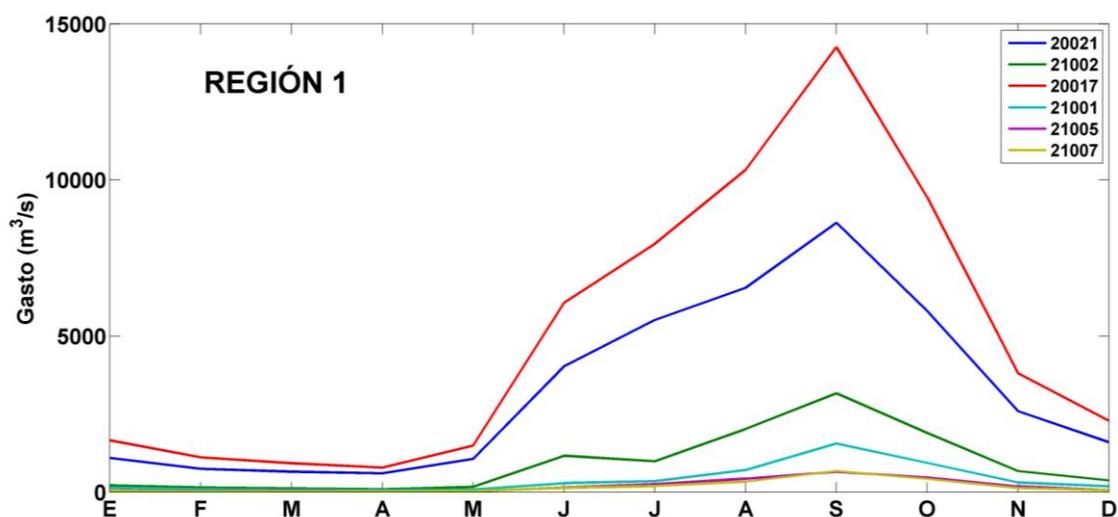


Figura 35. Ciclo anual para flujos de agua superficial (periodo promedio de 1961 a 1990) para la región 1.

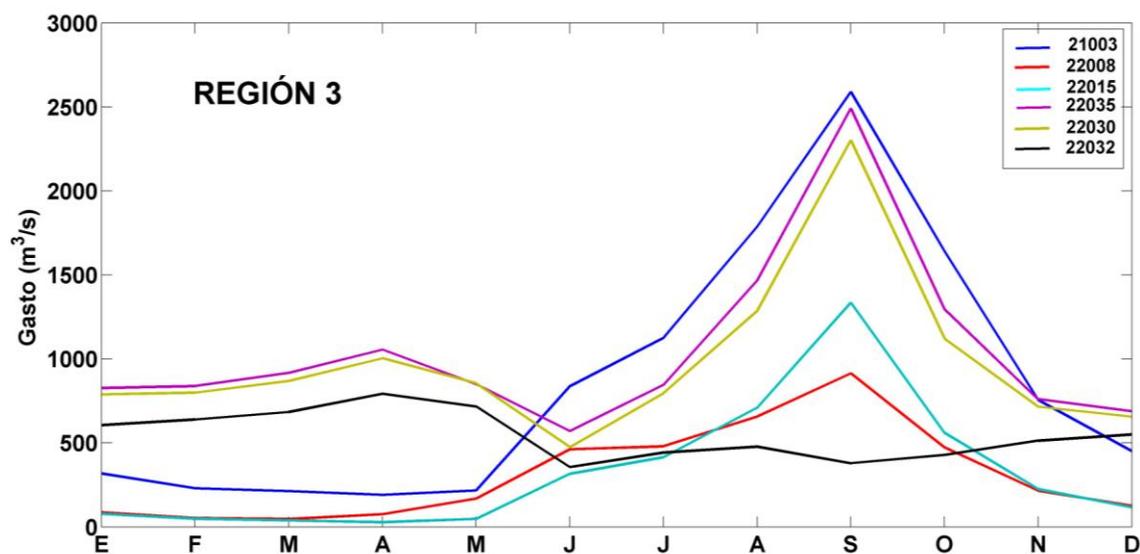


Figura 36.- Ciclo anual para flujos de agua superficial (periodo 1961 a 1990) para la región 3.

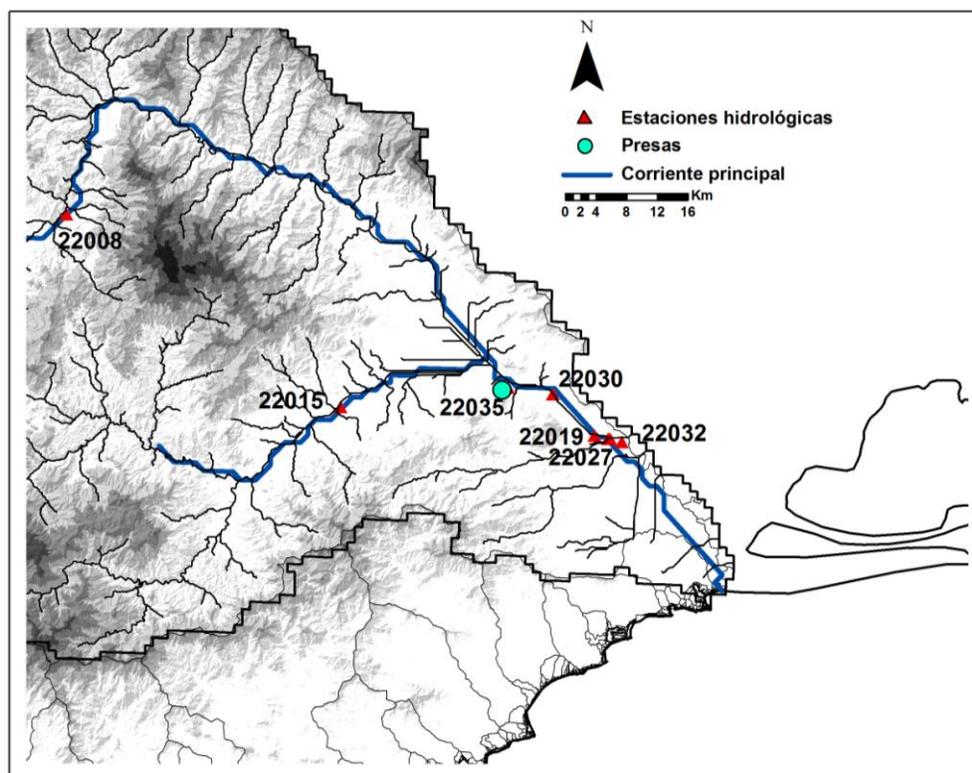
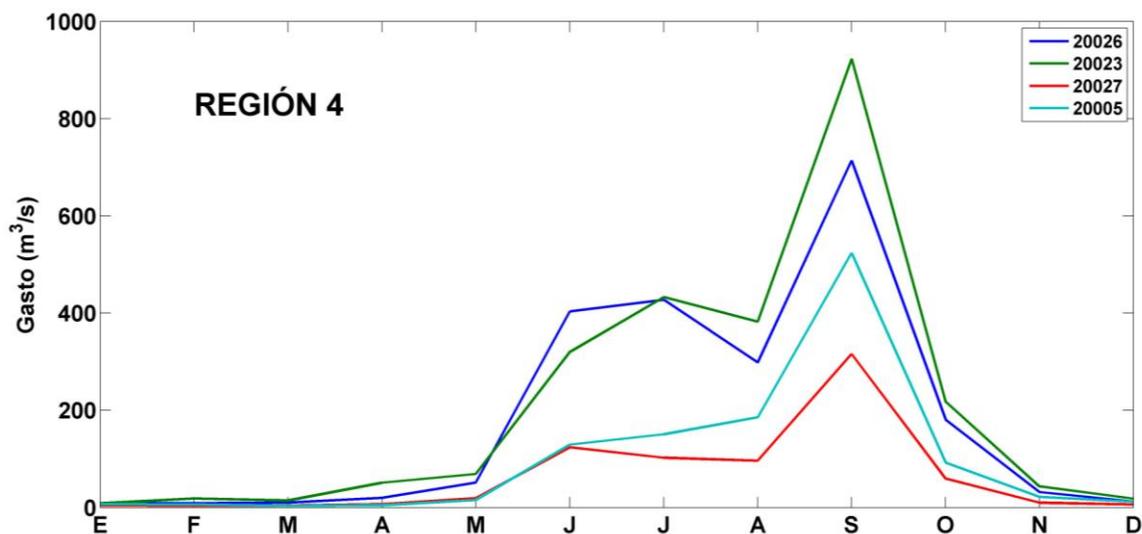


Figura 37. Ubicación de las estaciones hidrológicas en la región 3.



**Figura 38. Ciclo anual para flujos de agua superficial (periodo 1972 a 1990) para la región 4.**

De tal forma que cada una de las regiones tiene diferentes comportamientos de acuerdo a la ubicación de la corriente dentro del cauce principal (Fig. 39). La región 1 presenta dos áreas principales, las estaciones ubicadas en el Bajo Río Verde (con mayor gasto) y las estaciones costeras dentro de la región 1. La región 3 presenta tres patrones principales, la región alta del Río Tehuantepec, la región en donde confluye la corriente y la región del canal lateral. Finalmente, la región 4, con dos diferentes comportamientos, la región aguas arriba, perteneciente al Río Salado y la región perteneciente al Río Atoyac.

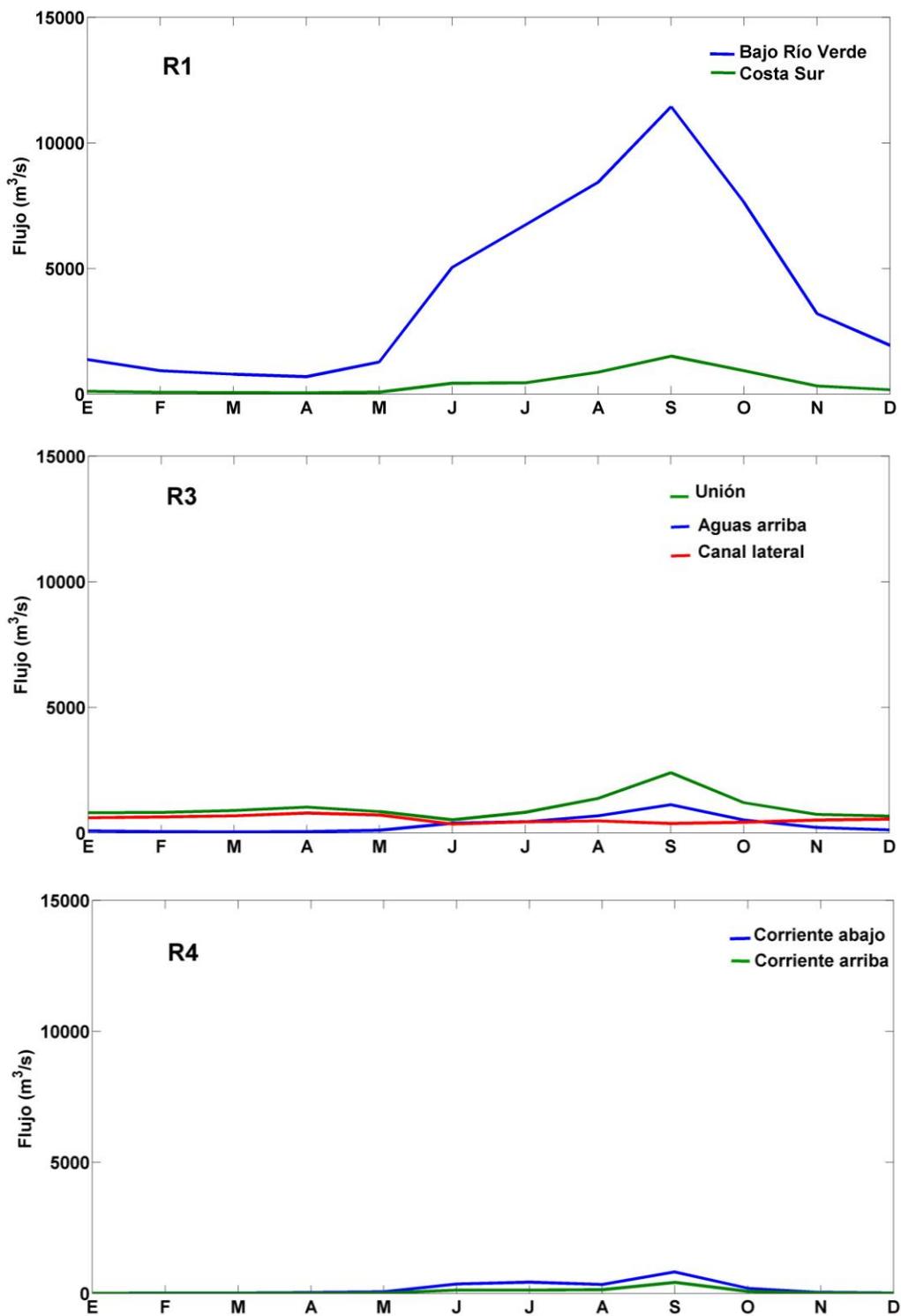
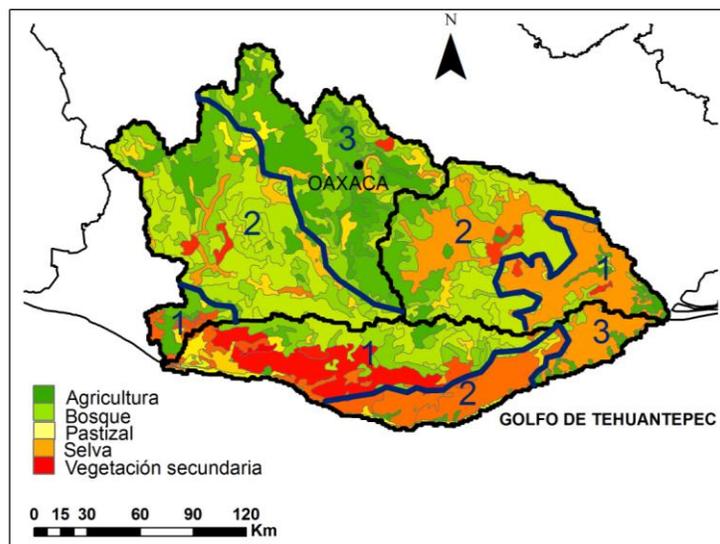


Figura 39. Ciclo anual del flujo de agua para las tres regiones.

## 5.2. Patrones de escorrentía para cada región derivada del ACP

La escorrentía fue obtenida para las tres regiones (Tabla 7), el apéndice G muestra los cálculos realizados para cada una de las secciones (Fig. 40) en las que se calcularon los coeficientes y parámetros usados en el cálculo final. Las tres cuencas hidrológicas fueron divididas por secciones de acuerdo a la vegetación y uso de suelo (Fig. 40), para calcular posteriormente en cada una de las tres regiones, en base al peso de porcentajes de acuerdo al área, la escorrentía.

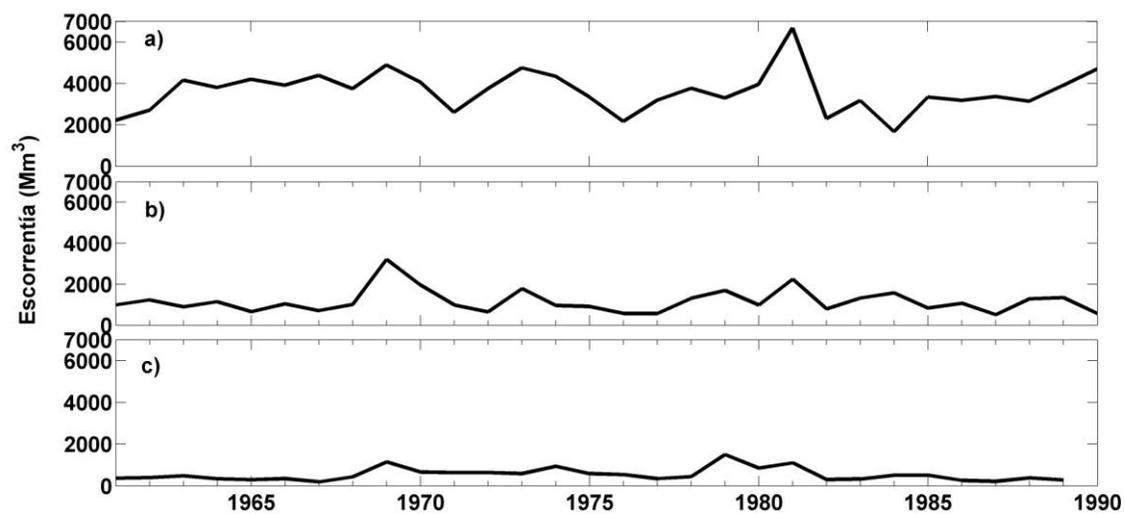
La escorrentía muestra una variabilidad interanual similar a la precipitación (Fig. 41). La región 1 aparece como la región con mayor escorrentía (Tabla 7) mientras que la región 4, la región de menor escorrentía. Sin embargo, el coeficiente de escorrentía fue mayor en la región 4 (apéndice G), pero la precipitación media anual, menor. Aunque la escorrentía fue mayor en la región 1, cuando se calcula el pico flujo para una precipitación diaria extrema, la región 3 aparece como la región con mayor escorrentía (Tabla 7).



**Figura 40. Secciones en las que se dividieron las cuencas para evaluar la escorrentía en las cuatro regiones.**

**Tabla 7. Escorrentía calculada para cada una de las regiones.**

	<b>R1</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>
Volumen precipitado promedio anual (Mm <sup>3</sup> )	16420	8873	3651
Volumen escurrido promedio anual (Mm <sup>3</sup> )	3624	1163	538
Volumen escurrido Máximo (Mm <sup>3</sup> )	6685	3213	1500
Volumen escurrido mínimo (Mm <sup>3</sup> )	1662	512	192
Po (mm) diaria	23.4	19.4	23.3
Escorrentía por evento extremo diario (precipitación derivada de P95 en mm; valor de la escorrentía en mm y % de escorrentía respecto a la precipitación diaria)	40.5/2.8 7 %	51.5/8.3 16 %	35.8/1.6 6 %



**Figura 41. Escorrentía anual ( $\text{Mm}^3$ ). a) hasta c) muestran la escorrentía anual para la R1, R2 y R3 respectivamente.**

## Capítulo 6

### Resultados (Hidroclimatología)

#### 6.1 Correlaciones entre los flujos de agua superficial y la precipitación.

Los flujos de agua y la precipitación se correlacionaron encontrándose valores positivos significativos al 95 % de confianza. Se observó una mayor correlación en las dos regiones más húmedas, la región 1 y 3. Para el caso de la región 4, sólo se tienen estaciones climatológicas de la región del valle y las estaciones hidrológicas en esta región están ubicadas debajo de ellas, por lo que se necesitaría correlacionarlos con estaciones arriba de estos flujos, debido a ello la correlación pudo disminuir.

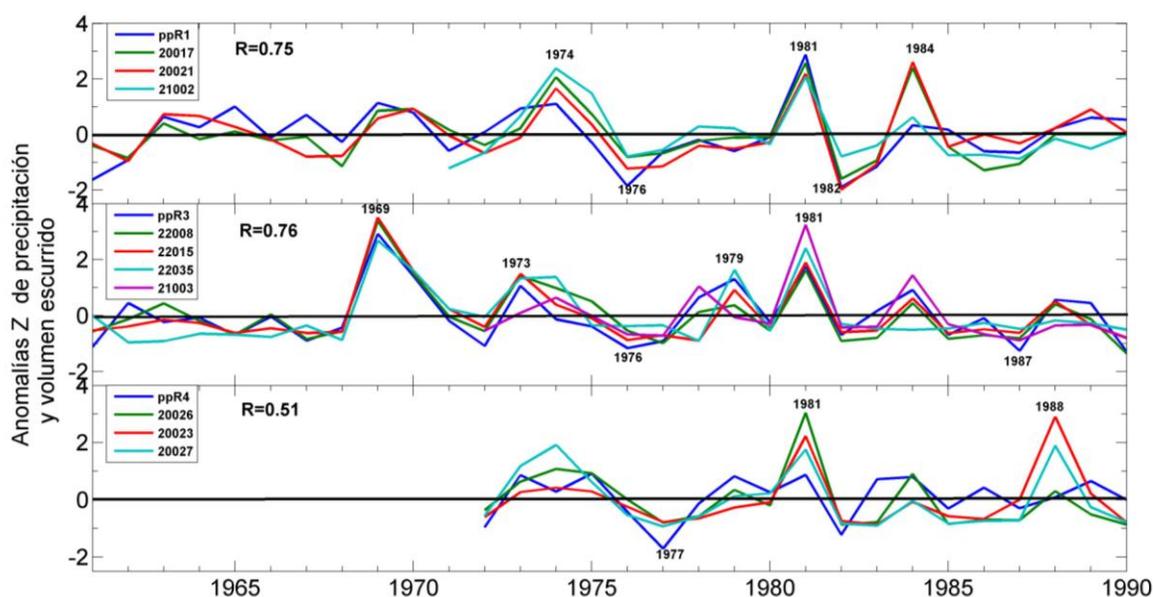
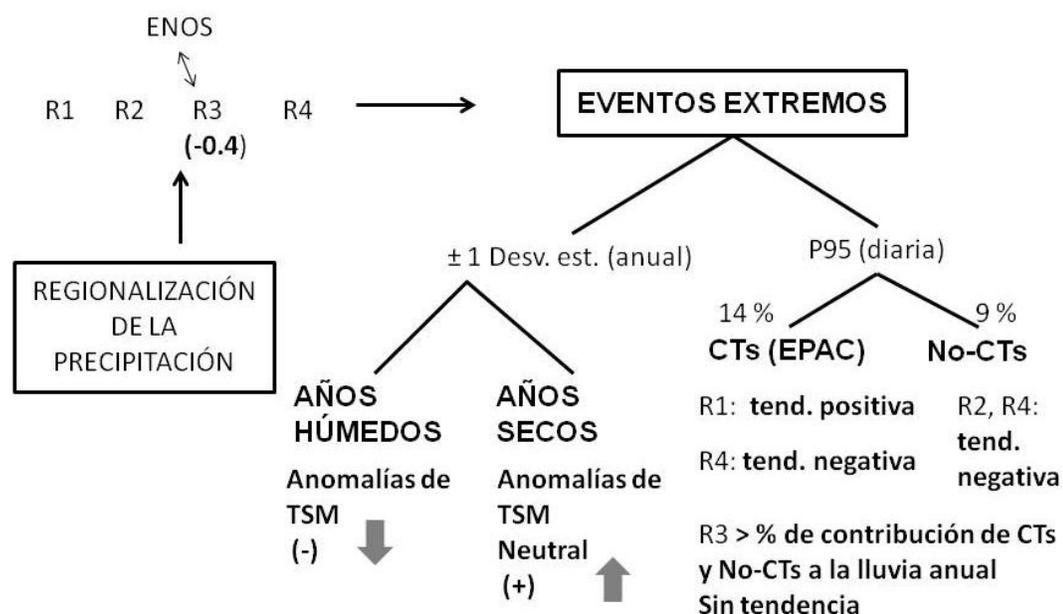


Figura 42. Anomalías estandarizadas de precipitación (azul) y volumen escurrido en cada estación de las tres regiones. Se muestra el valor de las correlaciones entre los flujos de agua superficial y la precipitación para promedios de mayo a octubre.

Las correlaciones significativas, nos muestran la relación directa que mantienen la precipitación y la hidrología en la región, los mismos años húmedos y secos durante el periodo estudiado y como consecuencia las condiciones de TSM asociadas a estos años (Fig. 26). La figura 43 muestra algunos de los principales resultados del estudio relacionado con la precipitación y que directamente también afectan a los flujos de agua en la región.



**Figura 43. Diagrama para ilustrar algunos de los principales resultados climatológicos encontrados en este estudio.**

El apéndice H muestra el análisis de correlación canónica entre las regiones de precipitación y las estaciones hidrológicas, no sólo por regiones sino entre cada región. Se observan correlaciones altas entre las 3 regiones, mayores entre la región 3 y 4. Se muestran los pares canónicos significativos, para ver en espacio cómo se comportan estas variables, la Fig. 44 muestra la proyección de la variante 1 y 2 para la región 1 con 3, 1 con 4, y 3 con 4.

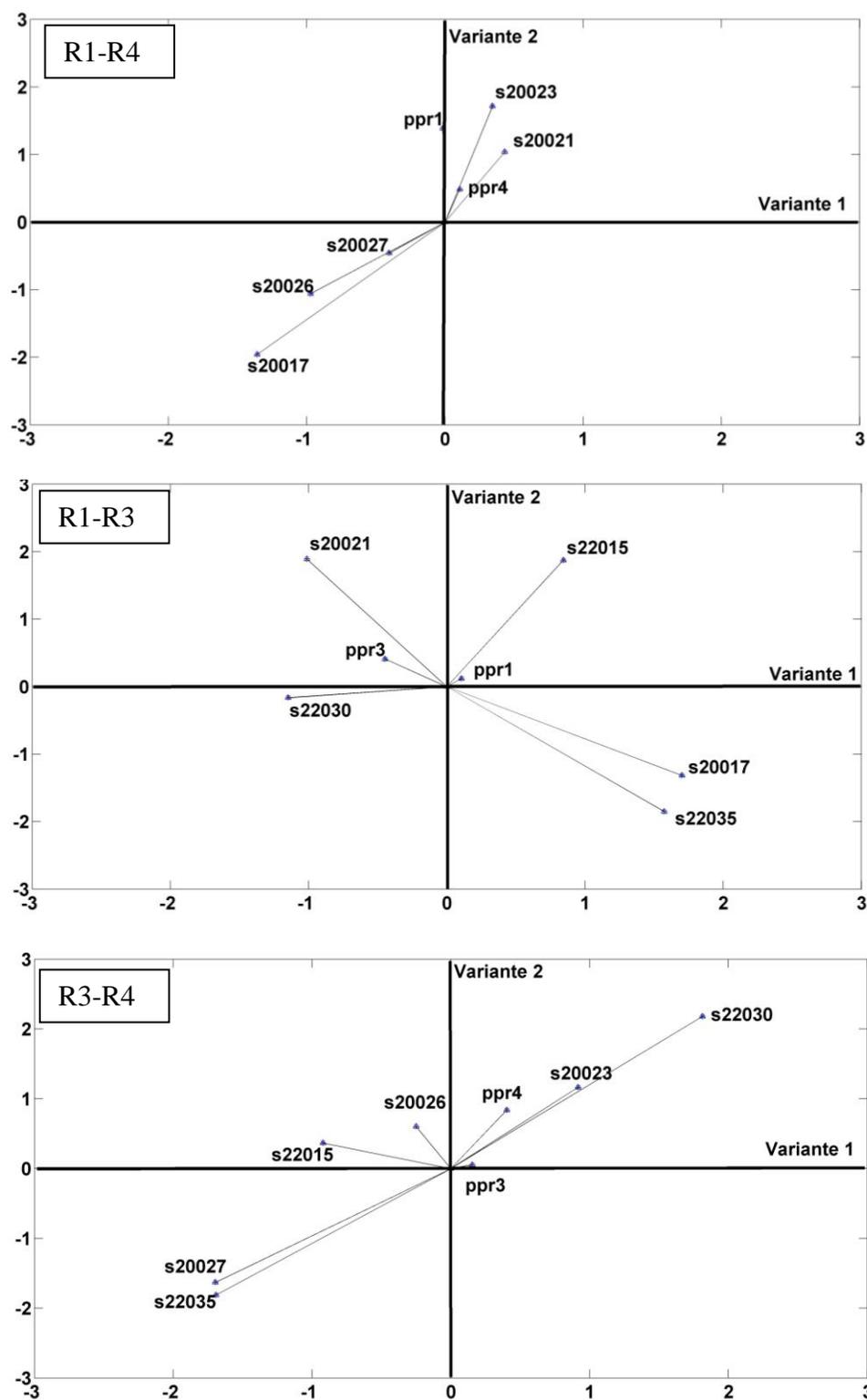


Figura 44. Coeficientes canónicos para la variante 1 y 2 entre dos regiones diferentes.

## 6.2. Precipitación y flujo de agua para un evento extremo: Huracán Orlene (21 a 24 de septiembre de 1974)

Con el fin de observar la relación entre la precipitación causada por un huracán y la respuesta de la hidrología en la estación hidrológica de Bajo Río Verde, la cual contribuyó con el 86 % de la varianza total, se describe el caso particular del huracán Orlene, ocurrido del 21 al 24 de septiembre de 1974, cuya trayectoria se observa en la Fig. 45. Se observa que durante este evento hubo un desfase de un día entre el máximo de la precipitación y el pico máximo del flujo de agua (Fig. 46). El flujo de agua graficado es de la estación de Paso de la Reyna, ubicado en la Región 1, en el punto de unión de las dos vertientes principales del Río Verde, las estaciones de la precipitación escogidas son aguas arriba en cada uno de los brazos.



Figura 45. Trayectoria del huracán Orlene. Fuente: Unysis Weather.

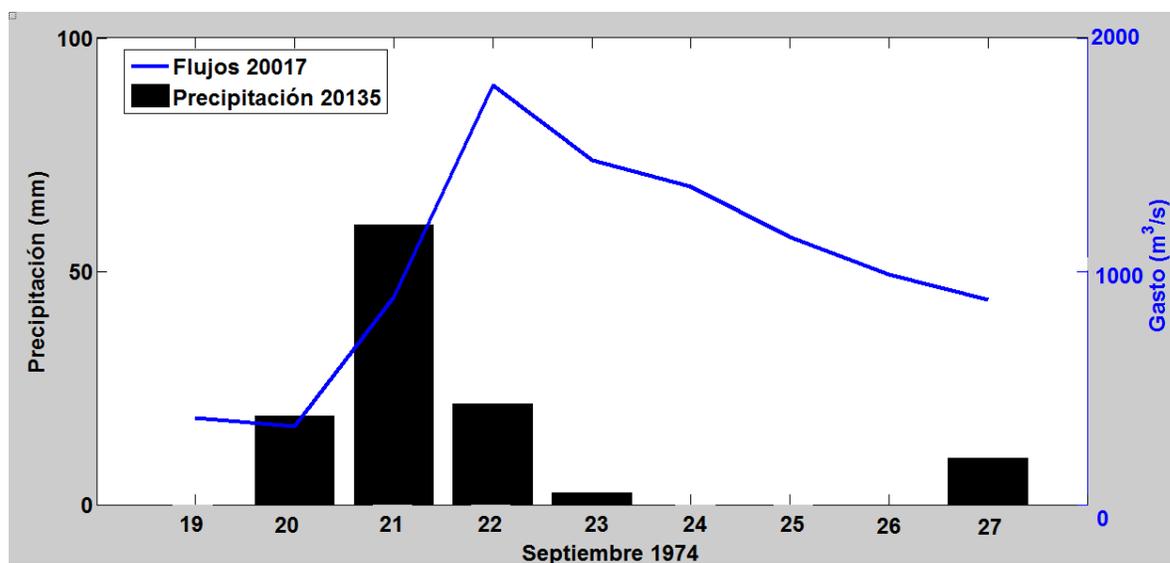
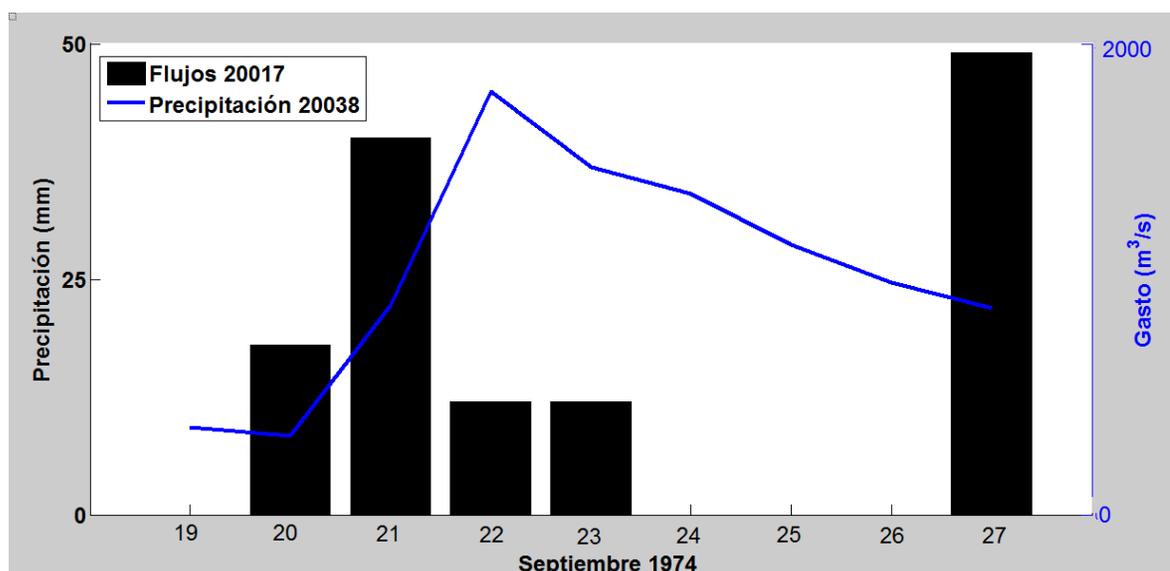


Figura 46. Precipitación y flujo de agua para el huracán Orlene; en la parte superior la precipitación de la vertiente del Río Yolotepec (20038), en la parte inferior, la del Río Atoyac (20135).

## Capítulo 7

---

### Discusiones

#### 7.1 Efectos locales

La región 4 que abarca la parte Alta de Río Verde presenta dos tipos de relieve, los valles centrales de Oaxaca y la sierra Alta, en la cual no se tienen mediciones por lo que la precipitación en esta región está subestimada. Las zonas de mayor altitud a excepción de la región 4, presentaron una mayor precipitación, observándose la mayor varianza de la precipitación en la región de la Sierra Sur. Otras regionalizaciones en México han sido consistentes con los cambios topográficos y de vegetación (García *et al.*, 1990; Pineda Martínez *et al.*, 2007, Giddings *et al.*, 2005).

Otros procesos que influyeron en la climatología de cada región estuvieron relacionados con el Océano Pacífico y el Golfo de México. Se observó la influencia de la ZITC de mayo a julio, particularmente cada región presentó picos diferentes debido al arribo de ciclones tropicales principalmente en agosto-septiembre y la proximidad del Golfo de Tehuantepec y el Golfo de México.

#### 7.2 Precipitación y relación con el ENOS y la ODP

Con respecto a la relación de la precipitación con ENSO, se encontró una correlación significativa al 95%, pero baja (-0.39) solamente para la región 3, la más cercana al Golfo de Tehuantepec. Dilley (1996) encontró una relación similar en el valle de Oaxaca. Cavazos y Hastenrath (1990), observaron que para una precipitación promedio de mayo a octubre de 1967 a 1987, esta estuvo correlacionada con el promedio del SOI en 0.38, esto indica que la correlación depende del periodo analizado.

Respecto a la ODP, condiciones de humedad han sido observadas en el Sur de México para el verano (Méndez *et al.*, 2010) cuando hay una ODP

negativa, sin embargo, los resultados entre la ODP y las anomalías de precipitación no mostraron correlaciones significativas, sólo una correlación positiva (0.39) fue encontrada en la CP1 durante el periodo de invierno de diciembre a febrero. Méndez y Magaña (2010) explican que durante la fase negativa de la ODP, la corriente de chorro del Caribe se debilita y la actividad de las ondas del Este se incrementa permitiendo una mayor convección tropical sobre Mesoamérica.

La mayoría de casos de humedad fueron observados durante la fase negativa de la ODP, pero como se menciona anteriormente, no hubo correlaciones significativas. El periodo de tiempo fue un límite en el análisis, ya que sólo 3 % de las estaciones inicialmente evaluadas para el estudio cubrían un ciclo completo de la ODP. Para los años más secos ( $> 1$  desviación estándar) se observaron anomalías positivas sobre el Pacífico Ecuatorial asociado a condiciones neutrales ENOS. Méndez y Magaña, 2010, asociaron una prolongada sequía sobre el Sur y centro de México debido a la interacción entre las ondas del Este y los vientos alisios sobre los mares intra-americanos, en adición a las bajas frecuencias como la oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA) o la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP).

### **7.3 Eventos extremos diarios asociados a CT y no-CT.**

Los años con mayor número de eventos de ciclones tropicales fueron asociados con anomalías negativas de TSM relacionados con condiciones La Niña y neutrales, consistentes con Peralta Hernández *et al.* (2009), que reporta que los eventos extremos lluviosos ocurren más frecuentemente durante periodos de La Niña. Los ciclones tropicales fueron evaluados en el Pacífico Tropical Oriental y su contribución a la variabilidad anual de la precipitación fue mayor que los eventos extremos húmedos no asociados a ciclones tropicales, debidos a topografía local o a ciclones tropicales en el Golfo de México, los cuales no fueron evaluados en este trabajo. Dilley, 1996, analizó la frecuencia de tormentas en el Golfo de

México y Océano Pacífico, encontró en septiembre las más altas correlaciones sobre la costa adyacente a Oaxaca.

En general durante El Niño (La Niña) se ha reportado que la precipitación de verano disminuye (incrementa) en el Istmo de Tehuantepec (Magaña *et al.*, 2003) y un número reducido de tormentas tropicales llegan a tierra durante años El Niño (Jauregui, 1995) coincidiendo con los resultados. La tendencia positiva observada en la región 1 es consistente con las observaciones de Peralta Hernández *et al.* (2009), que encontró una tendencia positiva en los eventos extremos mayores y moderados en el Sur de México.

## 7.4 Hidroclimatología

Se observó una correlación alta entre la hidrología y la precipitación, sin embargo, nuevamente la falta de datos de precipitación en la parte alta de la región 4 pudo ocasionar que los valores fueran menores, ya que si fuera esta una correlación real debida a factores físicos de la región, se discutiría sobre que al ser una región menos húmeda que las otras, la correlación con los flujos de agua se aminora debido a desfases entre la llegada de la precipitación y el alcance del umbral de la escorrentía. En el caso de la presa ubicada en la región 4, el área de esta es no significativa por lo que no hubo que naturalizar el flujo de agua en estas estaciones. En el caso de la presa ubicada en la región 3, esta sí es importante, sin embargo, sólo hay una estación aguas debajo de la presa y esta se localiza en una canal lateral artificial al cauce principal, por lo que no fue necesario hacer esta corrección.

Con respecto a la variabilidad de los flujos de agua manejados por la precipitación, se observa el patrón discutido en la precipitación sobre los efectos del ENOS. En cuencas del Noroeste de México que desembocan en el Golfo de California se ha encontrado que los flujos de agua se asocian a la precipitación, encontrándose años húmedos y secos, tanto para condiciones El Niño como condiciones La Niña, así como largos periodos asociados a la ODP (Brito Castillo, 2003). Cuando la ODP estuvo en la fase positiva, los veranos en el Noroeste de

México fueron más secos con El Niño y húmedos con La Niña y cuando la ODP estuvo en su fase negativa, los veranos fueron influenciados por otro tipo de eventos (Brito Castillo, 2003); la precipitación en el caso de estas cuencas también se asocia a la circulación monsonica, aunque también al igual que las cuencas estudiadas se observa el efecto de lo CTs en la lluvia extrema como lo documentan Cavazos *et al.* (2008). En nuestro caso, no se pudo evaluar la ODP debido a que el periodo de datos fue muy corto.

Por otro lado, se realizó un ejercicio para observar la relación que pudiera haber entre la precipitación de las cuatro regiones y los flujos de agua en las tres cuencas, mediante un análisis de correlación canónica, bajo la premisa de observar una correlación entre la precipitación aguas arriba y los flujos en la parte baja de la cuenca. Aunque la correlación canónica fue significativa en los tres casos, no se obtuvieron relaciones entre la precipitación corriente arriba con los flujos corriente abajo, sólo se obtuvieron agrupamientos en el caso de flujos de agua de una región y otra con similar varianza, tanto alta como baja.

En el caso de la escorrentía, se obtuvieron valores diferentes cuando se realizó el cálculo tomando en cuenta las cuencas y cuando se calculó por regiones. Entre cuencas, la cuenca del Golfo de Tehuantepec, presentó el valor mayor de CN y K, por el tipo y uso de suelo; en el caso de las regiones, la región 4 presentó valores mayores, debido principalmente a su urbanización y mayor pendiente en las zonas altas. Cuando se realizó el cálculo de escorrentía final, la región 1 fue la que obtuvo volúmenes de escorrentía mayores debido al área y a la precipitación más elevada en esta región. Cuando se evaluó la escorrentía para eventos extremos diarios, la región 3 fue la que alcanzó los mayores picos de escorrentía debido a que fue la región que presentó una mayor contribución de eventos extremos asociado a CTs.

## Capítulo 8

---

### Conclusiones

Las correlaciones entre los volúmenes escurridos mensuales y la precipitación fueron significantes al 95 % de confianza, observándose una mayor correlación en las regiones más húmedas que las secas. Esto nos señala que la escorrentía en las costas de Oaxaca entre 1961- 1990 fue manejada fundamentalmente por la precipitación. Río Verde fue la cuenca que mayor escorrentía presentó, sin embargo, para eventos diarios extremos, la región del Río Tehuantepec fue la región que produce una mayor escorrentía.

Las condiciones de humedad fueron relacionadas con anomalías negativas de la temperatura superficial del mar relacionadas con La Niña y condiciones neutrales, mientras que las condiciones de sequía fueron asociadas con anomalías positivas. La ODP no pudo ser evaluada en la zona estudiada, debido a la falta de continuidad y longitud adecuada en la base de datos utilizada. La variabilidad de la precipitación no fue explicada totalmente por el ENOS, sólo en una de las regiones derivadas de ACP, la región 3, se obtuvo una correlación negativa significativa, en las que condiciones de El Niño fueron relacionadas con anomalías de precipitación negativas, es decir, con sequía. Otras oscilaciones, como la ODP y la OMA pueden contribuir a esta variabilidad.

A escala regional se observó una regionalización de la precipitación que expone los procesos locales de cada región como la topografía. La región del Istmo de Tehuantepec fue la más afectada por eventos extremos relacionados con ciclones tropicales, con una mayor contribución de huracanes a la precipitación anual, mientras que la región 1, la parte W del Río Verde presentó una tendencia positiva de los huracanes y la región 4, el valle de Oaxaca, aunque se observa influencia de los huracanes, esta observó y una tendencia negativa de los mismo. La riqueza del Río Verde es una fuente potencial para el abastecimiento de agua

en el estado de Oaxaca, sin embargo es un recurso hídrico que se debe explotar adecuadamente.

Finalmente, como se observa, hubieron diferentes procesos que afectaron la variabilidad de la precipitación y flujos de agua superficial en estas tres cuencas estudiadas, tanto procesos locales como teleconexiones, por lo que es necesaria la continua toma de datos climatológicos en estas regiones y el uso de modelos hidrológicos de escorrentía-precipitación, para poder evaluar adecuadamente estas regiones en vista a evaluar panoramas futuros en esta región.

## Referencias bibliográficas

Arriaga Ramírez, S., Cavazos, T. (2010). Regional trends of daily precipitation indices in northwest Mexico and Southwest United States. *J. Geophys. Res.*, vol. 115, p. D14111, doi: 10.1029/2009JDO113248.

Amador, J.A., Alfaro, E. J., Lizano, O.G. y Magaña, V.O. (2006). Atmospheric forcing of the Eastern tropical Pacific: A review. *Prog. Oceanogr.*, 69, 101-142.

Becerra Moreno, A. (2005). Escorrentía, erosión y conservación de suelos. *Texcoco: Universidad Autónoma de Chapingo.* 375 pp.

Bitrán Bitrán, D. (2002). Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México, en el periodo de 1980–1999. México, D.F: Centro Nacional de Prevención de Desastres [Recuperado de: <http://www.cenapred.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieImpacto/Impacto1.pdf>].

Brito Castillo, L., Douglas, A., Leyva-Contreras, A. & Lluch-Belda, D. (2003), The effect of large-scale circulation on precipitation and streamflow in the Gulf of California continental watershed. *Int. J. Climatol.*, 23, 751-768.

Campos Aranda, D.F. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico.* San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Cattel, R. B. (1966). The scree test for the number of factors. *Multivar. Behav. Res.*, 1, 245-276.

Cavazos, T., Hastenrath, S. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by Southern Oscillation. *Int. J. Climatol.*, 10, 377-386.

Cavazos, T., Turrent, C. & Lettenmaier, D.P. (2008), Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 35, p. L21703, doi: 10.1029/2008GL035832.

Cervantes Zamora, Y., Cornejo Olguín, S.L., Lucero Márquez, R., Espinoza Rodríguez, J.M., Miranda Viquez, E. y Pineda Velázquez, A. (1990). *Provincias Fisiográficas de México. Extraído de Regiones Naturales de México. Atlas Nacional de México. Vol II. Escala 1:4000000.* Instituto de Geografía, UNAM. México.

Challenger, A., y Soberón J. (2008). Los ecosistemas terrestres. En *Capital natural de México, Vol I. Conocimiento actual de la biodiversidad.* México: CONABIO. 87-108 pp.

Comisión Nacional del Agua, México. (2011): Estadísticas del agua en México. Distrito Federal: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 185 pp.

Comisión Nacional de Biodiversidad. México. (2012 a): Riesgos naturales: caso huracán Paulina. [Recuperado de: [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cambios\\_veg/doctos/hp\\_s.html](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cambios_veg/doctos/hp_s.html).]

Comisión Nacional de Biodiversidad. México. (2012 b): Regiones prioritarias. [Recuperado de: <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/terrestres.html>.]

Comrie, A.C., Glenn, E. C. (1998). Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the Southwest United States and northern Mexico with an application to monsoon precipitation variability. *Clim. Res.*, 10, 201-215.

Cortéz, V.M. (1999). Marcha Anual de la Actividad Convectiva en México. *Atmósfera*, 12, 101-110.

Curtis, S. (2004). Diurnal cycle of rainfall and surface winds and the mid-summer drought of Mexico Central America. *Clim. Res.*, 27, 1-8.

Dilley, M. (1996). Synoptic controls on precipitation in the Valley of Oaxaca, Mexico. *Int. J. Climatol.*, 16, 1019-1031.

Dilley, M. (1997), Climatic factors affecting annual maize yields in the Valley of Oaxaca, Mexico. *Int. J. Climatol.*, 17, 1549-1557.

Easterling, D. R., Evans, J.L., Groisman, P. Ya., Karl, T. R., Kunkel, K. E., & Ambenje, P. (2000). Observed Variability and trends in extreme climate events: A brief review. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 81, 417-425.

Endfield, G.H., Fernández-Tejedo, I. y O'Hara, S. L. (2004). Drought and disputes, deluge and dearth: climatic variability and human response in colonial Oaxaca, Mexico. *J. Hist. Geogr.*, 30, 249–276.

Englehart, P.J., Douglas, A.V. (2002). Mexico's summer rainfall patterns: an analysis of regional models and changes in their teleconnectivity. *Atmósfera*, 15, 147-164.

García, E., Vidal, R., y Hernández, M. E. (1990). Las regiones climáticas de México. En García de Fuentes, Ana. Editora. Atlas Nacional de México, UNAM, Instituto de Geografía. 2, IV, 10. Map at 1:12,000,000. México, D.F.

Giddings, L., Soto, M., Rutherford, B. M. & Maarouf, A. (2005). Standardized Precipitation Index Zones for México. *Atmósfera*, 18, 33-56.

Goman, M., Joyce, A. & Mueller, R. (2005). Stratigraphic evidence for anthropogenically induced coastal environmental change from Oaxaca, Mexico. *Quaternary Res.*, 63, 250– 260.

Guirguis, K. J., Avissar, R. (2008). A precipitation Climatology and Dataset Intercomparison for the Western United States. *J. of Hydrometeorology*, 9, 825-841.

Hernández Santana, J.R. (2009). Análisis morfoestructural del estado de Oaxaca, México. Un enfoque de clasificación tipológica del relieve. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 68, 7-24.

Hodges, D.C. (1987). Health and agricultural intensification in the prehistoric Valley of Oaxaca, Mexico. *Am. J. Phys. Antropol.*, 73(3), 323-332.

Hu, Q., y Feng, S. (2002). Interannual rainfall variations in the North American summer monsoon region: 1900-98. *J. Climate*, 15, 1189-1202.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía, e Informática. México. (2009). Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación: Escala 1:250 000: Serie III. Aguascalientes: INEGI. 77 pp.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía, e Informática. México. (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/principales2010.aspx>

Jauregui, E. (1995). Rainfall fluctuation and tropical storm activity. *Erdkunde*, 49 (1), 39-48, doi: 10.3112/erdkunde.1995.01.04.

Kendall, M.G. (1955). Rank correlation methods. Segunda ed. London: Charles Griffin, 196 pp.

Lavín, M. F., Robles, J.M., Argote, M. L., Barton E. D., Smith, R., Brown, J., Kosro M., Trávina, A., Vélez, H.S. y García, J. (1996). Física del Golfo de Tehuantepec. *Ciencia y Desarrollo*, 18 (103), 97-107.

Magaña, V. O., Amador, J. A., y Medina, S. (1999). The Midsummer Drought over Mexico and Central America. *J. Climate*, 12, 1577-1588.

Magaña, V. (Editor) (2004). Los impactos del niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 pp.

Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofís. Int.*, 42(3), 313-330.

Magaña, V.O., Caetano, E., (2005). Temporal evolution of summer convective activity over the Americas warm pools. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L02803, doi: 10.1029/2004GL021033.

Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259.

Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J.M. & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 1069-1079.

Méndez, M., Magaña, V.O. (2010). Regional Aspects of Prolonged Meteorological Droughts over Mexico and Central America. *J. Climate*, 23, doi: 10.1175/2009JCLI3080.1.

Méndez, G.J., Ramírez, A., Cornejo, O.E., Zarate, L.A., and Cavazos, T. (2010). Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 73, 57-70.

Mendoza, B., Velasco, V. y Jáuregui, 2006. A study of historical droughts in southern Mexico. *J. Climate*, 19, 2916-2934.

México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. (1964). Presa: "Presidente Benito Juárez". *Memorias*. 123 pp.

Mosiño, A.P., (1958). Una clasificación de las configuraciones de flujo aéreo sobre la república mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*, enero-marzo, 12 (1).

Mosiño, A.P., García, E. (1966). Evaluación de la sequía intraestival en la República Mexicana. *Conferencia Regional Latinoamericana*. Ciudad de México, 9-15 de agosto. *Unión Geográfica Internacional*, 3, 500-516.

Mosiño, A.P., García, E. (1974). The climate of Mexico in Bryson R. A. and F. K. Hare (eds.), *World Survey of Climatology*, vol II, *Climates of North America*, Elsevier, London, 345-404.

Ortega Gutiérrez, F., Elías Herrera, M., Reyes Salas, M., Macías Romo, C. y López, R. (1999). Late Ordovician-Early Silurian continental collisional orogeny in southern Mexico and its bearing on Gondwana-Laurentia connections. *Geology*, 27(8), 719-722.

Pavía, E.G., Graef, F. y Reyes, J. (2006). Notes and Correspondence PDO-ENSO effects in the Climate of Mexico. *J. Climate*, 19, 6433-6438.

Peralta Hernández, A.R., Balling, R.C. Jr., y Barba Martínez, L.R. (2009), Comparative analysis of indices of extreme rainfall events: variations and trends from Southern México. *Atmósfera*, 22(2), 219-228.

Pineda Martínez, L.F., Carbajal, N. y Medina Roldán, E., (2007). Regionalization and classification of bioclimatic zones in the central-northeastern region of Mexico using principal component analysis (PCA). *Atmósfera*, 20, 133-145.

Sánchez, O., Raga, G.B., Zavala Hidalgo, J. (2009). Is the ocean responsible for the intense tropical cyclones in the Eastern Tropical Pacific? Elsevier Editorial System for Dynamics of Atmospheres and Oceans. Manuscript draft. Manuscript number: DYNAT-D-09-00016.

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau, *J. Amer. Statist. Assoc.*, 63, 1379-1389.

U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service. (1972). National Engineering Handbook. Part 630, Section 4, Hydrology. Washington, D.C. 127 pp

Valdés, M.A., Cortéz, V.M. y Pastrana, F.J. (2005). Un estudio explorativo de los sistemas convectivos de mesoescala de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Núm. 56, 26-42.

Villegas Romero, I., Oropeza Mota, J.L., Martínez Ménes, M., y Mejía Sáenz, E. (2004). Producción de agua y sedimentos por impacto de ciclones tropicales en la cuenca hidrográfica del río La Sabana, Guerrero. *Terra Latinoamericana*, julio- septiembre, 323-333.

Villegas Romero, I., Oropeza Mota, J.L., Martínez Ménes, M., y Mejía Sáenz, E. (2009). Path and relation rain-runoff caused by hurricane Pauline in the Sabana River, Guerrero, México. *Agrociencia*, 43, 4.

Walliser, D.E., y Gautier, C. (1993). A Satellite-Derived Climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, 6, 2162-2174.

Webster, P. J. (1994). The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions. *Reviews of Geophysics*, 32 (4), 427-476.

White, D., Richman, M., & Yarna B. (1991). Climate regionalization and rotation of principal components. *Int. J. Climatol.*, 11, 1-25, doi:551.582.2:551.501.45: 551.577.21(748).

Yáñez, P., Ruiz, J., Patchett, P.J., Ortega Gutiérrez, F., y Gehrels, G.E. (1991). Isotopic studies of the Acatlán Complex, Southern Mexico: Implications for Paleozoic North American tectonics. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 817-828.

## Apéndices

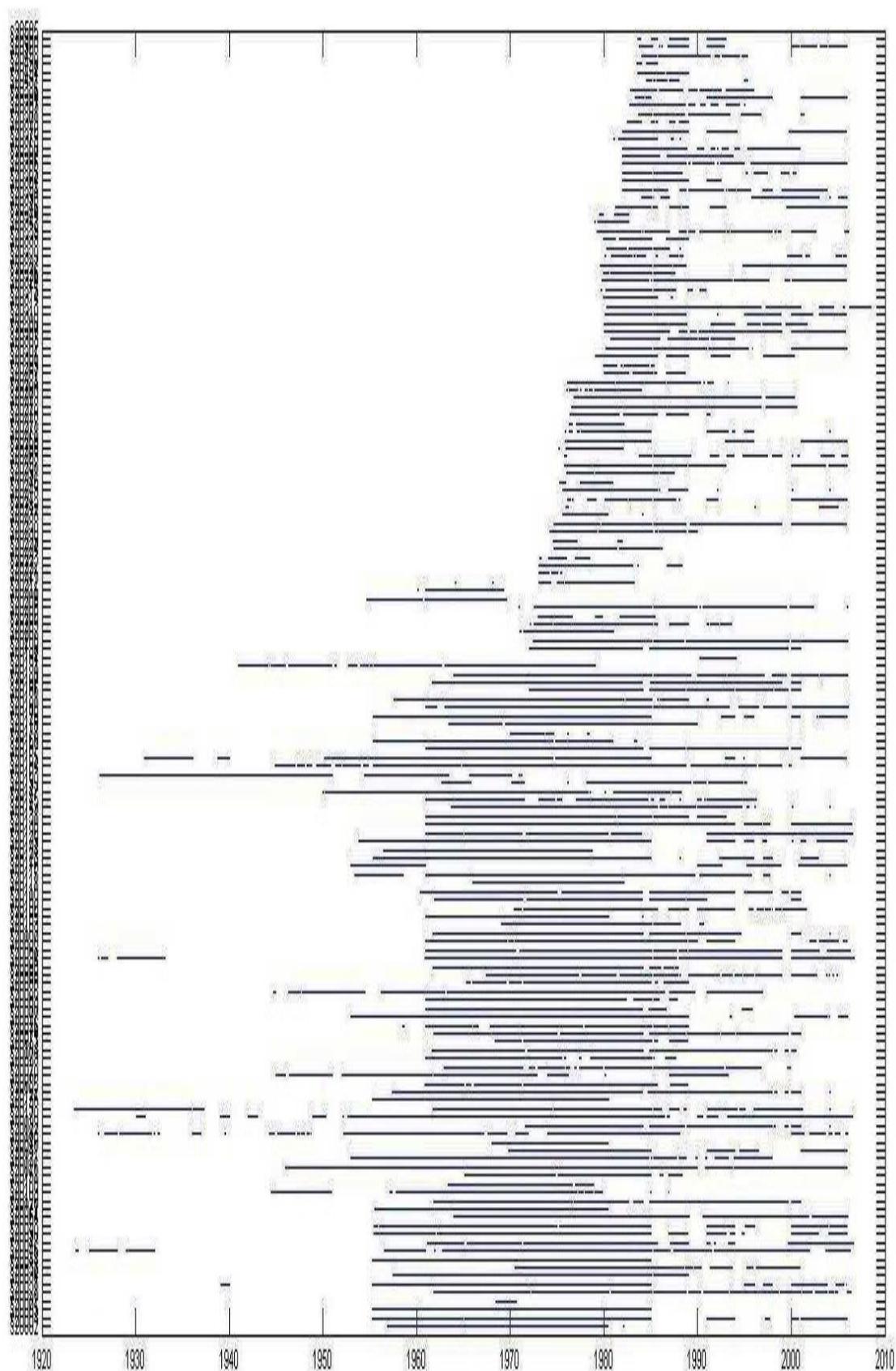
### Apéndice A. Estaciones climatológicas.

	Estación	Longitud	Latitud	Altitud (m)
1	20004	-96.5383	17.4267	2000
2	20005	-96.8378	17.5333	1050
3	20009	-95.9597	16.636	620
4	20022*	-96.7006	16.9566	1520
5	20023	-96.4167	17.125	3180
6	20026	-97.5292	16.95	2829
7	20031	-96.9	17.65	944
8	20032	-95.8772	16.2838	1820
9	20034*	-96.8	17.2072	1660
10	20038	-97.6667	16.5719	680
11	20040	-96.5622	17.2658	1880
12	20041	-96.4872	17.3472	2030
13	20043	-95.446	16.4419	160
14	20044*	-96.8783	17.06583	1720
15	20047	-97.3	16.2167	1662
16	20070*	-96.5939	16.3294	1550
17	20071*	-96.6167	16.35	1550
18	20079	-96.7097	17.0833	1555
19	20085	-96.8833	16.3667	1310
20	20086	-97.6167	16.2603	460
21	20089	-96.4178	15.92583	1300
22	20090	-96.4667	15.75	150
23	20094	-97.8731	17.1167	1300
24	20099	-96.9792	16.5144	1400
25	20103*	-97.5225	17.5733	2300
26	20105	-97.6792	17.065	2450
27	20106	-96.2167	16.0833	1410
28	20109	-96.5753	16.7333	1731
29	20115	-98.0667	17.3	2324
30	20118*	-96.7372	16.5794	1440
31	20120	-96.465	16.0914	2500
32	20126	-97.4953	16.5367	960
33	20130	-97.8	17.0167	1200
34	20135	-97.2278	16.4253	967
35	20145	-96.2483	17.3617	1600

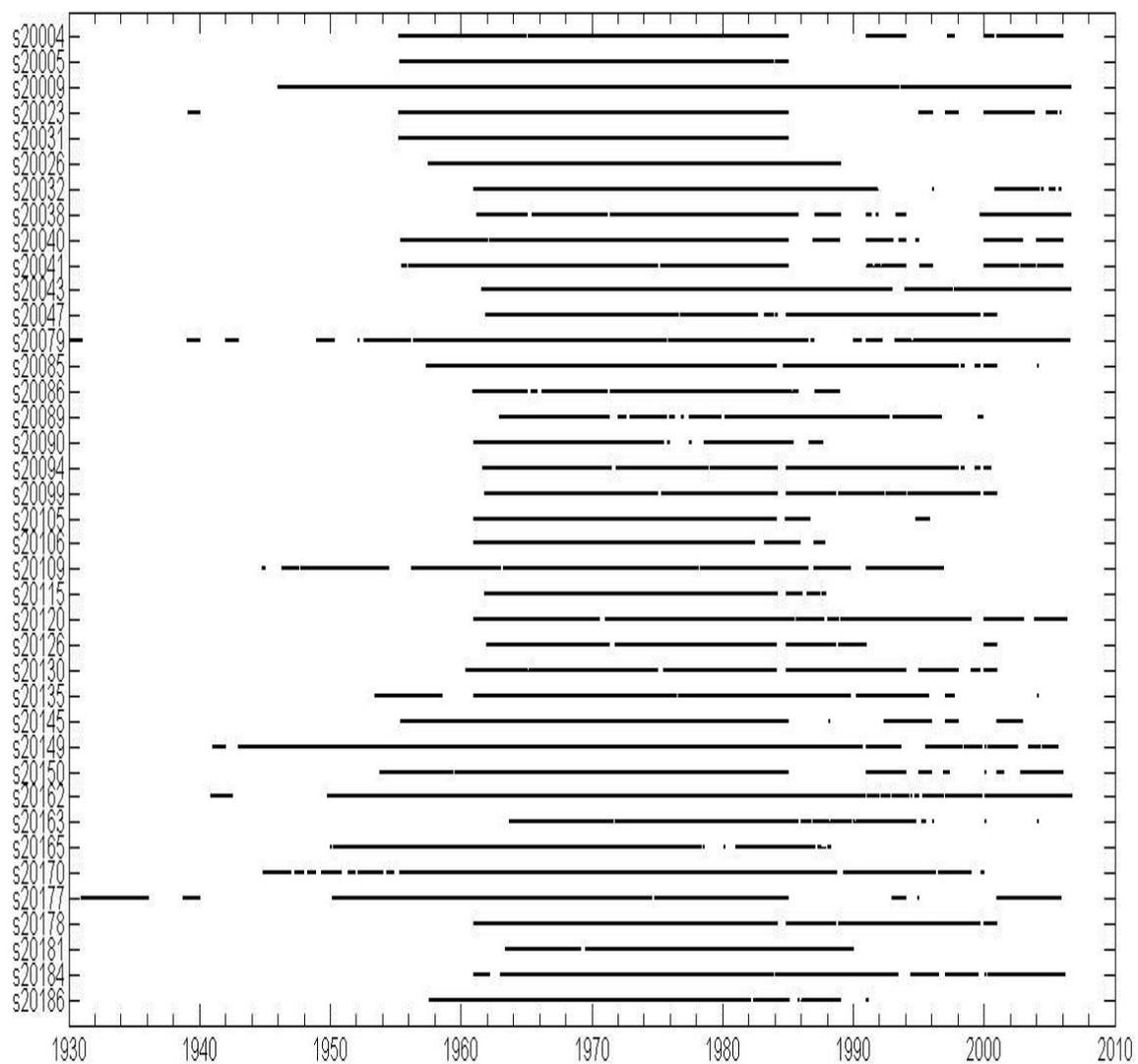
36	20149	-95.234	16.316	55
37	20150	-97.0022	17.2322	2260
38	20162	-95.598	16.4175	200
39	20163	-97.8108	17.6519	1560
40	20165	-96.4833	16.95	1600
41	20170	-96.3067	16.67028	1060
42	20177	-96.1514	17.3375	1230
43	20178	-97.5833	17.0333	2437
44	20181	-96.4667	17.3	1704
45	20184	-96.1083	16.5033	940
46	20186	-97.6	16.9	2200
47	20191*	-96.3531	16.5583	1080

---

\*Estaciones descartadas para la regionalización.

**Apéndice B. Continuidad de la base de datos para todas las estaciones.**

**Apéndice B'. Continuidad de la base de datos para las 39 estaciones analizadas en la regionalización.**



### Apéndice C. Estaciones hidrológicas.

ESTACIÓN	LONGITUD	LATITUD	NOMBRE DE ESTACIÓN	CORRIENTE	CUENCA	REGIÓN HIDROLÓGICA (CONAGUA)
20005	-96.729166	17.048611	OAXACA	RIO ATOYAC	RIO VERDE	COSTA CHICA - RIO VERDE
20017	-97.608333	16.275	PASO DE LA REYNA	RIO ATOYAC	RIO VERDE	COSTA CHICA - RIO VERDE
20021	-97.566666	16.558333	IXTAYUTLA	RIO YOLOTEPE	RIO VERDE	COSTA CHICA - RIO VERDE
20023	-96.752777	16.870833	ZIMATLAN	RIO ATOYAC	RIO VERDE	COSTA CHICA - RIO VERDE
20026	-96.833333	16.730555	TLAPACOYAN	RIO ATOYAC	RIO ATOYAC	COSTA CHICA - RIO VERDE
20027	-96.709722	17.027777	OAXACA	RIO SALADO	RIO ATOYAC	COSTA CHICA - RIO VERDE
21002	-97.005	15.8575	LA CEIBA	RIO COLOTEPEC	RIO COLOTEPEC	COSTA DE OAXACA (PUERTO ANGEL)
21003	-96.184166	15.889166	LA HAMACA	RIO COPALITA	RIO COPALITA	COSTA DE OAXACA (PUERTO ANGEL)
22007	-95.3375	16.425	LAS CUEVAS	RIO TEHUANTEPEC	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC
22008	-95.929166	16.647222	BOQUILLA NUMERO	RIO TEHUANTEPEC	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC
22015	-95.597222	16.413888	TEQUISISTLAN	RIO TEQUISISTLAN	RIO TEQUISISTLAN	TEHUANTEPEC
22019	-95.268055	16.370833	KILOMETRO 2+780	CANAL PRINCIPAL	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC
22027	-95.254166	16.366666	KM. 3 +000	CANAL LATERAL	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC
22030	-95.3375	16.425	LAS CUEVAS II	RIO TEHUANTEPEC	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC
22032	-95.270833	16.370833	KM. 2 +400	CANAL PRINCIPAL	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC
22034	-95.2875	16.375	LAS PILAS	RIO TEHUANTEPEC	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC

22035	-95.391666	16.433333	EL MARQUEZ	RIO TEHUANTEPEC	RIO TEHUANTEPEC	TEHUANTEPEC
21003	-96.183	15.888	LA HAMACA	RIO COPALITA	RÍO COPALITA	COSTA
21004	-95.673	15.984	ASTATA	RÍO ASTATA	RÍO ASTATA	COSTA
21007	-96.54	15.74	SAN ISIDRO	RÍO TONAMECA	RÍO TONAMECA	COSTA DE OAXACA (PUERTO ANGEL)
21005	-96.721	15.81	COZOALTEPEC	RÍO COZOALTEPEC	RÍO COZOALTEPEC	COSTA DE OAXACA (PUERTO ANGEL)

---

### Apéndice D. Tabla utilizada para el cálculo del umbral de escorrentía (Po).

ESTIMACION INICIAL DEL UMBRAL DE ESCORRENTIA Po (mm) PARA HUMEDAD PREVIA INTERMEDIA						
Uso de la tierra	Pendiente (%)	Características hidrológicas	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	≥ 3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	< 3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en hileras	≥ 3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	< 3	R/N	28	19	14	11
Cereales de invierno	≥ 3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10
	< 3	R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobres	≥ 3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	< 3	R/N	30	19	13	10
Rotación de cultivos densos	≥ 3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	< 3	R/N	47	25	16	13
Praderas	≥ 3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
	Muy buena	*	41	22	15	
	< 3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
Buena		*	*	22	14	
Muy buena	*	*	25	16		
Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal	≥ 3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
		Buena	*	42	22	15
	< 3	Pobre	*	34	19	14
		Media	*	42	22	15
		Buena	*	50	25	16
Masas forestales (bosques, Monte bajo, etc.)	Muy clara	40	17	8	5	
	Clara	60	24	14	10	
	Media	*	34	22	16	
	Espesa	*	47	31	23	
	Muy espesa	*	65	43	33	

Notas: 1. N: denota cultivo según las curvas de nivel  
R: denota cultivo según la línea de máxima pendiente  
2. \*: denota que esa parte de cuenca debe considerarse insalubre a efectos de cálculo de caudales de avenida  
3. Las zonas abarcadas se incluyen entre las de pendiente menor del 3 por 100

**Apéndice E. Tabla utilizada para el cálculo de Curvas Numeradas (CN) para las diferentes condiciones de suelo-vegetación (condición II de humedad)**

Clase	Laboreo	Condiciones para la infiltración	A	B	C	D
Barbecho	---	---	77	86	91	94
Cultivos alineados	R	Pobres	72	81	88	91
	R	Buenas	67	78	85	89
	C	Pobres	70	79	84	88
	C	Buenas	65	75	82	86
	C-T	Pobres	66	74	80	82
	C-T	Buenas	62	71	78	81
Cultivos no alineados o con surcos pequeños o mal definidos	R	Pobres	65	76	84	88
	R	Buenas	63	75	83	87
	C	Pobres	63	74	82	85
	C	Buenas	61	73	81	84
	C-T	Pobres	61	72	79	82
	C-T	Buenas	59	70	78	81
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternativa	R	Pobres	66	77	84	88
	R	Buenas	58	72	81	85
	C	Pobres	64	75	83	85
	C	Buenas	55	69	78	83
	C-T	Pobres	63	73	80	83
	C-T	Buenas	51	67	76	80
Pastizales (pastos naturales)	---	Pobres	68	79	86	89
	---	Regulares	49	69	79	84
	---	Buenas	39	61	74	80
	C	Pobres	47	67	81	88
	C	Regulares	25	59	75	83
	C	Buenas	6	35	70	79
Prados permanentes	---	---	30	58	71	78
Montes con pastos (ganadero-forestal)	---	Pobres	45	66	77	83
	---	Regulares	36	60	73	79
	---	Buenas	25	55	70	77
Bosques (forestal)	---	Muy pobres	56	75	86	91
	---	Pobres	46	68	78	84
	---	Regulares	36	60	70	76
	---	Buenas	26	52	63	69
	---	Muy buenas	15	44	54	61
Caserios	---	---	59	74	82	86
Caminos en tierra	---	---	72	82	87	89
Caminos en firme	---	---	74	84	90	92

**Apéndice F. Tabla utilizada para el cálculo del coeficiente de escorrentía K.**

USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hilera	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular -	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

**Apéndice G. Cálculos realizados para determinar la escorrentía.**

	<b>CUENCA RÍO VERDE</b>	<b>VEGETACIÓN Y USO DE SUELO</b>	<b>TIPO DE SUELO</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>PENDIENTE</b>	<b>GRUPO HIDROLÓGICO</b>
SECCIÓN	1) SALIDA AL MAR	Selva + agricultura	Regosol, cambisol	Media	Accidentado medio a suave	B
	2) PARTE MEDIA DE LA CUENCA	Bosque + agricultura	Regosol, litosol	Media a gruesa	Fuertemente accidentado a muy escarpado	B
	3) NE Y VALLE DE OAXACA	Pastizal, agricultura, área urbana	Regosol, litosol, Feozem, vertisol	Media	Accidentado medio a muy escarpado	B
	<b>CUENCA RÍO TEHUANTEPEC</b>					
SECCIÓN	1) SALIDA AL MAR	Selva	Cambisol, regosol, luvisol	Media a fina	Suave a accidentado medio	B
	2) AGUAS ARRIBA	Selva + agricultura + bosque	Litosol + Acrisol	Media	Fuertemente accidentado a escarpado	C
	<b>REGIÓN COSTERA DEL SUR</b>					
SECCIÓN	1) RÍO COLOTEPEC, GRANDE Y RÍOS ANEXOS AL OESTE	Selva, agrícola, bosque	Regosol, cambisol, acrisol	Media a fina	Suave a escarpado	C
	2) RÍO TONAMECA, COPALITA HASTA RÍO ASTATA	Selva mediana caducifolia	Regosol, litosol	Media	Suave a fuertemente accidentado	B
	3) EXTREMO ESTE	Selva baja caducifolia	Litosol, cambisol, solonchek	Gruesa a fina	Suave a fuertemente accidentado	B

### Apéndice G (continuación)

CONDICIONES DE INFILTRACIÓN	CN	ÁREA (%)	CN *%	K	K*%.	Po (mm)	Po*%
Buenas	63.5	48	30.5	0.25	0.12	28.5	13.7
Pobres	72.5	41	29.7	0.27	0.11	29	11.9
Buena	76.0	10	7.6	0.3	0.03	23.3	2.3
		<b>CN RV</b>	<b>67.8</b>	<b>K</b>	<b>0.25</b>	<b>Po</b>	<b>27.9</b>
Pobres	68	23	15.6	0.22	0.05	24	5.5
Regular	72.7	76	55.2	0.28	0.21	14	10.6
		<b>CN RT</b>	<b>70.9</b>	<b>K</b>	<b>0.26</b>	<b>Po</b>	<b>16.2</b>
Pobre	79.3	52	41.3	0.28	0.15	16	8.3
Regular	70	25	17.5	0.22	0.06	34	8.5
Regular	70	23	16.1	0.26	0.06	24	5.5
		<b>CN RCS</b>	<b>74.9</b>	<b>K</b>	<b>0.26</b>	<b>Po</b>	<b>22.3</b>

**Apéndice H. Análisis de correlación canónica entre la precipitación y los flujos de agua regionales (se muestran sólo los pares de variantes significativos).**

R1- R4					
Eigenvalor: 0.7748; Correlación canónica: 0.8802					
U			V		
variable	Coeficiente canónico (cc) Variante 1	Coef. de corr. entre el cc y las variables originales	variable	Coeficiente canónico (cc) Variante 1	Coef. de corr. entre el cc y las variables originales
PPR4	0.1077	-0.6908	PPR1	-0.0149	-0.7873
S20026	-0.9704	-0.9840	S20021	0.4331	-0.7982
S20023	0.3439	-0.6340	S20017	-1.3585	-0.9819
S20027	-0.4029	-0.8380			
R1- R3					
Eigenvalor: 0.4852; Correlación canónica: 0.6966					
variable	Coeficiente canónico (cc) Variante 1	Coef. de corr. entre el cc y las variables originales	variable	Coeficiente canónico (cc) Variante 1	Coef. de corr. entre el cc y las variables originales
PPR3	-0.4464	0.5664	PPR1	0.1063	0.6729
S22015	0.8442	0.8542	S20021	-1.0120	0.5753
S22035	1.5742	0.9200	S20017	1.7023	0.8874
S22030	-1.1480	0.7984			
R3- R4					
Eigenvalor: 0.8005; Correlación canónica: 0.8947					
U			V		
variable	Coeficiente canónico (cc) Variante 1	Coef. de corr. entre el cc y las variables originales	variable	Coeficiente canónico (cc) Variante 1	Coef. de corr. entre el cc y las variables originales
PPR4	0.1552	-0.5097	PPR3	0.4027	-0.4552
S20026	-0.9212	-0.7589	S22015	-0.2498	-0.7095
S20023	-1.6921	-0.6815	S22035	0.9173	-0.5627
S20027	1.8136	-0.4263	S22030	-1.6964	-0.8974

