



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

## PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

### FACULTAD DE INGENIERIA

DETERMINACION DE LOS CAMBIOS DEL PATRON DE  
LLUVIAS DEBIDO A LA PRESENCIA DE EMBALSES. ESTUDIO  
DEL SISTEMA GRIJALVA

## TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERIA**  
INGENIERIA CIVIL-HIDRAULICA

**PRESENTA:**

**ANADIANA GOMEZ HERNANDEZ**

TUTOR:

**DRA. LILIA REYES CHAVEZ**

CIUDAD UNIVERSITARIA 2012



# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1 Precipitación</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Estimación de datos faltantes. Técnicas de Interpolación de Lluvias</b>	<b>4</b>
1.1.1 Método de Thiessen	5
1.1.2 Método de Interpolación Polinomial	5
1.1.2.1 Aproximación por mínimos cuadrados	6
1.1.2.2 Aproximación de Lagrange	7
1.1.3 Método de Interpolación Inversa	7
1.1.4 Método de Interpolación Multicuadrática	7
1.1.5 Método de Interpolación Óptima	8
1.1.6 Método de Interpolación de Kriging	10
<b>1.2 Delimitación de Regiones Homogéneas</b>	<b>12</b>
1.2.1 Prueba de Fisher	12
<b>1.3 Pruebas de Homogeneidad e Independencia</b>	<b>14</b>
1.3.1 Pruebas de Homogeneidad	14
1.3.1.1 Prueba estadística de Helmer	14
1.3.1.2 Prueba estadística T de Student	15
1.3.1.3 Prueba estadística de Cramer	15
<b>1.4 Prueba de Independencia de Anderson</b>	<b>17</b>
<b>2 El Cambio Climático</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Definición de cambio climático.</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Efecto Invernadero</b>	<b>20</b>
2.2.1 Gases del efecto invernadero	21
<b>2.3 Detección y atribución de cambio climático</b>	<b>22</b>
<b>2.4 Cambios en los extremos del clima.</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Datos instrumentales del clima.</b>	<b>25</b>
<b>2.6 Cálculo de índices de cambio climático.</b>	<b>28</b>
2.6.1 Los índices del cambio climático del ETCCDI.	28
2.6.2 Procedimiento para calcular los índices de cambio climático.	35
2.6.2.1 Selección de datos.	35
2.6.2.2 Análisis y control de calidad.	37
2.6.2.3 Evaluación de homogeneidad.	38
2.6.2.4 Cálculo de los índices.	39
2.6.2.5 Análisis de tendencias.	39

2.7	Mitigación y adaptación como respuesta al cambio climático.	39
<b>3</b>	<b>Aplicaciones. Estudio del Sistema Grijalva</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>Descripción del sitio de estudio</b>	<b>42</b>
3.1.1	Ubicación	42
3.1.2	Fisiografía	44
3.1.3	Clima	45
3.1.4	Sistema Hidroeléctrico	48
<b>3.2</b>	<b>Metodología</b>	<b>49</b>
3.2.1	Información climática	49
3.2.2	Revisión de la calidad y cantidad de la información	54
3.2.3	Determinación de regiones homogéneas	55
3.2.4	Técnicas de interpolación de variables climáticas	56
3.2.5	Pruebas de homogeneidad e independencia	66
3.2.5.1	Precipitación Acumulada Anual	66
3.2.5.2	Precipitación Máxima Anual	79
3.2.5.3	Temperatura Máxima Anual	82
3.2.5.4	Evaporación	86
<b>3.3</b>	<b>Análisis de resultados</b>	<b>87</b>
	<b>Conclusiones</b>	<b>106</b>
	<b>Referencias</b>	<b>109</b>

# INTRODUCCIÓN

---

Muy poco se sabe acerca de la vulnerabilidad de las presas y embalses ante las alteraciones en los patrones de precipitaciones extremas e inundaciones causadas por el hombre a medida que avanzamos en el siglo XXI. Esto se debe a que el diseño convencional de presas y embalses en el último siglo ha sido "en un solo sentido" sin el reconocimiento de los posibles mecanismos de retroalimentación que afectan el ciclo del agua. Aunque la idea de que un embalse puede incidir en el aumento de las precipitaciones se sugirió hace más de 60 años, el protocolo del diseño de presas en la ingeniería civil sigue asumiendo como "estacionarios" los parámetros estadísticos de un evento de precipitación con baja probabilidad de excedencia durante el tiempo de vida útil.

Una de las infraestructuras públicas más comunes y más importantes debido a su diseño, operación y finalidad son las presas. Los embalses de hoy pueden servir para diversos usos, tales como la generación de energía hidroeléctrica, la pesca, navegación, recreación, suministro de agua (para el consumo público y de riego) y el control de inundaciones. En todo el mundo, la Comisión Mundial de Represas informa de que ha habido por lo menos 45,000 presas construidas desde la década de 1930. Se estima que la mitad de los ríos del mundo tienen al menos una presa en algún momento su alcance.

Si bien puede argumentarse que los embalses más grandes que necesitan ser planificados ya están en funcionamiento, hay una gran necesidad de reevaluar el concepto de operación y diseño de las presas debido al paradigma de la seguridad durante este siglo. Experimentos numéricos que implican la producción de modelos climáticos, los presupuestos de agua, y los datos socioeconómicos de la población, indican claramente que se prevee que el estrés hídrico empeore en el año 2025 en los Estados Unidos y alrededor del mundo. Este aumento de la demanda de agua debido al crecimiento de la población requerirá la continuación de los embalses existentes y la construcción de nuevas presas en lugares con escasez de agua.

Además, las presas y sus embalses son infraestructuras que provocan un cambio sistemático en el uso del suelo a gran escala y cobertura de la tierra debido a los múltiples propósitos a los que sirven. Las investigaciones realizadas durante las últimas dos décadas han demostrado que un cambio en usos del suelo puede alterar la hidroclimatología regional. Por ejemplo, los datos y estudios de modelos apoyan la idea de que la humedad atmosférica añadida por el riego puede aumentar las precipitaciones, siempre que las condiciones de mesoescala sean las adecuadas.

Si un cambio de uso de suelo impulsado por la presa puede desencadenar cambios en los patrones de precipitación, probablemente también puedan cambiar los patrones de precipitaciones extremas. Si cambian los patrones de las precipitaciones extremas, entonces el supuesto de estacionariedad en las relaciones de frecuencia de las inundaciones, que es fundamental para la práctica del diseño actual de las presas, es violada. Por tanto, es posible que la avenida de diseño de la presa pueda ser alcanzada en un periodo de retorno más corto que para el que fue calculada originalmente. Esta posibilidad plantea preocupaciones sobre la seguridad de la presa si la pérdida

de almacenamiento se evalúa en conjunto con un aumento no contabilizado en el volumen debido a eventos de precipitación extremos que tendría que ser desfogado por la presa y podría causar inundaciones aguas abajo de la misma.

De acuerdo con los resultados mostrados en el artículo de la Water Resources Research “*Dam safety effects due to human alteration of extreme precipitation*” (Hossain, Jeyachandran, & Pielke , 2010), el estudio parece indicar que el impacto de la grandes presas en los patrones de precipitaciones extremas son función de las condiciones del entorno y de los usos del suelo. Por ejemplo, los cambios en los usos del suelo, los sistemas de riego adicional, añaden una cantidad significativa de vapor de agua a la atmósfera, lo que favorece lluvias y tormentas eléctricas. Estos cambios pueden alterar a gran escala los patrones de precipitación, como el monzón asiático.

Por lo tanto es importante estudiar los efectos de los embalses en los patrones de las precipitaciones para analizar las tendencias de las series y entonces usar modelos estadísticos que contemplen que los procesos ya no son estacionarios.

Sin embargo, debido a la falta de conciencia o los reglamentos, el impacto potencial de estas infraestructuras civiles sobre el clima no se ha estudiado durante la etapa de construcción de presas de principios del siglo XX. Ahora que hay un número suficiente de presas en todo el mundo con un registro bastante largo de monitoreo de las precipitaciones, podemos analizar los efectos que las presas pueden haber tenido en la alteración de los patrones de precipitación y de las implicaciones consecuentes sobre la seguridad de las presas.

La presente tesis pretende hacer un análisis sobre el cambio en los patrones de lluvia debido a la presencia de embalses, este análisis se llevará a cabo estudiando a las presas que conforman el Sistema Grijalva debido a que es el sistema más importante del país.

En el capítulo uno se describirán las técnicas de estimación de datos faltantes para variables climáticas, así como pruebas para delimitar regiones meteorológicamente homogéneas y pruebas para determinar si existe tendencia en las series de variables climáticas.

El capítulo dos se describirá el fenómeno del cambio climático, hablando un poco de los factores que lo originan y la manera en que este se detecta.

Por último, el capítulo tres será la parte de la aplicación de este trabajo, donde se analizará si existen cambios en el patrón de lluvias debido a la presencia de los embalses, específicamente el Sistema Grijalva.

# 1 Precipitación

Existe una variación espacial y temporal de la precipitación de acuerdo con la circulación atmosférica y algunos factores locales. La humedad es la principal causa de la variabilidad de la precipitación. Para cuantificar el valor de la precipitación en un sitio de interés se utilizan los pluviómetros y pluviógrafos. Los primeros son dispositivos de medición que determinan la cantidad de agua que cae en un periodo de tiempo de 24 horas, es decir únicamente proporcionan el valor de la precipitación en este periodo de tiempo. Mientras que el pluviógrafo registra el valor de precipitación en diferentes intervalos de tiempo durante las 24 horas.

En nuestro país se cuenta con estaciones climatológicas distribuidas en toda la República Mexicana para monitorear las variables climáticas como son precipitación, temperatura y evaporación. Sin embargo, la mayoría de estas estaciones cuentan solo con pluviómetros para cuantificar la precipitación.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene la misión de administrar la base de datos nacional oficial del clima en México y es de carácter público. Específicamente, los datos de la red de estaciones climatológicas convencionales administrados en el sistema CLIMA COMputarizado (CLICOM) son la fuente de información climática con las dos características requeridas para el estudio del clima en la escala de las entidades federativas: un periodo de registro largo (por lo menos cuatro o cinco décadas continuas) y cobertura geográfica suficientemente densa.

Otras redes de observación con diferente cobertura geográfica, número de estaciones y propósito específico son los observatorios sinópticos, la red de radiosondeo, las estaciones meteorológicas automáticas, y las redes de observación de otras instituciones. Estas observaciones son valiosas para el pronóstico del estado del tiempo o para la toma de decisiones en tiempo real.

Una estación meteorológica automatizada es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática (sobre todo en forma numérica). Está conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas variables meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación.

## 1.1 Estimación de datos faltantes. Técnicas de Interpolación de Lluvias

Es común la falta de registros confiables cuando se pretende diseñar una obra hidráulica por lo que se requiere contar con técnicas confiables que permitan inferir dicha información.

En el caso de variables climáticas se pueden emplear las técnicas geoestadísticas de interpolación, las cuales van desde el uso de las distancias hasta una combinación de éstas con sus parámetros de correlación. (Escalante Sandoval C. A., 2011)

Sean  $X_j$  e  $Y_j$  las coordenadas de un punto  $j$  en un espacio bidimensional.

$P_j$  una función de las coordenadas  $X_j$  e  $Y_j$  la que denota el proceso observado en  $n$  estaciones de medición.

$j = 1, 2, \dots, n$  donde  $j$  es el subíndice que indica el sitio al cual se refiere el proceso medido.

$P_e$  es una estimación del proceso en un punto con coordenadas  $X_e$  e  $Y_e$ .

La estimación puntual se hace de los datos medidos en las  $n$  estaciones y puede representarse como una combinación lineal pesada de aquellos valores medidos, así:

$$P_e = \sum_{j=1}^n W_j P_j \quad (1.1)$$

Donde:

$W_j$  factor de peso del punto de muestreo  $j$ .

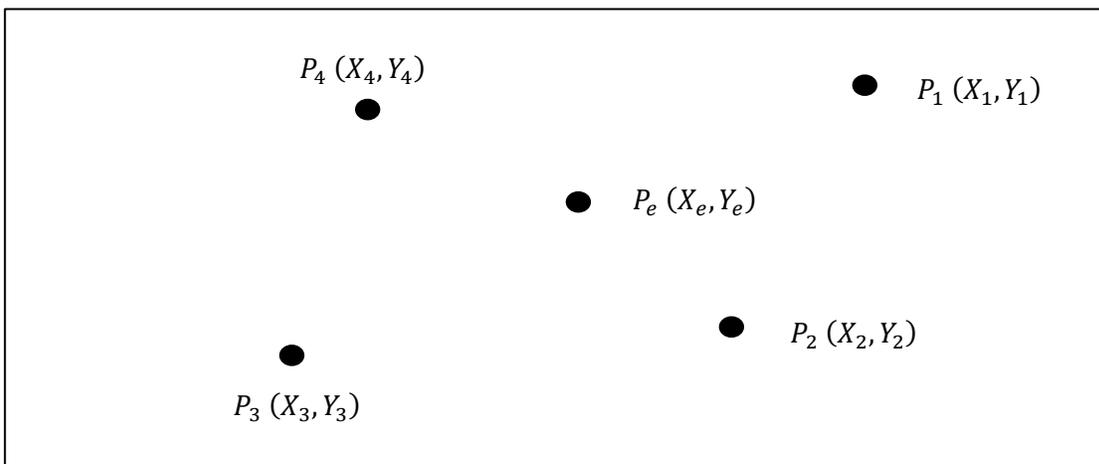


Figura 1.1. Ubicación de los puntos de muestreo  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  y el punto de estudio  $P_e$  donde  $X_j$  y  $Y_j$  representan las coordenadas de dichos puntos.

### 1.1.1 Método de Thiessen

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

$$d_{ej} = \sqrt{(X_e - X_j)^2 + (Y_e - Y_j)^2}, \quad j = 1, \dots, n \quad (1.2)$$

Donde:

$$d_{ej} = \text{Min}(d_{e1}, d_{e2})$$

### 1.1.2 Método de Interpolación Polinomial

Este método consiste en ajustar una ecuación global para el área en estudio; esta es función de las coordenadas del sitio a interpolar, empleando una función algebraica siendo la forma general de la función:

$$P_e = \sum_{k=1}^m \partial_k \phi_k(X_e, Y_e) \quad (1.3)$$

Donde:

$P_e$  valor interpolado en el punto  $(X_e, Y_e)$

$\partial_k$  k-ésimo coeficiente Polinomial

$\phi_k(X_e, Y_e)$  k-ésimo monomio en términos de las coordenadas  $(X_e, Y_e)$

$m$  número total de monomios algebraicos determinados en función del grado del polinomio.

La técnica de interpolación polinomial consiste en ajustar un polinomio que describa el comportamiento del sitio en estudio.

Grado Polinomio	$k$	$\phi_k(X, Y)$	Monomios $m$
0	1	1	1
1	2-3	$X \quad Y$	3
2	4-6	$X^2 \quad XY \quad Y^2$	6
3	7-10	$X^3 \quad X^2Y \quad XY^2 \quad Y^3$	10
4	11-15	$X^4 \quad X^3Y \quad X^2Y^2 \quad XY^3 \quad Y^4$	15
5	16-21	$X^5 \quad X^4Y \quad X^3Y^2 \quad X^2Y^3 \quad XY^4 \quad Y^5$	21

Grado Polinomio	$k$	$\phi_k(X, Y)$							Monomios $m$
6	22-28	$X^6$	$X^5Y$	$X^4Y^2$	$X^3Y^3$	$X^2Y^4$	$XY^5$	$Y^6$	28

### 1.1.2.1 Aproximación por mínimos cuadrados

Los factores de peso:

$$W_j = \sum_{k=1}^m [\alpha_{kj}]^T \phi_k(x_e, y_e) \quad (1.4)$$

Donde:

$$[\alpha_{kj}] = [\psi_{ki}] [\phi_{kj}] \quad (1.5)$$

$$[\psi_{ki}] = [\theta_{kj}]^{-1} \quad (1.6)$$

$$[\theta_{kj}] = \sum_{j=1}^n \phi_k(x_j, y_j) \phi_i(x_j, y_j) \quad (1.7)$$

$\phi_k(x_j, y_j)$  representan los monomios que no son otra cosa que las coordenadas de cada uno de los sitios analizados.

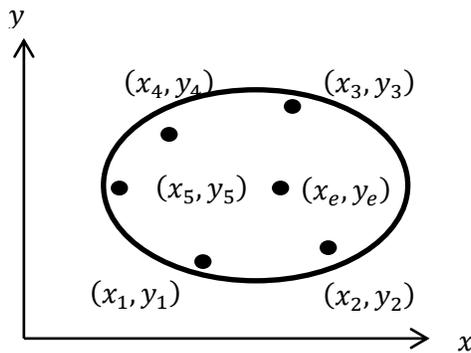


Figura 1.2. Coordenadas de los sitios analizados

Los términos  $\phi_k(x_j, y_j)$  forman una matriz de  $m$  renglones y  $n$  columnas.

Por ejemplo, para un polinomio de primer grado con  $m = 3$ :

Grado	$k$	$\phi_k(x, y)$	$m$
0	1	1	1
1	2-3	$X$ $Y$	3

### 1.1.2.2 Aproximación de Lagrange

Esta difiere de la anterior en que se requiere que el número de monomios sea igual al número de estaciones ( $m = n$ ) por lo que para un sitio con cinco estaciones deben calcularse los cinco primeros monomios.

		1
	X	Y
	X <sup>2</sup>	XY

### 1.1.3 Método de Interpolación Inversa

Esta técnica asume que la influencia de la lluvia en una estación para el cálculo de la misma en cualquier otro punto es inversamente proporcional a la distancia entre los dos puntos.

Los factores de peso se obtienen:

$$W_j = \frac{\left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{d_{ej}}\right]^\beta} \quad (1.8)$$

$$d_{ej} = \sqrt{(x_e - x_j)^2 + (y_e - y_j)^2} \quad j = 1, \dots, n \quad (1.9)$$

Cuando

$\beta = 1$  Interpolación de la distancia inversa.

$\beta = 2$  Interpolación del cuadrado de la distancia inversa.

### 1.1.4 Método de Interpolación Multicuadrática

$$W_j = \sum_{i=1}^n [\delta_{ij}] d_{ei} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1.10)$$

$$[\delta_{ij}] = [D_{ij}]^{-1} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \cdots & \delta_{14} \\ \delta_{21} & \cdots & \vdots \\ \delta_{31} & \ddots & \vdots \\ \delta_{41} & \cdots & \delta_{44} \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

$$[D_{ij}] = \text{matriz de distancias} = \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} & \dots \\ d_{21} & 0 & & & \\ d_{31} & & 0 & & \\ d_{41} & & & 0 & \\ \vdots & & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$[d_{ei}] = \begin{bmatrix} d_{e1} \\ d_{e2} \\ \vdots \\ d_{en} \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

### 1.1.5 Método de Interpolación Óptima

Este método requiere del conocimiento de todo el registro de las muestras disponibles en la región.

Los factores de peso se obtienen con la expresión:

$$[W_j] = [\hat{\rho}(d_{ij})]^{-1} [\hat{\rho}(d_{ej})] \quad (1.14)$$

$$[W_j] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}_{[n \times n]} \begin{bmatrix} \rho(d_{e1}) \\ \rho(d_{e2}) \\ \vdots \\ \rho(d_{en}) \end{bmatrix}_{[n \times 1]} \quad (1.15)$$

Donde:

$R_{ij}$  son los elementos de la matriz inversa  $[\hat{\rho}(d_{ij})]$

El primer paso es determinar la correlación entre los pares de registros con la expresión:

$$\rho(d_{ij}) = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{t=1}^N [P_i^t - \bar{m}_i][P_j^t - \bar{m}_j]}{S_i S_j} \quad (1.16)$$

Donde:

$P_i^t$  son las observaciones del proceso en estación  $i$ , en mm.

$P_j^t$  son las observaciones del proceso en estación  $j$ , en mm.

$\bar{m}_i$  media de las observaciones estación  $i$ , en mm.

$\bar{m}_j$  media de las observaciones estación  $j$ , en mm.

$N$  número total de datos entre par de estaciones.

$S_i$  y  $S_j$  desviación estándar en estaciones  $i$  y  $j$ , en mm.

Obtenida la matriz  $[\rho(d_{ij})]$  se consideran las diferentes combinaciones entre estaciones sin repetirlos y se forman los pares:

$\rho(d_{ij})$	$d_{ij}$
(correlaciones entre los pares de registros)	(distancias entre los pares de registros)

Con los pares de valores del paso anterior se ajustan los modelos:

a) Inverso

$$\hat{\rho}(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \frac{d_{ij}}{c}} \quad (1.17)$$

b) Potencia Inversa

$$\hat{\rho}(d_{ij}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{ij}}{c}\right)^a} \quad (1.18)$$

c) Exponencial

$$\hat{\rho}(d_{ij}) = e^{-\frac{d_{ij}}{c}} \quad (1.19)$$

Se requiere obtener por mínimos cuadrados los valores de las constantes  $a$  y  $c$ .

Donde:

$d_{ij}$  distancia entre las estaciones  $i$  y  $j$ , en km.

Seleccionado el mejor modelo de ajuste se procede a encontrar la matriz:

$$[\hat{\rho}(d_{ij})] \text{ y } [\hat{\rho}(d_{ej})]$$

Si los factores de peso  $w$  no suman uno se emplearan multiplicadores de Lagrange, de la forma:

$$[\hat{\rho}(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \hat{\rho}d_{11} & \hat{\rho}d_{12} & \hat{\rho}d_{13} & \cdots & \hat{\rho}d_{1n} & 1 \\ \hat{\rho}d_{21} & & & & & 1 \\ \vdots & & & & & 1 \\ \hat{\rho}d_{1n} & & & & & \vdots \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.20)$$

$$[\hat{\rho}(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \hat{\rho}e_1 \\ \hat{\rho}e_2 \\ \vdots \\ \hat{\rho}e_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

### 1.1.6 Método de Interpolación de Kriging

Esta técnica es similar a la interpolación óptima, excepto que la función de correlación espacial se reemplaza por el semivariograma. Los factores de peso se obtienen con:

$$[W_j] = [\hat{\gamma}(d_{ij})]^{-1} [\hat{\gamma}(d_{ej})] \quad (1.22)$$

Para el caso del Kriging ordinario:

$$[W_j] = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

$$[\gamma(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

$$[\gamma(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{e1}) \\ \gamma(d_{e2}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{en}) \end{bmatrix} \quad (1.25)$$

Si los factores de peso no suman uno se deberá replantear el sistema:

$$[w] = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (1.26)$$

$$[\gamma(d_{ij})] = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

$$[\gamma(d_{ej})] = \begin{bmatrix} \gamma(d_{e1}) \\ \gamma(d_{e2}) \\ \vdots \\ \gamma(d_{en}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

Para el Kriging Universal, el sistema a resolver es:

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \gamma_{13} & \cdots & \gamma_{1n} & \phi_{11} & \phi_{21} & \cdots & \phi_{m1} \\ \gamma_{21} & 0 & \gamma_{23} & \cdots & \gamma_{2n} & \phi_{21} & \phi_{22} & \cdots & \phi_{m2} \\ \gamma_{31} & \gamma_{22} & 0 & \cdots & \gamma_{3n} & \phi_{31} & \phi_{32} & \cdots & \phi_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \gamma_{n3} & \cdots & 0 & \phi_{1n} & \phi_{2n} & \cdots & \phi_{mn} \\ \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} & \cdots & \phi_{1n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \phi_{23} & \cdots & \phi_{2n} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{m1} & \phi_{m2} & \phi_{m3} & \cdots & \phi_{mn} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ w_n \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{e1} \\ \gamma_{e2} \\ \gamma_{e3} \\ \vdots \\ \gamma_n \\ \phi_{1e} \\ \phi_{2e} \\ \vdots \\ \phi_{ne} \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

El semivariograma entre estaciones es:

$$\gamma(d_{ij}) = \frac{1}{2n} \sum_{t=1}^n \{[P_i^t - \bar{m}_i] - [P_j^t - \bar{m}_j]\}^2 \quad (1.30)$$

Donde:

$\bar{m}_i$  media de las observaciones  $P_i$ .

$\bar{m}_j$  media de las observaciones  $P_j$ .

$n$  número total de observaciones  $P_i$  o  $P_j$ .

Los modelos de semivariograma de ajuste pueden ser:

a) Modelo lineal

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = ad_{ij} \quad (1.31)$$

b) Modelo monómico

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = ad_{ij}^b \quad (1.32)$$

c) Modelo exponencial

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = a[1 - e^{-cd_{ij}}] \quad \text{para } c > 0 \quad (1.33)$$

d) Modelo gaussiano

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = a \left[ 1 - e^{-cd_{ij}^2} \right] \quad \text{para } c > 0 \quad (1.34)$$

e) Modelo esférico

$$\hat{\gamma}(d_{ij}) = \frac{1}{2}a \left[ 3\frac{d_{ij}}{c} - \left(\frac{d_{ij}}{c}\right)^3 \right] \quad \text{donde: } d_{ij} < c \quad (1.35)$$

## 1.2 Delimitación de Regiones Homogéneas

Es importante hacer una delimitación de regiones homogéneas, es decir aquellas regiones que presenten el mismo patrón de comportamiento, esto con la finalidad de que la información inferida tenga el mismo comportamiento que la información recolectada.

En el caso de lluvias se usa la Prueba de Fisher para delimitar las regiones homogéneas.

### 1.2.1 Prueba de Fisher

La prueba de Fisher se basa en conocer las varianzas muestrales de dos conjuntos, con objeto de definir si ambos conjuntos parecen ser extraídos de la misma población, es decir que  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ . Para comparar las varianzas muestrales se utiliza el cociente entre dichas varianzas, poniendo en el numerador la mayor de ellas. Si el cociente supera un valor límite que corresponde a una probabilidad de no excedencia del 90% (en algunos textos se usa el 95% como límite) de la función F de Fisher, se considera que no hay evidencia estadística contundente para rechazar la hipótesis y se le acepta. En la tabla 1.1 se muestran los límites de la función F de Fisher correspondientes a una probabilidad de excedencia del 10% (CFE-Instituto de Ingeniería UNAM).

**Tabla 1.1. Puntos porcentuales de la distribución F de Fisher. Valores de F en función de la probabilidad  $P(F|v_1, v_2)$ .  
Fuente: Manual para el diseño de obras civiles CFE.**

$v_1 \backslash v_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	30	60	100	$\infty$
1	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.86	60.19	60.71	61.22	61.74	62.26	62.79	63.01	63.33
2	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.42	9.44	9.46	9.47	9.48	9.49
3	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	5.22	5.20	5.18	5.17	5.15	5.14	5.13
4	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.87	3.84	3.82	3.79	3.78	3.76
5	4.06	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.24	3.21	3.17	3.14	3.13	3.10
6	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.87	2.84	2.80	2.76	2.75	2.72
7	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.63	2.59	2.56	2.51	2.50	2.47
8	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.50	2.46	2.42	2.38	2.34	2.32	2.29
9	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	2.19	2.16
10	3.29	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.20	2.16	2.11	2.09	2.06
11	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.12	2.08	2.03	2.01	1.97
12	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	1.94	1.90
13	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.01	1.96	1.90	1.88	1.85
14	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.83	1.80
15	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.92	1.87	1.82	1.79	1.76
16	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.89	1.84	1.78	1.76	1.72
17	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.86	1.81	1.75	1.73	1.69
18	3.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.89	1.84	1.78	1.72	1.70	1.66
19	2.99	2.61	2.40	2.27	2.18	2.11	2.06	2.02	1.98	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	1.70	1.67	1.63
20	2.97	2.59	2.38	2.25	2.16	2.09	2.04	2.00	1.96	1.94	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.65	1.61
21	2.96	2.57	2.36	2.23	2.14	2.08	2.02	1.98	1.95	1.92	1.87	1.83	1.78	1.72	1.66	1.63	1.59
22	2.95	2.56	2.35	2.22	2.13	2.06	2.01	1.97	1.93	1.90	1.86	1.81	1.76	1.70	1.64	1.61	1.57
23	2.94	2.55	2.34	2.21	2.11	2.05	1.99	1.95	1.92	1.89	1.84	1.80	1.74	1.69	1.62	1.59	1.55
24	2.93	2.54	2.33	2.19	2.10	2.04	1.98	1.94	1.91	1.88	1.83	1.78	1.73	1.67	1.61	1.58	1.53
25	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.72	1.66	1.59	1.56	1.52
26	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.81	1.76	1.71	1.65	1.58	1.55	1.50
27	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.80	1.75	1.70	1.64	1.57	1.54	1.49
28	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.79	1.74	1.69	1.63	1.56	1.53	1.48
29	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.78	1.73	1.68	1.62	1.55	1.52	1.47
30	2.88	2.49	2.28	2.14	2.05	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.77	1.72	1.67	1.61	1.54	1.51	1.46
40	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.71	1.66	1.61	1.54	1.47	1.43	1.38
60	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.66	1.60	1.54	1.48	1.40	1.36	1.29
80	2.77	2.37	2.15	2.02	1.92	1.85	1.79	1.75	1.71	1.68	1.63	1.57	1.51	1.44	1.36	1.32	1.24
100	2.76	2.36	2.14	2.00	1.91	1.83	1.78	1.73	1.69	1.66	1.61	1.56	1.49	1.42	1.34	1.29	1.21
$\infty$	2.71	2.30	2.08	1.94	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.55	1.49	1.42	1.34	1.24	1.18	1.00

Al estandarizar una variable aleatoria  $x_i$  para un sitio  $j$  se obtiene una nueva serie

$$y_i^j = \frac{x_i^j}{\bar{x}_j} \quad (1.36)$$

Cuyos estadísticos son:

$$\mu_j = E[y_i^j] = 1 \quad (1.37)$$

$$\sigma_y = S_y = Cv_y = Cv_x \quad (1.38)$$

Por tanto, el estadístico  $F$  se reescribe como:

$$F = \frac{Cv_1^2}{Cv_2^2} = \left( \frac{Cv_1}{Cv_2} \right)^2 \quad (1.39)$$

## 1.3 Pruebas de Homogeneidad e Independencia

Una vez completados los registros debe verificarse que las muestras son homogéneas e independientes, esto se hace a través de las pruebas de homogeneidad de Helmert, T de Student y Cramer, y la prueba de independencia de Anderson. Esto se hace para garantizar que al completar los registros no se modificó la tendencia de las series, además de que se debe garantizar mediante la prueba de independencia que las series están compuestas de variables aleatorias para que puedan ser modelada mediante modelos probabilísticos.

### 1.3.1 Pruebas de Homogeneidad

Las características de las series hidrológicas como la media, desviación estándar y los coeficientes de correlación serial, se afectan cuando la serie presenta tendencia en la media o en la varianza, o cuando ocurren saltos negativos o positivos, tales anomalías son producidas por la pérdida de homogeneidad. (Escalante Sandoval & Reyes Chávez, 2008)

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

Las pruebas estadísticas que miden la homogeneidad de una serie de datos presentan una hipótesis nula y una regla para aceptarla o rechazarla.

#### 1.3.1.1 Prueba estadística de Helmert

Esta prueba es sencilla y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento  $P_j^i$  de la serie  $j$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$  con respecto a su valor medio  $P^j$ . Si una desviación de un cierto signo es seguida de otra del mismo signo, entonces se dice que se forma una frecuencia  $S$ , si de lo contrario se considera como un cambio  $C$ .

La serie se considera homogénea si cumple:

$$-\sqrt{n_j - 1} \leq (S - C) \leq \sqrt{n_j - 1} \quad (1.40)$$

Donde:

$n_j$  representa el tamaño de muestra

### 1.3.1.2 Prueba estadística T de Student

Cuando la causa probable de la prueba de homogeneidad de la serie será un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil.

Si se considera una serie  $P_j^i$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  del sitio  $j$ , la cual se divide en dos conjuntos de tamaño  $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$  entonces el estado de prueba se define con:

$$t_d = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\left[ n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad (1.41)$$

Donde:

$\bar{x}_1, S_1^2$  media y varianza de la primera parte del registro de tamaño  $n_1$ .

$\bar{x}_2, S_2^2$  media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño  $n_2$ .

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución T de Student de dos colas y con

$v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que aquel de la distribución T de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $P_j^i$  se considera no homogénea.

### 1.3.1.3 Prueba estadística de Cramer

Esta prueba se utiliza con el propósito de comprobar la homogeneidad en el registro  $P_j^i$  de la serie  $j$  para  $i = 1, 2, 3, \dots, n_j$  y también para determinar si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques,

el primero de tamaño total de la muestra, el segundo de tamaño  $n_{60}$  (60% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ), y el tercero de tamaño  $n_{30}$  (30% de los últimos valores de la muestra  $n_j$ ).

La prueba compara el valor de  $\bar{P}_j$  del registro total con cada una de las medias de los bloques elegidos  $\bar{P}_{60}^j$  y  $\bar{P}_{30}^j$ .

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

$$\bar{P}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{P_i^j}{n_j}, \quad j = 1 \quad (1.42)$$

Para una sola muestra analizada.

$$S_P^j = \left[ \frac{1}{(n_j - 1)} \sum_{i=1}^{n_j} (P_i^j - \bar{P}^j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.43)$$

$$\bar{P}_{60}^j = \sum_{k=1}^{n_{60}} \frac{P_k^j}{n_{60}} \quad (1.44)$$

$$\bar{P}_{30}^j = \sum_{k=1}^{n_{30}} \frac{P_k^j}{n_{30}} \quad (1.45)$$

$$\tau_{60}^j = \frac{\bar{P}_{60}^j - \bar{P}^j}{S_P^j} \quad (1.46)$$

$$\tau_{30}^j = \frac{\bar{P}_{30}^j - \bar{P}^j}{S_P^j} \quad (1.47)$$

$$t_w = \left\{ \frac{n_w(n_j - 2)}{n_j - n_w [1 + (\tau_w^j)^2]} \right\}^{1/2}, |\tau_w^j| \quad (1.48)$$

Para  $w = 60$  ,  $w = 30$

El estadístico  $t_w$  tiene distribución T de Student de dos colas con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_w$  para  $w = 60$  y  $w = 30$  es mayor que aquel de la distribución T de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $P_j^i$  se considera no homogénea.

## 1.4 Prueba de Independencia de Anderson

Para que se pueda llevar, a cabo el análisis de frecuencias se requiere que la muestra  $P_i^j$  de la serie  $j$  para  $i = 1, 2, 3 \dots$  este compuesta por variables aleatorias. Para producirlo se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual hace uso del coeficiente de autocorrelación serial  $r_k^j$  para diferentes tiempos de retraso  $k$ . Si se analiza un registro, entonces  $j = 1$

La expresión para obtener el coeficiente de correlación serial de retraso  $k$  es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (P_i^j - \bar{P}^j)(P_{i+k}^j - \bar{P}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (P_i^j - \bar{P}^j)^2} \quad (1.49)$$

Para:  $r_0^j = 1$  y  $k = 1, 2, \dots, n_j/3$

Donde:

$$\bar{P}^j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{P_i^j}{n_j} \quad (1.50)$$

Además, los límites al 95% de confianza para  $r_k^j$  se pueden obtener como

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{n_j - k - 1}}{n_j - k} \quad (1.51)$$

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

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

La prueba se hace desde  $k = 1$  hasta  $k = \frac{L}{3}$  donde  $L$  es el tamaño de registro, es mejor si  $r$  se acerca a cero.

## 2 El Cambio Climático

El calentamiento global y el cambio climático asociado podrán impactar el clima regional y local en diversas maneras. La detección de cambios en los extremos a partir de datos instrumentales permite obtener evidencia de cambios en el clima observados recientemente en las regiones y localidades de México. La identificación de estos cambios mediante los índices de cambio climático, en conjunto con la información sobre el comportamiento potencial del clima futuro mediante escenarios, muestra la importancia de desarrollar estrategias para la adaptación a la variabilidad climática presente y futura, alertando sobre la necesidad inmediata de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera iniciando una transición a una economía de bajo carbono. El cumplimiento de ambas tareas requiere la aplicación del conocimiento del clima bajo enfoques interdisciplinarios. (Vázquez Aguirre, 2010)

La Organización Meteorológica Mundial ha recomendado el uso de períodos de 30 años para calcular las estadísticas de referencia del clima llamadas “normales climatológicas”. Específicamente los períodos de 1961 a 1990 y de 1971 a 2000 han sido utilizados en los últimos años como referencia del clima observado en décadas recientes. Resulta claro entonces, el hecho de que la información del clima tiene implícita la información del estado del tiempo.

En términos de pronóstico, la ciencia hasta ahora solamente permite predecir el estado del tiempo con gran detalle y alta confiabilidad en plazos de unos cuantos días. En materia de clima sólo es posible hacer predicciones de las condiciones medias probables de ocurrir en plazos de meses o estaciones con respecto a lo normal. En plazos todavía más largos, como los del cambio climático, no es posible hacer pronósticos, sino solamente escenarios de cómo sería probablemente el clima dadas ciertas condiciones en el futuro lejano. Las condiciones consideradas en la elaboración de escenarios de cambio climático incluyen proyecciones del estado futuro de los sistemas naturales, sociales y económicos, tales como el cambio de estado de los ecosistemas, los cambios en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera y el desarrollo socioeconómico, entre otros factores. Diversos escenarios para el futuro han sido creados en el contexto del cambio climático global.

Una idea clara sobre cómo el cambio climático impactará en la escala de regiones específicas (como por ejemplo en las entidades federativas de México) requiere profundizar el conocimiento del clima en dichas escalas, es decir, se requiere tener identificadas con gran nivel de detalle las variaciones climáticas que ocurren en cada región de interés. Sólo mediante este conocimiento y un constante monitoreo del clima se podrá elucidar la forma en que los impactos del calentamiento global se irán manifestando en las diferentes regiones. El entendimiento del clima pasado y presente es uno de los elementos más importantes que permitirán trabajar en el diseño de medidas de adaptación a los cambios en el clima. Una sociedad que ha aprendido a adaptarse a

las variaciones del clima del pasado reciente y del presente tiene más posibilidades de adaptarse a los cambios climáticos.

El análisis detallado de los cambios regionales del clima es por tanto necesario para comprender los posibles impactos “locales” del calentamiento global.

## **2.1 Definición de cambio climático.**

Dos definiciones del término “cambio climático” son mayormente utilizadas en las comunidades científica y operacional:

La Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) define el cambio climático como *“un cambio en el clima que es atribuible directa o indirectamente a las actividades humanas, que altera la composición de la atmósfera planetaria y que se observa en períodos de tiempo comparables, en forma adicional a la variabilidad climática natural”*. (CMNUCC, 1992)

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) por otro lado, define el cambio climático como *“cualquier cambio en el clima producido durante el transcurso del tiempo, ya sea debido a la variabilidad natural o a la actividad humana”*. (IPCC, 2007).

El calentamiento global observado en décadas recientes es una de las evidencias de un importante cambio climático que está ocurriendo en la actualidad, cuyas causas han sido atribuidas a las actividades humanas, en particular al incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero.

De acuerdo a los científicos que han analizado este fenómeno, cada vez se tendrán climas más extremos y fenómenos climáticos más intensos.

Los veranos serán más cálidos y los patrones de las lluvias se modificarán, dando lugar a lluvias más intensas en algunas partes y lluvias menos frecuentes en otras, aumentando así las sequías.

Es muy probable que los días fríos, las noches frías y las escarchas sean ahora menos frecuentes en la mayoría de las áreas terrestres, mientras que los días y noches cálidos serían ahora más frecuentes.

Es probable que las olas de calor sean ahora más frecuentes en la mayoría de las áreas terrestres.

Se teme que las capas de hielo que actualmente permanecen en las partes más frías del planeta (en los polos y en las montañas más altas) se vayan derritiendo, lo que aumentará el nivel medio del mar, inundando permanentemente amplias zonas costeras.

Entender las variaciones locales en el clima y comprender la forma y magnitud de los impactos del calentamiento global, y el cambio climático asociado, son pasos imprescindibles para la seguridad del género humano.

El cambio climático ocurre por una exacerbada acción del efecto invernadero, resultado del incremento de las concentraciones de los gases de efecto invernadero, es decir, de la cantidad y variedad de algunos de los gases que la componen. (INE, 2010)

De manera natural, la atmósfera está compuesta en un 78.1% de nitrógeno, un 20.9% de oxígeno, y el restante 1% por otros gases, entre los que se encuentran el argón, el helio, y algunos gases de efecto invernadero, como el bióxido de carbono (0.035%), el metano (0.00015%), el óxido nitroso (0.0000016%) y el vapor de agua (0.7%).

Derivado de la actividad humana, una gran cantidad de gases han sido emitidos a la atmósfera, lo que ha cambiado ligeramente la composición de la misma. Como ejemplo se puede mencionar que la concentración de varios de los gases de efecto invernadero ha aumentado.

En los últimos trescientos años la cantidad de bióxido de carbono aumentó de 280 a 368 miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$  o partes por millón); la de metano, de 0.7 a 1.75  $\text{mg}/\text{m}^3$ ; y la de óxido nitroso, de 0.27 a 0.316  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Esto significa que, en volumen, ahora el bióxido de carbono es el 0.046% de la atmósfera en lugar del 0.035%; el metano ahora es el 0.00037% en lugar del 0.00015%, y el óxido nitroso es el 0.00000187% en vez del 0.0000016%.

Aunque estas concentraciones son muy pequeñas comparadas con las del oxígeno o el nitrógeno, el cambio en ellas realmente está afectando al planeta.

Para comprender mejor el cambio climático, es entonces necesario saber lo que son el efecto invernadero y los gases de efecto invernadero.

## **2.2 Efecto Invernadero**

El efecto invernadero es un fenómeno atmosférico natural que permite mantener la temperatura del planeta al retener parte de la energía proveniente del Sol.

La Tierra recibe de forma permanente un flujo de rayos solares; una parte de los rayos del Sol son reflejados al espacio por las nubes, pero la mayor parte de estas ondas luminosas atraviesan la atmósfera y alcanzan la superficie terrestre. La energía recibida del Sol calienta la superficie de la Tierra y los océanos.

A su vez, la superficie de la Tierra emite su energía de vuelta hacia la atmósfera y hacia el espacio exterior en forma de ondas térmicas conocidas como radiación de onda larga (radiación infrarroja).

Sin embargo, no toda la energía liberada por la Tierra es devuelta al espacio; parte de ella queda atrapada en la atmósfera debido a la existencia de ciertos gases, denominados gases de efecto invernadero, que tienen la propiedad de absorber y re-emitir la radiación proveniente de la superficie de la Tierra.

Los gases de efecto invernadero atrapan el calor emitido por la Tierra y lo mantienen dentro de la atmósfera, actuando a modo de un "gigantesco invernadero". A este fenómeno se le conoce como Efecto Invernadero.

Es importante señalar que no todo el calor que es absorbido por el efecto invernadero se mantiene en la atmósfera, sino que una parte regresa al espacio exterior. El clima terrestre depende, precisamente, del balance energético entre la radiación solar y la radiación emitida por la Tierra. Los gases de efecto invernadero son, como ya se ha reiterado, claves en este proceso.

### **2.2.1 Gases del efecto invernadero**

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): *"Por gases de efecto invernadero se entiende aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropógenos (de origen humano), que absorben y reemiten radiación infrarroja"*.

Debido a que estos gases tienen la capacidad de retener el calor emitido por la superficie terrestre, actúan a manera de un gigantesco invernadero que mantiene y regula la temperatura en la Tierra. Aunque solo representan el 1% de la composición atmosférica, cumplen funciones primordiales, ya que sin su existencia la Tierra sería demasiado fría para albergar la vida.

Los gases de efecto invernadero naturales son los responsables de la existencia del efecto invernadero, fenómeno que mantiene la temperatura de la Tierra y que permite la presencia de vida en el planeta.

Los gases de efecto invernadero son:

- Vapor de agua (H<sub>2</sub>O)
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Ozono (O<sub>3</sub>)

La actividad humana ha alterado el volumen y la proporción de estos gases en la atmósfera. En particular, el volumen de los mismos ha ido aumentando cada vez de manera más acelerada y, por lo mismo, el efecto también.

Estudios desarrollados por investigadores alrededor del mundo permiten identificar las fuentes de origen humano de los gases.

Las emisiones de dichos gases se estiman en 6 categorías contempladas por el Protocolo de Kioto:

- Energía (Consumo de combustibles fósiles y Emisiones fugitivas de metano)
- Procesos Industriales
- Solventes
- Agricultura
- Uso de Suelo, Cambio de Uso de Suelo y Silvicultura (USCUSS)
- Desechos

Estudios realizados sobre las concentraciones de gases en la atmósfera han revelado que las cantidades de los gases precursores del efecto invernadero, especialmente el bióxido de carbono, han aumentado sensiblemente.

La quema de grandes porciones de bosques y vegetación para ampliar las tierras de cultivo, el uso masivo de combustibles fósiles y la intensidad de los procesos industriales han ocasionado, tan sólo durante el siglo XX, mayores concentraciones de gases efecto invernadero en la atmósfera.

## **2.3 Detección y atribución de cambio climático**

En términos de la investigación sobre detección y atribución del cambio es importante comprender la diferencia entre ambos conceptos.

Los cambios en el sistema climático a través del tiempo pueden deberse ya sea a variaciones en la dinámica interna del sistema, o bien a la presencia de forzamientos externos. La dinámica interna es el resultado de los procesos de interacción entre las diversas componentes del sistema climático (atmósfera, hidrósfera, criósfera, etc.); los forzamientos externos, por otra parte, pueden ser de origen natural (variaciones en la actividad solar o en la actividad volcánica) o de origen humano (aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo).

Cuando no existen forzamientos externos, los cambios del clima son influenciados solamente por los procesos de la dinámica interna del sistema. De este modo, se tiene conocimiento de cambios del clima asociados a sistemas de interacción océano-atmósfera, como en el caso de la variabilidad climática asociada al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), o de las variaciones en períodos de décadas tales como las asociadas a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y a la Oscilación Multi-decadal del Atlántico (AMO). En forma adicional a las variaciones climáticas debidas a la dinámica interna, otros cambios del clima están asociados a forzamientos externos naturales como los observados en períodos largos de intensa actividad volcánica.

Hablar de detección del cambio climático implica demostrar, generalmente en términos estadísticos, que el clima ha cambiado con algún nivel de significancia en un intervalo de tiempo determinado. A reserva de apegarse a la definición formal del término, puede hablarse de

detección de cambios en el clima al identificar en un registro de variables climáticas, obtenido con instrumentos de medición, los cambios que sean estadísticamente diferentes a las características del mismo registro en el pasado inmediato (por ejemplo al identificar una tendencia significativa en los registros de termómetros). En la 'detección' del cambio climático se demuestra que existe evidencia de cambios en el clima a través del tiempo, pero no se da explicación alguna sobre el origen de dichos cambios.

La acción de explicar y demostrar las causas de los cambios en el clima se conoce como atribución del cambio climático, y consiste en establecer, con un nivel de confianza dado, el origen más probable de un cambio detectado en el clima.

El calentamiento global recientemente detectado en la tendencia de incremento de la temperatura media del planeta es uno de los indicadores de un cambio climático en nuestro tiempo. En su más reciente informe de evaluación, el IPCC concluyó que "el calentamiento del sistema climático es inequívoco". Mas debe tenerse en cuenta que se está hablando de la temperatura media de todo el planeta y que esto implica examinar áreas geográficas muy grandes de manera que el 'ruido' asociado a los detalles de escalas muy pequeñas no impida revelar la señal planetaria de cambio climático.

En cuanto a la atribución del cambio climático, las investigaciones han demostrado que el calentamiento global es debido en gran medida al incremento en la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero asociado a las emisiones de origen humano. Esta conclusión de atribución ha sido obtenida por los científicos del mundo mediante el uso de complejos modelos que describen las leyes de la dinámica interna del sistema climático y comparando el clima modelado con el clima observado. (Vázquez Aguirre, 2010)

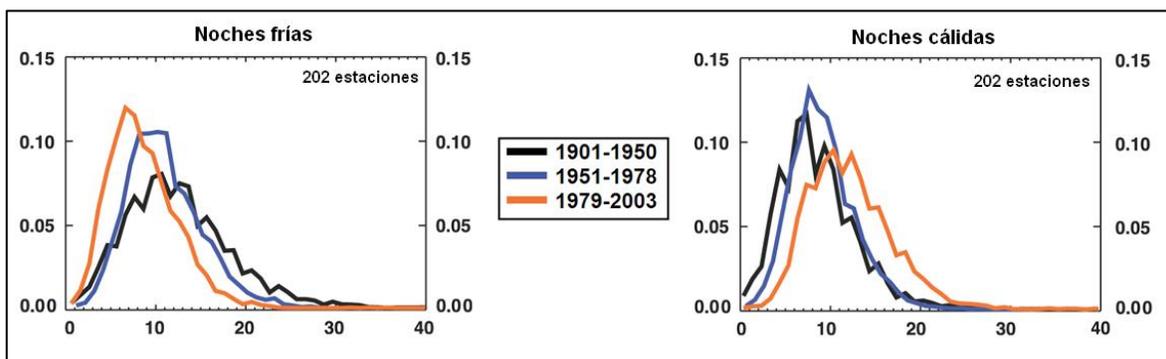
La atribución del cambio climático es clara para la escala de todo el planeta y para la escala de algunos continentes. Sin embargo, conforme aumenta el nivel de detalle la atribución se vuelve más compleja, de manera que hasta ahora es prácticamente imposible determinar si una tormenta o un fenómeno específico han ocurrido a causa del cambio climático. La atribución del cambio climático es posible en la escala global pero es tema de frontera en las escalas regional y local.

## **2.4 Cambios en los extremos del clima.**

Es importante tener en cuenta que calentamiento global no implica calentamiento constante en absolutamente todos los rincones del planeta, sino más bien, alteraciones en la dinámica del sistema climático, que a su vez provocarán cambios en el ciclo hidrológico y en los procesos que mantienen el balance energético del planeta. Así, cambio climático implica cambios en la circulación general de la atmósfera, y por lo tanto, variaciones en los sistemas meteorológicos y en las formas dinámicas en las que el clima se manifiesta.

Dada la fuerte interdependencia entre el clima y las actividades humanas, cualquier cambio climático tendrá diversas implicaciones para la economía y la sociedad. Una de las mayores consecuencias es quizás, el aumento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos, anunciado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) a principios de esta década. Los cambios en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos han empezado a ser demostrados en la literatura científica por algunos investigadores, incluyendo un panorama de éstos para el planeta en su conjunto y para diversas regiones incluyendo Norteamérica y Centroamérica. Para la República Mexicana, algunos estudios han sido realizados como parte de los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático pero se necesita mayor investigación para tener diagnósticos en cada entidad federativa.

Los cambios en los eventos extremos serán algunos de los mayores efectos del cambio climático, aunque su impacto en diversas regiones y localidades del país es aún incierto. Si bien en la actualidad se cuenta con escenarios sobre el probable comportamiento condicional del clima hacia mediados y finales de siglo, los cambios observados en el clima del pasado reciente y del presente, también deben considerarse en las estrategias de adaptación. La figura 2.1 muestra el panorama de cambios en la frecuencia de noches frías y noches cálidas incluida en el IV Informe del IPCC en 2007. En la figura puede observarse que en las últimas décadas hay un cambio claro en la distribución con disminución de eventos fríos y aumento de eventos cálidos.



**Figura 2.1. Cambios observados en las funciones de distribución de probabilidad anual de noches frías (izquierda) y noches cálidas (derecha) en 202 estaciones climatológicas del planeta, comparando tres periodos: 1901 a 1950 (línea negra), 1951 a 1978 (línea azul) y 1979 a 2003 (línea naranja). El eje horizontal representa el porcentaje de tiempo durante el año en que los indicadores estuvieron por debajo del percentil 10 (TN10p, izquierda) o por arriba del percentil 90 (TN90p, derecha). (Vázquez Aguirre, 2010).**

Los eventos extremos son ocasionados por una extensa combinación de factores y también ocurren como parte del clima normal, es decir, incluso en un clima sin cambios en su variabilidad hay un cierto número de eventos extremos. Es por ello que la atribución de un extremo en particular es muy difícil de determinar. La detección de los cambios en los extremos y el monitoreo de éstos es un tema relevante tanto en un clima normal como en condiciones de cambio climático.

A diferencia de los extremos climáticos, que ocurren en períodos de tiempo relativamente largos como en el caso de las sequías, la mayoría de los eventos meteorológicos extremos ocurren en la

escala de unos cuantos días y están asociados a sistemas atmosféricos en su mayoría regionales. La detección de cambios en los extremos meteorológicos desde un punto de vista climatológico requiere de observaciones en la escala temporal diaria.

No existe una definición única para los eventos extremos, pero puede decirse que son los eventos registrados en el comportamiento de una variable dada, que tienen baja probabilidad de ocurrencia y cuyo valor observado en dicha variable excede un umbral especificado.

Diversos grupos de investigación han propuesto diversas definiciones para los eventos extremos. Por ejemplo, para la identificación de extremos de precipitación calculados a partir de datos diarios, se sugieren al menos tres índices: a) la frecuencia de días que exceden los percentiles 90, 95 y 99, calculando los percentiles únicamente con los días con lluvia; b) el 'índice simple de intensidad de lluvia' calculado dividiendo la lluvia total por el número de días con lluvia y c) el porcentaje de la lluvia en un periodo (año, estación, etc.) que ocurre en los días con lluvia por arriba de los percentiles 90, 95 y 99. No obstante que muchas definiciones de evento extremo son posibles, el uso de una base teórica común para definir los eventos extremos permite su estudio sistemático.

Por lo tanto, el Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI por sus siglas en inglés) coordinado por la Comisión de Climatología de la Organización Meteorológica Mundial (CCI/OMM), el proyecto sobre Predecibilidad y Variabilidad Climática (CLIVAR), y la Comisión Técnica de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), ha formulado 27 índices para detectar las modificaciones en el comportamiento de los extremos del clima. Este conjunto de índices permite que su cálculo sea realizado de la misma manera internacionalmente, a fin de integrar los índices de diferentes regiones.

Es requisito para el cálculo de los índices de cambio climático que las observaciones del clima a partir de las cuales se calculen los índices sean las mejores posibles. Esto implica que los datos diarios hayan sido sujetos a un estricto control de calidad y análisis de homogeneidad, aspectos de gran importancia en los datos instrumentales del clima para el estudio del cambio climático.

## **2.5 Datos instrumentales del clima.**

La evidencia del cambio climático reciente ha sido documentada en varias componentes del sistema climático, tales como la atmósfera, el océano, los continentes y la cubierta de hielo y nieve. Sin embargo, una de las evidencias más claras ha sido documentada a partir de los datos instrumentales del clima, específicamente de las observaciones de temperatura (Figura 2.2). La compilación y análisis del registro global de temperatura han requerido de la cuidadosa recolección y procesamiento científico de datos termométricos en puntos de observación representativos de todo el planeta.

La construcción de series climáticas para la escala de un hemisferio o de todo el globo es una tarea científica compleja, ya que implica el manejo adecuado de las incertidumbres asociadas a las mediciones instrumentales y la correcta agregación de las series de estaciones individuales en la serie del área a representar.

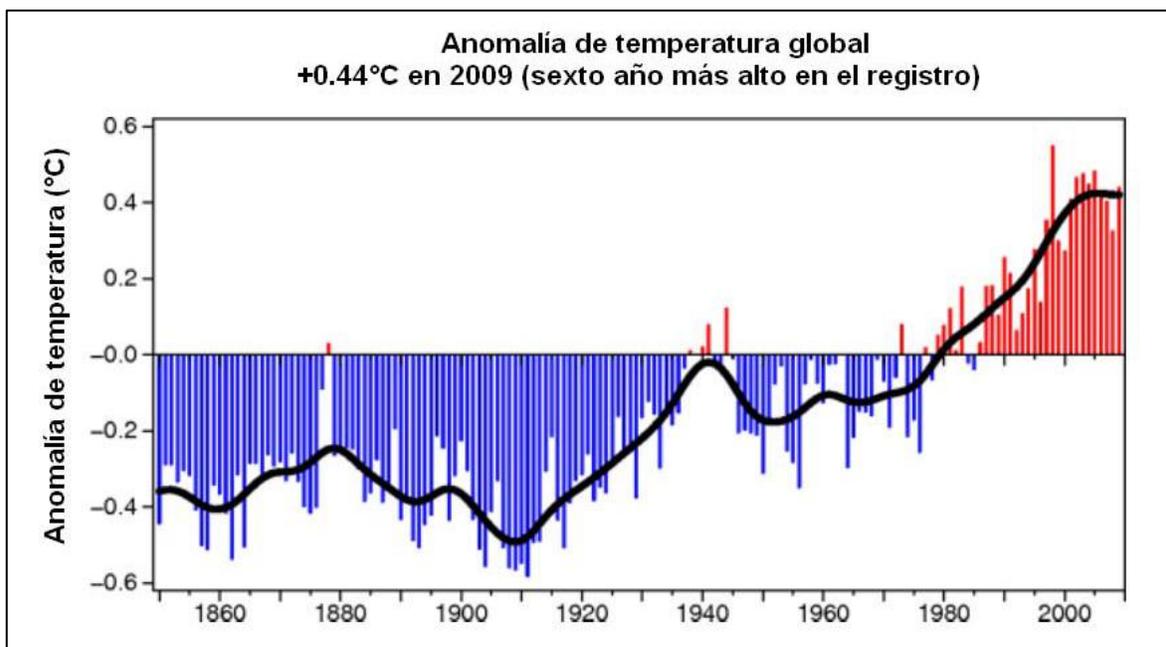


Figura 2.2. Registro global de temperatura compilado conjuntamente por la Climatic Research Unit de la Universidad de East Anglia y la Met Office del Reino Unido (Brohan et al., 2006). La gráfica muestra la anomalía de temperatura del planeta (1850-2009) con respecto a la media del período de referencia 1961-1990. El año 2009 es el sexto más alto en el registro excedido por 1998, 2005, 2003, 2002 y 2004. (Vázquez Aguirre, 2010)

Ante estas complejidades en el manejo de datos en series de tiempo, en ocasiones se ha optado por el desarrollo de datos en arreglos regulares mediante el uso de interpolaciones, sin embargo, este es un proceso aún más delicado, ya que el uso de dichas estimaciones implica discernir el tipo de análisis y aplicaciones para los que es adecuado usar datos en mallas regulares.

En México las observaciones instrumentales del clima se encuentran disponibles en varias bases de datos, aunque en la mayoría de ellas aún se requiere implementar un estricto proceso de control de calidad. El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tiene la misión de administrar la base de datos nacional oficial del clima en México y es de carácter público. Específicamente, los datos de la red de estaciones climatológicas convencionales administrados en el sistema CLICOM son la fuente de información climática con las dos características requeridas para el estudio del clima en la escala de las entidades federativas: un periodo de registro largo (por lo menos cuatro o cinco décadas continuas) y cobertura geográfica suficientemente densa.

Otras redes de observación con diferente cobertura geográfica, número de estaciones y propósito específico son los observatorios sinópticos, la red de radiosondeo, las estaciones meteorológicas automáticas, y las redes de observación de otras instituciones. Estas observaciones son valiosas para el pronóstico del estado del tiempo o para la toma de decisiones en tiempo real, pero para el propósito de analizar el clima regional pueden tener la desventaja de un periodo de registro relativamente corto, o baja resolución en su cobertura geográfica, con lo que sólo satisfacen parcialmente los requisitos para el estudio del clima con un alto nivel de detalle. La consolidación de las bases de datos climáticas en México aún requiere la aplicación de procedimientos de control de calidad, análisis de homogeneidad por especialistas del clima y la implementación de metadatos.

Los avances tecnológicos en instrumentación meteorológica y medios de comunicación han facilitado en años recientes el uso de estaciones meteorológicas automáticas. Sin embargo, antes de implementar nuevas redes de observación debe tomarse en cuenta que en el estudio del cambio climático, la relevancia de los datos instrumentales se centra en la longitud de la serie de tiempo, el grado de homogeneidad de los registros existentes y el manejo adecuado de la incertidumbre inherente al proceso de medición. Por lo tanto, conservar los puntos de medición con registros más antiguos y asegurar su continuidad reviste gran importancia.

Un análisis preliminar de los datos instrumentales de temperatura de la República Mexicana permite documentar un claro aumento de la temperatura promedio del país en los años recientes, el cual es consistente con el calentamiento global (figura 2.3).

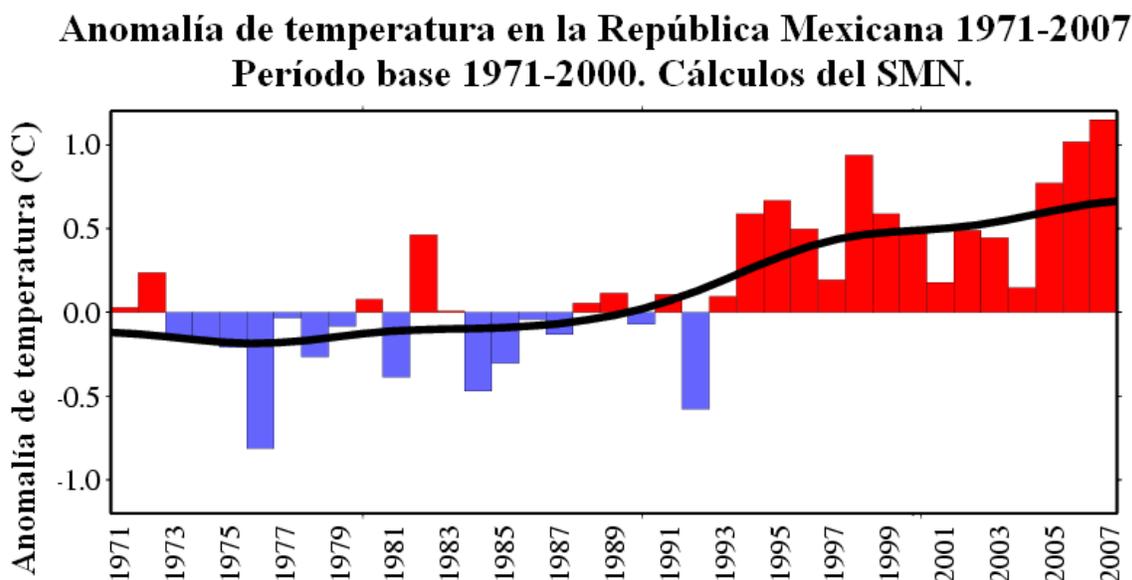


Figura 2.3. Anomalía de temperatura en la República Mexicana (1971-2007) con respecto a la media del período de referencia 1971-2000, con base en datos estatales del SMN. (Vázquez Aguirre, 2010)

Esta evidencia basada en los promedios de temperatura calculados por el Servicio Meteorológico Nacional a partir de observaciones instrumentales muestra que el clima mexicano se encuentra inmerso de manera consistente en los procesos de cambio climático identificados por la comunidad científica mundial y al mismo tiempo plantea el reto de incrementar el entendimiento detallado sobre los cambios del clima en escalas más pequeñas (regiones, entidades federativas, localidades), ya que en éstas tienen lugar la mayor parte de las decisiones que impactan directamente la dinámica socioeconómica del país. Al respecto, la Guía para la elaboración de Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (PEACC) coordinada por el INE, la Universidad Veracruzana (UV) y el Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA) de la UNAM, menciona con referencia a los estudios de cambio climático para las entidades federativas que: “...un estado, por su tamaño y su ubicación intermedia en los niveles de gobierno, hace más factible implementar medidas para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero así como políticas exitosas para adaptarse al cambio climático”. (Vázquez Aguirre, 2010)

## 2.6 Cálculo de índices de cambio climático.

### 2.6.1 Los índices del cambio climático del ETCCDI.

El Grupo de Expertos en Detección e Índices de Cambio Climático (ETCCDI) formado conjuntamente por la OMM, el proyecto de variabilidad climática (CLIVAR) y la Comisión Conjunta de Oceanografía y Meteorología Marítima (JCOMM), ha propuesto un conjunto de índices de cambio climático útiles en la detección y el monitoreo de cambios en los extremos del clima. Los índices son calculados a partir de las series de datos observados de temperatura y precipitación. Los índices de puntos de observación individuales pueden ser posteriormente agregados en series regionales representativas del área geográfica analizada. Los índices del ETCCDI proveen una base teórica común de modo que pueden ser calculados consistentemente en diferentes regiones del planeta para luego comparar o integrar los resultados de diversas regiones. La Tabla 2.1 muestra los índices del ETCCDI y su descripción.

**Tabla 2.1. Índices climáticos definidos por el ETCCDI, donde TN es la temperatura mínima, TX la temperatura máxima, TG la temperatura media y PRCP la precipitación máxima en 24 horas.**

ID	Nombre del indicador	Definición	Unidad
FD0	Frost days (Días de heladas)	Número de días en un año cuando $TN < 0^{\circ}C$	Días
SU25	Summer days (Días de verano)	Número de días en un año cuando $TX > 25^{\circ}C$	Días
ID0	Ice days (Días de hielo)	Número de días en un año cuando $TX < 0^{\circ}C$	Días
TR20	Tropical nights (Noches tropicales)	Número de días en un año cuando $TN > 20^{\circ}C$	Días
GSL	Growing season length (Duración de la)	Anual (1 <sup>o</sup> Ene a 31 Dic en HN, 1 <sup>o</sup> Julio a 30 Junio en HS) cuenta entre el primer periodo de por lo	Días

ID	Nombre del indicador	Definición	Unidad
	estación de cultivo)	menos 6 días con TG>5°C y primer periodo después de Julio 1 (Enero 1 en HS) de 6 días con TG<5°C	
<b>TXx</b>	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
<b>TNx</b>	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
<b>TXn</b>	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
<b>TNn</b>	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
<b>TN10p</b>	Cool nights (noches frías)	Porcentaje de días cuando TN<10th percentil	%
<b>TX10p</b>	Cool days (Días fríos)	Porcentaje de días cuando TX<10th percentil	%
<b>TN90p</b>	Warm nights (Noches cálidas)	Porcentaje de días cuando TN>90th percentil	%
<b>TX90p</b>	Warm days (días calurosos)	Porcentaje de días cuando TX>90th percentil	%
<b>WSDI</b>	Warm spell duration indicator (indicador de la duración de periodos cálidos)	Número de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX>90th percentil	Días
<b>CSDI</b>	Cold spell duration indicator (indicador de la duración de periodos fríos)	Número de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN<10th percentil	Días
<b>DTR</b>	Diurnal temperature range (rango diurno de temperatura)	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C
<b>Rx1day</b>	Max 1-day precipitation amount (máximo de PRCP en un día)	Máximo anual de PRCP registrada en un día	mm
<b>Rx5day</b>	Max 5-day amount (máximo de PRCP en 5 días)	Máximo anual de la PRCP registrada en 5 días consecutivos	mm
<b>SDII</b>	Simple daily intensity index (índice simple de intensidad diaria)	Precipitación anual total dividida por el número de días húmedos (definidos por PRCP>=1.0 mm) en un año	mm/día
<b>R10</b>	Number of heavy precipitation days (número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que PRCP>=10 mm	Días
<b>R20</b>	Number of very heavy precipitation days (número de días con	Número de días en un año en que PRCP>=20 mm	Días

ID	Nombre del indicador	Definición	Unidad
	precipitación muy intensa)		
<b>Rnn</b>	Number of days above nn mm (número de días sobre nn mm)	Número de días en un año en que PRCP>=nn mm, nn es un parámetro definido por el usuario	Días
<b>CDD</b>	Consecutive dry days (días secos consecutivos)	Número máximo de días consecutivos con RR<1 mm	Días
<b>CWD</b>	Consecutive wet days (días húmedos consecutivos)	Número máximo de días consecutivo con RR>=1 mm	Días
<b>R95p</b>	Very wet days (días muy húmedos)	Precipitación anual total en que RR>95 percentil	mm
<b>R99p</b>	Extremely wet days (días extremadamente húmedos)	Precipitación anual total en que RR>99 percentil	mm
<b>PRCPTOT</b>	Annual total wet-day precipitation (precipitación anual total en los días húmedos)	Precipitación anual total en los días húmedos (RR>=1 mm)	mm

A continuación se enlistan y definen los 27 índices básicos del ETCCDI de acuerdo con lo documentado en la página electrónica [http://cccma.seos.uvic.ca/etccdi/list\\_27\\_indices.shtml](http://cccma.seos.uvic.ca/etccdi/list_27_indices.shtml) (ETCCDI/CRD).

### 1. FDo. Días con helada (Frost Days).

Sea  $Tn_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el número de días cuando:

$$Tn_{ij} < 0^{\circ}\text{C} \quad (2.1)$$

### 2. SU25. Días de verano (Summer days).

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el día  $i$  periodo  $j$ . Contar el número de días cuando:

$$Tx_{ij} > 25^{\circ}\text{C} \quad (2.2)$$

### 3. IDo. Días con hielo (Icing Days).

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el número de días cuando:

$$Tx_{ij} < 0^{\circ}C \quad (2.3)$$

#### 4. TR20. Noches tropicales (Tropical nights).

Sea  $Tn_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el número de días cuando:

$$Tn_{ij} > 20^{\circ}C \quad (2.4)$$

#### 5. GSL. Estación de crecimiento (Growing Season Length).

Sea  $T_{ij}$  la temperatura media en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el número de días entre la primera ocurrencia de por lo menos 6 días consecutivos con  $T_{ij} > 5^{\circ}C$ , y la primera ocurrencia después de 1 Julio (1 Enero en el Hemisferio Sur) de por lo menos 6 días consecutivos con:  $T_{ij} < 5^{\circ}C$ .

La temperatura media puede obtenerse mediante la función (2.5):

$$T_{med} = T_{min} + y(T_{max} - t_{min}) \quad (2.5)$$

Donde  $y$  es una función que modela la temperatura con rápidos incrementos y decrementos lentos;  $a, b, c$  son parámetros que dependen de su posición geográfica y temporada en el año.

$$y = at^b \exp(ct) \quad (2.6)$$

$$a = 0.096$$

$$b = 2.422$$

$$c = -0.339$$

#### 6. TXx. Temperatura máxima extrema.

Sea  $Tx_{kj}$  la temperatura máxima diaria en el mes  $k$ , periodo  $j$ . La máxima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXx_{kj} = \max(Tx_{kj}) \quad (2.7)$$

#### 7. TNx. Temperatura mínima más alta.

Sea  $Tn_{kj}$  la temperatura mínima diaria en el mes  $k$ , periodo  $j$ . La máxima temperatura mínima diaria cada mes es entonces:

$$TNx_{kj} = \max(Tn_{kj}) \quad (2.8)$$

#### 8. TXn. Temperatura máxima más baja.

Sea  $Tx_{kj}$  la temperatura máxima diaria en el mes  $k$ , periodo  $j$ . La mínima temperatura máxima diaria cada mes es entonces:

$$TXn_{kj} = \min(Tx_{kj}) \quad (2.9)$$

**9. T<sub>Nn</sub>. Temperatura mínima extrema.**

Sea  $Tn_{kj}$  la temperatura mínima diaria en el mes  $k$ , periodo  $j$ . La mínima temperatura mínima diaria en cada mes es entonces:

$$TNx_{kj} = \min(Tn_{kj}) \quad (2.10)$$

**10. T<sub>n10p</sub>. Frecuencia de noches frías.**

Sea  $Tn_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $Tn10p$  el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tn_{ij} < Tn10p \quad (2.11)$$

**11. T<sub>x10p</sub>. Frecuencia de días frescos.**

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $Tx10p$  el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tx_{ij} < Tx10p \quad (2.12)$$

**12. T<sub>n90p</sub>. Frecuencia de noches cálidas.**

Sea  $Tn_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $Tn90p$  el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tn_{ij} > Tn90p \quad (2.13)$$

**13. T<sub>x90p</sub>. Frecuencia de días calurosos.**

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $Tx90p$  el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5-días. El porcentaje del tiempo es determinado, donde:

$$Tx_{ij} > Tx90p \quad (2.14)$$

**14. WSDI. Duración de los periodos cálidos (Warm Spells Duration Index).**

Sea  $Tx_{ij}$  la temperatura máxima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $Tx en 90$  el día calendario del percentil 90 centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tx_{ij} > Tx en 90 \quad (2.15)$$

**15. CSDI. Duración de los periodos fríos (Cold Spells Duration Index).**

Sea  $Tn_{ij}$  la temperatura mínima diaria en el día  $i$  en el periodo  $j$  y sea  $Tn$  en 10 el día calendario del percentil 10 centrado en una ventana de 5-días. Entonces el número de días por periodo es sumado donde, en intervalos de por lo menos 6 días consecutivos:

$$Tn_{ij} < Tn \text{ en } 10 \quad (2.16)$$

**16. DTR. Rango diurno de temperatura (Diurnal Temperature Range).**

Sean  $Tx_{ij}$  y  $Tn_{ij}$  las temperaturas diarias máximas y mínimas respectivamente en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Si  $I$  representa el número de días en  $j$  entonces:

$$DTR = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I} \quad (2.17)$$

**17. Rx1day. Precipitación máxima en un día.**

Sea  $RR_{ij}$  el total diario de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 1-día para el periodo  $j$  son:

$$Rx1day_j = \max(RR_{ij}) \quad (2.18)$$

**18. Rx5day. Precipitación máxima en cinco días.**

Sea  $RR_{kj}$  la cantidad de precipitación para el intervalo de cinco días terminando en  $k$ , periodo  $j$ . Entonces los valores máximos de 5-días para el periodo  $j$  son:

$$Rx5day_j = \max(RR_{kj}) \quad (2.19)$$

**19. SDII. Índice simple de intensidad diaria (Simple Daily Intensity Index).**

Sea  $RR_{wj}$  la cantidad de precipitación en días húmedos,  $w(RR \geq 1mm)$  en el periodo  $j$ . Si  $W$  representa el número de días húmedos en  $j$ , entonces:

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad (2.20)$$

**20. R10. Días con lluvia mayor a 10mm.**

Sea  $RR_{ij}$  la cantidad de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 10mm \quad (2.21)$$

**21. R20. Días con lluvia mayor a 20mm.**

Sea  $RR_{ij}$  la cantidad de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq 20mm \quad (2.22)$$

**22. Rnn. Días con lluvia mayor a nn mm.**

Sea  $RR_{ij}$  la cantidad de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Si  $nn$  representa cualquier valor razonable de precipitación diaria entonces, contar el número de días donde:

$$RR_{ij} \geq nn \text{ mm} \quad (2.23)$$

**23. CDD. Días secos consecutivos (Consecutive Dry Days).**

Sea  $RR_{ij}$  la cantidad de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el mayor número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} < 1mm \quad (2.24)$$

**24. CWD. Días húmedos consecutivos (Consecutive Wet Days).**

Sea  $RR_{ij}$  la cantidad de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Contar el mayor número de días consecutivos donde:

$$RR_{ij} \geq 1mm \quad (2.25)$$

**25. R95pTOT. Días muy húmedos.**

Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo  $w(RR \geq 1mm)$  en el periodo  $j$  y sea  $RR_{wn}95$  el percentil 95 de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si  $W$  representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R95p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \quad \text{donde } RR_{wj} > RR_{wn}95 \quad (2.26)$$

**26. R99p. Días extremadamente húmedos.**

Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en un día húmedo  $w(RR \geq 1mm)$  en el periodo  $j$  y sea  $RR_{wn}99$  el percentil 99 de precipitación en los días húmedos en el periodo 1961-1990. Si  $W$  representa el número de días húmedos en el periodo, entonces:

$$R99p_j = \sum_{w=1}^W RR_{wj} \quad \text{donde } RR_{wj} > RR_{wn}99 \quad (2.27)$$

## 27. PRCPTOT. Precipitación Total

Sea  $RR_{wj}$  la cantidad diaria de precipitación en el día  $i$  en el periodo  $j$ . Si  $I$  representa el número de días en  $j$ , entonces:

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (2.28)$$

### 2.6.2 Procedimiento para calcular los índices de cambio climático.

El procedimiento tiene las siguientes componentes: primero se requiere seleccionar los datos diarios (de lluvia, temperatura máxima y temperatura mínima) a partir de los cuales serán calculados los índices, de manera que sólo las series de observaciones más completas, continuas y libres de errores sean analizadas; una vez que se ha seleccionado un conjunto de datos adecuado para el análisis, se requiere que éste sea sometido a un minucioso procedimiento de control de calidad, sometiendo valores poco comunes a procedimientos estadísticos de verificación y de escrutinio experto con base en conocimientos de la climatología física de cada región; una vez que los datos han pasado el proceso de control de calidad, éstos deben ser sujetos a una prueba y análisis de homogeneidad, dejando para el análisis sólo las series de datos homogéneas (es decir, que contienen información únicamente debida a las variaciones del clima y están libres de alteraciones en las mediciones a causa de cambios en la ubicación de la estación, cambios de instrumentos o cambios en el entorno); las series homogéneas son entonces utilizadas para calcular los índices de cambio climático de cada estación individual; para posteriormente integrar la serie regional de la zona de estudio y analizar las tendencias. A continuación se discute cada una de estas etapas.

#### 2.6.2.1 Selección de datos.

Los análisis de cambios en extremos y el cálculo exitoso de los índices de cambio climático dependen de la disponibilidad y calidad de los datos climáticos en la región de interés. Los datos climáticos son los registros de las condiciones climáticas observadas, medidas en localidades y momentos específicos con algún instrumento (termómetros, pluviómetros, barómetros), bajo un conjunto de procedimientos estándares. Una base de datos climática debe contener información sobre las variables del clima en los sitios de observación y también información sobre otros factores (ambiente de la estación de observación, características de los instrumentos, procedimientos de registro y cualquier cambio relacionado).

La selección de datos climáticos es necesaria como requisito previo al cálculo de los índices debido que las series de tiempo de los datos instrumentales del clima no son perfectas y pueden contener registros en los que las mediciones no se reportaron, comúnmente denominados “datos faltantes”. Al respecto, cabe mencionar que varias técnicas de análisis requieren que las series de datos estén completas, por lo que en algunos casos, los usuarios de los datos intentan ‘rellenar’ los faltantes. Contrariamente a resultar favorable, el relleno de los datos aumenta la incertidumbre de los análisis, pues al relleno de los valores puntuales en las series se crea artificialmente un comportamiento del clima que en realidad nunca sucedió. En el caso de los índices de cambio climático será requisito seleccionar las series más completas y continuas; permitiéndose que las series seleccionadas tengan un número muy pequeño de datos faltantes. Evidentemente, no todas las observaciones disponibles serán aptas para usarse en el cálculo de los índices de cambio climático, generalmente, el número de datos adecuados se reduce a un pequeño subconjunto del total disponible.

En años recientes, la infraestructura de observación y monitoreo del sistema climático en el mundo se ha visto beneficiada por el progreso en telecomunicaciones, automatización y modernización de los instrumentos de medición. Tales desarrollos tecnológicos han resultado en propuestas para implementar nuevas redes de observación por parte de los sectores con interés en el clima, sin embargo, para la detección del cambio climático, los aspectos más relevantes de los datos instrumentales son la longitud y continuidad de los registros, la homogeneidad de los datos a través del tiempo y el manejo adecuado de la incertidumbre inherente a los procesos de medición.

En lo concerniente a la cobertura geográfica de las mediciones, uno de los requisitos más importantes para la selección de estaciones es que la distribución espacial de los puntos de observación sea uniforme y suficientemente densa, de modo que el clima de la región de interés se “capture” con la mayor precisión posible. En consecuencia, para fines de monitoreo del cambio climático, conservar los puntos de medición con registros más antiguos y asegurar su continuidad reviste gran importancia. El rescate de datos instrumentales y el mantenimiento de la redes de medición son tareas que deben ser permanentes y consideradas prioritarias para el entendimiento del clima regional.

El Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua tiene la misión de resguardar y mantener las observaciones del estado del tiempo y del clima en México. Las estaciones de observación atmosférica con registros de mayor longitud son probablemente los observatorios meteorológicos sinópticos, aunque su cobertura espacial es relativamente baja en densidad. Otra importante red de observación en el país es la red de estaciones convencionales de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la que con densidad geográfica mayor que la red de observatorios, es probablemente, la más adecuada para estudiar los cambios del clima en la escala de las entidades federativas; esta red cuenta con información en la mayor parte de sus estaciones durante al menos las últimas cinco décadas.

Aunque en la red de estaciones climatológicas convencionales se ha observado una fuerte reducción en el número de estaciones en operación en los años recientes, se considera factible utilizar estos datos instrumentales para realizar estudios de detección de los cambios en el clima regional, salvo en los casos en que localidades específicas no cuenten con suficientes observaciones disponibles. Esto no omite que la necesidad de mejorar los sistemas de monitoreo y observación del clima a través de mayores apoyos en todos los niveles de gobierno y en los sectores beneficiados siga vigente.

Con el fin de facilitar y optimizar el cálculo de los índices de cambio climático, es recomendable que las estaciones seleccionadas para ser analizadas cumplan los siguientes requisitos:

- Las estaciones seleccionadas deben cubrir la mayor parte de la región de interés.
- La distribución geográfica de las estaciones debe estar espacialmente equilibrada (evitar tener muchas estaciones en una parte de la región y muy pocas en otra).
- Las estaciones seleccionadas deben tener el mayor número posible de años con datos completos (observados únicamente, sin estimaciones ni interpolaciones).
- Las estaciones deben seleccionarse para un periodo de tiempo común en el que el porcentaje de datos existentes sea lo más grande posible.

Estas características deben verificarse en cada una de las variables necesarias para calcular los índices: precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, ya que el número de datos disponibles puede cambiar de una variable a otra.

### ***2.6.2.2 Análisis y control de calidad.***

Un segundo problema adicional al de los datos faltantes, consiste en que en los datos observados aparezcan valores extraños que excedan o disminuyan exageradamente el rango de variación habitual de la variable que se quiere analizar. Estos valores poco comunes, etiquetados como sujetos de verificación, pueden ser errores en la serie de datos (de origen humano, errores realizados durante la digitación de los datos, como cuando se ha digitado 350 en vez de 35.0; errores sistemáticos por mala calibración o reemplazo de los instrumentos de medición; o debidos a algún cambio de ubicación de la estación de observación; cambio del personal que realiza las observaciones, etc.) aunque en algunos casos pueden ser registros reales de situaciones poco probables, es decir, de eventos extremos. Los casos más frecuentes de valores extraordinarios en las variables climáticas que corresponden a reportes de eventos extremos que realmente sucedieron, son casi siempre -aunque son los únicos-, casos de fuertes descensos de temperatura relacionados con el paso de frentes fríos o a valores altísimos de precipitación relacionados con la incidencia de ciclones tropicales. Sólo un análisis minucioso de cada situación puede determinar si se trata de un evento extremo o de un error en los datos.

La experiencia en el análisis de extremos en México ha mostrado que para la aceptación o rechazo de valores como parte del proceso de control de calidad, algunos criterios de validación simples como las comparaciones con la media de largo plazo no son suficientes, sino que se requiere de criterios estadísticos más robustos, análisis en el contexto del entorno físico y de la situación sinóptica, e incluso del conocimiento de expertos locales.

En la literatura puede encontrarse evidencia de métodos complejos de control de calidad de datos meteorológicos, desde los que se basan en el uso de percentiles y análisis de funciones de densidad de probabilidad hasta los que incorporan técnicas multivariadas y multidimensionales, o incluso los que incorporan mediciones de radar y satélite meteorológicos para validar la ocurrencia de eventos extremos.

Algunas recomendaciones para el control de calidad son:

- Verificar los errores lógicos (que la temperatura máxima no sea menor que la mínima, que no existan valores de lluvia menores que cero).
- Verificar la base de datos vs. los registros originales en papel o en el registro del instrumento.
- Marcar como datos por verificar los valores que exceden un límite predeterminado y verificarlos (es común la práctica de utilizar el límite de  $\pm 4$  desviaciones estándar para el caso de la temperatura).
- Realizar una cuidadosa inspección visual de las gráficas de la serie de tiempo.
- En el caso de valores extremos, recurrir a fuentes de información alternas para ver si existe evidencia física que justifique los datos (paso de frentes, impacto de ciclones tropicales o situaciones meteorológicas sinópticas específicas).
- Analizar los datos poco comunes de una fecha en particular en el contexto de las observaciones en fechas adyacentes.
- Comparar las observaciones de la estación con valores en verificación con las observaciones de otras estaciones cercanas en las mismas fechas.
- Consultar información contextual sobre aspectos conocidos de la variabilidad climática regional, tales como las normales climatológicas, anomalías históricas, impactos documentados de El Niño o de otros fenómenos, etc.

### ***2.6.2.3 Evaluación de homogeneidad.***

Una vez que se ha realizado análisis y control de calidad minuciosos en la serie de datos climáticos y que los valores poco comunes han sido verificados o descartados, puede procederse a probar la homogeneidad de la serie de tiempo. La homogeneidad de los datos climáticos a través del tiempo incide directamente en la posibilidad o no de calcular y analizar tendencias. Este aspecto es de especial relevancia al realizar estudios de cambio climático. Varias pruebas de homogeneidad han sido desarrolladas y están disponibles en la literatura científica y la Organización Meteorológica

Mundial ha publicado guías para realizar estudios de homogeneidad de los datos climáticos. Hasta ahora, la mayoría de los análisis de homogeneidad se realizan en la escala mensual y sólo algunos estudios han sido desarrollados en la escala diaria.

Las pruebas para demostrar que una serie de tiempo de una variable climática es homogénea tienen por objeto el garantizar que las variaciones contenidas en las observaciones correspondan únicamente a los procesos climáticos y no a otros factores “artificiales”.

#### **2.6.2.4 Cálculo de los índices.**

En el cálculo de los índices de cambio climático sólo deben utilizarse las series de datos que sean homogéneas. Las series con discontinuidades que hayan sido evaluadas como no homogéneas deberán ser descartadas o bien, sometidas a un cuidadoso procedimiento de homogeneización antes de poder usarse para calcular índices de cambio climático.

Los índices del ETCCDI permiten obtener las señales de cambio climático regional, específicamente en lo referente a los extremos meteorológicos desde el punto de vista climático.

#### **2.6.2.5 Análisis de tendencias.**

En series de tiempo de corta duración como en el caso de México es complicado llegar a conclusiones definitivas en el tema de las tendencias, sin embargo, para algunas aplicaciones puede resultar de utilidad conocer estas características del clima en años recientes.

No debe olvidarse que el hecho de encontrar o no tendencias significativas, es solamente un indicador del comportamiento reciente de las variables climáticas, a lo cual debe sumarse el contexto de la física del clima en la región de estudio. Hay que tener en cuenta que a mayor conocimiento de las variaciones locales del clima, mayor es también el potencial de construir e implementar capacidades adaptativas a la variabilidad y el cambio climático.

## **2.7 Mitigación y adaptación como respuesta al cambio climático.**

Ante la certeza de un calentamiento del sistema climático del planeta y la incertidumbre asociada a los detalles de su ocurrencia y mitigación surge el denominado “imperativo de la adaptación”. Este concepto alude a la necesidad de adaptarse a los cambios en el clima que inevitablemente

ocurrirán durante los siguientes años a causa del tiempo de permanencia en la atmósfera de los gases de invernadero ya emitidos.

Es de interés común evitar llegar a niveles muy altos de riesgo ante el cambio climático y contar con capacidad de adaptación a los cambios del clima que ya están en curso. Entender mejor las implicaciones del cambio climático es una herramienta necesaria para “evitar lo inmanejable y manejar lo inevitable”.

Las variaciones normales del clima impactan positiva o negativamente en la naturaleza y los sectores socioeconómicos. En un clima cambiante, el grado de exposición de los sistemas a las variaciones modificadas del clima puede incrementar significativamente la vulnerabilidad y los niveles de riesgo del presente. La gestión de riesgos relacionados con el clima requiere de enfoques transversales entre ciencias naturales y sociales, y es interdisciplinaria. Al implementarla, tanto científicos como diseñadores de políticas enfrentan retos complejos para incluir las aportaciones provenientes de diversas disciplinas, sectores y capacidades en un proceso de aprendizaje que no es inmediato. Un caso relacionado de particular interés en México ha sido el desarrollo de Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático (INE, 2009).

El hecho de que la mayor parte del calentamiento observado en la última mitad de siglo sea atribuible al aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera, ha dado lugar al surgimiento de la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático (CMNUCC), la adopción (1997) y entrada en vigor (2005) del Protocolo de Kioto y las reuniones anuales de los miembros de la CMNUCC denominadas ‘Conferencias de las Partes’ (e.g. COP15, Copenhague 2009; COP16, Cancún 2010). Todo esto con el objetivo de establecer compromisos internacionales de cooperación en mitigación de las emisiones de origen humano de los gases de efecto invernadero y de implementar estrategias de adaptación a los impactos del cambio climático, ya que mientras la mitigación es imprescindible para evitar llegar a niveles catastróficos de riesgo relacionados con el cambio climático, la adaptación a los cambios del clima que son ya inevitables es necesaria de instrumentar en el corto plazo. La implementación exitosa de estrategias de adaptación depende fuertemente del entendimiento del cambio climático y de sus implicaciones en las diversas regiones donde habitamos. Un elemento clave para la detección precisa y oportuna de los cambios en el clima regional es el estudio minucioso del clima observado.

En un clima sin cambios, un reto permanente para la sociedad es el aprender cómo adaptarse a la variabilidad climática y minimizar el riesgo de desastres. Este reto se acentúa cuando los rangos de variación normal del clima pueden ser alterados a causa de un cambio del sistema climático originado por forzamientos externos, como es el caso del cambio climático actual.

Una visión integral que incorpora información del clima observado en el presente y sus proyecciones para el futuro, información de la vulnerabilidad de un sistema a las variaciones del clima e información sobre las acciones de prevención y respuesta factibles de implementar, conlleva al fortalecimiento y mejora de las decisiones requeridas para responder adecuadamente a los impactos de la variabilidad y el cambio del clima.

El diseño de políticas de mitigación y estrategias de adaptación ante el cambio climático requiere no sólo de la información de escenarios del clima factible de ocurrir en el futuro ante ciertas condiciones, sino también de la información del clima reciente y de sus cambios observados.

## **3 Aplicaciones. Estudio del Sistema Grijalva**

El objetivo del presente trabajo es analizar los efectos que pudieran ejercer la presencia de embalses sobre las variables climatológicas: precipitación máxima y acumulada anual, temperatura máxima anual y finalmente la evaporación.

El sitio a analizar es el Sistema Grijalva debido a que este sistema de presas es el más importante del país desde el punto de vista del aprovechamiento hidroeléctrico.

### **3.1 Descripción del sitio de estudio**

#### **3.1.1 Ubicación**

La Cuenca del río Grijalva-Usumacinta se localiza entre los meridianos 91°30' y 94° 30' de longitud Oeste y los paralelos 14° 30' y 19° de latitud Norte. Pertenece a la Región Hidrológica no. 30 según la división hidrológica realizada por la CONAGUA-INE-INEGI en el 2007. Ver figura 4.1.

El río Grijalva es el segundo río más caudaloso del país, tiene un área de cuenca aproximada de 58,000 km<sup>2</sup>, el cual nace en la República de Guatemala y desemboca en el Golfo de México, en el estado de Tabasco, después de haber cruzado el estado de Chiapas. El río Grijalva es un río continuo, que tiene su origen en la sierra guatemalteca de los Cuchumatanes. Resulta de la unión de dos corrientes importantes, el río San Miguel y el río San Gregorio. El primero está formado por la confluencia cerca de Chicomuselo, Chiapas, de los ríos Yahuayita y Zacualpa, que bajan de la Sierra Madre, por territorio mexicano, a los cuales se une el río Tapizalá, que se origina en territorio de Guatemala, donde se le denomina río Cuilco, y cruza la frontera por Amatenango, Chiapas. El segundo, el río San Gregorio, se forma por la confluencia aproximadamente 3 kilómetros al oeste de la frontera, de los ríos Lagartero, Nentón, Azul y Selegua, llamado también Rincón Tigre, provenientes de Guatemala, así como del río Tzimal, que se le une por su margen derecha. (González Villareal, 2009)

En territorio mexicano, el cauce sigue una dirección sureste-noroeste, con sentido hacia el noroeste, a lo largo de la Depresión Central de Chiapas. Posteriormente atraviesa la Meseta Central por el Cañón del Sumidero, recorre las sierras del norte y desciende en la llanura tabasqueña hasta unirse al río Usumacinta, desembocando juntos en el Golfo de México (figura 4.2.).

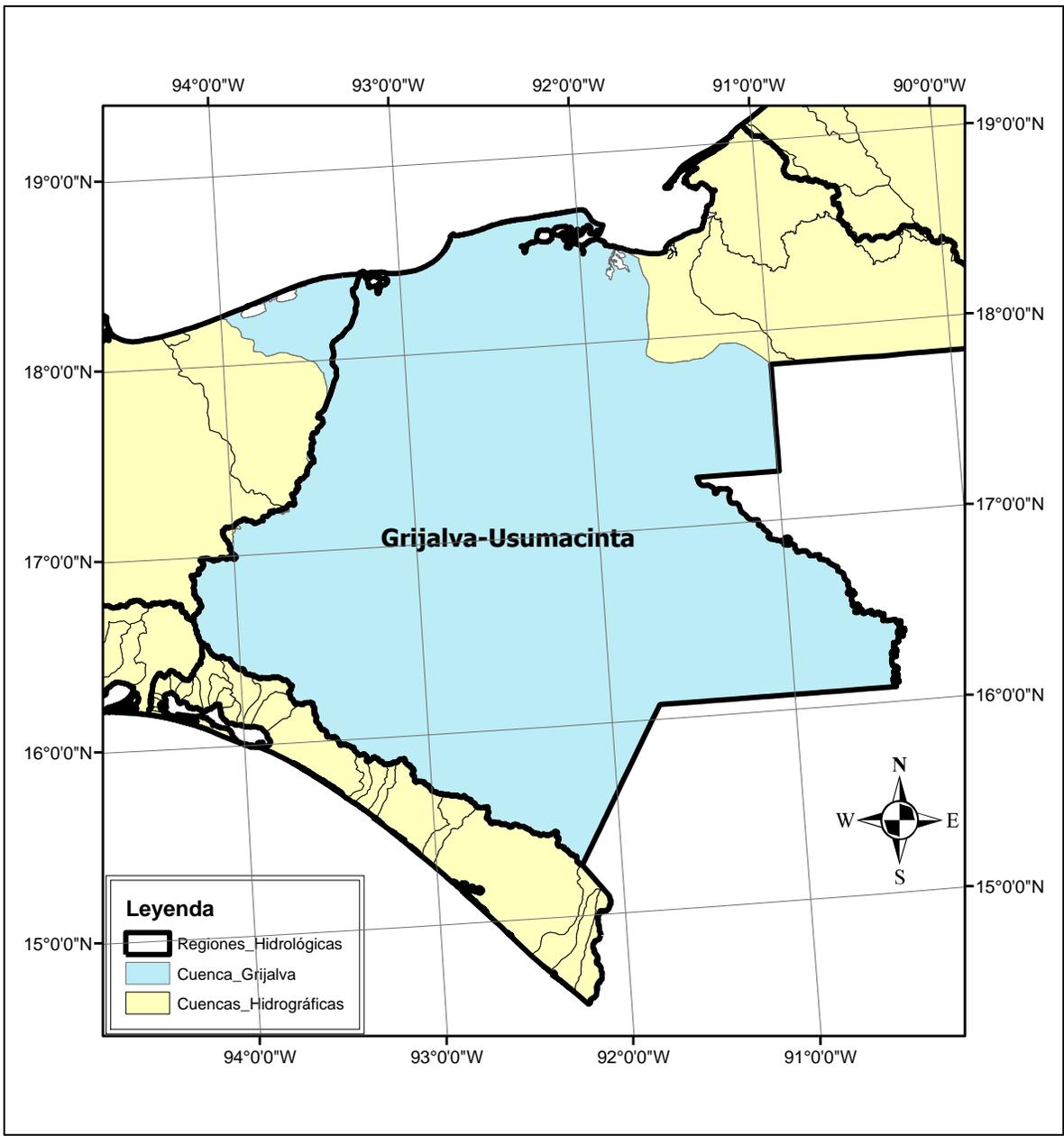


Figura 3.1. Ubicación de la cuenca Grijalva-Usumacinta

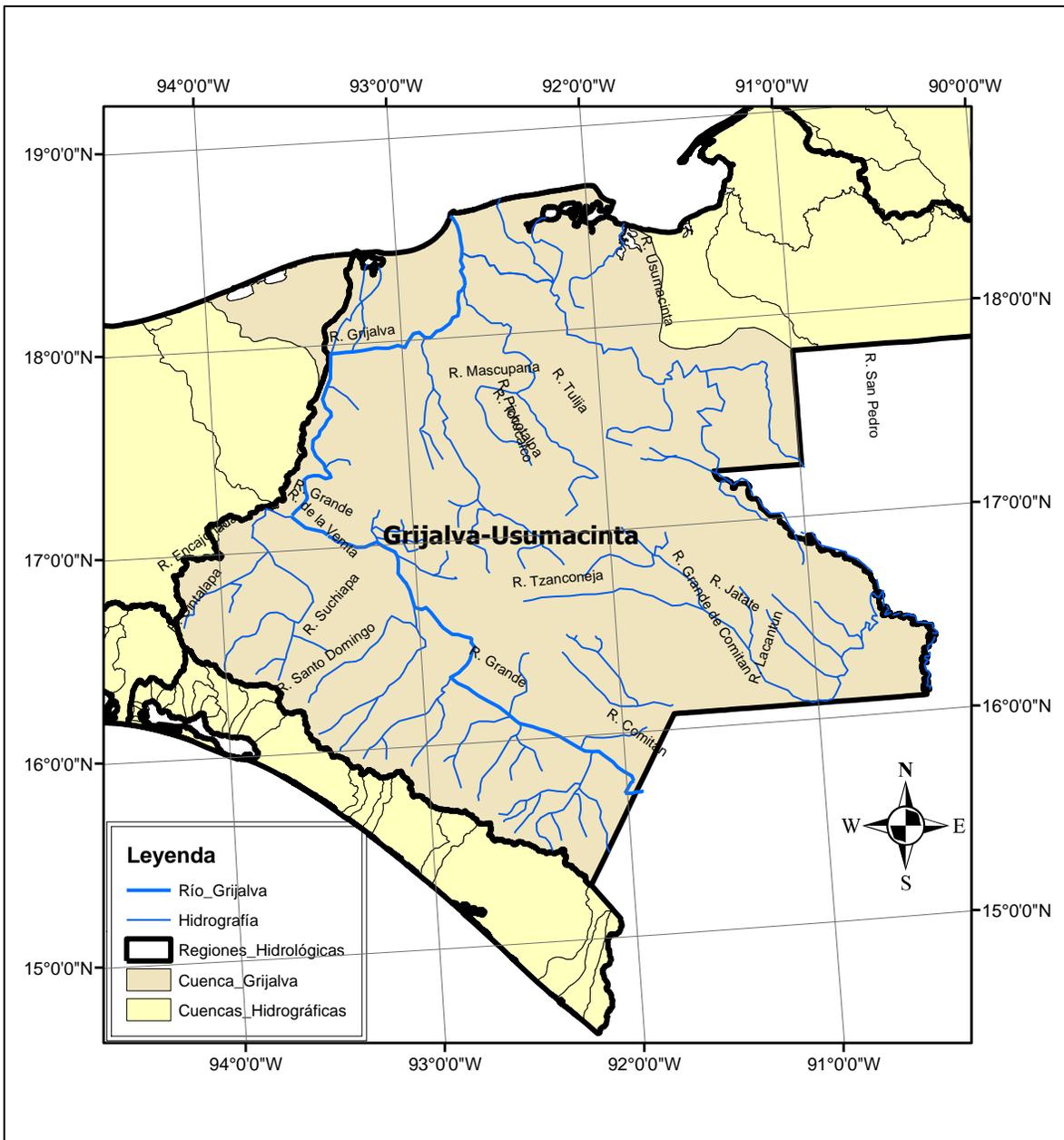


Figura 3.2. Hidrografía de la Cuenca Grijalva-Usumacinta

### 3.1.2 Fisiografía

Un complejo fisiográfico integrado por la Sierra Madre de Chiapas o Macizo Cristalino y Granítico de Chiapas al sur; la Sierra Norte de Chiapas al centro; los suaves lomeríos de la sierra de la Lacandonia y las Sierra Bajas del Petén guatemalteco al este y las llanuras costeras del Golfo al norte, integran un variado mosaico de paisajes terrestres que descienden desde alturas superiores

a los 4,000 msnm hasta el nivel del mar en el Golfo de México, favoreciendo la formación de ricos ecosistemas terrestres, costeros y marinos.

La Sierra Madre del Sur constituye el parteaguas entre la vertiente del Pacífico y del Golfo. La Meseta central o Altiplanicie se localiza en la parte central de Chiapas. Ella forma el parteaguas entre las cuencas del Grijalva y el Usumacinta. Se distinguen tres regiones con grandes mesetas: Cuxtepeques y Comitán, con alturas medias de 1,600 msnm; Ixtapa, con 1,000 msnm y Zinacantán y San Cristóbal de las Casas, con altitudes de 2,100 msnm. La depresión central de Chiapas presenta altitudes en el sureste hasta de 700 msnm descendiendo hacia el noroeste a 500 msnm. El relieve lo constituye una meseta asociada con cañadas, que da lugar a valles amplios como el del Alto Grijalva. Las partes altas se encuentran cubiertas por una vegetación de coníferas, pinos y encinos, mientras que la selva tropical predomina en sus elevaciones medias y bajas. Las Sierras del Norte ocupan una extensa porción del estado de Chiapas y una parte del estado de Tabasco. Las altas precipitaciones (superiores a los 4,000 mm al año) y su declive hacia el Golfo dan lugar a la formación de extensos depósitos estructurales que han recibido sedimentos desde fines del Paleozoico o principios del Mesozoico. Hasta hace muy pocos años sus cimas estaban cubiertas por extensos bosques de pino y encino. En sus partes bajas se encuentran selvas tropicales muy perturbadas. Remata hacia el norte la Llanura costera del Golfo, de topografía plana, sujeta a una intensa erosión regresiva, que forma una amplia llanura aluvial y de barrera. (Toledo, 2003)

### 3.1.3 Clima

En la zona de estudio predomina el clima cálido subhúmedo y húmedo. La figura 4.3 muestra los diversos climas presentes en el sitio en estudio y el cuadro 4.1 muestra la descripción de cada clima. (CONABIO)

**Cuadro 3.1. Climas presentes en la Cuenca Grijalva-Usumacinta. Fuente CONABIO**

CLAVE	TIPO DE CLIMA
(A)C(fm)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frio menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco mayor a 40 mm; lluvias entre verano e invierno y porcentaje de lluvia invernal menor al 18% del total anual.
(A)C(m)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frio menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C. Lluvias de verano, precipitación del mes mas seco mayor de 40 mm; porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
(A)C(m)(f)	Semicálido húmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frio menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C. Con precipitación anual mayor de 500 mm y precipitación del mes mas seco mayor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
(A)C(w1)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes mas frio menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
(A)C(w2)	Semicálido subhúmedo del grupo C, temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes

CLAVE	TIPO DE CLIMA
	mas frio menor de 18°C, temperatura del mes mas caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes mas seco menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>A(f)</b>	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual.
<b>Am</b>	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Precipitación del mes mas seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>Am(f)</b>	Cálido húmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Precipitación del mes mas seco menor de 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
<b>Aw1</b>	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Precipitación del mes mas seco menor de 60 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>Aw2</b>	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Precipitación del mes mas seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>Aw2(x')</b>	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Precipitación del mes mas seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
<b>Awo</b>	Cálido subhúmedo, temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Precipitación del mes mas seco entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>BS1(h')w</b>	Semiárido cálido, temperatura media anual mayor de 22°C, temperatura del mes mas frio mayor de 18°C. Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>C(f)</b>	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes mas seco mayor de 40 mm; lluvias todo el año y porcentaje de lluvia invernal mayor al 18% del total anual.
<b>C(m)</b>	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>C(m)(f)</b>	Templado, húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
<b>C(w1)</b>	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.
<b>C(w2)</b>	Templado, subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C y temperatura del mes mas caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.
<b>Cb'(m)(f)</b>	Semifrío, húmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C, temperatura del mes mas caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal mayor al 10.2% del total anual.
<b>Cb'(w2)</b>	Semifrío, subhúmedo con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes mas frio entre -3°C y 18°C, temperatura del mes mas caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes mas seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

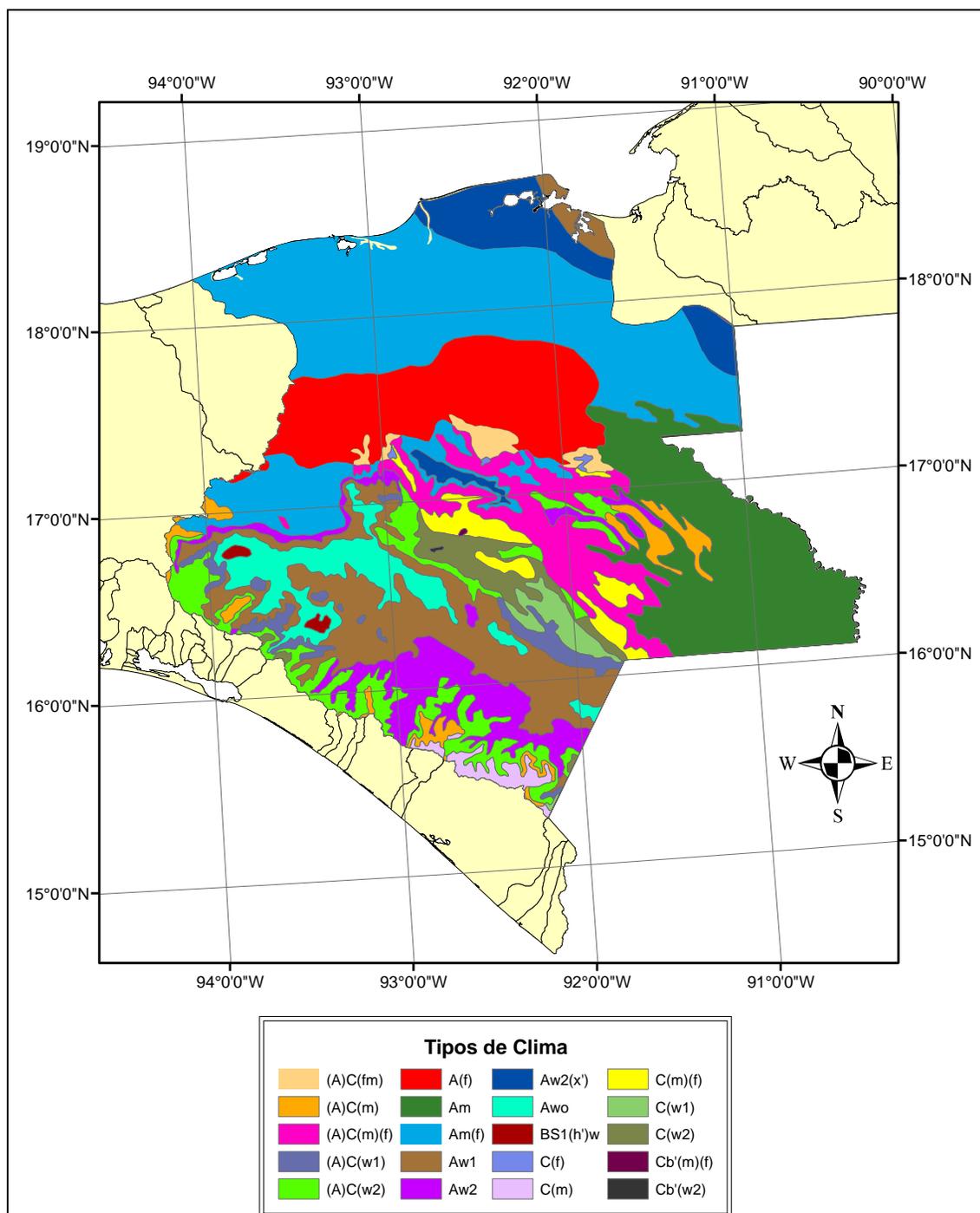


Figura 3.3. Tipos de climas en la cuenca Grijalva-Usumacinta. Fuente CONABIO

### 3.1.4 Sistema Hidroeléctrico

En 1958 la Comisión Federal de Electricidad (CFE), inició estudios para determinar el potencial hidroeléctrico de la cuenca del Río Grijalva y con ello aprovechar integralmente sus recursos, los resultados de dichos estudios junto con los de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH), hoy Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), permitieron la formulación del Plan Integral del Río Grijalva por parte de ambas dependencias. En la actualidad se cuenta con un sistema de presas que operan en cascada o en serie formado por La Angostura (Belisario Domínguez), construida en el periodo de 1969 a 1975, Chicoasén (M. Moreno Torres), construida en el periodo de 1977 a 1983, Malpaso (Netzahualcóyotl), realizada de 1959 a 1964 y Peñitas (Ángel Albino Corzo) cuya construcción finalizó en 1987. Las primeras tres presas cambiaron de manera drástica el régimen del río, inundaron grandes áreas formando lagos artificiales e hicieron al río menos caudaloso y de mayor tirante.

La evaluación económica de los proyectos de presas grandes acepta normalmente un periodo de vida útil de las presas de 100 años, el cual es válido para las estructuras principales, pero es menor para las componentes electromecánicas y de control. La vida útil de las presas depende del mantenimiento que se le dé a la infraestructura y en ocasiones, también se ve reducida por el depósito de sedimentos o azolves.

La figura 4.4 ilustra el perfil del sistema hidroeléctrico del Grijalva. En las presas se indica el nivel de aguas máximas ordinarias o de operación, el cual es el máximo nivel del agua al que puede operar la presa para satisfacer las demandas (NAMO).

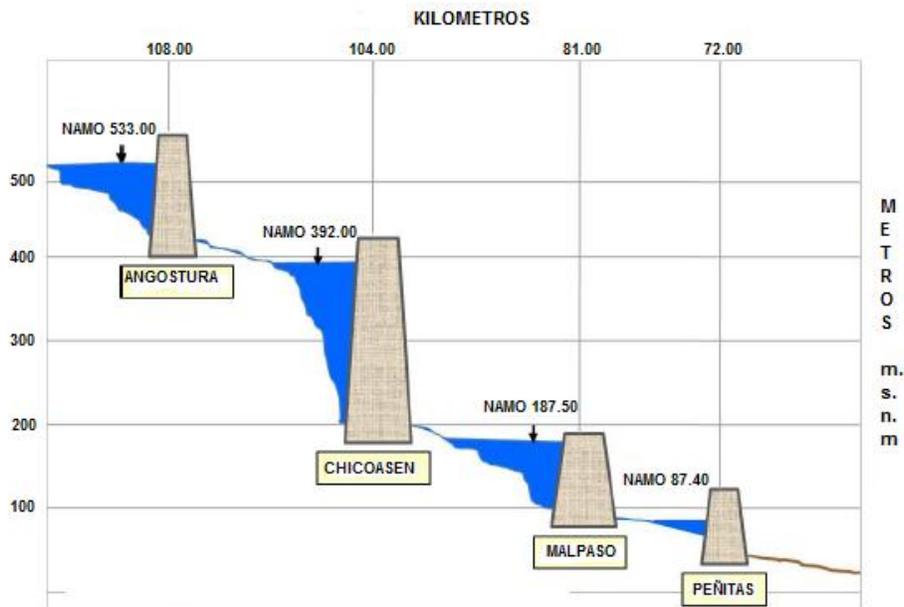


Figura 3.4. Perfil del sistema hidroeléctrico del Grijalva. Fuente INE-Instituto de Ingeniería UNAM

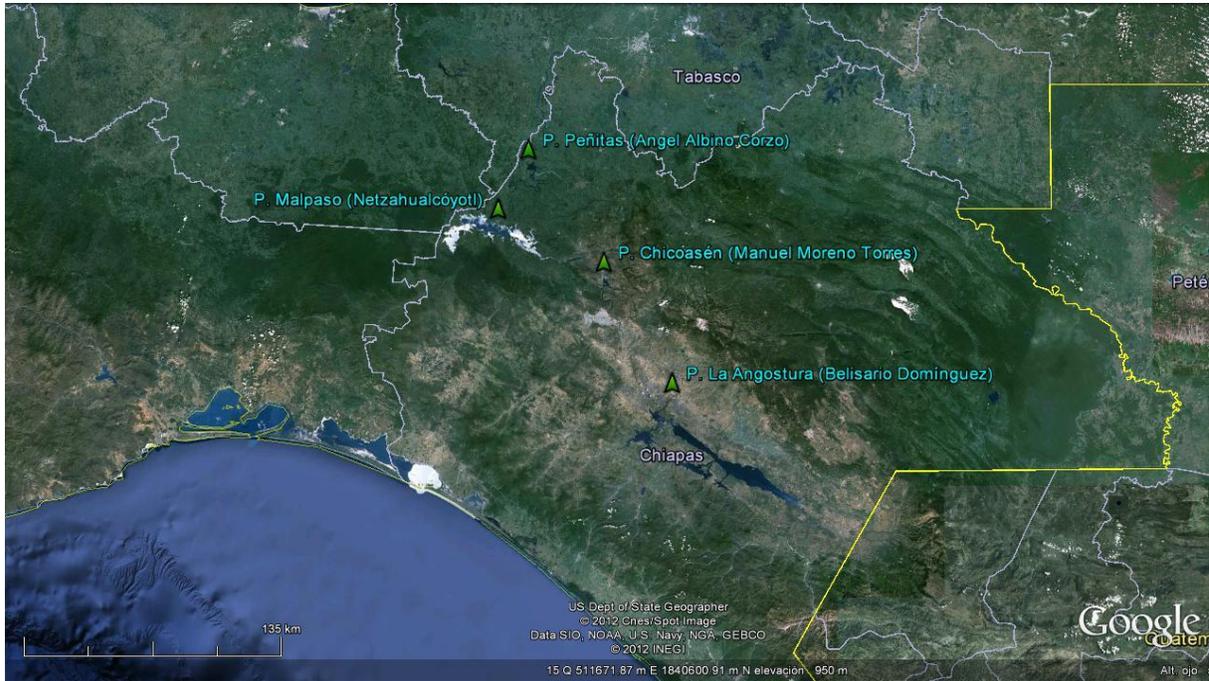


Figura 3.5. Ubicación de las presas. Fuente Google Earth

## 3.2 Metodología

### 3.2.1 Información climática

Se recopiló información de precipitaciones diarias, temperaturas máximas diarias y evaporaciones diarias de estaciones climatológicas contenidas en la base de datos CLICOM (SMN). La selección de estaciones se hizo considerando una distancia de 150 km a partir de la ubicación de cada presa del sistema, y de estas solo se seleccionaron aquellas con un periodo de registro mayor a treinta años. A continuación se presenta una lista de las estaciones climáticas:

Cuadro 3.2. Estaciones localizadas a una distancia de 150 km a partir de la ubicación de las presas. Fuente CLICOM

Clave	Nombre	Estado	Cuenca	Altura [msnm]	Longitud	Latitud
7002	Abelardo L. Rodríguez	Chiapas	Rio Lacantun	1775.00	-92.24	16.38
7003	Acala	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	420.00	-92.80	16.55
7006	Altamirano (SMN)	Chiapas	Rio Lacantun	1240.00	-92.04	16.74
7007	Amatenango del Valle	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	1750.00	-92.48	16.55
7009	Aquespala	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	617.00	-91.92	15.79
7012	Finca Argovia	Chiapas	Rio Suchiate Y Otros	620.00	-92.30	15.15
7014	Belisario Domínguez I	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	660.00	-92.36	15.31
7015	Bochil	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	1200.00	-92.89	16.99
7021	Catarinitas	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	650.00	-92.48	15.90
7030	San Juan Chamula	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	2300.00	-92.70	16.80
7031	Chanal	Chiapas	Rio Lacantun	2030.00	-92.26	16.66

Clave	Nombre	Estado	Cuenca	Altura [msnm]	Longitud	Latitud
7034	Villa de Chiapilla	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	550.00	-92.72	16.58
7036	Chilil	Chiapas	Rio Lacantun	2266.00	-92.49	16.68
7037	Finca Cuxtepeques	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	1000.00	-92.97	15.73
7038	Despoblado	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	115.00	-92.56	15.20
7039	El Boqueron	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	500.00	-93.16	16.64
7040	El Burrero	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	1230.00	-92.83	16.79
7048	Finca El Triunfo	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	20.00	-92.55	15.35
7050	El Progreso	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	170.00	-93.31	17.05
7053	Escuintla (DGE)	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	92.00	-92.66	15.33
7054	Finca A. Prusia	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	980.00	-92.80	15.72
7055	Finca Chayabe	Chiapas	Rio Lacantun	1596.00	-91.71	16.38
7061	Finca Hamburgo	Chiapas	Rio Suchiate Y Otros	1225.00	-92.33	15.13
7062	Finca La Soledad	Chiapas	Rio Lacantun	900.00	-91.86	16.39
7065	Finca Ocotlán	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	650.00	-93.48	16.37
7067	Frontera Amatenango	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	850.00	-92.11	15.43
7069	Grijalva	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	211.00	-93.13	16.97
7070	Guadalupe Grijalva	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	540.00	-92.16	15.69
7071	Guaquitepec	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	1040.00	-92.29	17.14
7074	Horcones	Chiapas	Rio Pijijiapan Y Otros	130.00	-93.61	15.96
7077	Huixtla	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	85.00	-92.49	15.14
7084	Jesús Chiapas	Chiapas	Rio Pijijiapan Y Otros	120.00	-93.26	15.88
7085	Palenque (DGE)	Chiapas	Rio Usumacinta	200.00	-91.98	17.55
7087	La Cabaña	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	2113.00	-92.63	16.71
7091	La Escalera	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	485.00	-92.99	16.53
7093	La Libertad	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	520.00	-93.66	16.56
7094	La Mesilla	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	560.00	-92.29	16.18
7097	La Providencia	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	670.00	-93.96	16.52
7100	La Unión	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	580.00	-93.80	16.67
7102	Las Flores II	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	480.00	-93.56	16.69
7104	Las Margaritas	Chiapas	Rio Lacantun	1512.00	-91.97	16.31
7112	Malpaso II	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	398.00	-93.58	17.21
7113	Mapastepec	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	70.00	-92.88	15.45
7114	Yaquintela	Chiapas	Rio Usumacinta	650.00	-91.73	16.91
7115	Margaritas	Chiapas	Rio Pijijiapan Y Otros	90.00	-93.06	15.59
7119	Motozintla (SMN)	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	1210.00	-92.24	15.42
7122	Ocosingo	Chiapas	Rio Lacantun	865.00	-92.09	16.91
7123	Ocozocoautla	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	838.00	-93.37	16.75
7125	Oxchuc	Chiapas	Rio Lacantun	1987.00	-92.34	16.79
7129	Pijijiapan	Chiapas	Rio Pijijiapan Y Otros	120.00	-93.21	15.70
7130	Platanar De Arriba	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	39.00	-93.39	17.58
7132	Portaceli	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	780.00	-93.13	16.45
7134	Puente Colgante	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	418.00	-93.03	16.74
7141	Salto De Agua (DGE)	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	22.00	-92.33	17.56
7145	San Francisco	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	540.00	-92.95	15.87
7149	San Pedro Chenalho (DGE)	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	1480.00	-92.63	16.89
7156	Santa María	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	220.00	-93.82	16.94
7160	Simojovel (DGE)	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	700.00	-92.72	17.13
7167	Tapilula	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	780.00	-93.01	17.25
7168	Tonalá (DGE)	Chiapas	Mar Muerto	55.00	-93.74	16.08
7175	Villaflores (SMN)	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	631.00	-93.26	16.23

Clave	Nombre	Estado	Cuenca	Altura [msnm]	Longitud	Latitud
7178	Yamonho	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	280.00	-93.33	17.12
7180	Jaltenango (CFE)	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	580.00	-92.72	15.87
7182	Arriaga (DGE)	Chiapas	Mar Muerto	64.00	-93.91	16.24
7190	La Trinitaria (CFE)	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	1540.00	-91.88	16.12
7201	Tonalá (SMN)	Chiapas	Mar Muerto	17.00	-93.70	16.08
7202	Tuxtla Gutiérrez (DGE)	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	530.00	-93.12	16.75
7203	Venustiano Carranza	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	790.00	-92.56	16.34
7205	Comitán (DGE)	Chiapas	Rio Lacantun	1596.00	-92.12	16.25
7207	Larrainzar	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	1930.00	-92.72	16.89
7208	Novillero	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	150.00	-92.94	15.50
7217	Solosuchiapa	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	165.00	-93.03	17.43
7224	Chicomuselo	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	550.00	-92.27	15.75
7226	Reforma II	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	530.00	-92.67	15.92
7228	Tres Picos	Chiapas	Rio Pijijiapan Y Otros	50.00	-93.55	15.88
7395	Finca La Victoria	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	989.00	-92.42	15.29
27002	Benito Juárez	Tabasco	Rio Usumacinta	10.00	-92.80	18.42
27003	Blasillo	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-93.97	18.05
27007	Centro Exp. W-75	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	12.00	-93.61	17.97
27008	Cárdenas	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	21.00	-93.38	17.98
27009	Comalcalco (DGE)	Tabasco	Rio Usumacinta	10.00	-93.22	18.25
27011	Dos Patrias	Tabasco	Rio Usumacinta	60.00	-92.80	17.61
27015	Francisco Rueda	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	7.00	-93.94	17.84
27019	Jalapa	Tabasco	Rio Usumacinta	10.00	-92.81	17.72
27020	Jalpa de Méndez	Tabasco	Rio Usumacinta	10.00	-93.05	18.17
27024	La Huasteca	Tabasco	Rio Usumacinta	80.00	-92.93	17.52
27030	Macuspana (DGE)	Tabasco	Rio Usumacinta	68.00	-92.61	17.76
27034	Paraíso	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-93.21	18.40
27036	Paso de Cunduacán	Tabasco	Rio Usumacinta	16.00	-93.15	17.97
27037	Pueblo Nuevo	Tabasco	Rio Usumacinta	8.00	-93.88	17.85
27039	Samaria	Tabasco	Rio Usumacinta	19.00	-93.29	17.98
27042	Tapijulapa	Tabasco	Rio Usumacinta	22.00	-92.82	17.47
27044	Teapa (DGE)	Tabasco	Rio Usumacinta	38.00	-92.97	17.57
27048	Tepetitan	Tabasco	Rio Usumacinta	7.00	-92.37	17.82
27049	Tequila	Tabasco	Rio Usumacinta	12.00	-92.81	17.72
27050	Tres Brazos	Tabasco	Rio Usumacinta	30.00	-92.60	18.38
27051	Tulipán	Tabasco	Rio Usumacinta	20.00	-93.35	18.11
27053	Vicente Guerrero	Tabasco	Rio Usumacinta	6.00	-92.88	18.39
27054	Villahermosa (DGE)	Tabasco	Rio Usumacinta	10.00	-92.93	18.00
27060	González	Tabasco	Rio Usumacinta	8.00	-93.77	17.97
27061	Puyacatengo	Tabasco	Rio Usumacinta	86.00	-92.92	17.51
27070	Oxolotan	Tabasco	Rio Usumacinta	36.00	-92.75	17.38
27073	Poblado C-09	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-92.49	18.17
27074	Poblado C-11	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-93.62	18.17
27076	Poblado C-16	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-93.50	18.11
27077	Poblado C-22	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-93.62	18.07
27078	Poblado C-28	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-93.50	18.02
27080	Poblado C-32	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	20.00	-93.50	17.97
30037	Cuitláhuac	Veracruz	Rio Jamapa	5.00	-94.10	17.73
30043	Chinameca	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	40.00	-94.66	18.04
30077	Jaltipan de Morelos	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	46.00	-94.72	17.96

Clave	Nombre	Estado	Cuenca	Altura [msnm]	Longitud	Latitud
30090	Las Perlas	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	22.00	-94.91	17.42
30107	Minatitlán	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	65.00	-94.53	17.98
30167	Tancochapa	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	29.00	-94.09	17.87
30265	Cedillo	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	100.00	-94.61	17.25
30281	La Laguna	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	100.00	-94.51	17.27
30292	Rio Grande	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	150.00	-94.37	17.28

Se eligió un periodo de estudio de 1961 al 2008 de manera que se pudiera tener la mayor cantidad de estaciones posibles con un periodo de registro mayor a 30 años, de esta manera de las 117 estaciones previamente seleccionadas solo se analizaron 58 estaciones (Ver cuadro 4.3, figura 4.6).

**Cuadro 3.3. Estaciones Finales en estudio. Fuente CLICOM**

Clave	Nombre	Estado	Cuenca	Altura [msnm]	Longitud	Latitud
7002	Abelardo L. Rodríguez	Chiapas	Rio Lacantun	1775.00	-92.24	16.38
7006	Altamirano (SMN)	Chiapas	Rio Lacantun	1240.00	-92.04	16.74
7009	Aquespala	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	617.00	-91.92	15.79
7012	Finca Argovia	Chiapas	Rio Suchiate Y Otros	620.00	-92.30	15.15
7015	Bochil	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	1200.00	-92.89	16.99
7030	San Juan Chamula	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	2300.00	-92.70	16.80
7034	Villa de Chiapilla	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	550.00	-92.72	16.58
7037	Finca Cuxtepeques	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	1000.00	-92.97	15.73
7039	El Boqueron	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	500.00	-93.16	16.64
7040	El Burrero	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	1230.00	-92.83	16.79
7050	El Progreso	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	170.00	-93.31	17.05
7053	Escuintla (DGE)	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	92.00	-92.66	15.33
7054	Finca A. Prusia	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	980.00	-92.80	15.72
7061	Finca Hamburgo	Chiapas	Rio Suchiate Y Otros	1225.00	-92.33	15.13
7062	Finca La Soledad	Chiapas	Rio Lacantun	900.00	-91.86	16.39
7065	Finca Ocotlán	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	650.00	-93.48	16.37
7067	Frontera Amatenango	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	850.00	-92.11	15.43
7070	Guadalupe Grijalva	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	540.00	-92.16	15.69
7077	Huixtla	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	85.00	-92.49	15.14
7085	Palenque (DGE)	Chiapas	Rio Usumacinta	200.00	-91.98	17.55
7087	La Cabaña	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	2113.00	-92.63	16.71
7091	La Escalera	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	485.00	-92.99	16.53
7097	La Providencia	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	670.00	-93.96	16.52
7102	Las Flores II	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	480.00	-93.56	16.69
7112	Malpaso II	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	398.00	-93.58	17.21
7113	Mapastepec	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	70.00	-92.88	15.45
7119	Motozintla (SMN)	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	1210.00	-92.24	15.42
7122	Ocosingo	Chiapas	Rio Lacantun	865.00	-92.09	16.91
7123	Ocozacoautla	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	838.00	-93.37	16.75
7129	Pijijiapan	Chiapas	Rio Pijijiapan Y Otros	120.00	-93.21	15.70
7134	Puente Colgante	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	418.00	-93.03	16.74
7141	Salto De Agua (DGE)	Chiapas	Rio Grijalva-Villahermosa	22.00	-92.33	17.56
7145	San Francisco	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	540.00	-92.95	15.87
7156	Santa María	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	220.00	-93.82	16.94
7168	Tonalá (DGE)	Chiapas	Mar Muerto	55.00	-93.74	16.08
7175	Villaflores (SMN)	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	631.00	-93.26	16.23

Clave	Nombre	Estado	Cuenca	Altura [msnm]	Longitud	Latitud
7182	Arriaga (DGE)	Chiapas	Mar Muerto	64.00	-93.91	16.24
7201	Tonalá (SMN)	Chiapas	Mar Muerto	17.00	-93.70	16.08
7202	Tuxtla Gutiérrez (DGE)	Chiapas	Rio Grijalva-Tuxtla	530.00	-93.12	16.75
7203	Venustiano Carranza	Chiapas	Rio Grijalva-La Concordia	790.00	-92.56	16.34
7205	Comitán (DGE)	Chiapas	Rio Lacantun	1596.00	-92.12	16.25
7395	Finca La Victoria	Chiapas	Rio Huixtla Y Otros	989.00	-92.42	15.29
27007	Centro Exp. W-75	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	12.00	-93.61	17.97
27008	Cárdenas	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	21.00	-93.38	17.98
27011	Dos Patrias	Tabasco	Rio Usumacinta	60.00	-92.80	17.61
27020	Jalpa de Méndez	Tabasco	Rio Usumacinta	10.00	-93.05	18.17
27030	Macuspana (DGE)	Tabasco	Rio Usumacinta	68.00	-92.61	17.76
27034	Paraíso	Tabasco	Rio Coatzacoalcos	10.00	-93.21	18.40
27037	Pueblo Nuevo	Tabasco	Rio Usumacinta	8.00	-93.88	17.85
27039	Samaria	Tabasco	Rio Usumacinta	19.00	-93.29	17.98
27044	Teapa (DGE)	Tabasco	Rio Usumacinta	38.00	-92.97	17.57
27048	Tepetitán	Tabasco	Rio Usumacinta	7.00	-92.37	17.82
27050	Tres Brazos	Tabasco	Rio Usumacinta	30.00	-92.60	18.38
27053	Vicente Guerrero	Tabasco	Rio Usumacinta	6.00	-92.88	18.39
27054	Villahermosa (DGE)	Tabasco	Rio Usumacinta	10.00	-92.93	18.00
30077	Jaltipan de Morelos	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	46.00	-94.72	17.96
30107	Minatitlán	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	65.00	-94.53	17.98
30167	Tancochapa	Veracruz	Rio Coatzacoalcos	29.00	-94.09	17.87

De estas estaciones seleccionadas se recabó de la base de datos CLICOM la información correspondiente a precipitaciones, temperaturas máximas y evaporaciones.

Cabe señalar que aunque solo se analizaron las 58 estaciones mencionadas, se utilizó la información de las 117 estaciones previamente elegidas para el relleno de los datos faltantes de las estaciones seleccionadas.

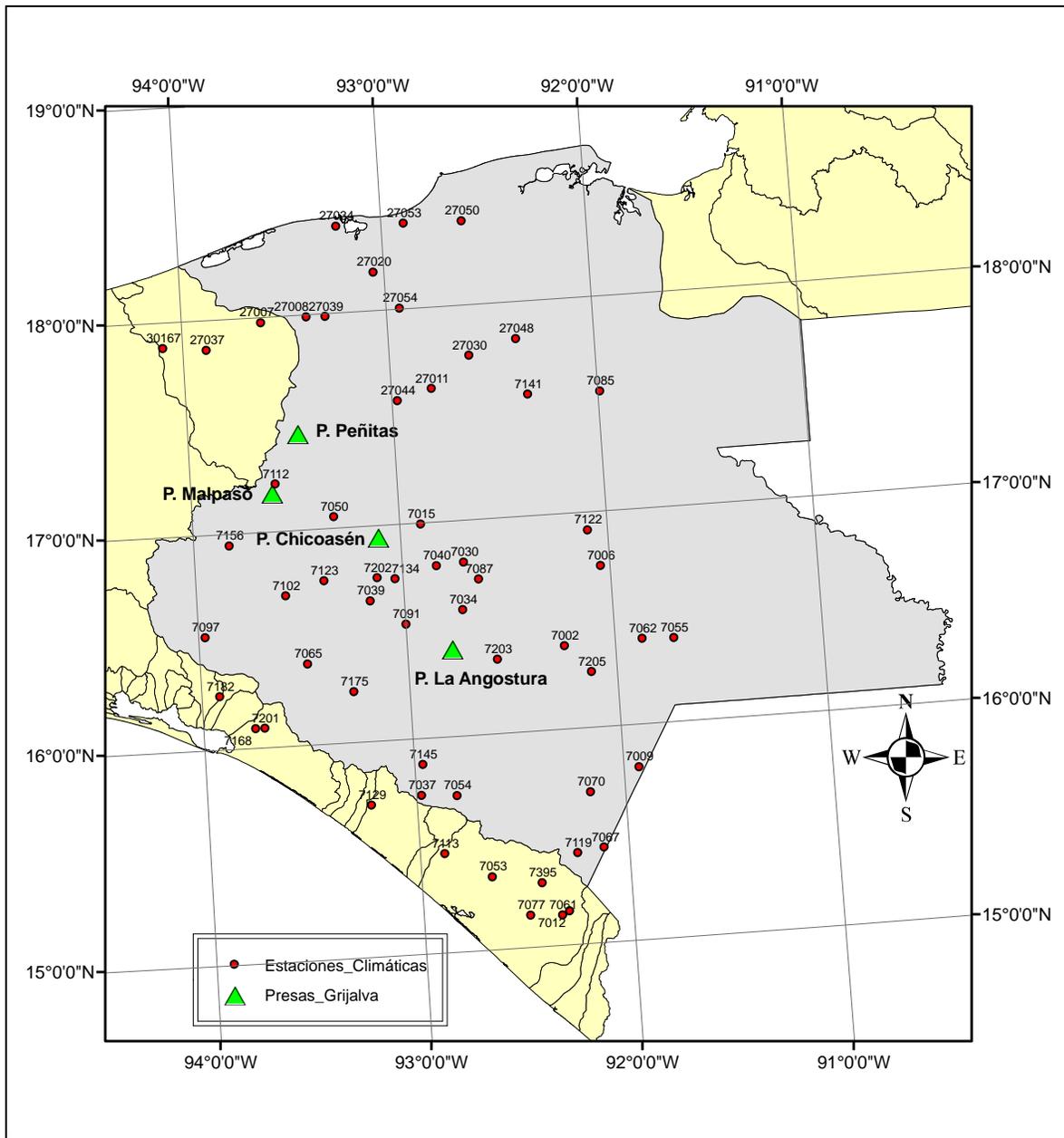


Figura 3.6. Ubicación de las estaciones climáticas en estudio

### 3.2.2 Revisión de la calidad y cantidad de la información

Se debe hacer un análisis minucioso de la cantidad y calidad de la información recabada, esto es analizar la presencia de puntos extraños, es decir precipitaciones menores que cero o precipitaciones muy altas en meses donde no son probables que ocurran, para esto se puede recurrir a información sobre si se presentó algún fenómeno de tipo ciclónico o frentes fríos que pudieran ocasionar estos valores.

También se debe elegir un periodo de registro común entre estaciones de al menos treinta años. Otro punto es el relleno de datos faltantes el cual se lleva a cabo utilizando técnicas de interpolación de lluvias. Se deben elegir aquellas estaciones que contengan el menor número de datos faltantes para no meter “ruido” a las series.

### 3.2.3 Determinación de regiones homogéneas

Es común la falta de datos en las series registradas, debido a esto se usan técnicas de interpolación de variables climáticas para poder inferir esos valores faltantes; para el uso de estas técnicas de interpolación se requiere vincular estaciones que contengan esos valores faltantes, sin embargo es muy importante que las estaciones vinculadas pertenezcan a la misma región homogénea que la estación a “rellenar”.

Para determinar estas regiones homogéneas se usa la Prueba de Fisher, explicada en el subcapítulo 1.2.1 del presente trabajo. Esta prueba utiliza los coeficientes de variación determinados de las series anuales.

El primer paso es determinar cuantos años con registro completo se tiene de cada estación, posteriormente se calcula la precipitación acumulada anual de los años con registros completos, con estos datos se obtienen los coeficientes de variación de cada estación.

En la siguiente tabla se ubican los coeficientes de variación,  $Cv_j$ , de todas las estaciones (como en este caso el número de estaciones es extenso, solo se ejemplifica con seis de las estaciones por motivos de espacio). Luego, en el interior de esta tabla se calculan los cocientes  $F = (Cv_1/Cv_2)^2$ ; colocando en el numerador el valor mayor y en el denominador el menor de los coeficientes de variación.

Tabla 3.1. Estadísticos  $F = (Cv_1/Cv_2)^2$ .

	EST	7002	7003	7006	7007	7009	7012
EST	$Cv_j$	<b>0.3022</b>	<b>0.2606</b>	<b>0.1853</b>	<b>0.1946</b>	<b>0.2469</b>	<b>0.1286</b>
7002	<b>0.3022</b>	1.0000	1.3442	2.6578	2.4110	1.4973	5.5236
7003	<b>0.2606</b>	1.3442	1.0000	1.9772	1.7936	1.1139	4.1091
7006	<b>0.1853</b>	2.6578	1.9772	1.0000	1.1024	1.7750	2.0783
7007	<b>0.1946</b>	2.4110	1.7936	1.1024	1.0000	1.6102	2.2910
7009	<b>0.2469</b>	1.4973	1.1139	1.7750	1.6102	1.0000	3.6890
7012	<b>0.1286</b>	5.5236	4.1091	2.0783	2.2910	3.6890	1.0000

Por otro lado, en la tabla 4.2 se presentan los valores límite de la función F de Fisher para una probabilidad de excedencia del 5%, en función de los grados de libertad (el número de años de registro menos 1) asociados al tamaño de cada muestra.

Tabla 3.2. Valores críticos del estadístico  $F_c$  para un nivel de probabilidad de 5%.

	EST	7002	7003	7006	7007	7009	7012
EST	NJ	34	27	41	38	32	44
7002	34	1.7721	1.8167	1.7413	1.7532	1.7830	1.7308
7003	27	1.8167	1.9048	1.8325	1.8439	1.8725	1.8225
7006	41	1.7413	1.8325	1.6816	1.6940	1.7248	1.6708
7007	38	1.7532	1.8439	1.6940	1.7167	1.7471	1.6938
7009	32	1.7830	1.8725	1.7248	1.7471	1.8045	1.7529
7012	44	1.7308	1.8225	1.6708	1.6938	1.7529	1.6509

En las tablas 4.1 y 4.2 se marcaron los valores de las parejas en las que  $F > F_c$ . Esto nos indica que la estación 7012 no es parte de la región ya que  $F > F_c$  en su relación con todas las estaciones mostradas, también observamos que la estación 7006 no pertenece a la misma región homogénea que las estaciones 7002, 7003 y 7009, pero si es homogénea con la estación 7007.

De esta manera es como se obtiene la delimitación de regiones homogéneas para inferir la información faltante.

### 3.2.4 Técnicas de interpolación de variables climáticas

Se empleó la Técnica de Interpolación del cuadrado de la distancia inversa explicada en el subcapítulo 1.1.3 de este trabajo.

A continuación se ejemplifica con la estación 7015 la manera en la que se desarrolla esta técnica para inferir valores faltantes.

El primer paso es determinar las distancias de la estación 7015 con las estaciones más cercanas siempre y cuando pertenezcan a la misma región homogénea que esta:

Tabla 3.3. Distancias entre la estación 7015 y las estaciones más cercanas

Est e	Est j	dej [km]
7015	7207	21.747
7015	7040	22.863
7015	7160	24.727
7015	7069	25.884
7015	7030	29.529
7015	7149	30.152
7015	7134	31.051
7015	7167	31.812
7015	7202	35.548
7015	7087	41.162
7015	7050	44.979
7015	27070	46.461
7015	7039	47.361

Est e	Est j	dej [km]
7015	7003	48.947
7015	7178	48.966
7015	7034	49.058

Resaltadas se encuentran las estaciones que pertenecen a la misma región que la estación 7015.

Empleando la ecuación (1.8) y considerando  $\beta = 2$ , la deducción de datos faltantes debe hacerse mes por mes, por lo que existen diversas combinaciones entre las estaciones vinculadas dependiendo de si las mismas cuentan con los datos necesarios para inferir la información faltante. A continuación se muestra la obtención de los datos faltantes de la estación 7015 mes por mes:

- **Enero:**

Tabla 3.4. Factores de peso. Enero

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	$\Sigma Wj$
7015	7149	30.152	0.033	0.001	0.490	1.000
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.510	

Tabla 3.5. Obtención de datos faltantes, mes de enero

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		ENE	ENE	ENE
1996	1	0.0	0	0
1996	2	0.0	0	0
1996	3	$(3*0.510)+(0*0.490)=1.5$	3	0
1996	4	0.0	0	0
1996	5	0.0	0	0
1996	6	$(2.1*0.510)+(0*0.490)=1.1$	2.1	0
1996	7	$(40.3*0.510)+(3*0.490)=22.0$	40.3	3
1996	8	$(4.3*0.510)+(0*0.490)=2.2$	4.3	0
1996	9	0.0	0	0
1996	10	0.0	0	0
1996	11	$(0.9*0.510)+(0*0.490)=0.5$	0.9	0
1996	12	0.0	0	0
1996	13	$(3.7*0.510)+(0*0.490)=1.9$	3.7	0
1996	14	0.0	0	0
1996	15	0.0	0	0
1996	16	0.0	0	0
1996	17	$(0*0.510)+(3*0.490)=1.5$	0	3
1996	18	$(11.3*0.510)+(0*0.490)=5.8$	11.3	0
1996	19	$(2.8*0.510)+(0*0.490)=1.4$	2.8	0
1996	20	0.0	0	0
1996	21	$(2.5*0.510)+(0*0.490)=1.3$	2.5	0
1996	22	$(0.1*0.510)+(0*0.490)=0.1$	0.1	0
1996	23	$(5.5*0.510)+(6*0.490)=5.7$	5.5	6
1996	24	$(5.9*0.510)+(0*0.490)=3.0$	5.9	0

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		ENE	ENE	ENE
1996	25	0.0	0	0
1996	26	0.0	0	0
1996	27	$(5.7*0.510)+(0*0.490)=2.9$	5.7	0
1996	28	0.0	0	0
1996	29	0.0	0	0
1996	30	$(0*0.510)+(16*0.490)=7.8$	0	16
1996	31	$(0*0.510)+(8*0.490)=3.9$	0	8

- **Febrero:**

Tabla 3.6. Factores de peso. Febrero

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.510	1.000
7015	7149	30.152	0.033	0.001	0.490	

Tabla 3.7. Obtención de datos faltantes, mes de febrero

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		FEB	FEB	FEB
1996	1	0.0	0	0
1996	2	0.0	0	0
1996	3	$(10.9*0.510)+(0*0.490)= 5.6$	10.9	0
1996	4	$(20*0.510)+(0*0.490)= 10.2$	20	0
1996	5	0.0	0	0
1996	6	0.0	0	0
1996	7	0.0	0	0
1996	8	0.0	0	0
1996	9	0.0	0	0
1996	10	$(7.1*0.510)+(0*0.490)= 3.6$	7.1	0
1996	11	0.0	0	0
1996	12	0.0	0	0
1996	13	0.0	0	0
1996	14	0.0	0	0
1996	15	$(3.1*0.510)+(3*0.490)= 3.1$	3.1	3
1996	16	0.0	0	0
1996	17	0.0	0	0
1996	18	0.0	0	0
1996	19	0.0	0	0
1996	20	0.0	0	0
1996	21	0.0	0	0
1996	22	0.0	0	0
1996	23	0.0	0	0
1996	24	0.0	0	0
1996	25	0.0	0	0
1996	26	0.0	0	0
1996	27	0.0	0	0
1996	28	0.0	0	0

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		FEB	FEB	FEB
1996	29	$(3.5*0.510)+(0.1*0.490)= 1.8$	3.5	0.1

- **Marzo:**

Tabla 3.8. Factores de peso. Marzo

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.510	1.000
7015	7149	30.152	0.033	0.001	0.490	

Tabla 3.9. Obtención de datos faltantes, mes de marzo

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		MAR	MAR	MAR
1996	1	0.0	0	0
1996	2	$(5.1*0.510)+(0*0.490)= 2.6$	5.1	0
1996	3	0.0	0	0
1996	4	0.0	0	0
1996	5	$(9.1*0.510)+(3*0.490)= 6.1$	9.1	3
1996	6	0.0	0	0
1996	7	$(8.4*0.510)+(8*0.490)= 8.2$	8.4	8
1996	8	$(18*0.510)+(0*0.490)= 9.2$	18	0
1996	9	$(2.3*0.510)+(5*0.490)= 3.6$	2.3	5
1996	10	0.0	0	0
1996	11	0.0	0	0
1996	12	0.0	0	0
1996	13	0.0	0	0
1996	14	0.0	0	0
1996	15	0.0	0	0
1996	16	0.0	0	0
1996	17	0.0	0	0
1996	18	0.0	0	0
1996	19	$(9.9*0.510)+(4*0.490)= 7.0$	9.9	4
1996	20	$(4.3*0.510)+(6*0.490)= 5.1$	4.3	6
1996	21	0.0	0	0
1996	22	0.0	0	0
1996	23	$(4*0.510)+(0*0.490)= 2.0$	4	0
1996	24	$(0*0.510)+(6*0.490)= 2.9$	0	6
1996	25	0.0	0	0
1996	26	0.0	0	0
1996	27	0.0	0	0
1996	28	0.0	0	0
1996	29	0.0	0	0
1996	30	0.0	0	0
1996	31	$(0*0.510)+(8.5*0.490)= 4.2$	0	8.5

- **Abril:**

Este mes está completo.

- **Mayo:**

Tabla 3.10. Factores de peso. Mayo

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.510	1.000
7015	7149	30.152	0.033	0.001	0.490	

Tabla 3.11. Obtención de datos faltantes, mes de mayo

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		MAY	MAY	MAY
2005	13	$(11.7*0.510)+(0*0.490)= 6.0$	11.7	0

- **Junio:**

Este mes está completo.

- **Julio:**

Este mes está completo.

- **Agosto:**

Tabla 3.12. Factores de peso. Agosto

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7069	25.884	0.039	0.001	0.565	1.000
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.435	

Tabla 3.13. Obtención de datos faltantes, mes de agosto

AÑO	DIA	7015	7030	7069
		AGO	AGO	AGO
1988	1	$(9.8*0.435)+(35.5*0.565)= 24.3$	9.8	35.5
1988	2	$(2.6*0.435)+(14.5*0.565)= 9.3$	2.6	14.5
1988	3	$(8.4*0.435)+(0.5*0.565)= 3.9$	8.4	0.5
1988	4	$(0*0.435)+(9.5*0.565)= 5.4$	0	9.5
1988	5	0.0	0	0
1988	6	$(20*0.435)+(2.6*0.565)= 10.2$	20	2.6
1988	7	$(0*0.435)+(11*0.565)= 6.2$	0	11
1988	8	$(46.3*0.435)+(22.8*0.565)= 33.0$	46.3	22.8
1988	9	0.0	0	0
1988	10	$(5.3*0.435)+(1*0.565)= 2.9$	5.3	1
1988	11	$(2.6*0.435)+(38.6*0.565)= 23.0$	2.6	38.6
1988	12	$(7.2*0.435)+(2.4*0.565)= 4.5$	7.2	2.4

AÑO	DIA	7015	7030	7069
		AGO	AGO	AGO
1988	13	$(27.3*0.435)+(17*0.565)= 21.5$	27.3	17
1988	14	$(2.1*0.435)+(4.9*0.565)= 3.7$	2.1	4.9
1988	15	$(6.7*0.435)+(4.8*0.565)= 5.6$	6.7	4.8
1988	16	0.0	0	0
1988	17	$(0*0.435)+(11.5*0.565)= 6.5$	0	11.5
1988	18	$(34.2*0.435)+(48.4*0.565)= 42.2$	34.2	48.4
1988	19	$(25*0.435)+(1.5*0.565)= 11.7$	25	1.5
1988	20	$(17*0.435)+(0.5*0.565)= 7.7$	17	0.5
1988	21	$(0*0.435)+(0.9*0.565)= 0.5$	0	0.9
1988	22	$(4.6*0.435)+(13.4*0.565)= 9.6$	4.6	13.4
1988	23	$(4.5*0.435)+(0.2*0.565)= 2.1$	4.5	0.2
1988	24	$(2.6*0.435)+(0*0.565)= 1.1$	2.6	0
1988	25	$(4.5*0.435)+(6.8*0.565)= 5.8$	4.5	6.8
1988	26	$(1.3*0.435)+(0*0.565)= 0.6$	1.3	0
1988	27	$(0*0.435)+(0.8*0.565)= 0.5$	0	0.8
1988	28	$(15.5*0.435)+(28.2*0.565)= 22.7$	15.5	28.2
1988	29	$(0*0.435)+(5.6*0.565)= 3.2$	0	5.6
1988	30	$(9.4*0.435)+(27.3*0.565)= 19.5$	9.4	27.3
1988	31	$(6.9*0.435)+(0*0.565)= 3.0$	6.9	0

- **Septiembre:**

Tabla 3.14. Factores de peso. Septiembre

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.510	1.000
7015	7149	30.152	0.033	0.001	0.490	

Tabla 3.15. Obtención de datos faltantes, mes de septiembre

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		SEP	SEP	SEP
1988	1	$(2.9*0.510)+(0*0.490)= 1.5$	2.9	0
1988	2	$(17.8*0.510)+(6.1*0.490)= 12.1$	17.8	6.1
1988	3	$(6.3*0.510)+(0*0.490)= 3.2$	6.3	0
1988	4	$(2.4*0.510)+(0*0.490)= 1.2$	2.4	0
1988	5	$(9*0.510)+(2.5*0.490)= 5.8$	9	2.5
1988	6	$(4.1*0.510)+(2.8*0.490)= 3.5$	4.1	2.8
1988	7	0.0	0	0
1988	8	0.0	0	0
1988	9	$(12.1*0.510)+(4.7*0.490)= 8.5$	12.1	4.7
1988	10	0.0	0	0
1988	11	$(0*0.510)+(4*0.490)= 2.0$	0	4
1988	12	$(4.3*0.510)+(6*0.490)= 5.1$	4.3	6
1988	13	$(3.5*0.510)+(4.6*0.490)= 4.0$	3.5	4.6
1988	14	$(0*0.510)+(0.1*0.490)= 0.0$	0	0.1
1988	15	0.0	0	0
1988	16	0.0	0	0
1988	17	$(16.3*0.510)+(4.3*0.490)= 10.4$	16.3	4.3

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		SEP	SEP	SEP
1988	18	0.0	0	0
1988	19	0.0	0	0
1988	20	0.0	0	0
1988	21	$(3.4*0.510)+(1.2*0.490)= 2.3$	3.4	1.2
1988	22	$(4*0.510)+(35.1*0.490)= 19.2$	4	35.1
1988	23	0.0	0	0
1988	24	$(0*0.510)+(8.6*0.490)= 4.2$	0	8.6
1988	25	$(12*0.510)+(14.7*0.490)= 13.3$	12	14.7
1988	26	$(10*0.510)+(35.1*0.490)= 22.3$	10	35.1
1988	27	$(0*0.510)+(6.1*0.490)= 3.0$	0	6.1
1988	28	$(6.7*0.510)+(7*0.490)= 6.8$	6.7	7
1988	29	$(32*0.510)+(35.1*0.490)= 33.5$	32	35.1
1988	30	$(11.9*0.510)+(22.8*0.490)= 17.2$	11.9	22.8

- Octubre:

Tabla 3.16. Factores de peso. Octubre

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.510	1.000
7015	7149	30.152	0.033	0.001	0.490	

Tabla 3.17. Obtención de datos faltantes, mes de octubre

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		OCT	OCT	OCT
1988	1	$(12.5*0.510)+(62.2*0.490)= 36.8$	12.5	62.2
1988	2	$(1.5*0.510)+(13.4*0.490)= 7.3$	1.5	13.4
1988	3	$(32.4*0.510)+(40*0.490)= 36.1$	32.4	40
1988	4	$(4.4*0.510)+(16.1*0.490)= 10.1$	4.4	16.1
1988	5	$(8.7*0.510)+(2.1*0.490)= 5.5$	8.7	2.1
1988	6	$(16.2*0.510)+(28.7*0.490)= 22.3$	16.2	28.7
1988	7	$(13.4*0.510)+(11.9*0.490)= 12.7$	13.4	11.9
1988	8	$(0*0.510)+(0.1*0.490)= 0.0$	0	0.1
1988	9	$(0*0.510)+(2.1*0.490)= 1.0$	0	2.1
1988	10	$(3.4*0.510)+(8.6*0.490)= 5.9$	3.4	8.6
1988	11	$(0.1*0.510)+(0*0.490)= 0.1$	0.1	0
1988	12	0.0	0	0
1988	13	$(0.1*0.510)+(0*0.490)= 0.1$	0.1	0
1988	14	0.0	0	0
1988	15	0.0	0	0
1988	16	0.0	0	0
1988	17	0.0	0	0
1988	18	0.0	0	0
1988	19	0.0	0	0
1988	20	0.0	0	0
1988	21	0.0	0	0
1988	22	0.0	0	0
1988	23	0.0	0	0

AÑO	DIA	7015	7030	7149
		OCT	OCT	OCT
1988	24	$(12*0.510)+(19.9*0.490)= 15.9$	12	19.9
1988	25	$(1*0.510)+(6.2*0.490)= 3.5$	1	6.2
1988	26	$(5.1*0.510)+(0.1*0.490)= 2.7$	5.1	0.1
1988	27	$(13.5*0.510)+(18.4*0.490)= 15.9$	13.5	18.4
1988	28	$(0*0.510)+(2.5*0.490)= 1.2$	0	2.5
1988	29	0.0	0	0
1988	30	0.0	0	0
1988	31	0.0	0	0

- **Noviembre:**

Tabla 3.18. Factores de peso. Noviembre

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7069	25.884	0.039	0.001	0.565	1.000
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.435	

Tabla 3.19. Obtención de datos faltantes, mes de noviembre

AÑO	DIA	7015	7069	7030
		NOV	NOV	NOV
1988	1	$(1*0.565)+(1.5*0.435)= 1.2$	1.0	1.5
1988	2	0.0	0	0
1988	3	0.0	0	0
1988	4	0.0	0	0
1988	5	0.0	0	0
1988	6	0.0	0	0
1988	7	0.0	0	0
1988	8	0.0	0	0
1988	9	0.0	0	0
1988	10	0.0	0	0
1988	11	0.0	0	0
1988	12	0.0	0	0
1988	13	0.0	0	0
1988	14	0.0	0	0
1988	15	0.0	0	0
1988	16	0.0	0	0
1988	17	0.0	0	0
1988	18	0.0	0	0
1988	19	0.0	0	0
1988	20	$(0*0.565)+(8.4*0.435)= 3.6$	0	8.4
1988	21	$(0*0.565)+(4.5*0.435)= 2.0$	0	4.5
1988	22	$(0*0.565)+(2*0.435)= 0.9$	0	2
1988	23	0.0	0	0
1988	24	0.0	0	0
1988	25	0.0	0	0
1988	26	0.0	0	0
1988	27	$(3.6*0.565)+(0*0.435)= 2.0$	3.6	0

AÑO	DIA	7015	7069	7030
		NOV	NOV	NOV
1988	28	$(2.6*0.565)+(0*0.435)= 1.5$	2.6	0
1988	29	0.0	0	0
1988	30	$(0*0.565)+(4.8*0.435)= 2.1$	0	4.8

- **Diciembre:**

Tabla 3.20. Factores de peso. Diciembre

Est e	Est j	dej [km]	1/dej	(1/dej)^2	Wj	Σ Wj
7015	7069	25.884	0.039	0.001	0.565	1.000
7015	7030	29.529	0.034	0.001	0.435	

Tabla 3.21. Obtención de datos faltantes, mes de diciembre

AÑO	DIA	7015	7069	7030
		DIC	DIC	DIC
1988	1	0.0	0.0	0
1988	2	$(0*0.565)+(3*0.435)= 1.3$	0	3
1988	3	0.0	0	0
1988	4	$(0*0.565)+(0.6*0.435)= 0.3$	0	0.6
1988	5	$(0*0.565)+(2*0.435)= 0.9$	0	2
1988	6	0.0	0	0
1988	7	0.0	0	0
1988	8	0.0	0	0
1988	9	0.0	0	0
1988	10	0.0	0	0
1988	11	0.0	0	0
1988	12	$(2.4*0.565)+(12.8*0.435)= 6.9$	2.4	12.8
1988	13	$(0*0.565)+(1.2*0.435)= 0.5$	0	1.2
1988	14	0.0	0	0
1988	15	0.0	0	0
1988	16	$(0*0.565)+(0.1*0.435)= 0.0$	0	0.1
1988	17	0.0	0	0
1988	18	0.0	0	0
1988	19	0.0	0	0
1988	20	0.0	0	0
1988	21	0.0	0	0
1988	22	0.0	0	0
1988	23	0.0	0	0
1988	24	0.0	0	0
1988	25	0.0	0	0
1988	26	0.0	0	0
1988	27	0.0	0	0
1988	28	$(0*0.565)+(0.1*0.435)= 0.0$	0	0.1
1988	29	0.0	0	0
1988	30	0.0	0	0
1988	31	0.0	0	0

Después de haber concluido la deducción de los datos faltantes se obtienen las precipitaciones acumulada y máxima anual.

En el caso de las precipitaciones estas deben maximizarse multiplicando por 1.13, ya que debe recordarse que la información recabada es de pluviómetro el cual proporciona la lectura de precipitación de 8:00 AM a 8:00 AM del día siguiente.

De esta manera para la estación 7002 la precipitación acumulada anual y la precipitación máxima anual (multiplicada por 1.13) se muestra en la tabla 4.22.

**Tabla 3.22. Precipitación acumulada anual y máxima anual. Estación 7002**

AÑO	7002	7002
	P acum [mm]	P max [mm]
1961	1145.1	53.0
1962	714.5	46.5
1963	499.2	50.9
1964	727.5	76.3
1965	803.0	84.8
1966	1130.2	63.4
1967	788.9	79.1
1968	1101.3	72.9
1969	1264.5	45.8
1970	586.9	65.0
1971	390.5	33.9
1972	538.8	39.6
1973	983.9	78.0
1974	382.5	82.5
1975	292.7	33.5
1976	273.3	30.5
1977	603.0	46.3
1978	850.8	66.7
1979	1223.9	64.8
1980	987.1	96.4
1981	1030.9	90.4
1982	918.4	64.2
1983	1147.8	135.6
1984	1380.4	57.1
1985	787.2	63.5
1986	672.3	85.7
1987	792.3	65.0
1988	1101.8	65.8
1989	1152.6	75.7
1990	655.8	41.2
1991	933.3	81.4

AÑO	7002	7002
	P acum [mm]	P max [mm]
1992	738.6	57.6
1993	897.2	54.8
1994	836.1	67.8
1995	1227.0	73.5
1996	1059.5	51.4
1997	1218.1	58.8
1998	1332.6	62.7
1999	1704.0	94.9
2000	1072.5	68.4
2001	875.5	61.0
2002	919.5	51.4
2003	828.0	58.2
2004	826.8	49.2
2005	1282.1	63.1
2006	988.0	59.3
2007	1030.5	50.3
2008	746.6	28.8

### 3.2.5 Pruebas de homogeneidad e independencia

Las pruebas de homogeneidad descritas en el subcapítulo 1.3.1 mostrarán si existe o no tendencia en las variables climáticas analizadas, esto es si hay un cambio en el patrón climático, lo cual nos llevará a la conclusión de si hay efectos en los patrones climáticos debido a la presencia de almacenamientos.

A continuación se presentan las pruebas de homogeneidad para la estación 7002 para la precipitación acumulada anual, ya que la metodología es la misma para precipitación máxima anual:

#### 3.2.5.1 Precipitación Acumulada Anual

- *Prueba de Helmert*

AÑO	P <sub>i</sub> [mm]	P <sub>promedio</sub> [mm]	P <sub>i</sub> -P <sub>promedio</sub>	Signo	Análisis S/C
1961	1145.07	905.06	240.007	+	
1962	714.52	905.06	-190.544	-	C
1963	499.22	905.06	-405.845	-	S
1964	727.50	905.06	-177.562	-	S

<b>AÑO</b>	<b>P<sub>i</sub> [mm]</b>	<b>P<sub>promedio</sub> [mm]</b>	<b>P<sub>i</sub>-P<sub>promedio</sub></b>	<b>Signo</b>	<b>Análisis S/C</b>
1965	803.00	905.06	-102.062	-	S
1966	1130.20	905.06	225.138	+	C
1967	788.90	905.06	-116.162	-	C
1968	1101.30	905.06	196.238	+	C
1969	1264.50	905.06	359.438	+	S
1970	586.90	905.06	-318.162	-	C
1971	390.50	905.06	-514.562	-	S
1972	538.84	905.06	-366.223	-	S
1973	983.88	905.06	78.817	+	C
1974	382.50	905.06	-522.562	-	C
1975	292.66	905.06	-612.402	-	S
1976	273.30	905.06	-631.762	-	S
1977	603.00	905.06	-302.062	-	S
1978	850.80	905.06	-54.262	-	S
1979	1223.95	905.06	318.887	+	C
1980	987.10	905.06	82.038	+	S
1981	1030.90	905.06	125.838	+	S
1982	918.40	905.06	13.338	+	S
1983	1147.80	905.06	242.738	+	S
1984	1380.40	905.06	475.338	+	S
1985	787.20	905.06	-117.862	-	C
1986	672.30	905.06	-232.762	-	S
1987	792.30	905.06	-112.762	-	S
1988	1101.80	905.06	196.738	+	C
1989	1152.60	905.06	247.538	+	S
1990	655.77	905.06	-249.291	-	C
1991	933.30	905.06	28.238	+	C
1992	738.60	905.06	-166.462	-	C
1993	897.20	905.06	-7.862	-	S
1994	836.10	905.06	-68.962	-	S
1995	1227.00	905.06	321.938	+	C
1996	1059.49	905.06	154.423	+	S
1997	1218.12	905.06	313.060	+	S
1998	1332.58	905.06	427.521	+	S
1999	1704.00	905.06	798.939	+	S
2000	1072.48	905.06	167.413	+	S
2001	875.50	905.06	-29.562	-	C
2002	919.50	905.06	14.438	+	C
2003	828.00	905.06	-77.062	-	C
2004	826.80	905.06	-78.262	-	S
2005	1282.10	905.06	377.038	+	C
2006	988.00	905.06	82.938	+	S
2007	1030.50	905.06	125.438	+	S
2008	746.60	905.06	-158.462	-	C

Tabla 3.23. Prueba de Helmert

Se cuentan cuantos cambios de signo ( $C$ ) hay y cuantos valores sin cambio de signo consecutivo hay ( $S$ ):

$$S = 28$$

$$C = 19$$

De acuerdo con la ecuación (1.40) se tiene que:

$$n_{7002} = 48$$

Por lo tanto:

$$-\sqrt{48 - 1} \leq (28 - 19) \leq \sqrt{48 - 1}$$

$$-\sqrt{47} \leq (9) \leq \sqrt{47}$$

$$-6.86 \leq 9 \leq 6.86$$

Lo cual es falso ya que 9 no es menor o igual que 6.86. Por lo tanto se considera que la serie es **no homogénea** de acuerdo con la prueba de Helmert.

- **Prueba T de Student**

Para esta prueba se divide a la serie en dos bloques del mismo tamaño de muestra:

AÑO	P [mm]
1961	1145.07
1962	714.52
1963	499.22
1964	727.50
1965	803.00
1966	1130.20
1967	788.90
1968	1101.30
1969	1264.50
1970	586.90
1971	390.50
1972	538.84
1973	983.88
1974	382.50
1975	292.66
1976	273.30
1977	603.00
1978	850.80
1979	1223.95
1980	987.10
1981	1030.90

AÑO	P [mm]
1985	787.20
1986	672.30
1987	792.30
1988	1101.80
1989	1152.60
1990	655.77
1991	933.30
1992	738.60
1993	897.20
1994	836.10
1995	1227.00
1996	1059.49
1997	1218.12
1998	1332.58
1999	1704.00
2000	1072.48
2001	875.50
2002	919.50
2003	828.00
2004	826.80
2005	1282.10

<b>1982</b>	918.40		<b>2006</b>	988.00
<b>1983</b>	1147.80		<b>2007</b>	1030.50
<b>1984</b>	1380.40		<b>2008</b>	746.60

Tabla 3.24. Prueba T de Student

Posteriormente se calculan el tamaño de muestra ( $n$ ), el promedio ( $\bar{x}$ ) y la varianza ( $S^2$ ) de cada bloque:

Bloque 1		Bloque 2	
$n_1 =$	<b>24</b>	$n_2 =$	<b>24</b>
$\bar{x}_1 =$	<b>823.55</b>	$\bar{x}_2 =$	<b>986.58</b>
$S_1^2 =$	<b>105,653.40</b>	$S_2^2 =$	<b>60,625.87</b>

Se calcula el estadístico  $t_d$ , de acuerdo con la ecuación (1.41)

$$t_d = \frac{823.55 - 986.58}{\left[ (24)(105,653.40) + (24)(60,625.87) \left( \frac{1}{24} + \frac{1}{24} \right) \right]^{1/2}}$$

$$t_d = 0.1000$$

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

$$v = 24 + 24 - 2$$

$$v = 46$$

Con ayuda del paquete Microsoft Office Excel se calcula el valor de la distribución  $T$  de Student de dos colas, el cual resulta:

$$T = 2.0129$$

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que aquel de la distribución  $T$  de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie se considera no homogénea.

Como en este caso:

$$t_d < T$$

La serie se considera *homogénea*.

- **Prueba de Cramer**

Esta prueba consiste en comprobar la homogeneidad en el registro de la serie en estudio y en determinar también si el valor medio no varía significativamente de un periodo de tiempo a otro. Con este propósito se consideran tres bloques, el primero de tamaño total de la muestra  $n_{7002}$ , el segundo de tamaño  $n_{60}$  (60% de los últimos valores de la muestra  $n_{7002}$ ), y el tercero de tamaño  $n_{30}$  (30% de los últimos valores de la muestra  $n_{7002}$ ).

BLOQUE 1	
AÑO	P [mm]
1961	1145.07
1962	714.52
1963	499.22
1964	727.50
1965	803.00
1966	1130.20
1967	788.90
1968	1101.30
1969	1264.50
1970	586.90
1971	390.50
1972	538.84
1973	983.88
1974	382.50
1975	292.66
1976	273.30
1977	603.00
1978	850.80
1979	1223.95
1980	987.10
1981	1030.90
1982	918.40
1983	1147.80
1984	1380.40
1985	787.20
1986	672.30
1987	792.30
1988	1101.80
1989	1152.60
1990	655.77
1991	933.30
1992	738.60
1993	897.20
1994	836.10

BLOQUE 2 (60%)	
AÑO	P [mm]
1980	987.10
1981	1030.90
1982	918.40
1983	1147.80
1984	1380.40
1985	787.20
1986	672.30
1987	792.30
1988	1101.80
1989	1152.60
1990	655.77
1991	933.30
1992	738.60
1993	897.20
1994	836.10
1995	1227.00
1996	1059.49
1997	1218.12
1998	1332.58
1999	1704.00
2000	1072.48
2001	875.50
2002	919.50
2003	828.00
2004	826.80
2005	1282.10
2006	988.00
2007	1030.50
2008	746.60

BLOQUE 3 (30%)	
AÑO	P [mm]
1995	1227.00
1996	1059.49
1997	1218.12
1998	1332.58
1999	1704.00
2000	1072.48
2001	875.50
2002	919.50
2003	828.00
2004	826.80
2005	1282.10
2006	988.00
2007	1030.50
2008	746.60

BLOQUE 1	
1995	1227.00
1996	1059.49
1997	1218.12
1998	1332.58
1999	1704.00
2000	1072.48
2001	875.50
2002	919.50
2003	828.00
2004	826.80
2005	1282.10
2006	988.00
2007	1030.50
2008	746.60

BLOQUE 2 (60%)

BLOQUE 3 (30%)

Tabla 3.25. Bloques para la prueba de Cramer

De acuerdo a las ecuaciones 1.42 y 1.43 para una sola muestra analizada se tiene que la desviación estándar de la serie se calcula como:

$$\bar{P}^{7002} = \frac{43442.97}{48} = 905.06 [mm]$$

Por lo que:

$$S^{7002} = 296.91$$

También se calculan las medias de los tres bloques analizados:

$$n_{60} = 29$$

$$n_{30} = 14$$

Por lo que:

$$\bar{P}_{60}^{7002} = \frac{29142.44}{29} = 1004.91 [mm]$$

$$\bar{P}_{30}^{7002} = \frac{15110.67}{14} = 1079.33 [mm]$$

$$\tau_{60}^{7002} = \frac{1004.91 - 905.06}{296.91} = 0.3363$$

$$\tau_{30}^{7002} = \frac{1079.33 - 905.06}{296.91} = 0.5869$$

Ahora se calculará el estadístico  $t_w$ , el cual tiene distribución  $T$  de Student de dos colas con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$ .

$$t_{60} = \left\{ \frac{29(48 - 2)}{48 - 29[1 + (0.3363)^2]} \right\}^{1/2} = 3.0979$$

$$t_{30} = \left\{ \frac{14(48 - 2)}{48 - 14[1 + (0.5869)^2]} \right\}^{1/2} = 2.7575$$

También se calculará el estadístico  $T$  de la distribución  $t$  de Student de dos colas para  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$  con ayuda del paquete Excel de Microsoft Office, el cual resulta de:

$$T = 2.0195$$

Si y solo si, el valor absoluto de  $t_w$  para  $w = 60$  y  $w = 30$  es mayor que aquel de la distribución  $T$  de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie  $P_j^i$  se considera no homogénea.

Comparando los valores tenemos que:

$$3.0979 > 2.0195 \quad \therefore t_{60} > T$$

$$2.7575 > 2.0195 \quad \therefore t_{30} > T$$

Por lo tanto podemos decir que si hay diferencia significativa entre las medias por lo que se considera que la serie correspondiente a la estación 7002 es **no homogénea**.

- **Prueba de Independencia de Anderson**

Esta prueba sirve para garantizar que la serie está compuesta de variables aleatorias. Para aplicarla se deben obtener los coeficientes de autocorrelación serial, los cuales se obtienen con las expresiones 1.49, 1.50 y 1.51.

**Tabla 3.26. Precipitación acumulada anual. Estación 7002**

<b>AÑO</b>	<b>P [mm]</b>
1961	1145.07
1962	714.52
1963	499.22
1964	727.50
1965	803.00
1966	1130.20
1967	788.90
1968	1101.30
1969	1264.50
1970	586.90
1971	390.50
1972	538.84
1973	983.88
1974	382.50
1975	292.66
1976	273.30
1977	603.00
1978	850.80
1979	1223.95
1980	987.10
1981	1030.90
1982	918.40
1983	1147.80
1984	1380.40
1985	787.20
1986	672.30
1987	792.30
1988	1101.80
1989	1152.60
1990	655.77
1991	933.30
1992	738.60
1993	897.20
1994	836.10
1995	1227.00
1996	1059.49
1997	1218.12
1998	1332.58
1999	1704.00
2000	1072.48
2001	875.50
2002	919.50
2003	828.00
2004	826.80
2005	1282.10
2006	988.00
2007	1030.50

AÑO	P [mm]
2008	746.60

La prueba se hace desde  $k = 1$  hasta  $k = \frac{L}{3}$  donde  $L$  es el tamaño de registro, por lo tanto:

$$k = \frac{48}{3} = 16$$

Esto significa que se calcularán  $r_k^{7002}$  para  $k = 1, 2, 3 \dots 16$ .

El coeficiente de autocorrelación serial para un tiempo de retraso  $k = 1$ , se calcula como:

$$r_1^{7002} = \frac{\sum_{i=1}^{48-1} (P_i^{7002} - \bar{P}^{7002})(P_{i+1}^{7002} - \bar{P}^{7002})}{\sum_{i=1}^{48} (P_i^{7002} - \bar{P}^{7002})^2}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{48-1} (P_i^{7002} - \bar{P}^{7002})(P_{i+1}^{7002} - \bar{P}^{7002}) = & (1145.07 - 905.06)(714.52 - 905.06) + \\ & (714.52 - 905.06)(499.22 - 905.06) + (499.22 - 905.06)(727.50 - 905.06) + \dots + \\ & (1030.50 - 905.06)(746.60 - 905.06) = 1,971,171.86 . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{48} (P_i^{7002} - \bar{P}^{7002})^2 = & (1145.07 - 905.06)^2 + (714.52 - 905.06)^2 + (499.22 - 905.06)^2 + \\ & \dots + (746.60 - 905.06)^2 = 4,143,366.43 \end{aligned}$$

Por lo que:

$$r_1^{7002} = \frac{1,971,171.86}{4,143,366.43} = 0.4757$$

Los límites de confianza se calculan como:

$$r_1^{7002}(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{48 - 1 - 1}}{48 - 1}$$

Por lo que el límite superior es:

$$ls = 0.2616$$

Y el límite inferior es:

$$li = -0.3041$$

A continuación se presentan todos los coeficientes de autocorrelación serial junto con sus límites de confianza, además se muestra el correlograma correspondiente que es la grafica de los valores estimados para  $r_k^j$  (ordenadas) contra los tiempos de retraso  $k$  (abscisas) junto con sus correspondientes límites de confianza.

Tabla 3.27. Coeficientes de autocorrelación serial. Prueba de Anderson

$k$	Lim Sup	$r_k$	Lim Inf
1	0.2616	0.4757	-0.3041
2	0.2641	0.1727	-0.3076
3	0.2667	0.0450	-0.3111
4	0.2694	0.1464	-0.3148
5	0.2721	0.0430	-0.3187
6	0.2750	-0.0582	-0.3226
7	0.2780	-0.0800	-0.3267
8	0.2810	-0.0818	-0.3310
9	0.2842	-0.1198	-0.3354
10	0.2874	0.0600	-0.3401
11	0.2908	0.1221	-0.3449
12	0.2943	0.0418	-0.3499
13	0.2980	0.0373	-0.3551
14	0.3017	0.0132	-0.3606
15	0.3057	-0.0467	-0.3663
16	0.3098	-0.0738	-0.3723

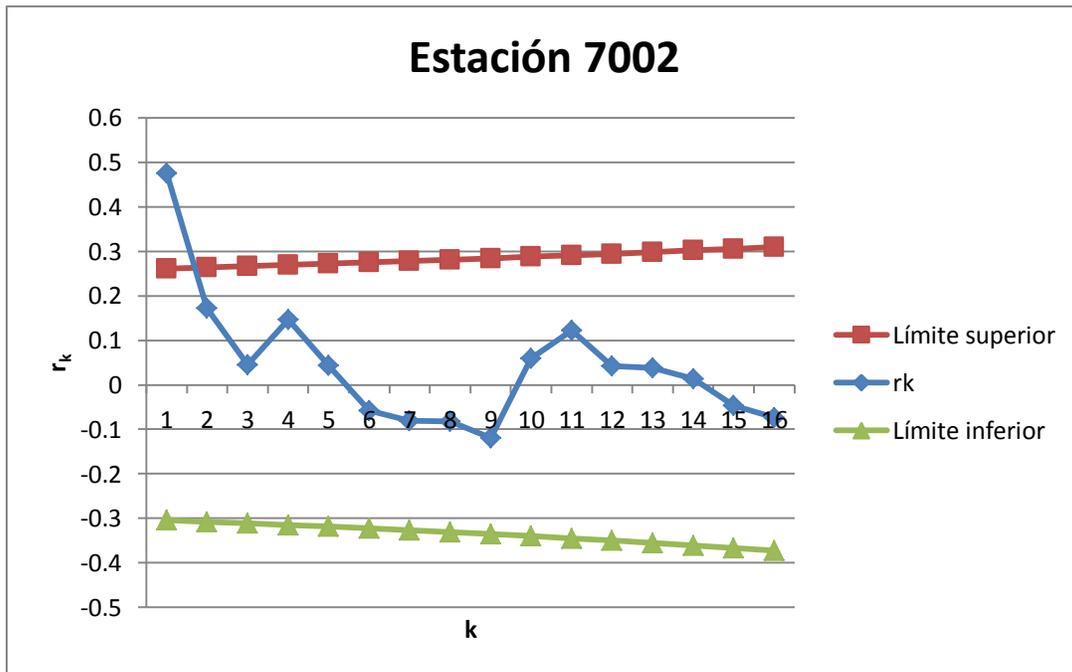


Gráfico 3.1. Correlograma de la estación 7002

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

Por lo tanto tenemos que el 10% de 16 es 1.6, por lo que solo dos de los valores pueden sobrepasar los límites de confianza, en este caso solo un valor sobrepasa el límite superior, por lo tanto la serie de la estación 7002 es **independiente**.

En resumen se tiene que para la estación 7002 en el caso de precipitación acumulada anual:

**Tabla 3.28. Resultados de la pruebas para la estación 7002. Precipitación acumulada anual**

Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente

En el caso de la pruebas de homogeneidad ninguna prueba es superior a la otra, por lo que para definir si la serie de la estación 7002 es homogénea o no tomaremos en cuenta que dos de las tres pruebas resulten no homogéneas. Entonces podemos concluir diciendo que **la serie de la estación 7002 es no homogénea**.

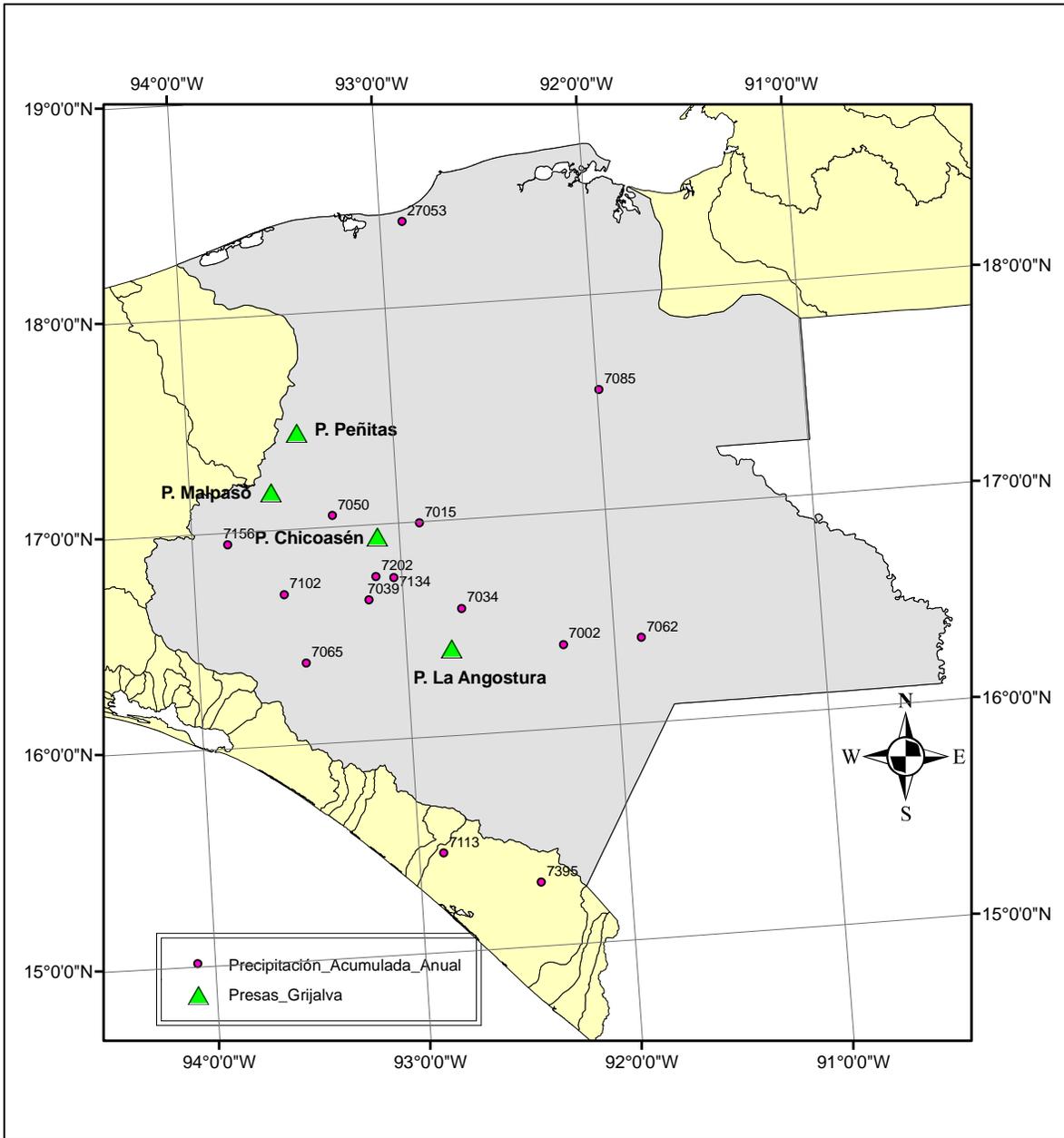
En resumen, el resultado del análisis de homogeneidad para las 58 estaciones se presenta en la tabla 4.29.

**Tabla 3.29. Resultados de las pruebas para las 58 estaciones analizadas. Precipitación Acumulada Anual**

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7002	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7006	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7009	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7012	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7015	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7030	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7034	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7037	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7039	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7040	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7050	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7053	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7054	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7061	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7062	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7065	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7067	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7070	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7077	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7085	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7087	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7091	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7097	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7102	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7112	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7113	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7119	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7122	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7123	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7129	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7134	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7145	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7156	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7168	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7175	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7182	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7201	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7202	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7203	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7205	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7395	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
27007	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27008	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27011	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27020	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27030	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27034	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27037	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27039	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27044	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27048	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27050	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
27053	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
27054	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
30077	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
30107	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
30167	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

Figura 3.7. Ubicación de las estaciones no homogéneas. Precipitación Acumulada Anual



De estos resultados podemos decir que las series de las siguientes estaciones son *no homogéneas*:

Tabla 3.30. Estaciones "no homogéneas". Precipitación Acumulada Anual

Estación
7002
7015
7034
7039
7050

Estación
7062
7065
7085
7102
7113
7134
7156
7202
7395
27053

En la figura 4.7 se presenta la ubicación de las estaciones que resultaron no homogéneas con respecto a la ubicación de los embalses.

### 3.2.5.2 Precipitación Máxima Anual

Los resultados del análisis de homogeneidad para las 58 estaciones analizando la precipitación máxima anual se presenta en la tabla 4.31.

Tabla 3.31. Resultados de las pruebas para las 58 estaciones analizadas. Precipitación Máxima Anual

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7002	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7006	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7009	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7012	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7015	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7030	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7034	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7037	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7039	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7040	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7050	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7053	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7054	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7061	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7062	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7065	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7067	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7070	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7077	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7085	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7087	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7091	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7097	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7102	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7112	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7113	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7119	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7122	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7123	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7129	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7134	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7141	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7145	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7156	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7168	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7175	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7182	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7201	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7202	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7203	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7205	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7395	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
27007	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27008	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27011	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27020	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27030	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27034	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27037	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27039	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27044	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27048	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27050	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27053	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
27054	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
30077	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
30107	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
30167	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente

De acuerdo con estos resultados las estaciones cuyas series resultaron no homogéneas son las siguientes:

Tabla 3.32. Estaciones "no homogéneas". Precipitación Máxima Anual

Estación
7012
7040
7050
7061

Estación
7062
7113
7119
7122
7145
7395
30167

A continuación se presenta la ubicación de las estaciones que resultaron no homogéneas con respecto a la ubicación de los embalses:

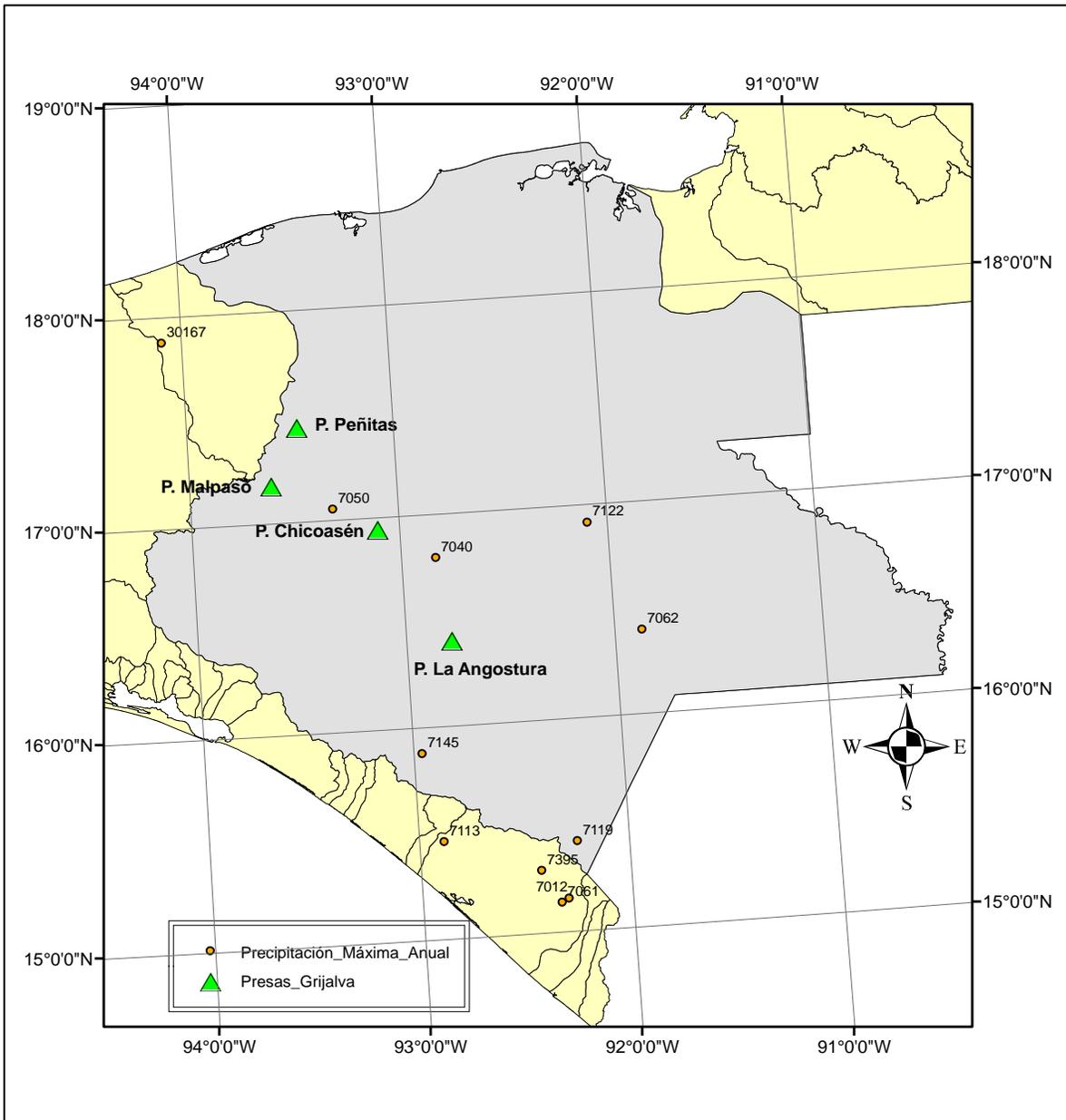


Figura 3.8. Ubicación de las estaciones no homogéneas. Precipitación Máxima Anual

Como se puede observar de los resultados se tienen 15 estaciones con series no homogéneas para el caso del análisis de la precipitación acumulada anual y 11 estaciones para el caso de la precipitación máxima anual. También se observa que hay 4 estaciones cuyas series resultaron no homogéneas para los dos casos analizados, estas estaciones son las siguientes:

- 7050
- 7062
- 7113
- 7395

El siguiente paso para el estudio fue el analizar para todas las estaciones que resultaron *no homogéneas* las temperaturas máximas y las evaporaciones máximas y acumuladas, con el fin de determinar si en estas variables climatológicas también existía falta de homogeneidad en las series.

### 3.2.5.3 *Temperatura Máxima Anual*

Para las series de temperatura máxima anual se llevó a cabo el mismo procedimiento que con las series de precipitación, esto es, revisar la cantidad y calidad de la información, la deducción de datos faltantes mediante la técnica de interpolación del cuadrado de la distancia inversa y la aplicación de las pruebas de homogeneidad e independencia. Cabe señalar que hubo estaciones que no pudieron ser rellenadas debido a la falta de información de las estaciones cercanas y que pertenecían a la misma región homogénea. En este caso no pudo analizarse la estación 7395. También es importante señalar que solo se analizaron para temperaturas aquellas estaciones que resultaron no homogéneas en el caso de precipitación, esto con la finalidad de observar si también se presentaban cambios en las tendencias en temperaturas.

Los resultados para los dos casos en estudio se muestran a continuación:

#### **Caso 1. Estaciones no homogéneas en Precipitación Acumulada Anual**

Tabla 3.33. Resultado de las pruebas para Temperatura Máxima.

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7002	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7015	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7034	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7039	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7050	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7062	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7065	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7085	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7102	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7113	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7134	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7156	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7202	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
27053	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

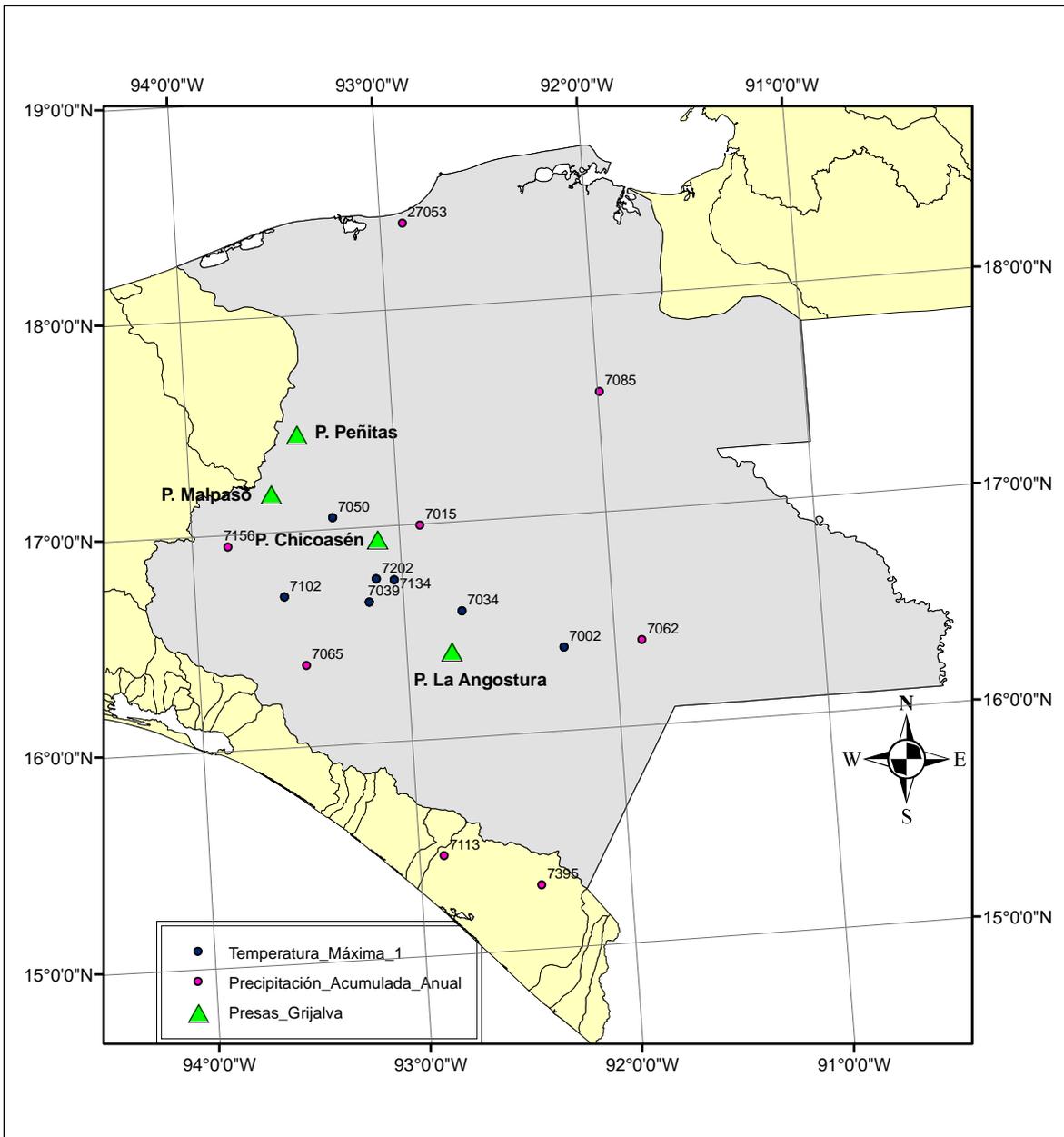


Figura 3.9. Ubicación de las estaciones. Caso 1

De acuerdo con estos resultados las estaciones cuyas series resultaron no homogéneas son las siguientes:

**Tabla 3.34. Estaciones "no homogéneas". Caso 1**

ESTACIÓN
7002
7034
7039
7050
7102
7134
7202

En la figura 4.9 se presenta la ubicación de estas estaciones que resultaron no homogéneas.

**Caso 2. Estaciones no homogéneas en Precipitación Máxima Anual**

**Tabla 3.35. Resultado de las pruebas para Temperatura Máxima**

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7012	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7040	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7050	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7061	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7062	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7113	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7119	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7122	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7145	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
30167	Homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente

De acuerdo con estos resultados las estaciones cuyas series resultaron no homogéneas son las siguientes:

**Tabla 3.36. Estaciones "no homogéneas". Caso 2**

ESTACIÓN
7012
7040
7050

ESTACIÓN
7061
7119
7122
7145

A continuación se presenta la ubicación de estas estaciones:

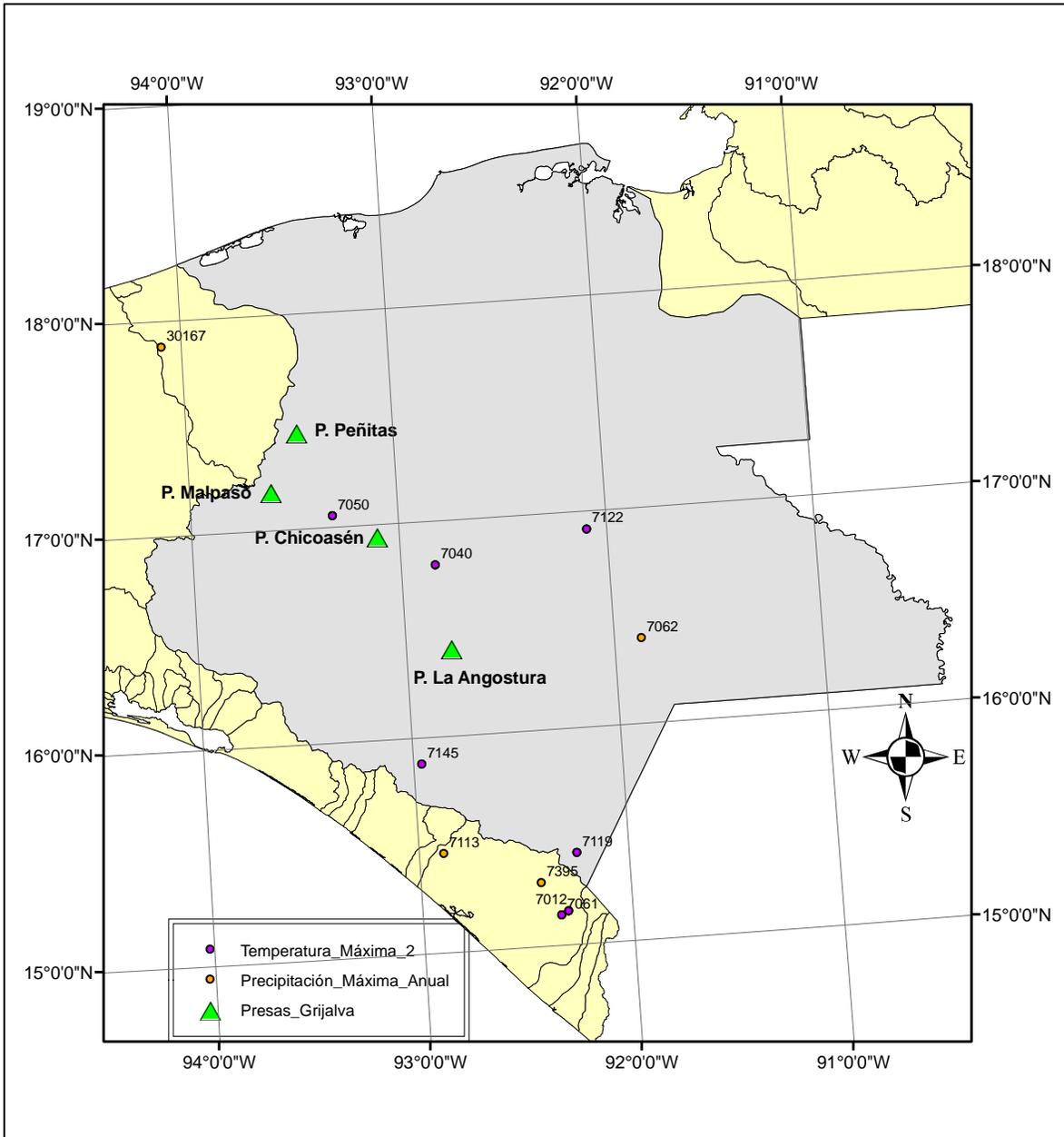


Figura 3.10. Ubicación de las estaciones. Caso 2

### 3.2.5.4 Evaporación

Para las series evaporación se llevó a cabo el mismo procedimiento que con las series de precipitación, esto es, revisar la cantidad y calidad de la información, la deducción de datos faltantes mediante la técnica de interpolación del cuadrado de la distancia inversa y la aplicación de las pruebas de homogeneidad e independencia. Cabe señalar que hubo estaciones que no pudieron ser rellenadas debido a la falta de información de las estaciones cercanas y que pertenecían a la misma región homogénea. En este caso no pudieron analizarse las estaciones 7012, 7050, 7119, 7065, 7085 y 27053.

#### **Caso 1. Estaciones no homogéneas en Precipitación Acumulada Anual**

Tabla 3.37. Resultado de las pruebas para evaporación. Caso 1

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
<b>7002</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
<b>7015</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
<b>7034</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
<b>7039</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
<b>7062</b>	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
<b>7102</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
<b>7113</b>	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
<b>7134</b>	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
<b>7156</b>	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
<b>7202</b>	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

De acuerdo con estos resultados las estaciones cuyas series resultaron no homogéneas son las siguientes:

Tabla 3.38. Estaciones "no homogéneas". Caso 1

Estación
<b>7002</b>
<b>7015</b>
<b>7034</b>
<b>7039</b>
<b>7102</b>
<b>7156</b>

### Caso 2. Estaciones no homogéneas en Precipitación Máxima Anual

Tabla 3.39. Resultado de las pruebas para evaporación. Caso 2

Estación	Pruebas			
	Helmert	T-Student	Cramer	Anderson
7040	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7061	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7062	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7113	No homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
7122	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente
7145	No homogénea	Homogénea	No homogénea	Independiente

De acuerdo con estos resultados las estaciones cuyas series resultaron no homogéneas son las siguientes:

Tabla 3.40. Estaciones "no homogéneas". Caso 2

Estación
7040
7061
7122
7145

### 3.3 Análisis de resultados

Según los resultados mostrados arriba se pueden resumir como sigue:

CASO	PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA	EVAP ACUM
P ACUM	7002	7002	7002
	7015	7015	7015
	7034	7034	7034
	7039	7039	7039
	7050	7050	
	7062	7062	7062
	7065	7065	
	7085	7085	

CASO	PRECIPITACIÓN	TEMPERATURA	EVAP ACUM
	7102	7102	7102
	7113	7113	7113
	7134	7134	7134
	7156	7156	7156
	7202	7202	7202
	7395		
	27053	27053	
P MAX	7012	7012	
	7040	7040	7040
	7050	7050	
	7061	7061	7061
	7062	7062	7062
	7113	7113	7113
	7119	7119	
	7122	7122	7122
	7145	7145	7145
	7395		
	30167	30167	

En esta tabla se observa en la primera columna el caso del cual se trata, es decir si es en precipitación acumulada anual o en precipitación máxima anual. La segunda columna muestra todas las estaciones que resultaron no homogéneas en el caso de precipitación para ambos casos. La tercera columna muestra resultado en gris las estaciones que resultaron no homogéneas en la variable de temperatura para ambos casos y la última columna muestra estos mismos resultados pero para la variable de evaporación acumulada.

Las siguientes figuras muestran las estaciones que resultaron no homogéneas en la variable temperatura para los dos casos en estudio. En estas figuras se puede observar que en el caso de temperatura máxima (figura 4.12) hay dos estaciones (7012 y 7061) que pertenecen a la región hidrológica denominada Costa de Chiapas, por lo que se puede suponer que la falta de homogeneidad en estas series puede ser debido a fenómenos de tipo ciclónico más que a efectos de los embalses.

También se observa que para el caso de precipitación acumulada (figura 4.11) es mucho mas claro ver el efecto de los embalses sobre el patrón de precipitaciones, ya que las estaciones que también presentaron falta de homogeneidad en temperaturas se encuentran cercanas a los embalses.

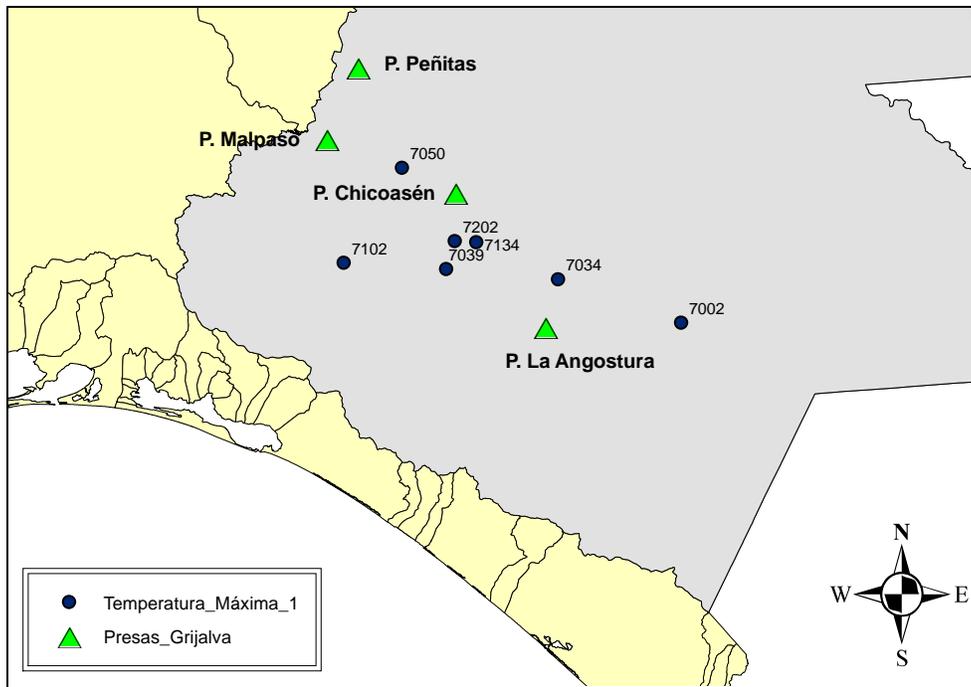


Figura 3.11. Caso 1

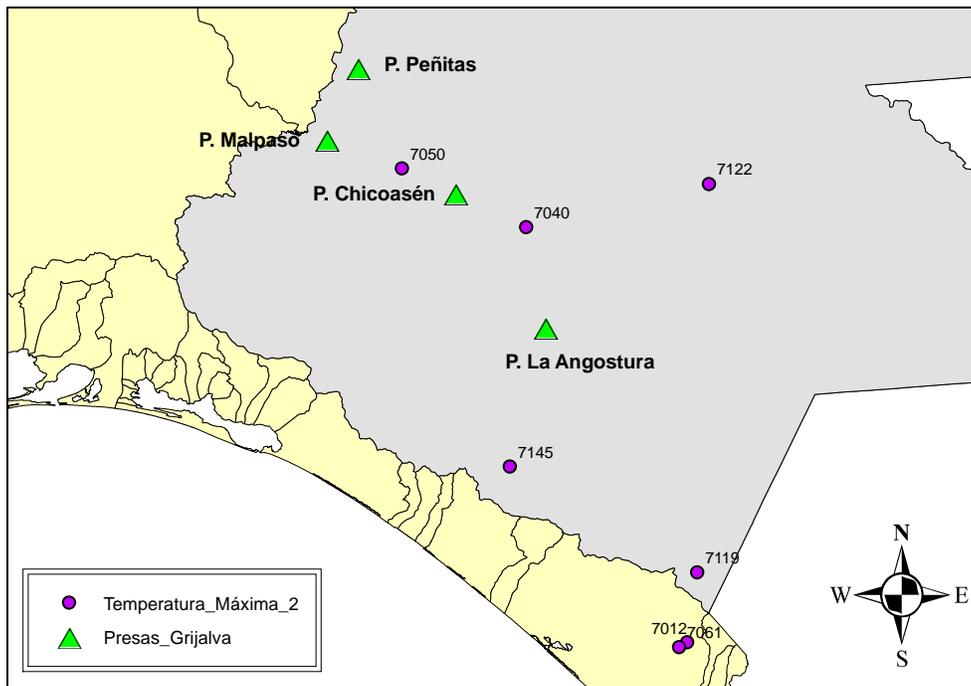


Figura 3.12. Caso 2

Se analizará si la tendencia de las series es creciente (por encima de la media) o decreciente (por debajo de la media). Este análisis se hará para las estaciones que resultaron no homogéneas tanto en precipitación como en temperatura.

❖ Precipitación acumulada anual

○ 7002

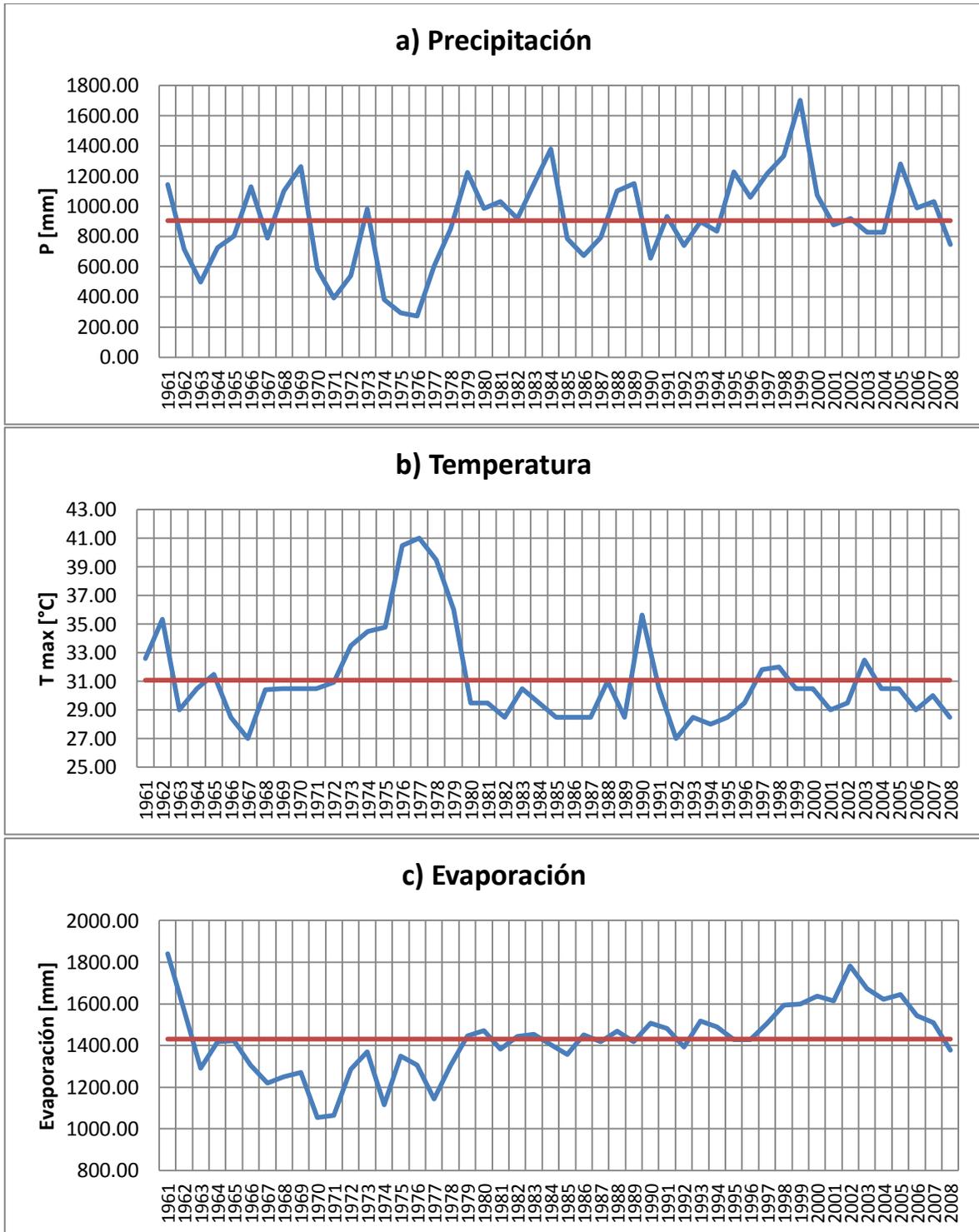


Gráfico 3.2. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7002

○ **7034**

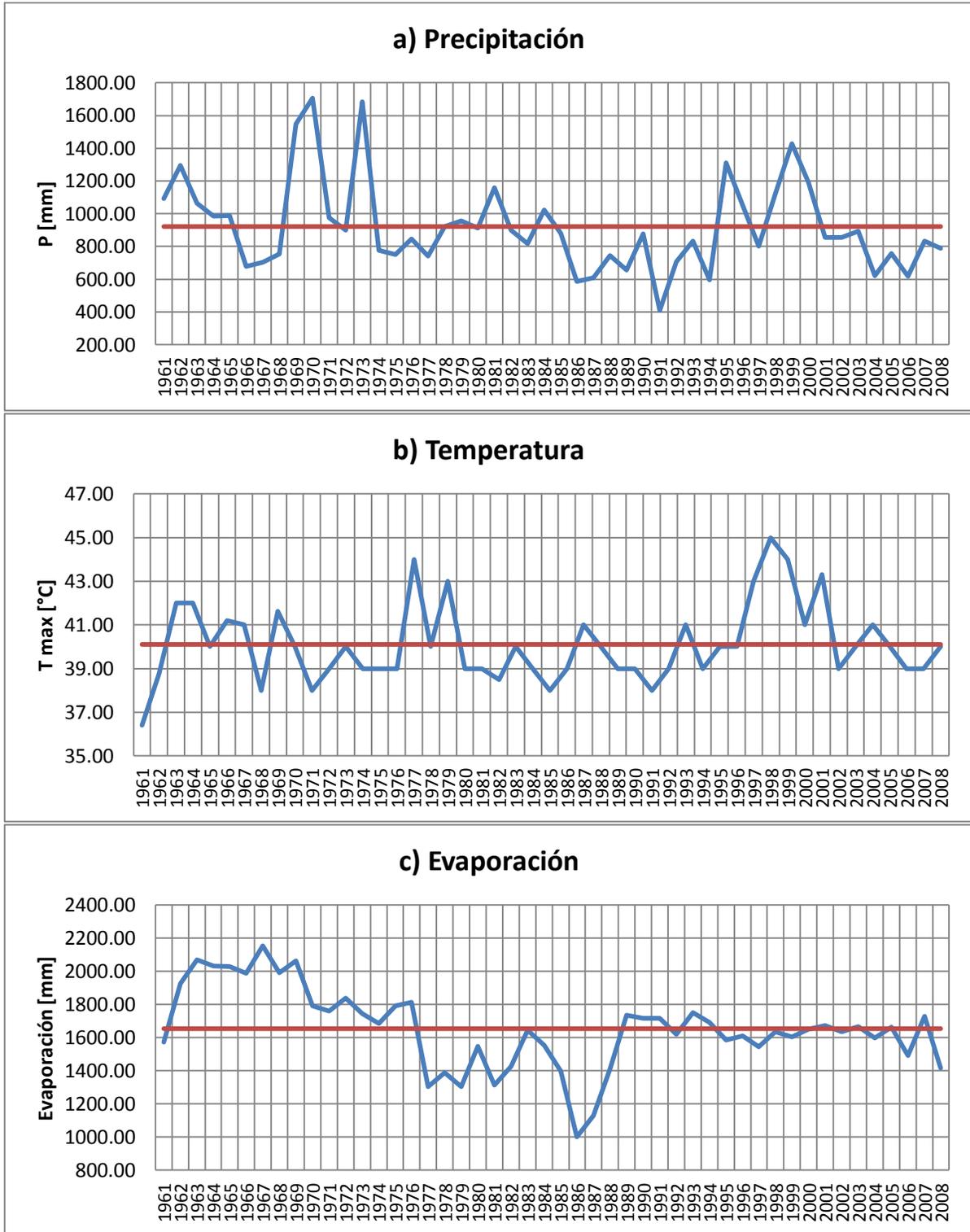


Gráfico 3.3. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7034

○ **7039**

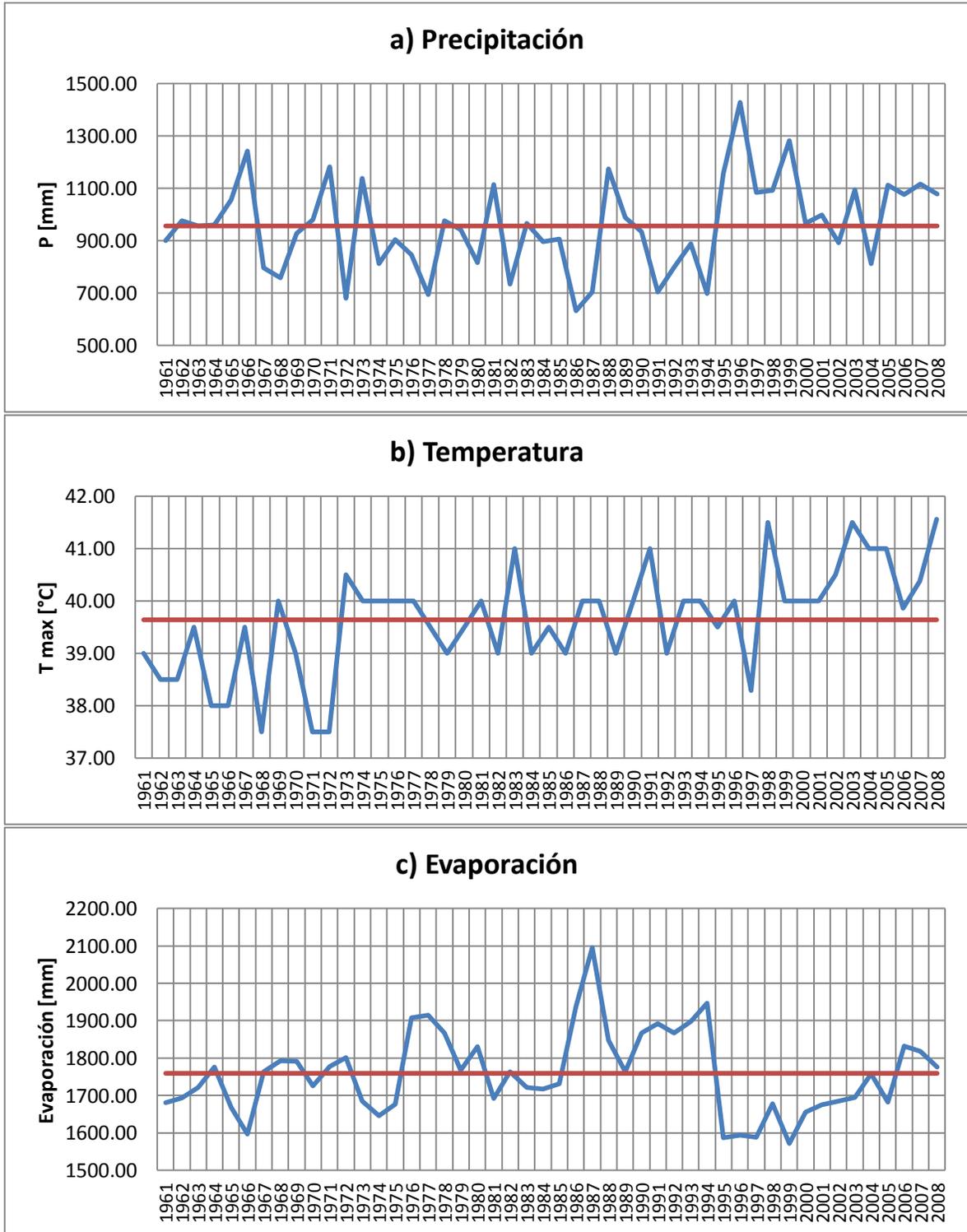


Gráfico 3.4. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7039

○ **7050**

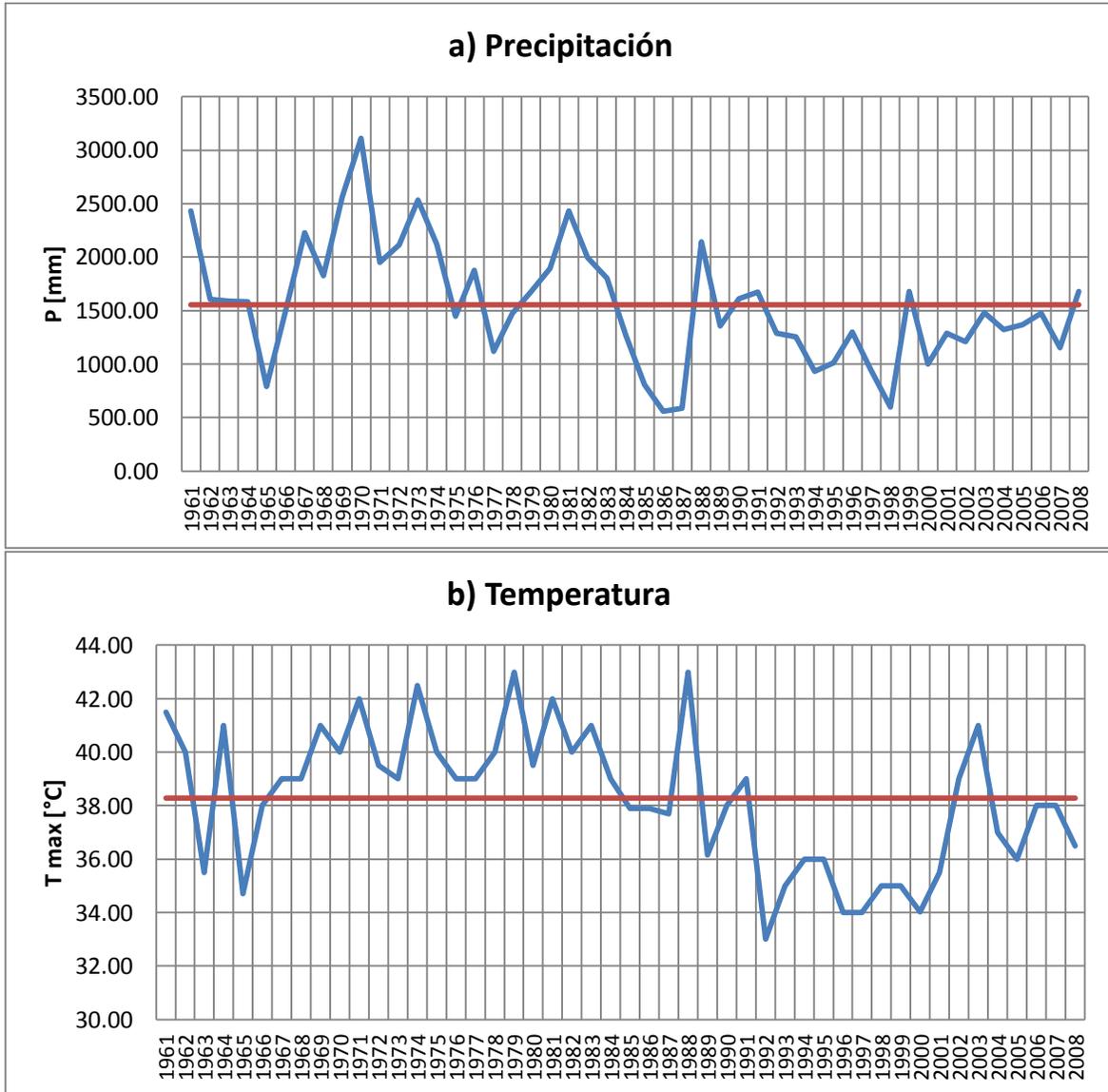


Gráfico 3.5. Análisis de la tendencia para las variables precipitación y temperatura en la estación 7050

○ 7102

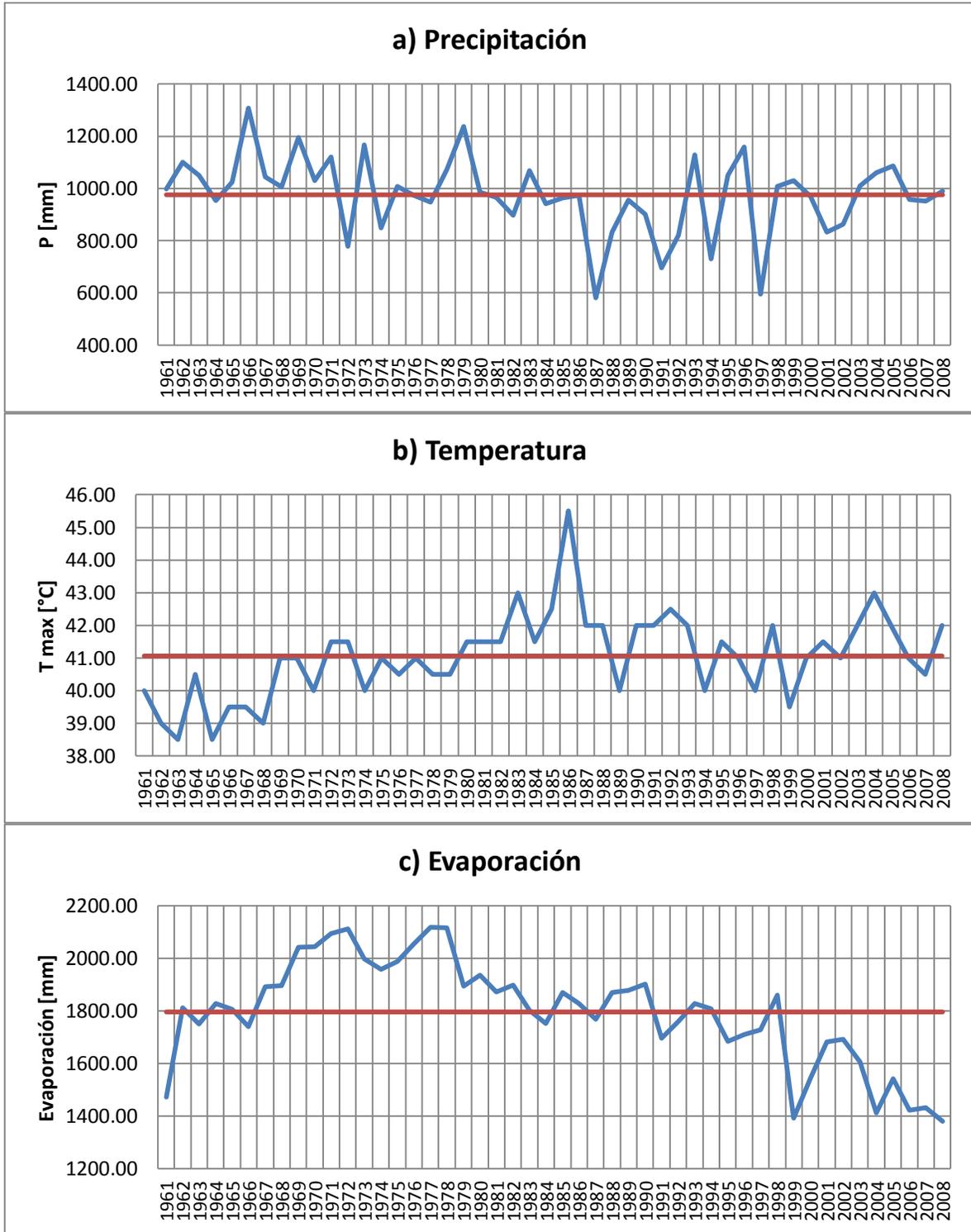


Gráfico 3.6. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7102

○ **7134**

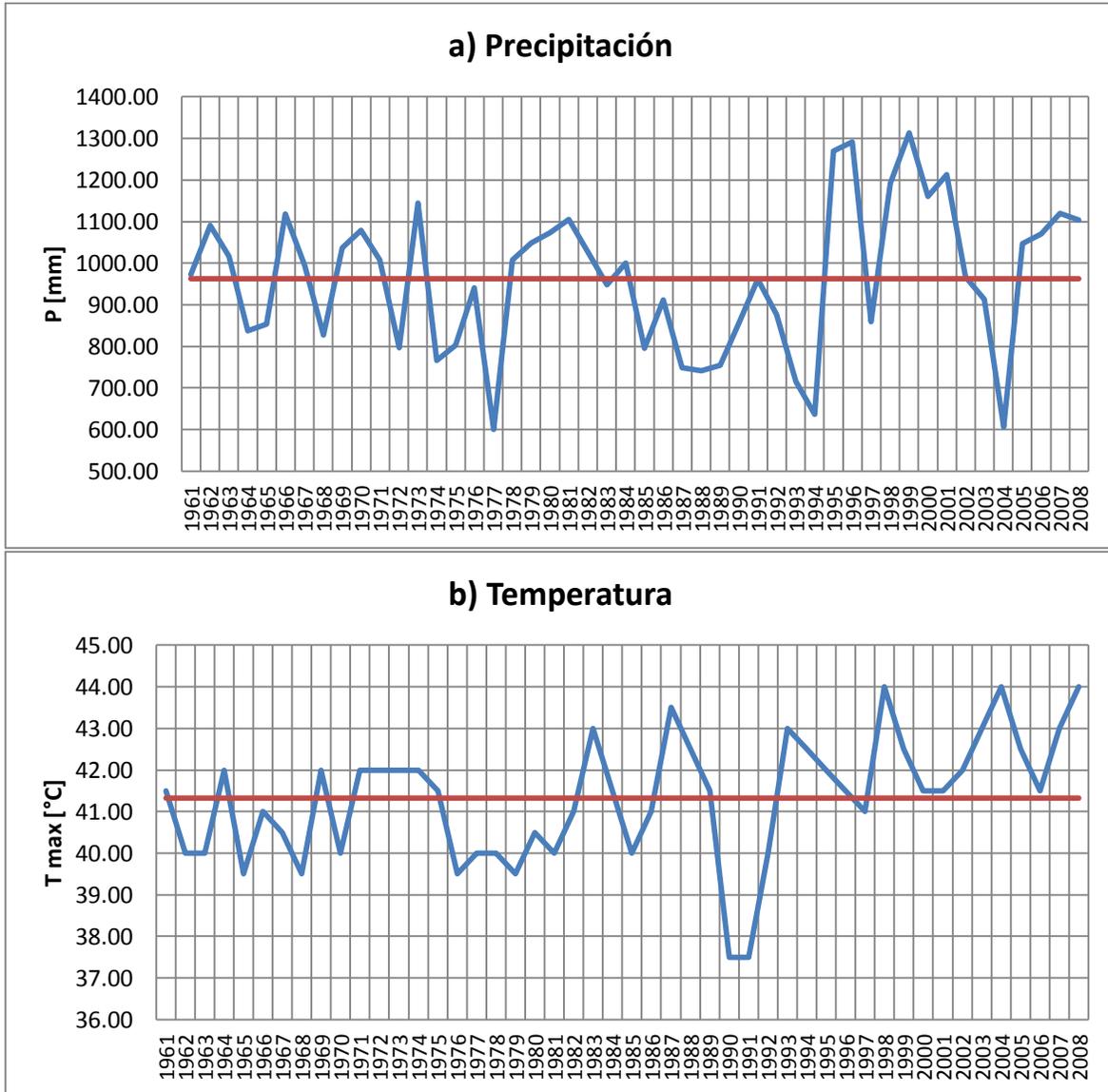


Gráfico 3.7. Análisis de la tendencia para las variables precipitación y temperatura en la estación 7134

○ **7202**

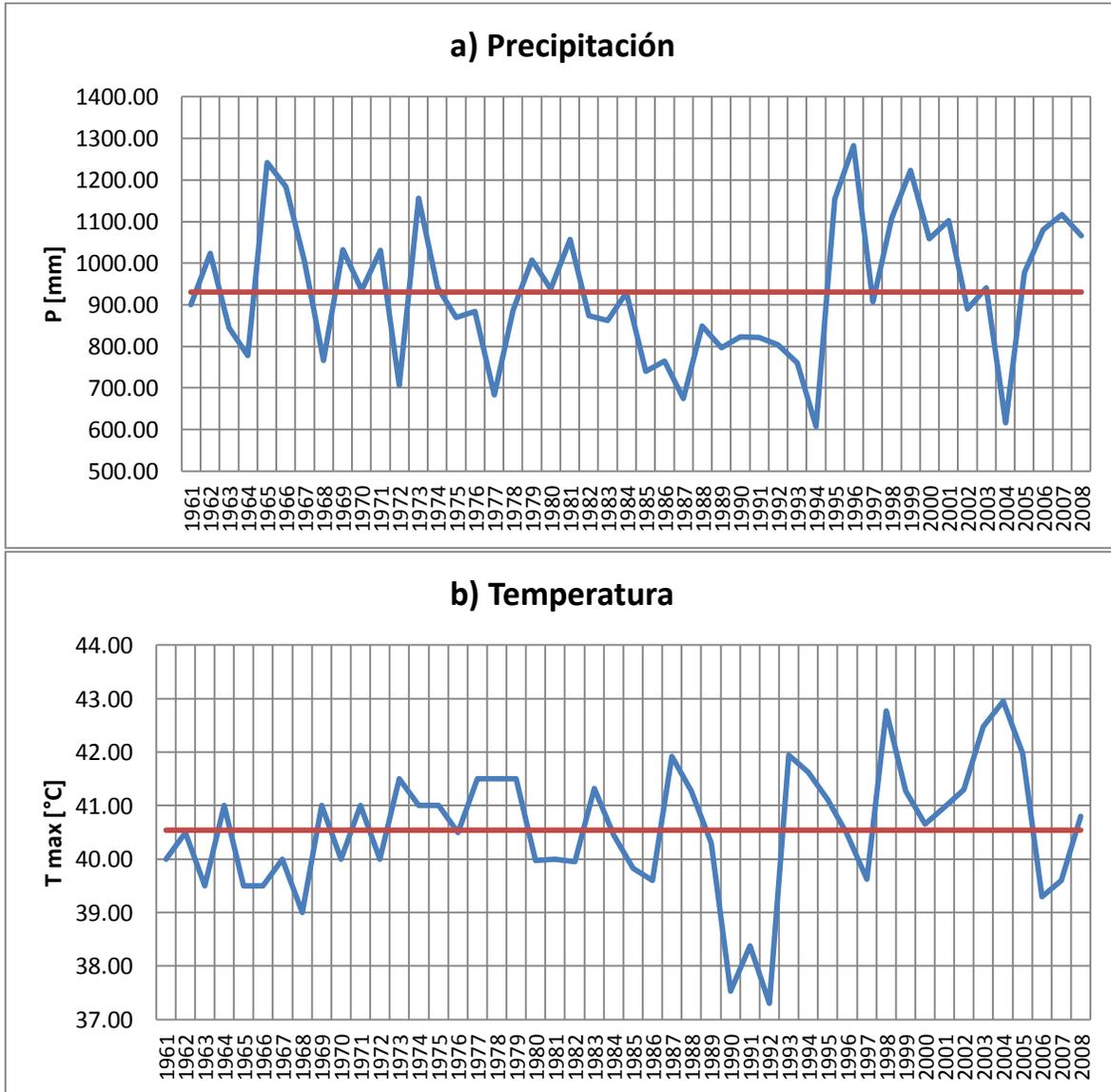


Gráfico 3.8. Análisis de la tendencia para las variables precipitación y temperatura en la estación 7202

❖ Precipitación máxima anual

○ 7012

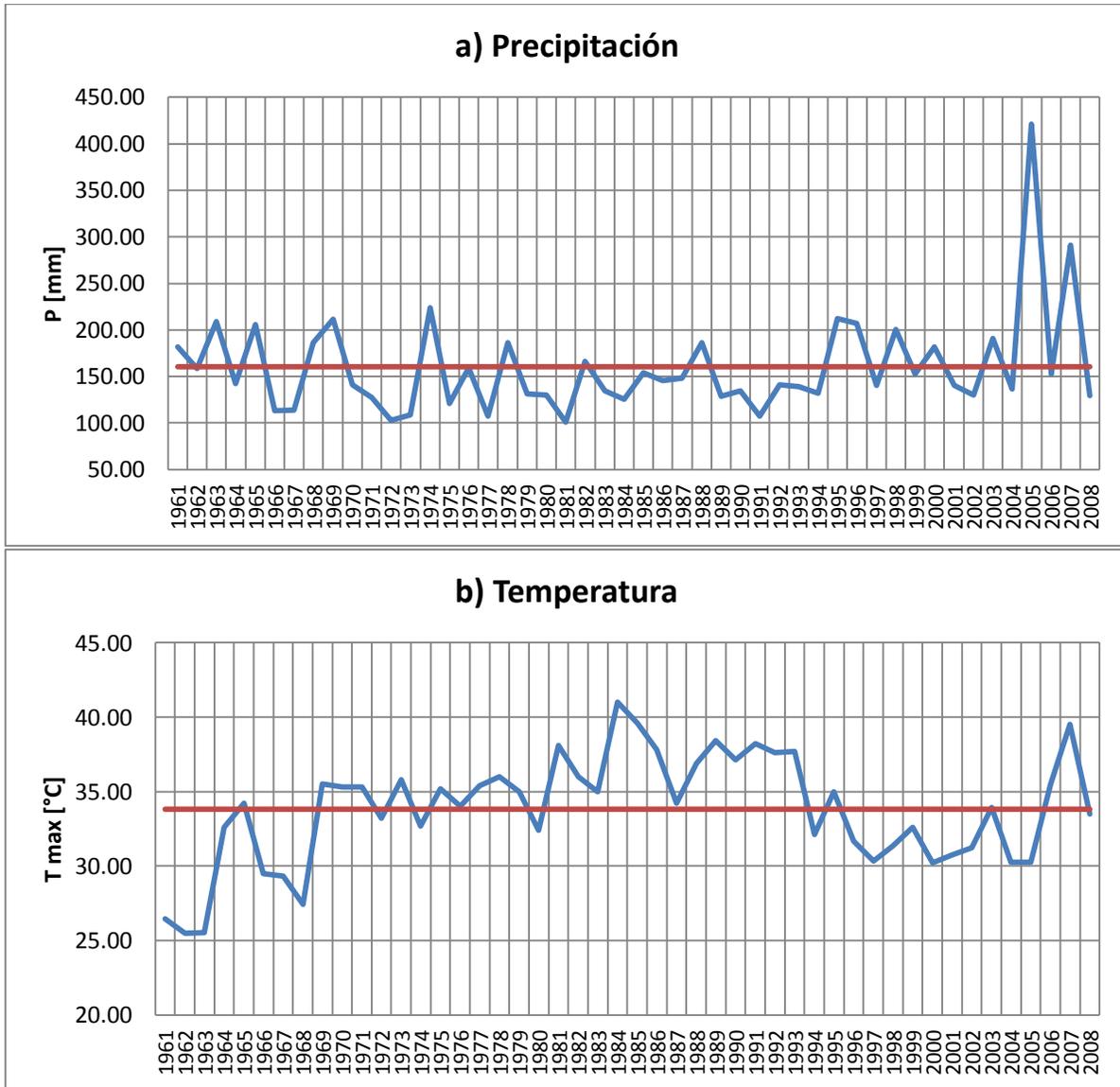


Gráfico 3.9. Análisis de la tendencia para las variables precipitación y temperatura en la estación 7012

○ 7040

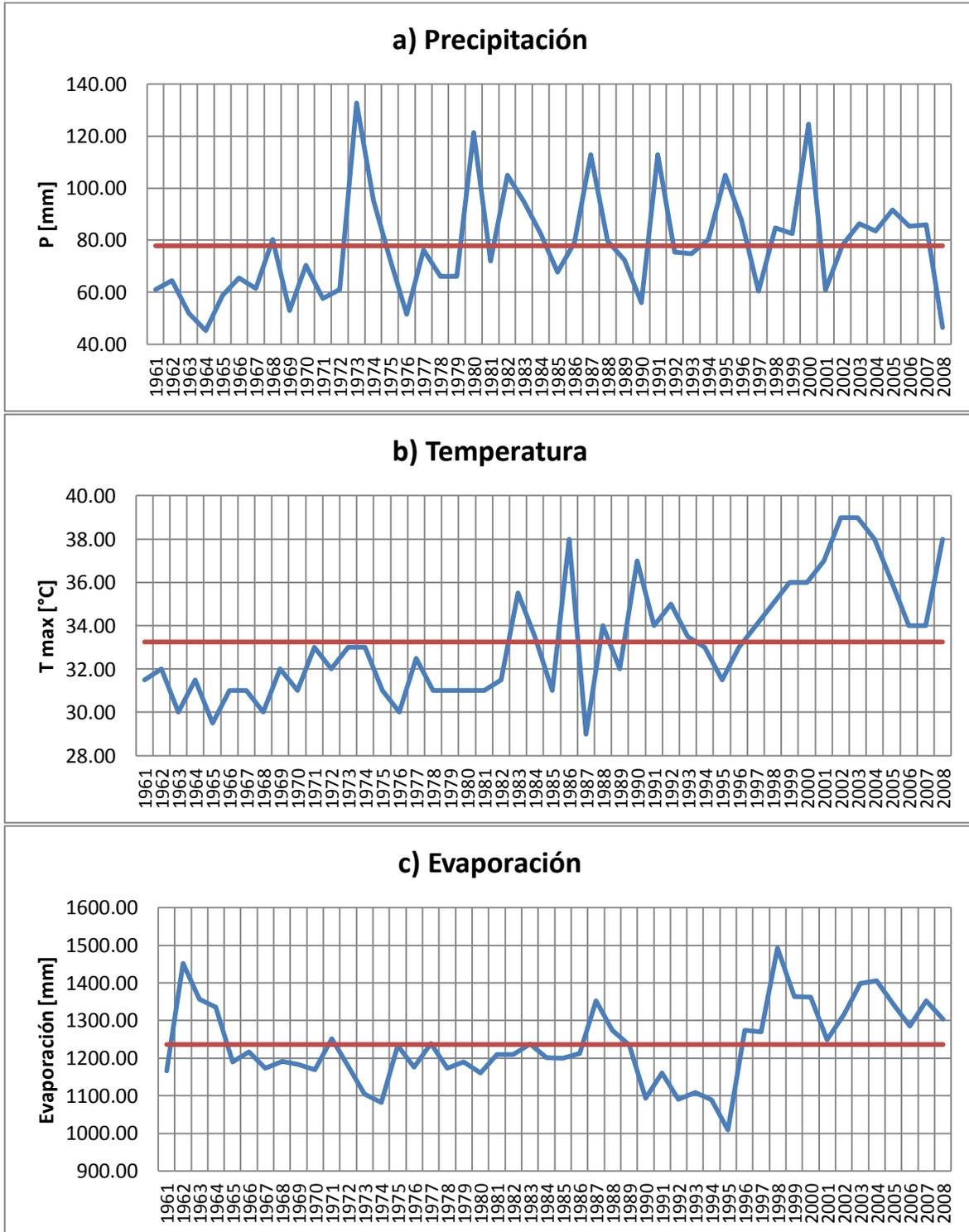


Gráfico 3.10. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7040

○ **7050**

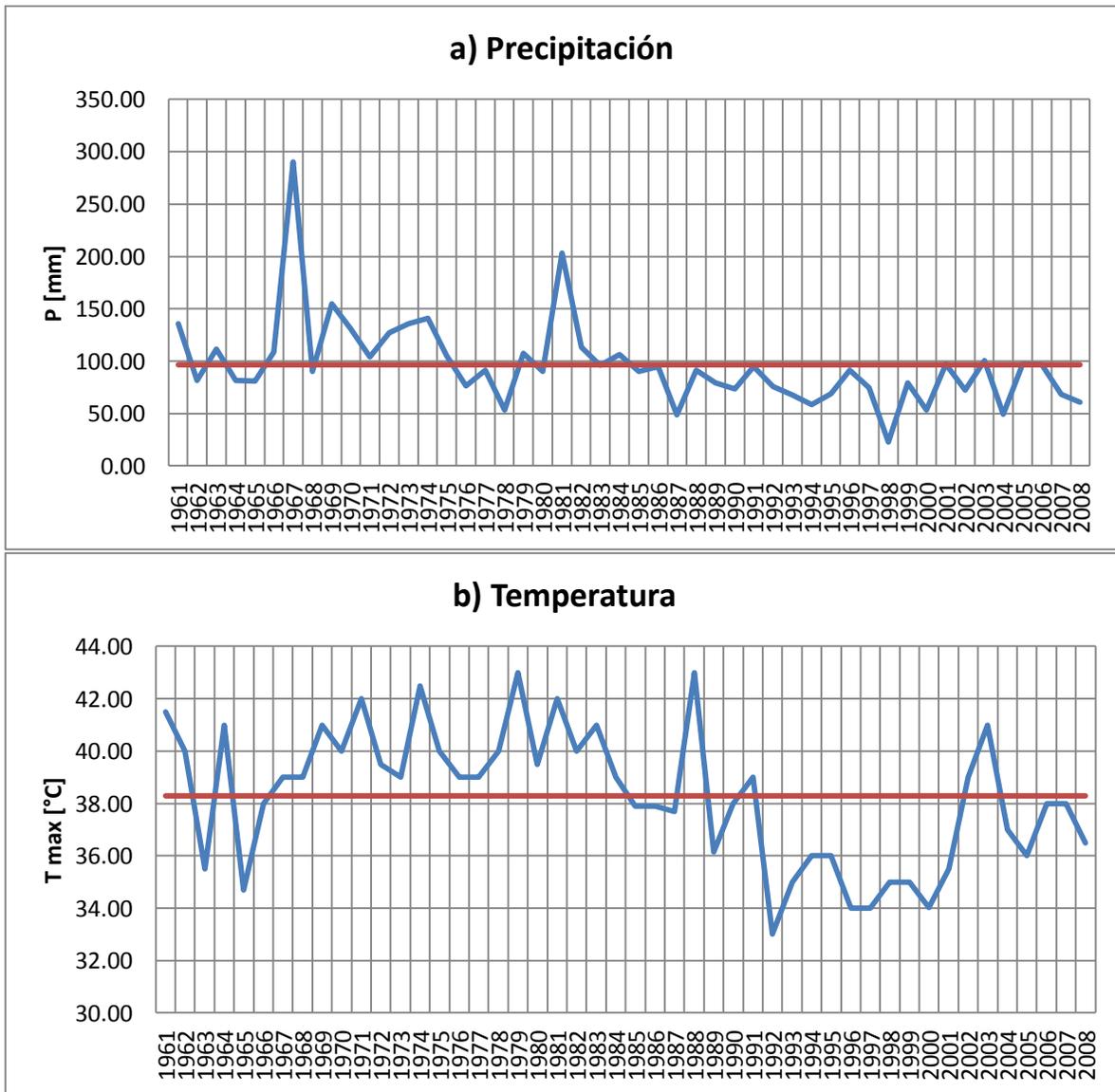


Gráfico 3.11. Análisis de la tendencia para las variables precipitación y temperatura en la estación 7050

○ **7061**

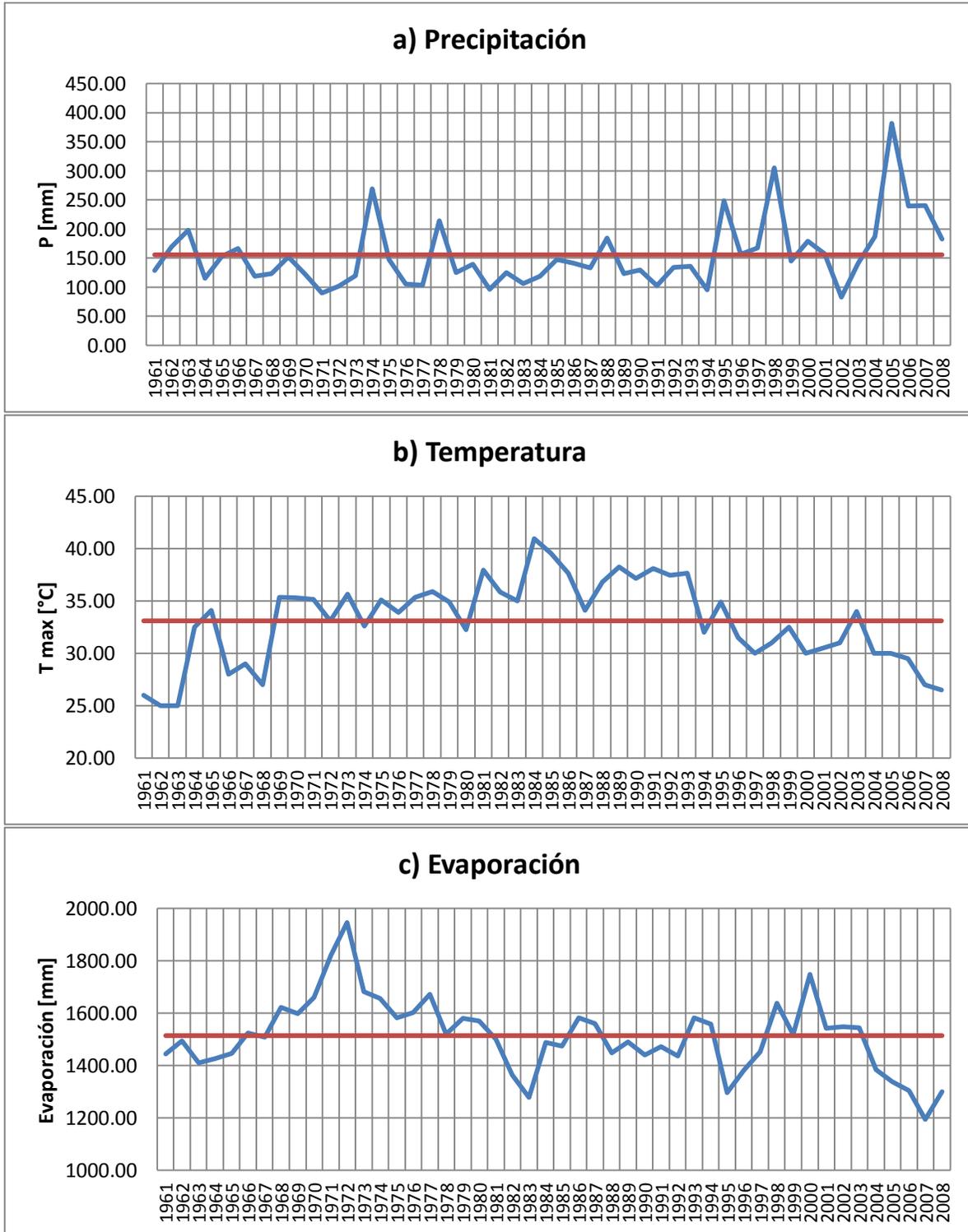


Gráfico 3.12. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7061

○ 7119

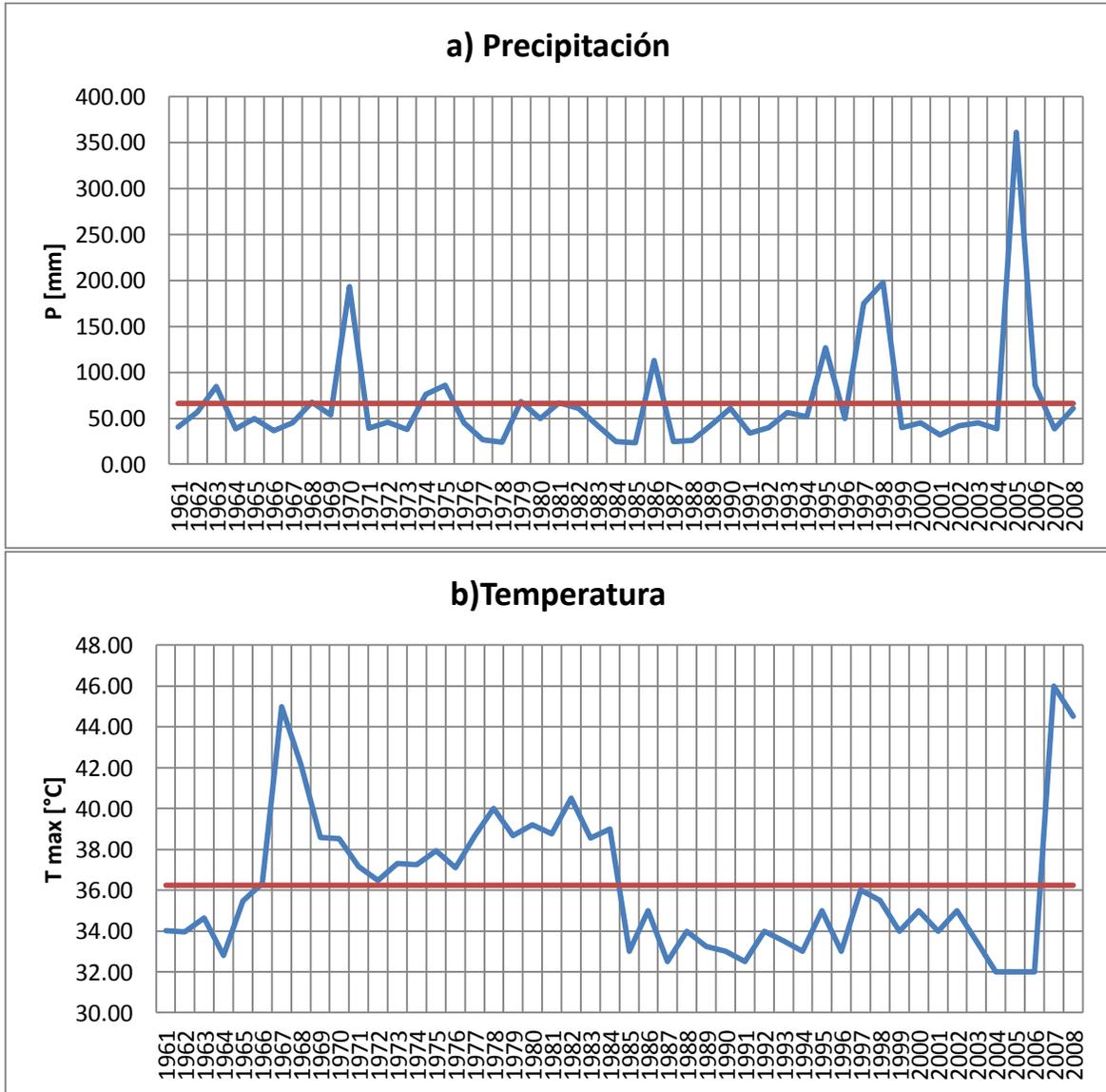


Gráfico 3.13. Análisis de la tendencia para las variables precipitación y temperatura en la estación 7119

○ 7122

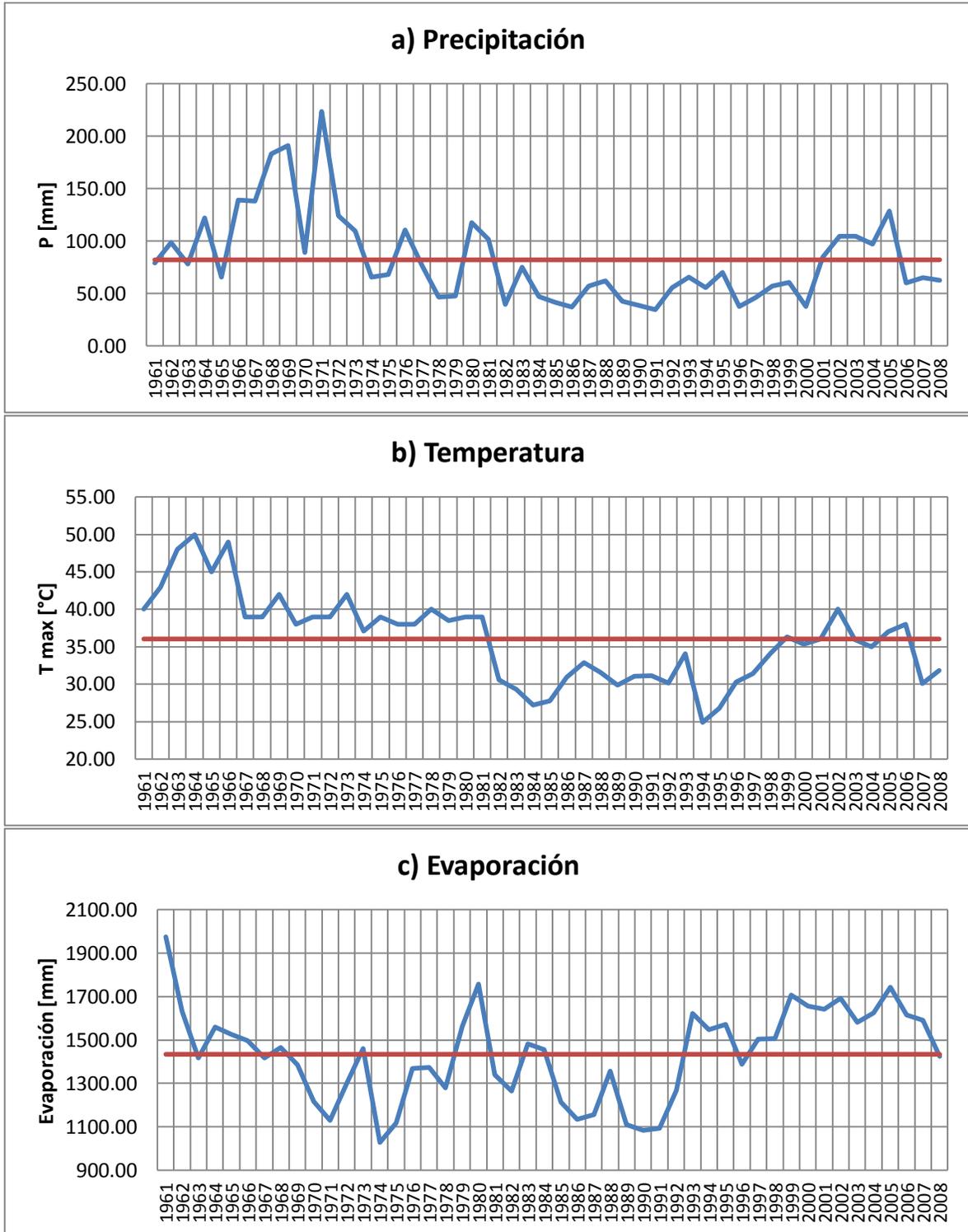


Gráfico 3.14. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7122

○ 7145

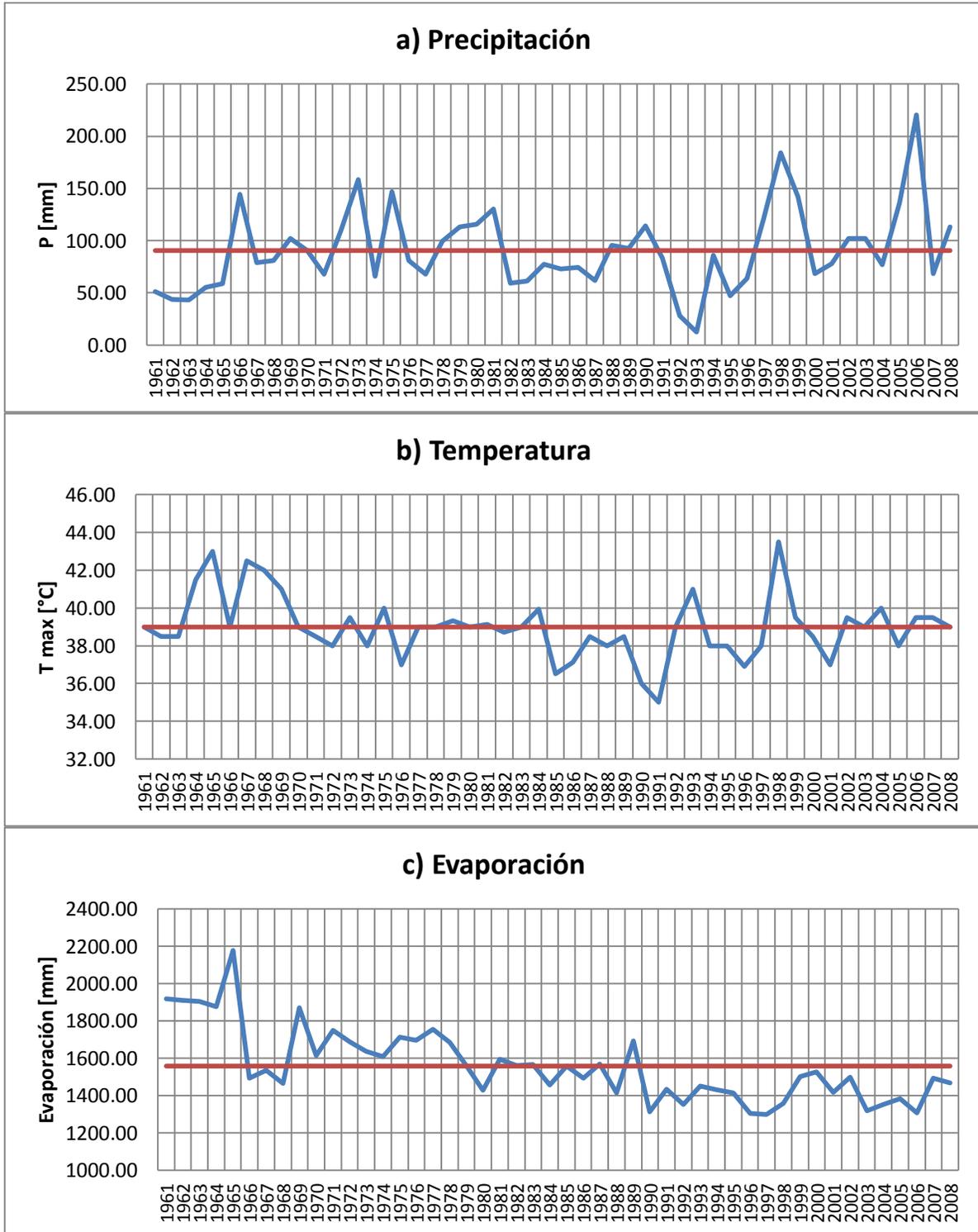


Gráfico 3.15. Análisis de la tendencia para las variables precipitación, temperatura y evaporación en la estación 7145

A continuación se muestra una tabla de las estaciones que resultaron no homogéneas en el caso de precipitación acumulada y precipitación máxima y las distancias entre estas y cada embalse.

Tabla 3.41. Estaciones no homogéneas y su distancia a cada embalse

Caso	Estación	Distancia [km]			
		La Angostura	Chicoasén	Malpaso	Peñitas
PRECIPITACIÓN ACUMULADA	7002	57.83	111.28	170.20	176.08
	7015	66.00	22.79	78.36	79.16
	7034	20.64	57.60	115.40	124.84
	7039	48.76	33.54	75.58	94.64
	7050	91.26	25.07	34.22	47.29
	7062	97.93	145.78	205.04	206.88
	7065	75.02	75.16	90.44	119.45
	7085	152.84	136.57	176.73	157.22
	7102	90.00	56.64	53.88	84.40
	7113	105.94	167.06	206.48	229.98
	7134	46.39	23.48	77.55	90.64
	7156	126.43	76.86	35.35	68.18
	7202	53.03	21.32	69.93	85.46
	7395	129.42	197.48	244.74	264.12
	27053	220.54	161.98	154.27	120.88
	PRECIPITACIÓN MÁXIMA	7012	148.12	216.61	264.60
7040		43.36	33.56	92.78	99.19
7050		91.26	25.07	34.22	47.29
7061		148.67	216.93	264.33	283.67
7062		97.93	145.78	205.04	206.88
7113		105.94	167.06	206.48	229.98
7119		123.60	192.71	243.59	260.31
7122		92.61	107.93	163.74	157.69
7145		61.82	119.80	160.47	182.95
7395		129.42	197.48	244.74	264.12
30167		214.70	147.25	92.95	92.70

En la tabla anterior se encuentran resaltadas en amarillo aquellas estaciones que además de ser no homogéneas en precipitación, también resultaron no homogéneas en la temperatura. Para el caso de la precipitación acumulada, resaltadas en gris se muestran dos estaciones que en el caso de la temperatura resultaron homogéneas pero en la evaporación resultaron no homogéneas.

Para el caso de la precipitación máxima resaltadas en verde se encuentran tres estaciones que a pesar de haber resultado no homogéneas en la temperatura y en la precipitación se encuentran a distancias considerables de los embalses, esto puede atribuirse a fenómenos ciclónicos ya que se encuentran cerca a la costa de Chipas.

De lo anterior podemos observar que para el caso de la precipitación acumulada de aquellas estaciones que resultaron no homogéneas en la precipitación pero no mostraron cambios en la temperatura y la evaporación la distancia al embalse mas cercano es de 75.02 [km] (resaltada en rojo) y en el caso de la precipitación máxima esta distancia es de 92.70 [km]. Por lo cual podemos decir que los embalses localizados a distancias mayores que las expuestas anteriormente no provocan alteraciones en los patrones climáticos de dichas estaciones.

# Conclusiones

---

Durante la realización de este trabajo se encontraron diversos problemas en cuanto a la cantidad y calidad de la información disponible, ya que lamentablemente no se cuentan con los suficientes registros tanto de precipitación, temperatura y evaporación.

Aunque existen diversas estaciones climáticas varias de estas presentaron registros incompletos por lo cual se tuvo que recurrir al uso de técnicas de interpolación de variables climáticas para completar estos registros. Aunque estas técnicas han demostrado su efectividad no deja de ser inferencia de información ya que depende de la información de otras estaciones, lo cual provoca “meterle ruido” a las series. También se revisó que estas estaciones pertenecieran a la misma región homogénea y que se encontraran a una distancia razonable para garantizar que la información transferida presente el mismo patrón que la estación con datos faltantes.

Otro gran problema es la calidad de la información, ya que en ocasiones hay puntos extraños dentro de las series registradas por lo cual hay que recurrir a registros históricos sobre eventos que hayan podido originar estos puntos extraños, o bien si estos eventos no existen pueden atribuirse a errores en la captura de la información, por lo que en estos casos lo mas conveniente es inferir dicha información mediante técnicas de interpolación de variables climáticas.

Por lo tanto en lo que se refiere a la información utilizada se puede decir lo siguiente:

- ❖ Es muy importante contar con una base de datos de tamaño de registro suficiente (mayor de treinta años) para que los estudios que se hagan sean lo mas certeros posibles.
- ❖ La base de datos debe contener información confiable, esto es que se haya hecho un análisis de la calidad de la información con la que se cuenta, para evitar datos en la muestra que no correspondan con lo que realmente ocurrió.
- ❖ Debe tratarse que las estaciones utilizadas en los estudios tengan la menor cantidad de datos faltantes, ya que aunque las técnicas utilizadas para inferir información son muy buenas, sigue siendo transferencia de información y esto puede meter ruido a las series, lo que puede hacer que si una serie no presentan tendencia, al hacer la transferencia de información y si no es bien realizada, pueda añadirse cierta tendencia a la serie.

En cuanto al análisis de los patrones de lluvias, este se realizó para dos diferentes casos, uno fue el analizar las estaciones considerando la precipitación acumulada anual y el otro fue hacer el análisis considerando la precipitación máxima anual. Cabe señalar que en el caso de la precipitación máxima anual esta no es la que se obtiene directamente del registro, sino que esta se tiene que multiplicar por un factor de 1.13, esto debido a que la información de precipitación con la que se cuenta es obtenida de pluviómetros y recordemos que esta información se lee de 8 de la mañana a 8 de la mañana del día siguiente por lo cual ya no representa la lluvia diaria, por este motivo se

ha comprobado que al multiplicar estas series por 1.13 se corrige el error. (Escalante Sandoval C. A., 2011)

De estos dos análisis se obtuvieron estaciones que resultaron no homogéneas, es decir que presentan cambios en sus patrones de lluvias. Tales estaciones fueron analizadas para el caso de temperatura máxima y evaporación total con el fin de determinar si también en estas variables se presentaban cambios en los patrones.

De acuerdo con el estudio realizado por los autores del artículo *“Dam safety effects due to human alteration of extreme precipitation”* publicado en el 2010, del cual surge la idea de este trabajo, en el que mencionan que trabajaron con datos de 40,000 estaciones climatológicas alrededor del mundo sin especificar la ubicación con respecto a la presencia de embalses, distribuidas a lo largo de todos los continentes (incluyendo a la República Mexicana), establecieron la relación que existe entre el cambio del comportamiento de la precipitación ante la afectación del uso de suelo y la presencia de los embalses, empleando diversas técnicas de estudio como el manejo de percentiles. Dentro de sus conclusiones establecen la existencia de un cambio del comportamiento de la precipitación. Sin embargo, para poder hacer un estudio de este tipo se necesita hacer una evaluación del régimen de lluvias antes y después de la construcción de los embalses, por lo que se necesitaría contar con un registro de 60 años como mínimo de precipitaciones en todas las estaciones climáticas en estudio, lamentablemente no se cuenta con la información suficiente y aunque existen técnicas para inferir dicha información en ocasiones no puede llevarse a cabo dicha inferencia. Por lo tanto, en este trabajo no pudo validarse los resultados obtenidos por los autores del artículo *“Dam safety effects due to human alteration of extreme precipitation”* de que sea la presencia de los embalses el motivo del cambio en los patrones de lluvias.

Aun así continuó el análisis y se encontró lo siguiente:

- ❖ Si existe un cambio en los patrones de lluvias, temperaturas máximas y evaporaciones.
- ❖ Sin embargo, aunque se encontró que si existen cambios en los patrones de lluvias en las estaciones cercanas a los embalses del Sistema Grijalva, no se puede afirmar que dichos cambios sean debido a la presencia de los mismos.
- ❖ Estos cambios pueden ser atribuidos a los cambios en los usos del suelo y la deforestación que se originan al construir las presas, por lo que se puede decir que los cambios en los patrones de lluvia en las estaciones cercanas a los embalses son provocados por la alteración en el entorno al construir las presas pero no se puede afirmar que sean debido a la presencia de los mismas.
- ❖ Debido a esto, es de suma importancia realizar un estudio de la cuenca e implementar programas de Manejo Integral de Cuencas para llevar a cabo un saneamiento de la misma.
- ❖ También se debe revisar la seguridad y la política de operación de las presas que conforman el sistema Grijalva, esto para evitar tanto inundaciones, disminución de la capacidad hidráulica, o problemas en la disponibilidad de agua (en el caso donde las precipitaciones estén disminuyendo).

Como recomendación surgida de este trabajo y enfocada al tema de cambio climático, mismo que se presentó en el capítulo 2, se observa que el estudio del tema se enfoca de manera global, sin incluir parámetros o índices locales, el análisis en la microesfera deberá incluir como unidad básica funcional la cuenca.

Reflexionando sobre este tema el cambio en el patrón de comportamiento de la lluvia generalmente a invitado a pensar que existen alteraciones en el clima, sin embargo la condición de cambio en la precipitación es necesaria pero no suficiente para hablar de un cambio climático por lo que es necesario plantear las escalas a las que se debe de medir un posible cambio en el clima sin perder de vista también las ventajas y desventajas que esta alteración en las variables meteorológicas ocasionará.

En resumen es necesario recalcar la importancia de la creación de índices y escalas que permitan estudiar y evaluar si en verdad existe un cambio de clima a nivel local, regional y finalmente global, dado que los programas de acción ante el cambio climático se hacen a nivel estatal reflejándose de forma directa la dinámica socioeconómica de un país.

# Referencias

---

1. CFE-Instituto de Ingeniería UNAM. *Manual de diseño de Obras Civiles*.
2. CMNUCC. (1992). *Definiciones*.
3. CONABIO. *Portal de información geográfica*. Obtenido de <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
4. Escalante Sandoval, C. A. (2011). *Apuntes de la clase de Hidrología Urbana*.
5. Escalante Sandoval, C., & Reyes Chávez, L. (2008). *Técnicas Estadísticas en Hidrología*. México D.F.: Facultad de Ingeniería UNAM.
6. ETCCDI/CRD. *ETCCDI/CRD climate change indices*. Obtenido de [http://cccma.seos.uvic.ca/etccdi/list\\_27\\_indices.shtml](http://cccma.seos.uvic.ca/etccdi/list_27_indices.shtml).
7. García Gutiérrez, F. P. (2010). *Modelación Hidrológica Estocástica: Desarrollo de un modelo de generación sintética de series temporales*. Bolivia: Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno.
8. González Villareal, F. J. (2009). *Evaluación de la vulnerabilidad del sistema de presas del Río Grijalva ante los impactos del cambio climático*. INE-Instituto de Ingeniería UNAM.
9. Hossain, F., Jeyachandran, I., & Pielke , R. S. (2010). Dam safety effects due to human alteration of extreme precipitation. 46.
10. INE. (2009). *Guía para la elaboración de Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático*. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Veracruzana y Centro de ciencias de la Atmósfera.
11. INE. (2010). *Cambio Climático en México*. Obtenido de [http://cambio\\_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/queeselcc/comoseproduceelcc.html](http://cambio_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/queeselcc/comoseproduceelcc.html)
12. IPCC. (2007). *Climate Change 2007:the AR4 Synthesis Report*. Geneva, Switzerland.
13. SMN. CLICOM.
14. Toledo, A. (2003). *Ríos, costas, mares: Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México*. México: INE-SEMARNAT.
15. Vázquez Aguirre, J. (2010). *Guía para el cálculo y uso de índices de cambio climático en México*. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.