

Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo

Teodoro Carlón Allende*
Manuel E. Mendoza**

Recibido: 14 de septiembre de 2006
Aceptado en versión final: 22 de febrero de 2007

Resumen. El análisis de datos hidrometeorológicos de series de tiempo es una herramienta apta para analizar la evolución del clima pasado y presente. El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de las series de tiempo de los datos de precipitación, temperatura y escurrimiento de las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las subcuencas (y algunas en sus cercanías) de Cointzio, Queréndaro y San Marcos, localizadas dentro de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. En primera instancia se presenta una descripción de los datos de temperatura utilizando climogramas; como se esperaba, los mismos registraron, para casi todas las estaciones, las mayores temperaturas durante los meses de abril, mayo y junio. El análisis de tendencia de precipitación, temperatura y escurrimiento se realizó con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall. Esta técnica ha sido ampliamente utilizada para probar aleatoriedad contra tendencias en los datos climáticos de las series de tiempo. El análisis de tendencia indica que la temperatura media en la estación de Morelia tiende a aumentar de manera significativa tanto sus valores mensuales como en el valor medio anual; mientras que Cuitzeo y Huingo tienden a reducir sus temperaturas en forma significativa. Para las precipitaciones anuales indica que las estaciones de Huingo y Jesús del Monte han presentado un aumento estadísticamente significativo.

Palabras clave: Análisis de tendencia, series de tiempo, hidrometeorología, cuenca del lago de Cuitzeo, México.

Hydrometeorological analysis of Cuitzeo Lake watershed

Abstract. Time series analysis of hydrometeorological data is an excellent tool for analyzing climate evolution in the past and present. The subject in this research was to analyze temperature, precipitation and runoff time series from hydro-meteorological stations located in (and close by) the subwatersheds of Cointzio, San Marcos and Querendaro, which are located in Cuitzeo Lake watershed, Michoacán. Firstly a climatic description based on climograms is presented; as it was expected, the highest temperatures were observed in April, May and June. The trend analysis of precipitation, tempera-

*Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de La Huerta, 58190, Morelia, Michoacán. E-mail. teodoro_allende@yahoo.com.mx.

**Instituto de Geografía, Unidad Académica Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de La Huerta, 58190, Morelia, Michoacán. E-mail mmendoza@igg.unam.mx.

ture and runoff was carried out using a nonparametric Mann-Kendall test. Trend analysis indicated mean temperature from Morelia station increase at significant level, in both monthly and annual values; while, records from Cuitzeo and Huingo stations indicated a decrease trend at significant level. Annual precipitation from Huingo and Jesus del Monte indicated an increase at significant level.

Key words: Trend analysis, time series, hydrometeorology, Cuitzeo lake watershed, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La Meteorología es la ciencia que estudia los fenómenos que se producen en la atmósfera (García 2001). Como ciencia, podría ocuparse fundamentalmente de entender como se producen esos fenómenos; sin embargo, desde el comienzo de la era moderna de la Meteorología en la escuela de Bergen, la predicción del tiempo se constituyó en uno de los pilares fundamentales del desarrollo de la ciencia meteorológica. En sus comienzos, la predicción meteorológica intentaba conocer con antelación aquellos fenómenos que podían producir daños materiales o personales en la población, lo que se conoce con el nombre de fenómenos adversos (*Ibid.*).

Desde hace diez mil años aproximadamente, la Tierra experimenta una época cálida (Euscategui 2002), que ha permitido la expansión de la humanidad a partir del desarrollo de la agricultura. Sin embargo, el clima durante estos últimos diez mil años no ha sido completamente uniforme; las variaciones de temperatura han determinado ciclos de calor o frío, los cuales han durado pocos siglos y sus efectos han sido moderados. Las temperaturas, en las dos últimas décadas han resultado ser las más cálidas del pasado siglo y los tres años más cálidos del siglo han tenido lugar en la década de los noventa. Existen evidencias de que los patrones de precipitación también están cambiando en muchas partes del globo (Watson *et al.*, 1997; Watson, 2001). A partir de la Revolución Industrial, y especialmente en la segunda mitad del siglo pasado, la humanidad ha modificado el medio ambiente a escala global (Ludevid, 1997). Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero como el dióxido de

carbono, el metano y el óxido nítrico, producto de las actividades humanas (principalmente, la quema de combustibles de origen fósil y los cambios en el uso de la tierra y la cobertura vegetal), ha producido una alteración en el balance de radiación solar que ha generado un incremento de la temperatura media global del aire (Gracia *et al.*, 2000, Githeko *et al.*, 2000). Este calentamiento ha modificado los elementos climatológicos, causando un cambio climático que ha afectado, entre otros, a los sistemas naturales (Euscategui, 2002). Como consecuencia, un elemento importante de la investigación actual en cambio y variabilidad climática es el análisis de tendencias en variables hidroclimáticas de series de registros de datos (Molnár y Ramírez, 2001).

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de las series de tiempo de los datos de precipitación, temperatura y escurrimiento de las estaciones hidrometeorológicas ubicadas en las subcuencas de Cointzio, Río Queréndaro, y Río San Marcos, localizadas en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán.

ÁREA EN ESTUDIO

Las subcuencas seleccionadas se localizan dentro de la cuenca lacustre del lago de Cuitzeo y forman parte de la región hidrológica de Lerma-Chapala (Figura 1). La subcuenca de San Marcos ocupa una superficie de 123 km², mientras que la subcuenca de Queréndaro tiene un área de 134 km², y la subcuenca de Cointzio ocupa una superficie de 675 km².

Las tres subcuencas están conformadas por colinas, lomeríos altos y planicies, desarrolladas sobre materiales volcánicos de composición intermedia a básica que van del Mioceno al

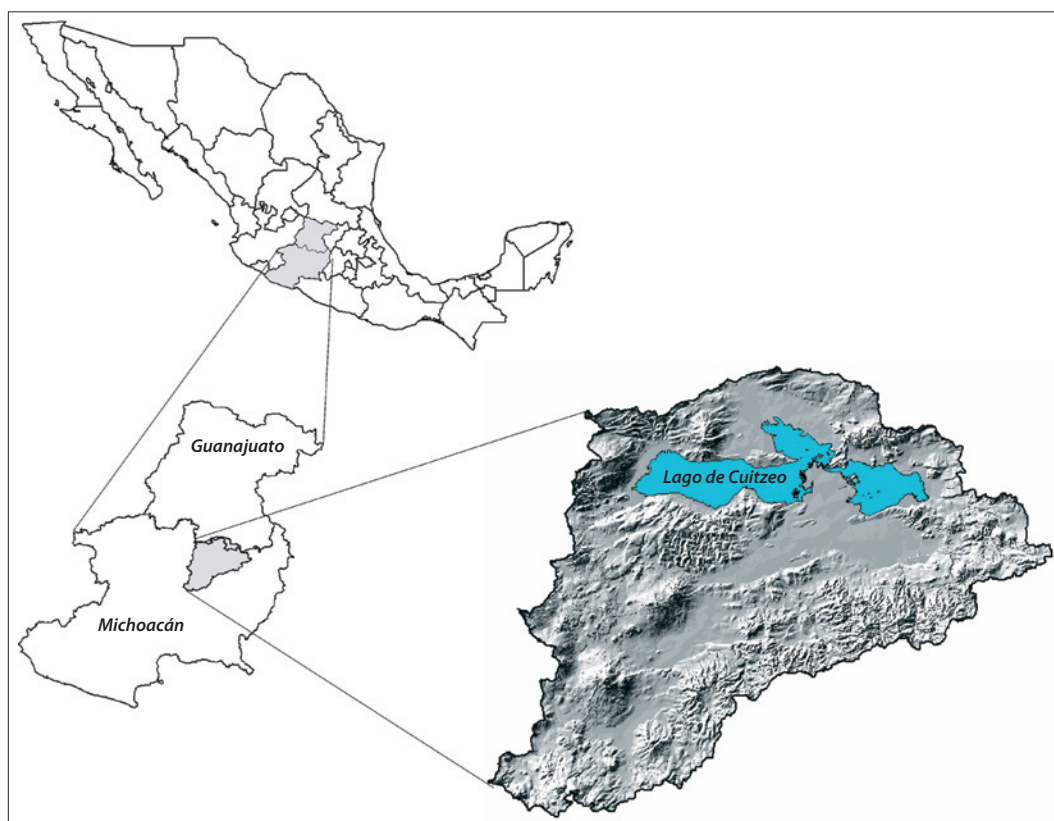


Figura 1. Ubicación del área en estudio.

Reciente, sobre los cuales se desarrollan principalmente suelos arcillosos (Vertisoles, Acrisoles) y francos (Andosoles). Las coberturas vegetales en las subcuencas son bosque templado (pino-encino), matorral-pastizal, cultivos temporales y de riego; sin embargo, la proporción de cada cobertura varía en cada subcuenca. Las subcuencas Queréndaro y Contzio presentan mayor proporción de bosques, mientras que en la subcuenca de San Marcos predominan los matorrales y pastizales (Carlón, 2006).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un análisis de tendencia de las series de tiempo de los registros de precipitación, temperatura y gastos. El análisis requirió de la

integración y actualización de dichas variables obtenidas o medidas en las estaciones hidrometeorológicas que se encuentran dentro de la cuenca de Cuitzeo (23 estaciones meteorológicas y siete hidrométricas). Los datos diarios se agregaron a medias mensuales y anuales. En la Figura 2 se muestra el diagrama de la metodología que se empleó para el análisis hidrometeorológico.

Del total de estaciones, se escogieron las estaciones meteorológicas con el mayor número de años de registro (11 estaciones) y cercanas a las estaciones hidrométricas sobre ríos con registros históricos amplios (tres estaciones; Figura 3). Algunas estaciones presentaban faltantes de datos en algunos meses, por lo que fue necesario calcular un promedio a partir de

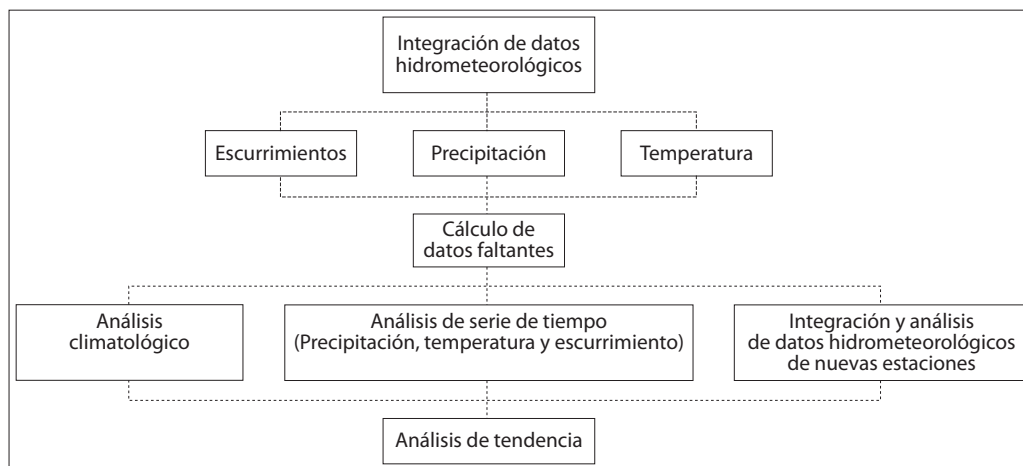


Figura 2. Diagrama de la metodología del análisis hidrometeorológico.

los doce registros contiguos. Para el análisis de precipitación se decidió eliminar los años que presentaban espacios en los meses, principalmente en los de lluvia, y se analizaron únicamente los años con registros (Cuadro 1). Los datos de las estaciones se obtuvieron de los registros de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en la delegación de Morelia, almacenados y actualizados en el manejador de datos CLICOM (Climatic Computing Project, CNA, 2005).

Con los datos descritos se elaboraron climogramas, así como las gráficas de las series de tiempo de precipitación anual. El análisis de tendencia de cambio de las precipitaciones mensuales y anuales, de las temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales y anuales se aplicó sólo a las estaciones que cubrieron periodos similares de tiempo, a fin de homogeneizar los datos de entrada del análisis. De esta forma sólo cuatro estaciones dentro de la cuenca fueron analizadas (Cuitzeo, Huingo, Jesús del Monte y Morelia Centro). Igualmente se realizó un análisis de tendencia de los registros de gastos mensuales y anuales de las estaciones localizadas en Río Grande, Río Queréndaro y Río San Marcos. Los registros hidrométricos

fueron extraídos de la base de datos BANDAS (Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, IMTA, 1999).

Finalmente, se colectaron datos de gastos actuales de los ríos Queréndaro, San Marcos y canal de la presa Umécuaro. La colecta requirió del levantamiento de las secciones perpendiculares de cada punto y se midió el flujo por dovelas a distintas profundidades y distancias con un flujómetro portátil modelo Flowmate 2000. Adicionalmente se integraron los datos de siete nuevas estaciones hidrometeorológicas instaladas en 2005 durante el desarrollo de la investigación (cuatro meteorológicas y tres hidrométricas; Figura 3).

ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones o variables hidrológicas, colectadas de manera secuencial, cuyos valores ocurrieron en un intervalo de tiempo (Δt). El análisis de series de tiempo puede hacerse, seleccionando valores de la variable X a intervalos de tiempo igualmente espaciados o a intervalos irregulares; una característica de cualquier serie de tiempo de datos hidrológicos es la variabilidad sistemática o no-sistemática, el

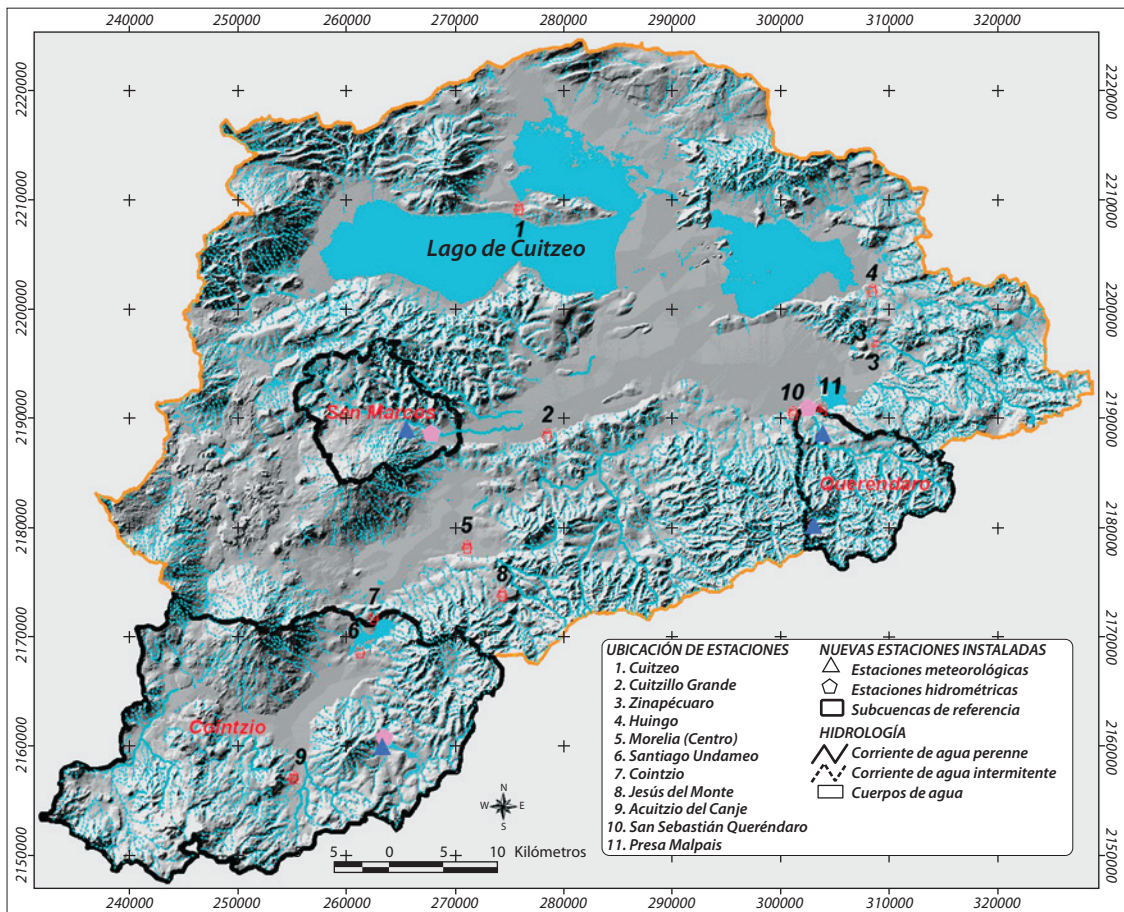


Figura 3. Ubicación de las estaciones hidrometeorológicas.

objetivo del análisis de las series de tiempo es desagregar estas dos variables (McCuen y Snyder, 1986).

La media móvil es un método para la separación de la variación sistemática y no-sistemática, dado un sistema de observaciones de una variable hidrológica: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$. La media móvil se obtiene de la ecuación 1:

$$\frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N}, \frac{X_2 + X_3 + \dots + X_{N+1}}{N}, \frac{X_3 + X_4 + \dots + X_{N+2}}{N} \quad (1)$$

La suma de cada grupo se llama media móvil de orden N. El orden N puede ser adoptar valor pero si es pequeño (menor a 5) y puede

ser poco efectivo para minimizar la variabilidad aleatoria (Mendoza *et al.*, 2006).

ANÁLISIS DE TENDENCIA

El análisis de tendencia de precipitación, temperatura y escurrimiento se realizó con la prueba no paramétrica de Mann-Kendall (Kendall, 1938). Esta técnica ha sido ampliamente utilizada para probar aleatoriedad contra tendencias en los datos climáticos de las series de tiempo (Zhang *et al.*, 2001). Este es un procedimiento lineal especialmente conveniente para los datos con distribución no normal, para los datos que

Cuadro 1. Estaciones con periodos de registros de datos

Estación	Periodos de registro de temperatura	Periodos de registro de precipitación
Cuitzeo	1923-2005	1923-2004
Cutzillo Grande	1970-2005	1969-1999, 2001-2003
Zinapécuaro	1923-2005	1924-1942, 1944-1954, 1956-1968, 1971-1978, 1980-1982, 1984-1992, 1998-1999, 2001-2004
Huingo	1941-2004	1942-2004
Morelia (Centro)	1947-2005	1947-2004
Santiago Undameo	1954-2004	1964-1999, 2003
Cointzio	1940-2005	1940-1985, 1992-2004
Jesús del Monte	1935-2005	1936, 1938, 1943-2003
Acuitzio del Canje	1961-2005	1961-1966, 1998-2004
San Sebastián Queréndaro	1969-1991	1969-1991
Presa Malpais	1940-2004	1944-1985, 1994, 1998-2004

contienen valores extremos y tendencias no lineales. La hipótesis nula H_0 es que los datos (x_1, x_2, \dots, x_n) son una muestra independiente e idénticamente distribuida (iid) de variables aleatorias. La hipótesis alterna H_1 es que la distribución de x_k y x_j no son idénticas para todos los $k, j \leq n$ con $k \neq j$. El análisis estadístico de la tendencia S se define como (Hirsch *et al.*, 1993, ecuación 2):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

donde $\text{sgn}(\)$ es la función de muestra.

De acuerdo con H_0 la distribución S es normal en el límite como $n \rightarrow \infty$. La media de la varianza de S , considerando que puede haber nodos en las series x , son:

$$E[S] = 0 \text{ y,} \quad (3)$$

$$\text{var}[S] = \left[n(n-2n+5) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] \div 18 \quad (4)$$

donde t es la longitud de alguna cola y \sum_i denota a la sumatoria sobre todos los nodos con longitud t . La asunción de normalidad para S se encuentra aun para una n pequeña; ($n \approx 10$) con una correlación de ± 1 y la variación estándar típica es utilizada para probar la hipótesis (Hirsch *et al.*, 1993):

$$Z = \begin{cases} \frac{[S-1]}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{[S+1]}{\sqrt{\text{var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

En una prueba de dos lados para tendencias, la hipótesis nula es rechazada en un nivel de significancia de α si $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$, donde $Z_{(1-\alpha/2)}$ es el valor de la distribución normal que excede $\alpha/2$. Un valor positivo de Z indica una tendencia ascendente; un valor negativo indica una tendencia descendente en la serie de tiempo evaluada. En este trabajo las tendencias son identificadas a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, con un valor crítico de 1.96. La

prueba estadística de tendencias Z es utilizada para indicar la tendencia significativa, pero no es una cuantificación de la magnitud de la tendencia (Molnár y Ramírez, 2001). En este trabajo se aplicó la prueba de Mann-Kendall para evaluar únicamente datos no estacionales e independientes (precipitación, temperatura y escurrimientos).

RESULTADOS

Descripción climática

El clima general de las estaciones es de templado con lluvias en verano (Cb), donde su régimen de lluvias se caracteriza por presentar diez veces más lluvia en el mes más húmedo (julio), de la mitad caliente del año que en el mes más seco (febrero); la temperatura media de un mes por lo menos, desciende por debajo de los 18° C, el régimen térmico indica que la temperatura media de cuatro meses o más es superior a 10° C (w) y la temperatura media del mes más cálido inferior a 22° C y el verano es templado, su rango de oscilación entre 5 y 7° C, respectivamente, presenta poca oscilación (i'); de > 14° C se refiere a una oscilación muy extrema (e), los porcentajes de precipitación invernal respecto a la total es menor de 5, la relación precipitación/temperatura (P/T) > 55.0 (w2), $3.2 < P/T < 55.0$, (w1), $P/T > 43.2$ (w0). Las estaciones en la cuenca presentan el mes más cálido antes del solsticio de verano (g), es decir, tienen una marcha de temperatura tipo Ganges (Cuadro 2; García, 2004).

Las estaciones de Acuitzio del Canje, Cointzio, Jesús del Monte y Santiago Undameo, localizadas en la porción SW de la cuenca de Cuitzeo cercanas a la subcuenca de Cointzio (Figura 3), tienen climogramas similares (Figuras 4 y 5). Las precipitaciones medias mensuales más importantes se presentan a partir de junio y terminan en septiembre, aunque en las estaciones Acuitzio del Canje y Cointzio la precipitación media en los meses de junio, agosto y septiembre es muy similar,

Cuadro 2. Estaciones con los tipos de clima

Estación	Clima
Cuitzeo	Cb(wo)(w)(i')g
Cutzillo Grande	Cb(wo)(w)(i')g
Zinapécuaro	Cb(w1)(w)(e)g
Huingo	Cb(w1)(w)(i')g
Morelia (centro)	Cb(wo)(w)(i')g
Santiago Undameo	Cb(w2)(w)(i')g
Cointzio	Cb(w1)(w)(i')g
Jesús del Monte	Cb(w1)(w)(i')g
Acuitzio del Canje	Cb(w2)(w)(i')g
San Sebastián Queréndaro	Cb(wo)(w)(i')g
Presa Malpais	Cb(wo)(w)(i')g

se tienen las mayores precipitaciones en julio (Figura 4). En la estación de Jesús del Monte las mayores precipitaciones se concentran en los meses de julio y agosto (Figura 4).

Las precipitaciones medias mensuales de la estación de Santiago Undameo, indican que éstas se concentran en los meses de julio y agosto. Por su parte las temperaturas en las estaciones de Acuitzio del Canje, Cointzio y Santiago Undameo son muy similares y oscilan entre los 12 a 20° C, con un aumento a partir de marzo y un descenso a partir de julio y agosto (Figuras 4 y 5). La estación de Jesús del Monte presenta la temperatura media mensual más alta para estas estaciones, las cuales varían entre 15 a 21° C, presentando un incremento a partir de febrero y un descenso en junio (Figura 4).

Las estaciones que se encuentran en la parte oriente de la cuenca son Zinapécuaro, Huingo, San Sebastián, Queréndaro y Presa Malpais. En la estación de Zinapécuaro la precipitación media mensual se concentra en los meses de julio y agosto, en este periodo también se registra la precipitación media mensual más alta de todas las estaciones, mientras que la temperatura media mensual varía de 15 a 22° C. La temperatura

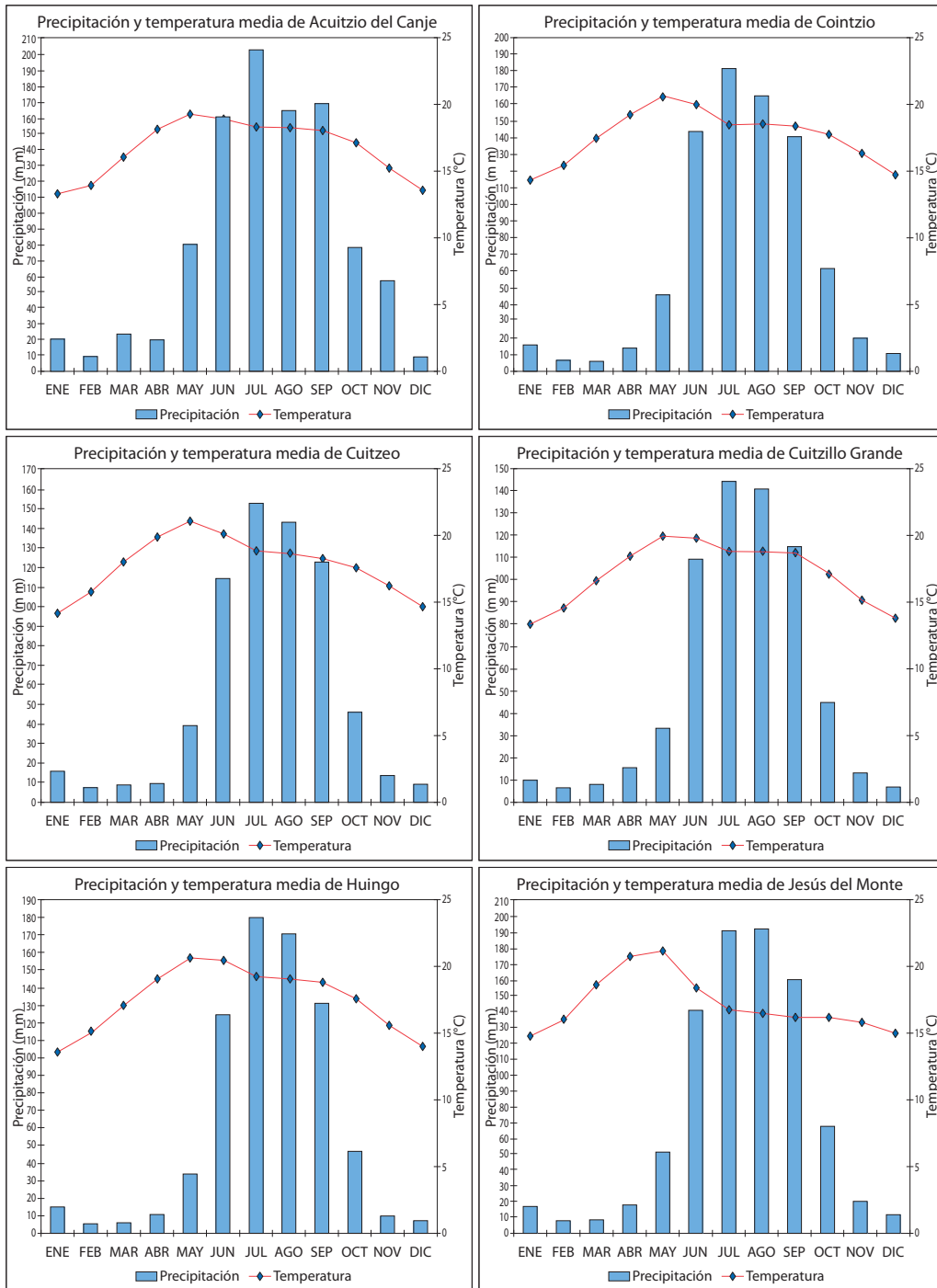


Figura 4. Climogramas de las estaciones.

media mensual más alta se registra en los meses de mayo a junio (Figura 5). Las estaciones de Huingo y Presa Malpais presentan una precipitación media mensual similar, concentrándose en los meses de julio y agosto, no supera los 180 mm (Figuras 4 y 5), para estas estaciones la temperatura media mensual varía de los 14 a los 20° C (Figuras 4 y 5). La estación San Sebastián es la que presenta menor precipitación media mensual en comparación con las cuatro estaciones anteriores, no supera los 170 mm y se concentra en los meses de julio y agosto, la temperatura media mensual varía de 12.5 a lo 19.5° C, presentándose la más alta en abril, mayo y junio.

Las estaciones Cuitzeo, Cuitzillo Grande y Morelia se encuentran en la planicie de la cuenca. Las estaciones Cuitzeo y Cuitzillo Grande son las que presentan precipitaciones medias mensuales similares, tanto en el tiempo como en volumen; su precipitación máxima es alrededor de los 150 mm. En la estación de Cuitzeo se presenta 1° C más que en la estación de Cuitzillo Grande. Además la estación de Cuitzillo Grande es la que presenta la menor precipitación de acuerdo con la media mensual (Figuras 4 y 5). La estación de Morelia es una de las que presenta las precipitaciones menores y las mayores temperaturas mensuales, lo cual puede ser por el gran crecimiento urbano (Figuras 4 y 5).

Series de tiempo

El análisis de la serie de tiempo de los datos anuales de precipitación indica que las estaciones de Acuitzio del Canje, Zinapécuaro y Jesús del Monte, presentan un comportamiento muy diferente a las estaciones restantes, ya que éstas son las que presentan las precipitaciones anuales más altas y concentradas principalmente en los meses de julio y agosto (Figuras 6 a 9).

Las estaciones Cuitzeo, Cointzio, Cuitzillo Grande, Huingo, Morelia, Presa Malpais, San Sebastián y Santiago Undameo presentan un comportamiento muy similar de 1958 a

1985. Los registros indican la presencia de un periodo húmedo en los años de 1957-1958 y posteriormente presentan un descenso de las precipitaciones, lo cual corresponde a un periodo relativamente seco; a partir de 1960 se mantiene una tendencia cíclica hasta 1979, posteriormente presentan un periodo aún más seco; el cual se presentó de 1978 a 1987 (Figuras 6 a 9). De acuerdo con los registros, en los últimos 15 años se presenta una precipitación anual inestable, pero con una tendencia a periodos secos principalmente en las estaciones de Cuitzeo, Cuitzillo Grande, Cointzio, Morelia; mientras que en las estaciones de Acuitzio, Jesús del Monte y Zinapécuaro los registros indican un aumento relativo de las precipitaciones anuales (Figuras 6 a 9).

Análisis de tendencia

El análisis de tendencia indicó que tanto las temperaturas medias mensuales como los valores medios anuales en la estación de Morelia tienden a aumentar de manera significativa; mientras que los mismos parámetros de temperatura de las estaciones Cuitzeo y Huingo tienden a reducir también en forma significativa (Figura 10A, B y C). Desde una perspectiva espacial, las estaciones que tienden a aumentar se localizan en la zona sur de la cuenca, mientras que las estaciones localizadas en la porción norte de la cuenca son las que tienden a reducir sus temperaturas. Desde una perspectiva temporal, los registros de las estaciones de Cuitzeo y Morelia indican que la temperatura mensual aumenta en todos los meses, aunque sólo los datos de Morelia presentan tendencia estadísticamente significativa; mientras que los registros de la estación de Jesús del Monte y Huingo, indican que las temperaturas medias mensuales tienden a reducirse en la estación seca, pero sólo registros de Jesús del Monte son estadísticamente significativos (Figura 10).

La temperatura máxima de la estación Morelia tiene un patrón de aumento tanto en sus valores mensuales como en el anual; sin

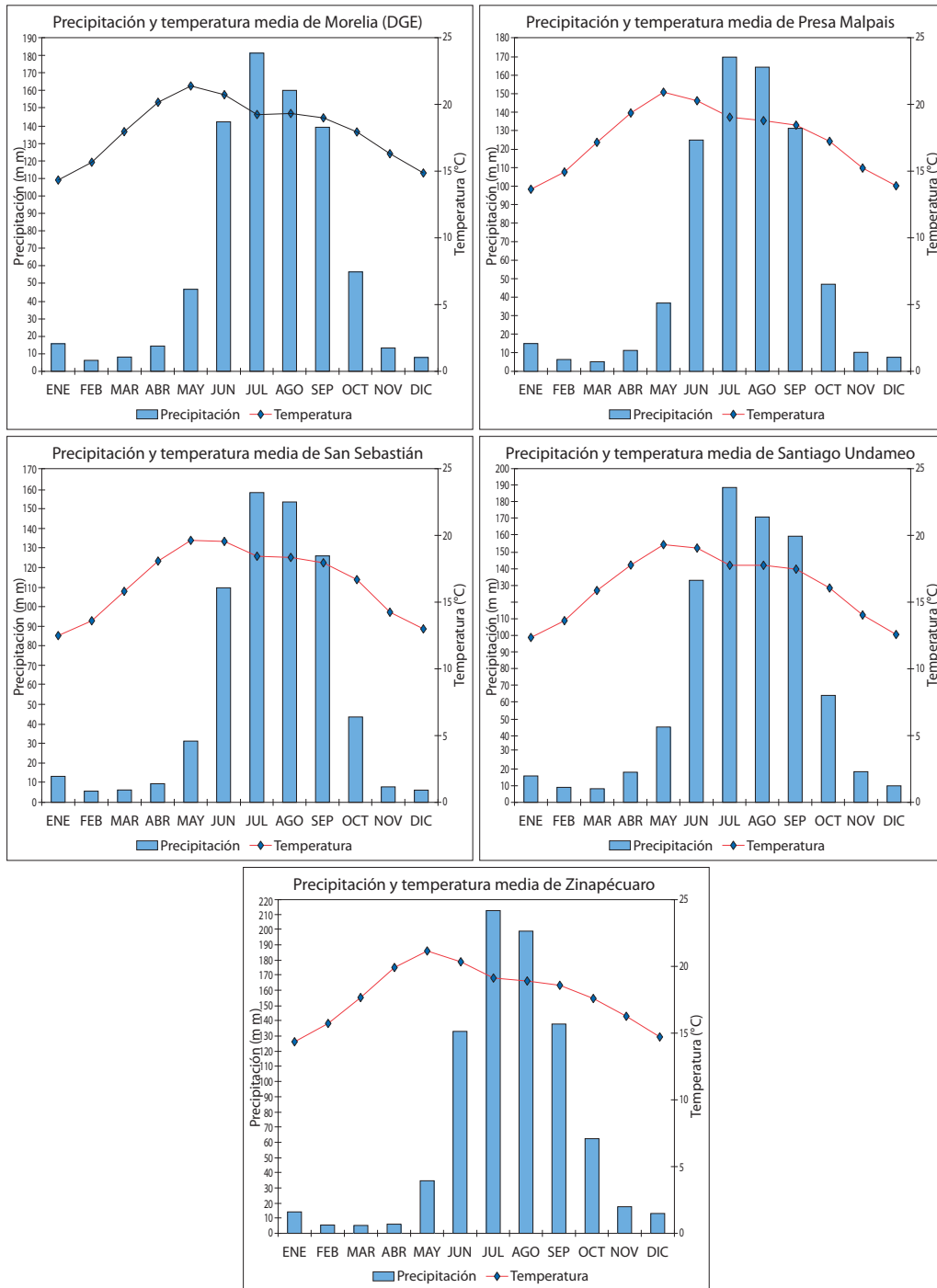


Figura 5. Climogramas de estaciones.

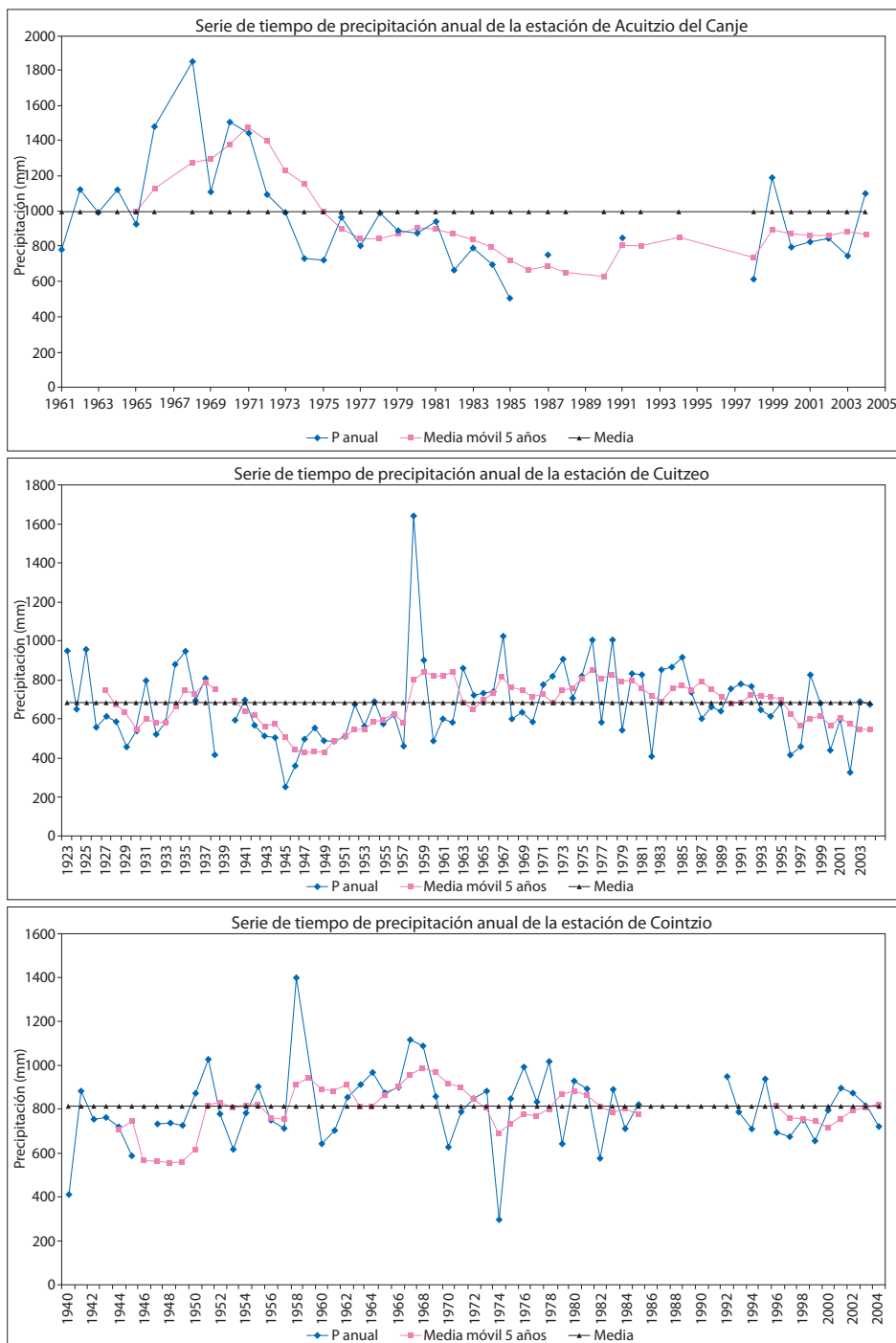


Figura 6. Series de tiempo de precipitación anual.

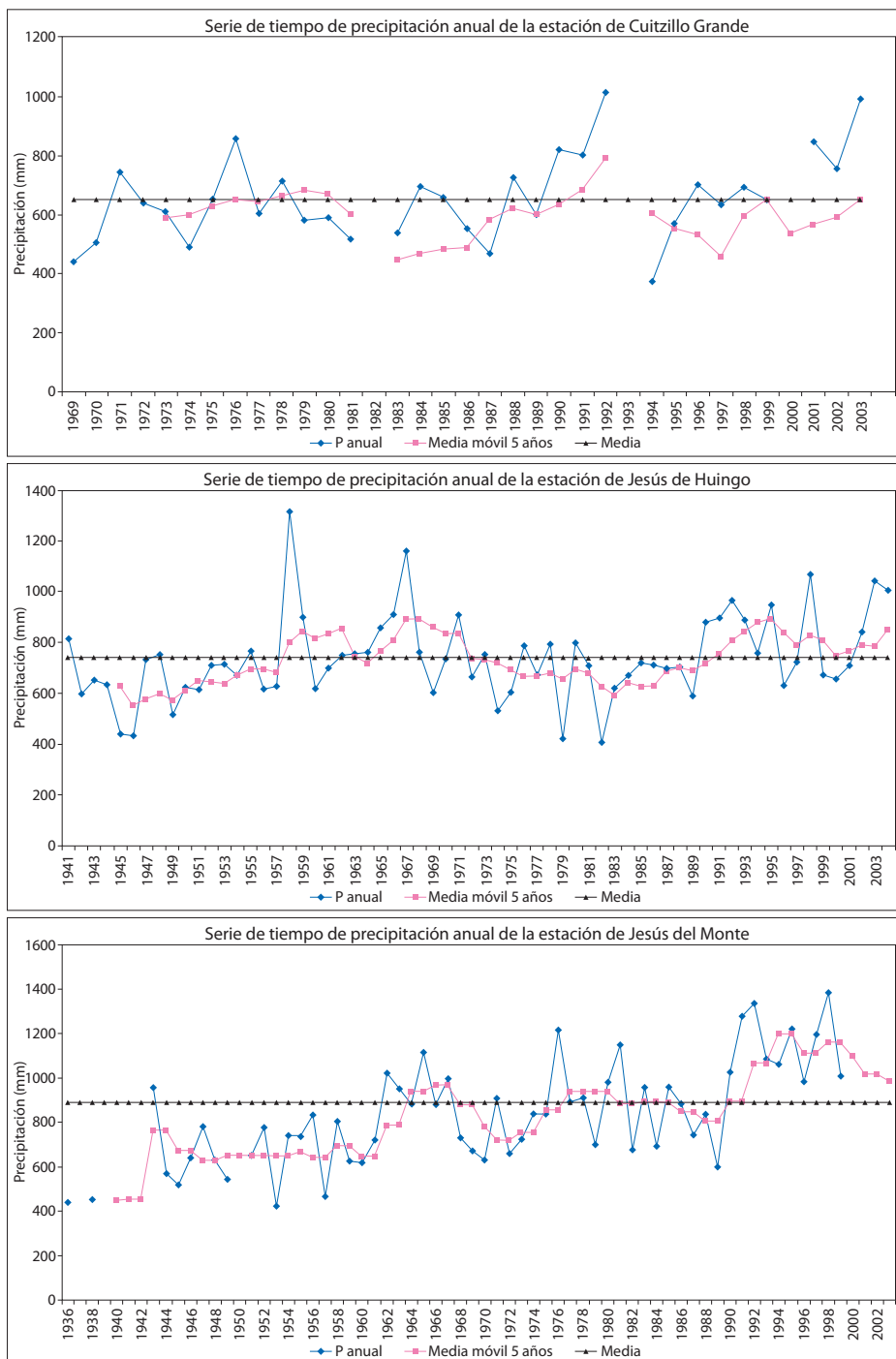


Figura 7. Series de tiempo de precipitación anual.

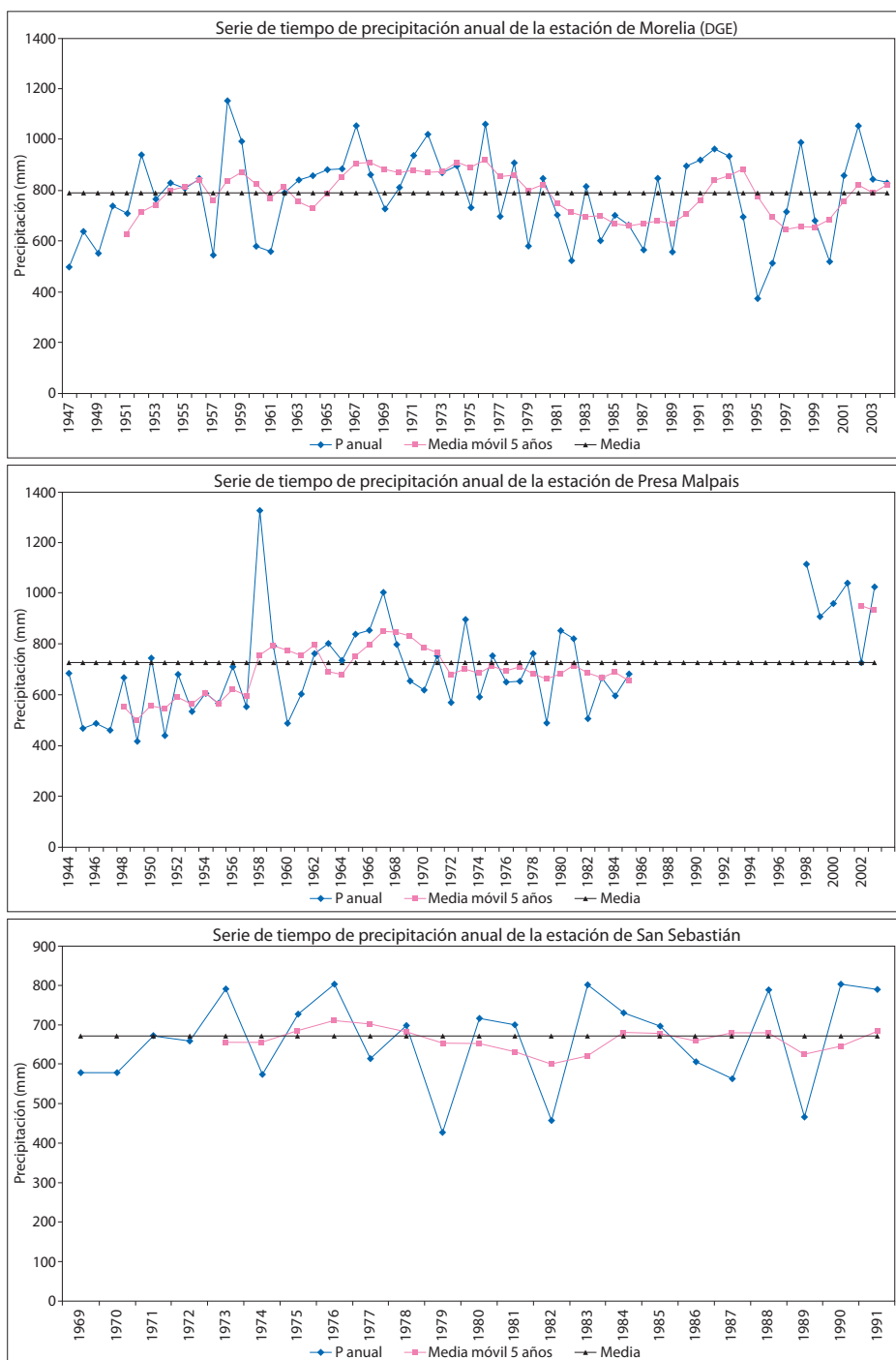


Figura 8. Series de tiempo de precipitación anual.

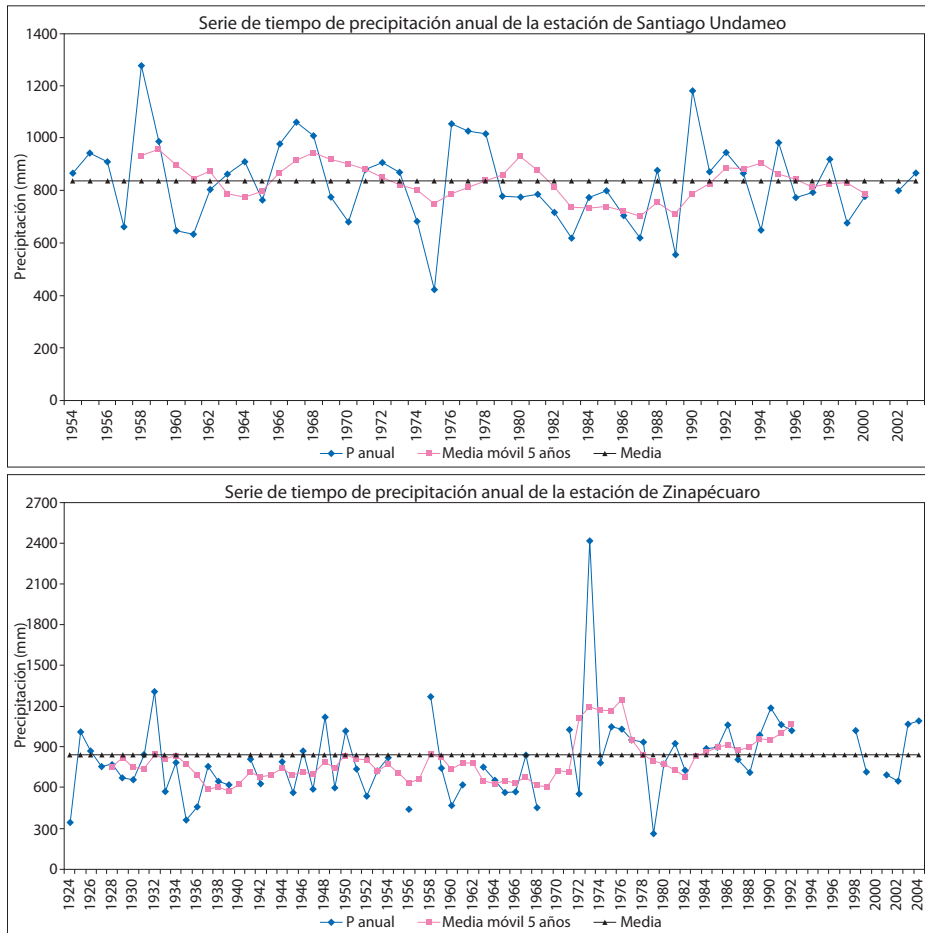


Figura 9. Series de tiempo de precipitación anual.

embargo, la tendencia es sólo significativa en diciembre, mientras que los registros de diez meses de la estación de Cuitzeo tienden a disminuir. Los registros de la estación Huingo no presentan un patrón, y sólo mayo resultó con tendencia estadísticamente significativa a la reducción de valores. Nuevamente se presenta un patrón espacial similar de los cambios registrados con las temperaturas medias, no así en el patrón temporal (Figura 10A).

Los registros de temperatura media mínima mensual de las estaciones de Morelia y Cuitzeo tienden a aumentar en forma estadísticamente

significativa todos los meses, con excepción de junio y julio en la estación Morelia. El patrón espacial no es claro, porque en este grupo se incluyen estaciones localizadas tanto al norte como al sur de la cuenca. Las estaciones de Jesús del Monte y Huingo tienden a disminuir en forma significativa de acuerdo con los valores de temperatura mínima registrados, especialmente durante la primavera, verano y otoño (Figura 10C). El patrón espacial, tampoco es claro.

El análisis de tendencias realizado con los registros de precipitación media mensual y

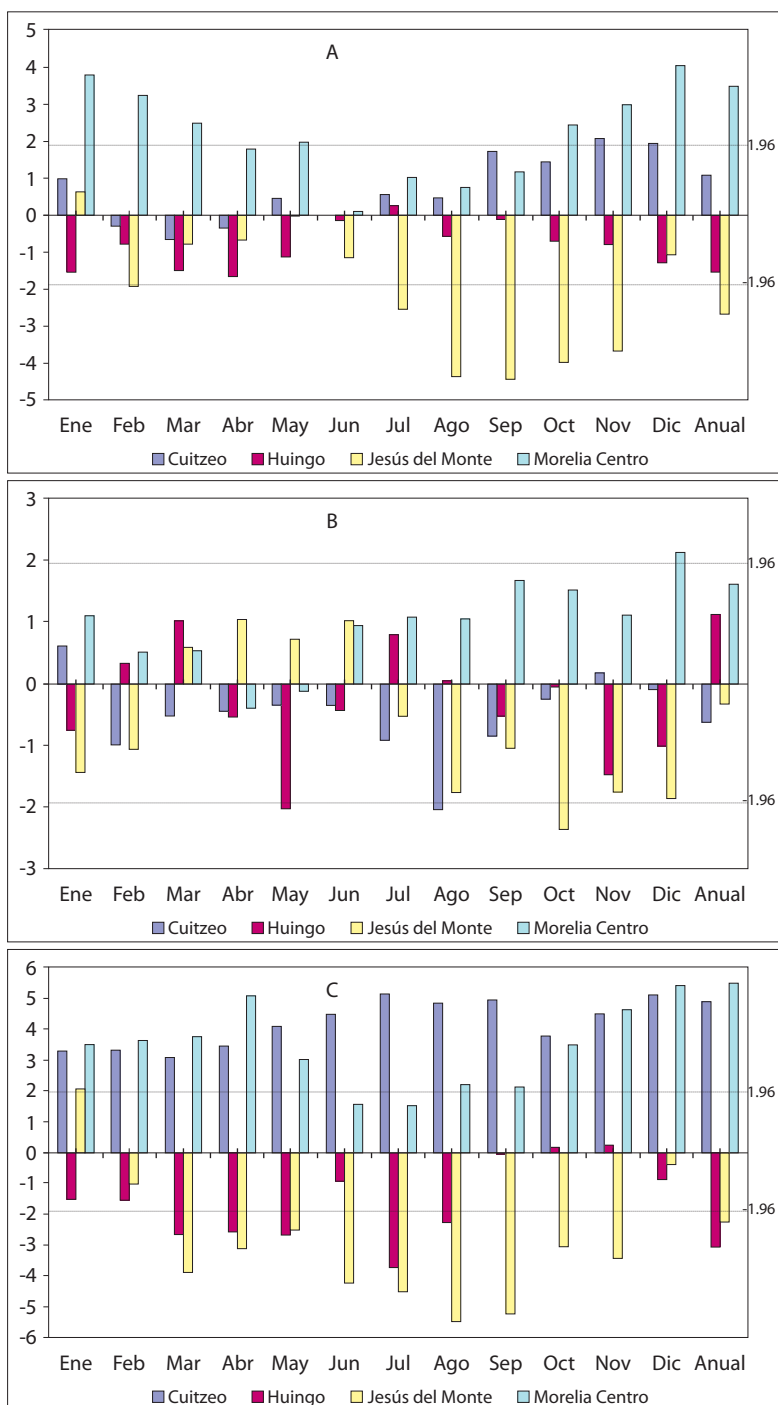


Figura 10. Análisis de tendencia de temperatura A) media mensual, B) media máxima mensual y C) media mínima mensual.

de la anual indica que existe un incremento significativo en la estación de Jesús del Monte; y sólo es estadísticamente significativo para agosto en las estaciones de Cuitzeo y Huingo (Figura 11). La estación con el índice más alto es Jesús del Monte, especialmente en agosto y septiembre. Sólo los registros de precipitación de la estación de Cuitzeo presentan una reducción significativa en diciembre; sin embargo, aunque no existen tendencias estadísticas significativas, se observa que la precipitación de las estaciones de Jesús del Monte y Morelia, durante los meses de noviembre y diciembre, presentan un patrón de reducción.

Los resultados anteriores son coherentes con los ciclos detectados por Mendoza *et al.*, (2006). El aumento en las precipitaciones se encuentra en el ciclo húmedo que inició en el 2000 y continúa hasta el final de los registros utilizados.

Los gastos medios mensuales, máximos mensuales y mínimos mensuales de la estación de Río Grande tienden a aumentar significativamente en varios meses del año, así como el anual, lo cual puede ser debido al aporte de agua subterránea, ya que la estación registra los aforos provenientes de un distrito de

riego, localizado aguas arriba. Mientras que los mismos registros de los gastos en los ríos Queréndaro y San Marcos tienden a disminuir en forma significativa en algunos meses, tales como octubre, noviembre y diciembre (Figura 12A, B y C), el resto de los meses, así como los registros anuales, tienden a disminuir sin significancia estadística. La disminución en el río San Marcos se presenta al final de la época de lluvias y el inicio de la temporada de secas, lo cual podría estar asociado a la reducción del flujo base como consecuencia de un abatimiento de las aguas subterráneas que alimentan los escurrimientos permanentes. Los niveles estáticos de los pozos localizados en la subcuenca de San Marcos se han abatido alrededor de 40 m en el periodo 1990-2000 (Medina, en preparación).

Los cambios en los volúmenes de los flujos suceden después que el cambio de cobertura vegetal y uso del suelo más importante en el área. Durante el periodo 1986-1996 en las subcuencas vecinas a la del río San Marcos se presentaron diversos procesos de cambio de cobertura que son causa de cambios en flujos de agua. La cuenca media del río Grande de Morelia se urbanizó en un 13% y el 20% de la

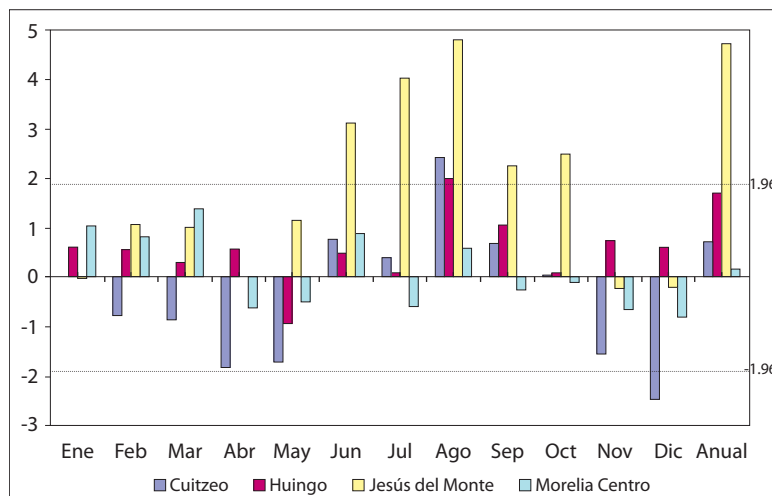


Figura 11. Análisis de tendencia de la precipitación media mensual y anual.

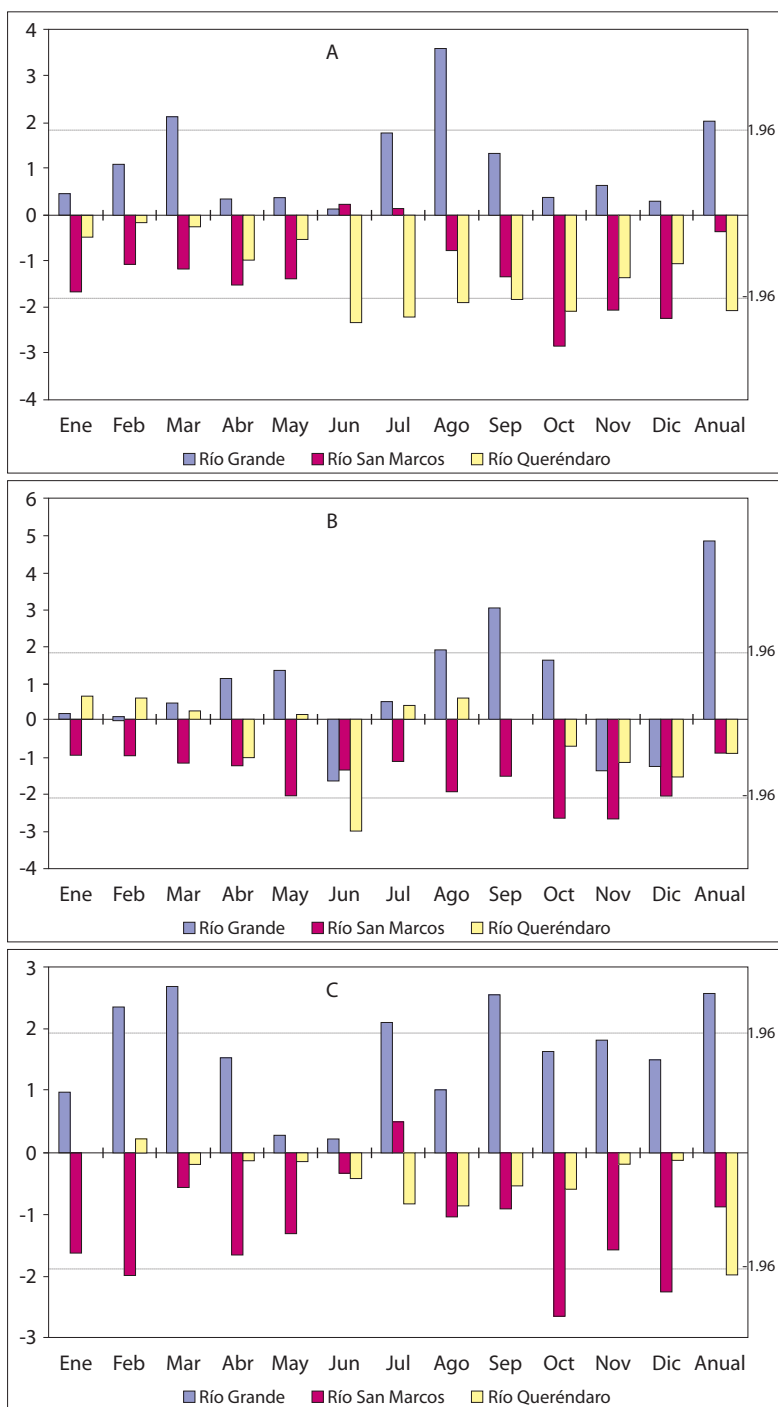


Figura 12. Análisis de tendencia de los gastos A) medio, B) máximo y C) mínimo.

cuenca del Fresno sufrió procesos de deforestación que reducen la infiltración y la alimentación de aguas subterráneas. En la cuenca del río San Marcos la forestación (7%) y el incremento de matorrales (27%), también reducen los flujos superficiales y subterráneos, debido a que el agua es más utilizada en las primeras etapas de crecimiento de la vegetación

En el mismo periodo en la subcuenca del río Queréndaro, la recuperación del bosque ocupó una superficie de 1 601 ha, equivalente al 12% de la cuenca, lo cual implica una reducción de los flujos superficiales en los primeros años del crecimiento de la cobertura arbórea.

Monitoreo de gastos y registros automatizados

Durante casi 24 meses se han registrado datos hidrometeorológicos automatizados en las tres subcuencas de referencia. Los datos registrados sobre el nivel del agua en las tres corrientes se describen a continuación.

En la Presa de Umécuaro existe un marcado retardo en la elevación del nivel del agua, en comparación con el inicio de la época de lluvias y con el consecuente escurrimiento tanto superficial como subterráneo, es decir, existe un retardo para que la presa sea colmatada. El nivel de la presa empieza a aumentar a partir del mes de septiembre alcanzando su máximo nivel entre los meses de noviembre y diciembre, muy entrado en la época seca; este retardo se asocia, debido a las características físicas de los suelos, a que la presa se alimenta por flujo sub-superficial más que superficial (grupos y subgrupos principales con superficie; 0.7.-0.8 densidad aparente, por lo tanto, captan mucha agua); en consecuencia, la capacidad de infiltración es muy alta, lo cual nos puede explicar este retardo de recuperación de la presa (Figura 13). En segundo lugar, la extensión del vaso puede jugar un papel significativo (1.6 km²).

Los datos registrados en las subcuencas de San Marcos y Queréndaro indican que la respuesta a las lluvias genera un escurrimiento

instantáneo, ya que el aumento del nivel del agua se manifiesta desde el inicio del periodo de lluvias.

Las estaciones de Chiquimitio y el Castillo registraron las temperaturas más altas del periodo estudiado, los valores registrados van desde los 16 a los 30° C (Figura 13). Las estaciones de Umécuaro y el Castillo registraron las mayores precipitaciones; en el caso de Umécuaro la precipitación se concentró en los meses de septiembre y octubre, mientras en el Castillo en los meses de julio y agosto.

Los gastos medidos durante el periodo de estudio en los ríos Queréndaro y San Marcos (Figura 13) de acuerdo con los registros históricos de los mismos existe una continuidad del comportamiento, aunque de acuerdo con este periodo de medición se observa que existe una tendencia a la reducción. De los tres ríos analizados, el que presenta mayor escurrimiento es Río Grande (cuenca alta, Coitzio), seguido por los gastos de los ríos Queréndaro y San Marcos (Figura 13A). En 1977 se presentó un evento muy extremo, ya que es donde registran el mayor escurrimiento en los últimos años en los ríos Grande de Morelia y San Marcos, lo cual se puede deber a que tiene coincidencia con una precipitación extrema registrada en las estaciones cercanas a éstos, o al año Niño de 1976-1977, mientras que el río Queréndaro su mayor gasto lo presentó en 1967, se puede deber a las mismas causas que en el caso anterior ya que se presentan los mismos eventos.

Con respecto a la presa de Umécuaro se observa que los gastos son muy variables a lo largo del año debido a la intervención humana, ya que la medición de flujo se mide en la salida de agua de la presa que surte agua a la hidroeléctrica, lo cual no tiene una relación con los escurrimientos de las partes altas de la subcuenca.

La medición de flujo en el manantial que se encuentra en el poblado de Chiquimitio dentro de la subcuenca de San Marcos presenta un abatimiento a partir del mes de febrero, lo cual provoca un descenso del nivel del Río

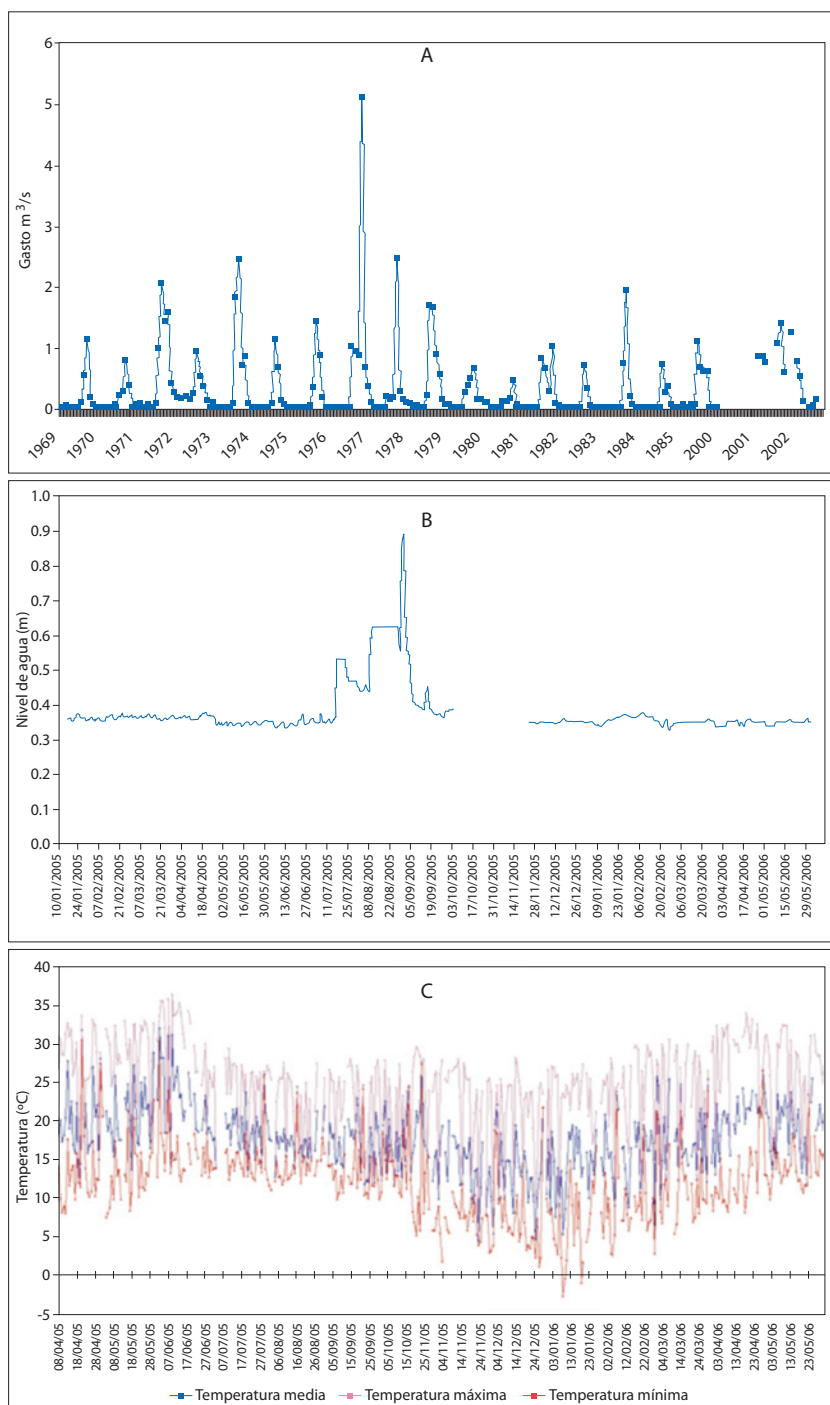


Figura 13. Registros de A) gastos históricos de río San Marcos, B) nivel de agua y C) temperatura registrada en la subcuenca de San Marcos.

San Marcos, ya que ésta es una de las fuentes principales de alimentación del río.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los datos de los climogramas, todas las estaciones registran las temperaturas más altas durante los meses de abril, mayo y junio (20 a 22° C); mientras que las precipitaciones se concentran en julio y agosto. La estación de Zinapécuaro registró la mayor precipitación anual (890 mm), la cual se caracteriza por un marcado aumento con respecto a las otras estaciones en los meses de julio y agosto (210 mm).

El análisis de tendencias de las precipitaciones anuales indicó que la estación de Jesús del Monte ha presentado un aumento estadísticamente significativo (Figuras 6, 7, 8, 11). Aunque es notorio que en los últimos siete años se observa que todas las estaciones tienden a incrementar sus precipitaciones, excepto la estación de Cuitzeo. En general los comportamientos son muy variables para todas las estaciones a lo largo de los años y que esta variabilidad interanual puede corresponder con las variaciones que se presentan en las variables año tras año; es decir, que la variación de variables climáticas en estudio no es la misma de un año a otro, sino que fluctúa por encima o debajo de lo normal. Esta variabilidad climática podría estar asociada con el balance global de radiación (Montealegre, 1999). Como ejemplo de esta variabilidad está la ocurrencia de los ciclos El Niño-La Niña. Ya que aun cuando el Niño está solamente presente en el Pacífico tropical, sus efectos se sienten indirectamente en otras partes del mundo interrumpiendo los patrones de la corriente y por lo tanto de la precipitación (Glantz, 2000).

Jesús del Monte, seguida por la estación Zinapécuaro, son de las más húmedas, se observan claros patrones cíclicos, antes de 1958 seco, 1958 extremadamente húmedo, 1960 a 1980 más húmedo, 1980-2000 relativamente seco y después un poco más húmedo.

Morelia es la estación que tiende a aumentar su temperatura de manera significativa tanto en sus valores mensuales como en el valor anual; de acuerdo con Mendoza *et al.* (2006), se reporta que para la estación de Morelia no se observan tendencias significativas para el 2000, entonces el cambio significativo está asociado a un cambio en los registros en los últimos años. Las estaciones que tienden a disminuir sus valores son las de Cuitzeo y Huingo (Figura 11). Lo cual muestra que existen tendencias de cambio climático, ya que las cuatro estaciones analizadas presentan cambios estadísticamente significativos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CNA Michoacán por la cesión de datos hidrometeorológicos. Los autores agradecen el apoyo proporcionado por los Fondos Mixtos CONACYT-Estado de Michoacán a través del proyecto Regionalización hidrológica y cambio de cobertura vegetal y uso del suelo dentro de la cuenca de Cuitzeo. Bases para la planeación de los recursos hídricos en cuencas pobremente aforadas (clave 12469) y al CIECO-UNAM a través de proyecto "Manejo de Ecosistemas e Impacto Humano", Universidad Nacional Autónoma de México SDEI-PTID-02. Agradecemos los comentarios de dos árbitros anónimos que enriquecieron el trabajo. El primer autor agradece la beca de maestría otorgada por los Fondos Mixtos CONACYT-Estado de Michoacán.

REFERENCIAS

- Carlón Allende, T. (2006), *Regionalización hidrológica de la cuenca de Cuitzeo*, tesis de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH.
- CNA (2005), *Climatic Computer Program*, Comisión Nacional del Agua, [CD].

- Euscategui, C. (2002), *Estado de los glaciares en Colombia y análisis de la dinámica glacial en el parque los nevados, asociada al cambio climático global*, tesis de grado Magíster en Meteorología, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias-Departamento de Geociencias, Bogotá, Colombia.
- García, E. (2004), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*, 5a. ed., Serie Libros, núm. 6. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- García, M. Z. (2001), "Los modelos numéricos de predicción del tiempo", *TETHYS, revista de meteorología*, núm. 2 [<http://www.tethys.cat/antics/num02/articles/art0205esp.htm>]: 10 de agosto 2006].
- Githeko, A. K., S. W. Lindsay, U. E. Confalonieri and J. A. Patz (2000), "Climate change and vector-borne diseases: a regional analysis", *Bulletin of the World Health Organization*, 78, pp. 1136-1147.
- Glantz, M. H. (2000), *Currents of change: impacts of El Niño and La Niña on climate and society*, Cambridge University Press, New York.
- Gracia, C. A., S. Sabaté y A. Sánchez. (2002), "El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo", *Ecosistemas 2* [www.aet.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm]: 3 de agosto 2006]
- Hirsch, R. M., D. R. Hesel, T. A. Cohn and E. J. Gilroy (1993), "Statistical analysis of hydrologic data", in Maidment (ed.), *Handbook of Hydrology*, McGraw Hill, New York.
- IMTA (1999), *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [CD].
- Kendall, M. G. (1938), "A new measure of rank correlation", *Biometrika* 30, pp. 81-93.
- Ludevid, M. (1997), *El Cambio Global en el medio ambiente*, Editorial Alfaomega, Barcelona, España.
- McCuen, R. H. and W. M. Snyder (1986), *Hydrologic modeling: statistical methods and applications*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- Medina, V. H. (en preparación), *Estudio geológico, geofísico e hidrogeoquímico para generar un modelo conceptual del acuífero la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, México*, tesis de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH.
- Mendoza, M., G. Bocco, M. Bravo, E. López and R. Osterkanp (2006), "Predicting water-surface fluctuation of continental lakes: a RS and GIS based approach in Central Mexico", *Water Resources Management*, 20, pp. 291-311.
- Molnár, P. and J. Ramírez (2001), "Recent trends in precipitation and streamflow in the Rio Puerco Basin", *Journal of climate*, 14(10), pp. 2317-2328.
- Montealegre, J. E. (1999), *La influencia de los procesos de interacción océano-atmósfera del Pacífico tropical y el Atlántico en la variabilidad interanual de la precipitación en Colombia*, tesis de Maestría en Meteorología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Watson, R., M. Zinyowera y R. Moss (eds.; 1997), *Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad (incluye resumen para responsables de la elaboración de políticas)*, Informe especial del Grupo de trabajo II del IPCC, 1995, Cambridge University Press, Cambridge.
- Zhang, X., K. D. Harvey, W. D. Hogg and T. R. Yuzyk (2001), "Trends in Canadian streamflow", *Water Resources Research*, 37(3), pp. 987-998.
- Watson, R. (ed.; 2001), *Climate Change 2001*, Synthesis Report. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra.