



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambiental)

**IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO
QUERÉTARO**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias (Recursos Hídricos y Ambiental)

Presenta:

Ing. Eladio Delgadillo Ruiz

Dirigido por:

Dr. Enrique González Sosa

SINODALES

Dr. Enrique González Sosa
Presidente

Dr. Calos Alberto Mastachi Loza
Secretario

Dr. Aurelio Guevara Escobar
Vocal

M.I. Filiberto Luna Zúñiga
Suplente

Dr. Humberto Suzan Aspíri
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma


Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Octubre de 2012
México.

Resumen

En el presente trabajo se evalúan las incertidumbres de las observaciones de temperatura implícitas en el cálculo de la evaporación total y demandada en el balance hídrico para la determinación de la disponibilidad de agua en la cuenca del río Querétaro para períodos interanuales. Las incertidumbres se analizan mediante un esquema de reconstitución de datos faltantes en las estaciones climatológicas de la cuenca. Se propone una homogenización de estaciones bajo la consideración de un reconocimiento de un clima regional. La reconstitución de los datos faltantes se lleva a cabo a través de la aplicación de una regresión tipo senoidal de cuatro parámetros a los residuales para posteriormente emplear una regresión lineal múltiple que representa un comportamiento regional y con el fin de obtener un valor de temperatura faltante en cierto año y en cierta estación dentro del área de estudio. Al final del estudio se comparan los valores de temperatura estimada con la observada, así como el valor de la evaporación estimada y la observada en las estaciones climatológicas, con lo cual se corrige el balance hídrico superficial, se reduce el sesgo en el cálculo del mismo y de esta manera contar con un valor menos incierto sobre la disponibilidad del recurso agua en la cuenca del río Querétaro.

Palabras clave (balance hídrico, disponibilidad, cambio climático, evapotranspiración).

Summary

In this paper it evaluates the uncertainties of the temperature to calculate the total evaporation in the water balance to determine water availability in the Basin of Querétaro River to interannual periods. The uncertainties were analyzed by a scheme of reconstruction of missing data in climatological stations in the basin. We propose a homogenization of stations through recognition of a regional climate. Reconstitution of the missing data is performed by applying a sinusoidal regression of four parameters to subsequent use a multiple linear regression representing a regional behavior and in order to obtain a temperature value missing a year and at a certain station within the study area. Finally the study compares the values estimated with the observed temperature and the value of the estimated and observed evaporation, which is calculated the surface water balance, reducing the bias and thus have a value less uncertain about the availability of water resources in the basin of Queretaro river.

Key words (water balance, availability, climate change, evapotranspiration).

Dedicatoria

A mis padres que son la mayor razón por la cual realicé estos estudios de posgrado, porque todo el esfuerzo que han invertido en mi formación académica nunca será mayor que el agradecimiento que siento por su apoyo brindado incondicionalmente.

Todo escritor que crea es un mentiroso; la literatura es mentira, pero de esa mentira sale una recreación de la realidad; recrear la realidad es, pues, uno de los principios fundamentales de la creación. (Juan Rulfo)

Agradecimientos

A mis padres Eladio y María de los Ángeles que se han esforzado por lograr que sea una persona de bien, con principios y valores sociales únicos y que son el cimiento para mi desarrollo profesional. A mis hermanas Olivia, Lucía, María de los Ángeles y María Guadalupe que me brindaron su apoyo incondicional y tener siempre palabras de aliento para continuar. A mi único hermano Miguel Ángel por tolerarme y brindarme su amistad en todo momento a lo largo del tiempo.

A mi asesor de tesis Dr. Enrique González por transmitirme lo mucho de su conocimiento y por ayudarme con sus consejos a dirigir este tema de tesis y sobre todo por no truncar mis ideas, sino al contrario, por darme su atinado consejo.

Al Dr. Carlos Mastachi porque gran parte del trabajo que se realizó fue a partir del conocimiento y punto de vista.

A todas las personas que me apoyaron en cada una de las localidades que visité en el transcurso de esta tesis, a los alumnos del servicio social que me apoyaron con su esfuerzo e ideas. A mis compañeros de la maestría en Recursos Hídricos, en especial a mis amigos.

A la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme un programa de excelencia.

Al proyecto CONACYT-SEMARNAT 000000000108173. Plan de acción ante el cambio climático del estado de Querétaro. Por su apoyo económico parcial para elaborar esta tesis.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología por confiar en mí y apoyarme económicamente para poder concluir estudios de posgrado.

A todas las personas que de algún modo colaboraron con la elaboración de esta tesis.
GRACIAS!!!!.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| Resumen..... | I |
| Summary..... | II |
| Dedicatoria..... | III |
| Agradecimientos..... | IV |
| Índice..... | V |
| Índice de figuras..... | VIII |
| Índice de tablas..... | XI |
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Antecedentes..... | 6 |
| 2.1. Objetivos..... | 12 |
| 2.1.1. General..... | 12 |
| 2.1.2. Particulares..... | 12 |
| 3. Aspectos generales de la Cuenca del Río Querétaro..... | 14 |
| 3.1. Descripción de la zona de estudio..... | 14 |
| 3.1.1. Historia del agua en la cuenca del Río Querétaro..... | 15 |
| 3.1.2. Estadísticas del agua en Querétaro..... | 18 |
| 3.1.3. Aspectos socioeconómicos..... | 19 |
| 3.2. Morfología..... | 21 |
| 3.3. Vegetación y Usos del Suelo..... | 22 |
| 3.4. Variables climáticas..... | 24 |
| 3.4.1. Precipitación..... | 24 |
| 3.4.2. Evaporación..... | 26 |
| 3.4.3. Esguerrimiento superficial..... | 27 |
| 3.5. Climas..... | 28 |
| 3.6. Temperatura..... | 28 |
| 4. Balance hídrico..... | 29 |
| 4.1. Componentes del balance hídrico..... | 29 |
| 4.2. Formulación del balance hídrico..... | 30 |
| 4.2.1. Thornthwaite (1957)..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 4.2.2. Daugherty (1985)..... | 31 |
| 4.2.3. NOM-011.CNA-2000..... | 31 |
| 4.2.4. Balance propuesto..... | 33 |
| 4.3. Evapotranspiración..... | 33 |
| 5. Metodología: Disponibilidad de agua..... | 34 |
| 5.1. Análisis de las bases de datos..... | 34 |
| 5.1.1. Cambio climático en la cuenca del Río Querétaro..... | 34 |
| 5.2. Relleno de las series de datos..... | 35 |
| 5.2.1. Tratamiento de la información..... | 35 |
| 5.2.2. Temperaturas máximas, mínimas y observadas..... | 35 |
| 5.2.3. Método de obtención de residuales..... | 36 |
| 5.2.4. Análisis estadístico..... | 37 |
| 5.2.5. Homogenización de estaciones..... | 37 |
| 5.2.6. Correlación estadística..... | 39 |
| 5.2.7. Regresión lineal simple..... | 39 |
| 5.3. Precipitación..... | 40 |
| 5.4. Evaporación..... | 40 |
| 5.4.1. Método de Thornthwaite..... | 40 |
| 5.4.2. Método de Hargreaves simplificada..... | 41 |
| 5.4.3. Método de Irmak <i>et al.</i> , (2003)..... | 42 |
| 5.4.4. Método desarrollado por Hamon..... | 42 |
| 5.4.5. Método de Jensen-Haise..... | 42 |
| 5.4.6. Método de Papadakis..... | 43 |
| 5.5. Caracterización de la red hidrometeorológica..... | 43 |
| 6. Resultados y Discusión..... | 44 |
| 6.1. Análisis del cambio climático en la cuenca del Río Querétaro..... | 44 |
| 6.2. Componentes del balance hídrico..... | 45 |
| 6.3. Disponibilidad del agua en la cuenca del Río Querétaro..... | 56 |
| 6.4. Red hidrometeorológica..... | 58 |
| 7. Conclusiones y Recomendaciones..... | 61 |
| Literatura citada..... | 63 |

| | |
|----------------|----|
| Acrónimos..... | 67 |
| Anexos..... | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Nombre | Página |
|--------|---|--------|
| 3.1 | Ubicación de la cuenca del río Querétaro | 15 |
| 3.2 | Suministro de agua (en porcentaje) en cada municipio de la ZMQ (INEGI, II conteo 2005 | 19 |
| 3.3 | Evolución de la población en la cuenca del Río Querétaro (fuente: INEGI, 2012). | 20 |
| 3.4 | Vegetación potencial de México (fuente: CONABIO, 2010). | 23 |
| 3.5 | Uso del suelo y Vegetación de México (fuente: CONABIO, 2010). | 23 |
| 3.6 | Distribución de la precipitación en el país (CNA, 2012). | 25 |
| 4.1 | Representación gráfica del ciclo hidrológico | 29 |
| 6.1 | Graficas de valor mensual mínimo de la temperatura mínima diaria Indicador TNN. | 44 |
| 6.2 | Gráfico de registros de temperatura observada diaria para la estación La Venta. | 45 |
| 6.3 | Parámetros de la regresión. | 46 |
| 6.4 | Gráfico de residuales de temperatura observada diaria de la estación La Venta. | 47 |
| 6.5 | Gráfico de componentes principales de las 11 estaciones climatológicas obtenido a partir de datos de residuales. | 48 |
| 6.6 | Dendograma de las estaciones climatológicas a partir de datos de residuales. | 49 |
| 6.7 | Mapa comparativo de los climas de la cuenca y las estaciones que forman los grupos de estaciones homogéneas | 51 |
| 6.8 | Clusters obtenidos con arcgis 9.3 | 52 |
| 6.9 | Gráfico comparativo de residuales obtenidos a través de datos observados y de datos estimados de temperatura media diaria para la estación 22043 para el año 2002 | 53 |
| 6.10 | Gráfico comparativo de temperatura obtenidos a través de datos observados y de datos estimados para la estación 22043 para el año 2002 | 54 |
| 6.11 | Gráfico comparativo de evaporación obtenida a través de datos observados y de | 54 |

| | | |
|------|--|----|
| | datos estimados de temperatura con el método de Penman- Monteith y los registrados en la estación 22043 para el año 2002 | |
| 6.12 | Gráfico de la serie de datos rellena para la estación 22006 | 55 |
| 6.13 | Gráfico comparativo de evaporación obtenida a través de datos observados y de datos estimados de temperatura con el método de Thorntwaite para la estación 22006 | 56 |
| 6.14 | Gráfico de P-ET para la estación 22006 | 56 |
| 6.15 | Gráfico comparativo de parte de la ecuación del balance hídrico para la estación 22043 para el año 2002. | 57 |
| 6.16 | Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación Ceja de Bravo. | 58 |
| 6.17 | Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación Plantel 7. | 59 |
| 6.18 | Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación La Joya. | 59 |
| 6.19 | Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación El Salto (Huimilpan). | 60 |
| 6.20 | Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación El Pueblito | 60 |
| A.1 | Comparativo de las estaciones de Conagua y las de la estación patrón para las temperaturas máximas y mínimas diarias. | 69 |
| A.2 | Comparativo entre las regresiones de los datos de temperatura media una a partir del origen y la otra a partir de los datos de la estación de Conagua. | 70 |
| A.3 | Gráfico que muestra los componentes del balance hídrico para un periodo de 1961-2012 | 71 |
| A.4 | Visualización de los datos de temperatura observada diarios de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro. | 71 |
| A.5 | Visualización de los datos de temperatura mínima diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro. | 72 |
| A.6 | Visualización de los datos de temperatura máxima diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro | 72 |

| | | |
|-----|--|----|
| A.7 | Visualización de los datos de temperatura media diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro. | 73 |
| A.8 | Visualización de los datos de precipitación diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro. | 73 |
| A.9 | Gráfico que muestra el relleno de datos de la temperatura observada contra la registrada por las estaciones correspondiente. | 77 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Nombre | Página |
|-------|---|--------|
| 4.1 | Agua disponible para procesos hidrológicos. | 30 |
| 6.1 | Datos estadísticos de las observaciones de temperatura. | 48 |
| 6.2 | Grupos formados para la aplicación de las regresiones múltiples. | 50 |
| A.1 | Descripción de los indicadores del paquete RClindex, para la cuenca del Río Querétaro. | 68 |
| A.2 | Tabla de radiación solar extraterrestre en $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Allen et al., 1998). | 78 |

Introducción

La definición de cambio climático publicada en el DOF (Junio, 2012) indica que se trata de la variación del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera global y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos comparables.

Es así que el clima influye en una gran variedad de procesos ecológicos. Estos efectos operan a través de parámetros meteorológicos locales tales como la temperatura, el viento, la precipitación, la nieve y las corrientes oceánicas, así como en las interacciones entre ellos. Recientemente se ha prestado mayor atención a los patrones de variabilidad climática con mayor duración y escala, con impactos ecológicos marcados sobre las escalas interanuales y de largos periodos de tiempo. De particular interés son las oscilaciones del atlántico norte (NAO, por sus siglas en inglés) y las oscilaciones del niño en el sur (ENSO, por sus siglas en inglés). Estos patrones cuentan con la mayor variación en el estado del tiempo y en el clima a lo largo del mundo y se ha demostrado que afectan a la vegetación terrestre, los animales terrestres, a la biología marina y las poblaciones de peces a través de vías directas e indirectas (Stenseth, *et al.*, 2002).

Asimismo, el clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja. A diferencia del concepto tradicional de clima, como el promedio de alguna variable climática, hoy en día se piensa en éste como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y los continentes, en diversas escalas de tiempo y espacio. Cuando una variable meteorológica como la precipitación o la temperatura diverge de su valor medio de 30 años según lo considerado por la OMN, se denomina anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano, o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta resultado de la actividad humana (Magaña, 2004).

Entonces, el cambio climático es interpretado a partir de la desviación estadística del clima o variabilidad que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso

más tiempo), y se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a variaciones en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras (IPCC, 2007), es decir cambios asociados a actividades antropogénicas. La valoración del impacto climático necesita tomar en cuenta dos procesos interrelacionados: cambio socio-económico y cambio climático. En principio, con la combinación es posible evaluar la exposición de las sociedades futuras y los ecosistemas al daño causado por el cambio climático (Berkhout, *et al.*, 2002).

Los impactos potenciales de cambio climático sobre los mecanismos de escurrimiento publicados como resultado de varios trabajos de investigación científica sugieren que el cambio climático futuro podría implicar un número mayor de climas extremos, incluyendo entre ellos eventos de precipitación con mayor intensidad y decrementos de las condiciones del escurrimiento. Algunas cuestiones importantes como los insuficientes periodos de registros hidrológicos, la variabilidad natural mezclada con cambios antropogénicos inducidos, los resultados de estudios de cambio climático y el efecto futuro del cambio climático sobre los diseños hidrológicos y la gestión del recurso agua, son tratadas por todos los hidrólogos en sus prácticas y en la gestión de los recursos hídricos actual y futura (Teegavarapu, 2010).

Los eventos atípicos en el clima y en los fenómenos meteorológicos naturales han recibido mayor atención en las últimas décadas, debido a la pérdida a menudo de vidas humanas y al incremento exponencial de los costos asociados a ellos. No cabe duda de que la sociedad en su conjunto se ha convertido vulnerable a condiciones climáticas extremas. La población y la infraestructura siguen en aumento en áreas que son vulnerables a eventos como inundaciones, tormentas y calor o frío extremo. Por otra parte, el cambio de uso del suelo puede a menudo incrementar la vulnerabilidad, por ejemplo, la creación de un mayor potencial de los impactos catastróficos de los fenómenos climáticos extremos, como inundaciones e incremento debido a la contaminación. Existe un gran número de maneras en que los eventos de clima extremo pueden ser definidos, como temperaturas diarias extremas, cantidades de lluvia diaria extrema, grandes áreas que experimentan inusuales temperaturas mensuales cálidas, o incluso las tormentas que se convierten en huracanes. Los eventos extremos pueden también ser definidos por el impacto catastrófico que un evento tiene en la sociedad. Tal impacto puede implicar la pérdida excesiva de vidas humanas, pérdidas económicas excesivas (Easterling, *et al.*, 2000).

Por otra parte, todos los organismos incluidos los humanos, requieren de agua para sobrevivir. Por lo tanto, asegurar que los suministros de agua estén disponibles es esencial para el consumo humano. A pesar de que nuestro planeta en ocasiones es llamado “planeta azul”, existe la advertencia del incremento en la escases del vital líquido a lo largo del mundo. Sin embargo, a diferencia del petróleo, la movilidad del agua en el planeta es un ciclo hidrológico cerrado, lo que implica una circulación continúa en la atmosfera. La cantidad de agua no podría disminuir en periodos más cortos de tiempo que las escalas de tiempo geológico. Aunque hay una gran cantidad de agua en la tierra, solo cerca del 2.5% es agua dulce, y la mayoría de esta agua se almacena en los glaciares o en aguas subterráneas profundas, la cual es de difícil acceso para el ser humano. La cantidad de agua almacenada en todos los ríos a lo largo del planeta es sólo de 2000 km³, mucho menos que la extracción anual de agua la cual asciende a 3800 km³/año. Claramente, una medición más adecuada de la disponibilidad es de 45,500 km³/año de descarga anual, la cual fluye principalmente a través de los ríos de los continentes hacía el mar. Los hidrólogos consideran al agua extraída del subsuelo y de la superficie como recurso hídrico disponible, y a la evapotranspiración como la pérdida de agua proveniente de la precipitación. En este sentido, P-ET en la superficie terrestre es una medida de la disponibilidad del recurso hídrico renovable. La mayor parte de este recurso disponible es el agua superficial, en particular la descarga de los ríos. Sin embargo, parte de esta agua, aproximadamente el 10% del total de las descargas de los ríos, se infiltra al subsuelo y nunca regresa a la superficie terrestre pero descarga en el océano directamente a través del subsuelo y allí se pierde (Oki y Kanae, 2006).

La disponibilidad de agua en los continentes es de vital importancia para diferentes rubros como: la salud humana, las actividades económicas, el funcionamiento de los ecosistemas, para llevar a cabo los procesos geofísicos, entre otros. Debido a que la presión de vapor de saturación del agua en el aire es altamente sensible a la temperatura, se esperan perturbaciones en el ciclo del agua debido al calentamiento global. Los cambios en los patrones regionales de los climas son complejos y menos ciertos que los de temperatura, sin embargo, con ambos se esperan aumentos y/o disminuciones regionales en la precipitación y el escurrimiento (Milly, *et al.*, 2005).

Del mismo modo, el ciclo de la humedad atmosférica es un aspecto importante del sistema climático de la tierra, aunque los procesos que determinan la humedad atmosférica son mal entendidos, por ejemplo, la evaporación directa de la lluvia contribuye significativamente a que el calor y la humedad formen nubes, pero muy poca información de estos procesos se encuentra disponible. Similarmente, las contribuciones relativas de humedad atmosférica sobre el suelo desde la evaporación local y humedad hasta fuentes oceánicas son inciertas (Worden, et al. 2007).

Así pues, la información acerca de la disponibilidad de humedad de suelo puede ser medida o estimada por un amplio rango de métodos. En este contexto la determinación de otros componentes del balance hídrico, como el escurrimiento, infiltración, o el total de la evapotranspiración actual (ETA) son cruciales. La ETA puede ser obtenida usando varios métodos de medición o estimada a través de modelos. Desafortunadamente, no existe un método ideal o universal para el cálculo de la ETA porque cada uno de los métodos disponibles presenta algunas limitaciones. Una gran cantidad considerable de métodos directos, como los lisímetros son considerados como equipos muy adecuados y precisos, pero el principal defecto y limitación de su generalizada adopción son su alto costo, la complicada instalación e inmovilidad, así como las diferencias de densidad entre el lisímetro y la vegetación presente en el área de estudio (Hlavinka, *et al.*, 2011).

Según la NOM-011-CNA-2000, la disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica es el valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo y el volumen anual actual comprendido aguas arriba. Esta variable indica la cantidad de recurso hídrico disponible al final de una gestión o cuenca, elemento clave cuando se piensa en términos de reserva estratégica del recurso agua. Con relación a esta variable, es importante mencionar que del total de las unidades de gestión de los estudios de disponibilidad consideradas (728), el 87% (632) presenta una disponibilidad media anual mayor a cero. De éstas, el 49% (312) tienen al menos 150 hm^3 de disponibilidad y el 28% (178) tienen más de 500 hm^3 (CONAGUA, 2011).

En México se han delimitado 653 acuíferos distribuidos en las 13 regiones hidrológico-administrativas. El bombeo intensivo del agua subterránea ha dado lugar a un problema de sobreexplotación en algunos de ellos, que afectan directamente el régimen y la disponibilidad de las aguas superficiales. La sobreexplotación de las aguas subterráneas conlleva, entre otros efectos negativos, la disminución del gasto y rendimiento de los pozos, el incremento del costo de extracción, el asentamiento y agrietamiento del terreno, con impactos severos sobre el medio ambiente: desaparición de manantiales, pérdidas de vegetación nativa que depende del agua subterránea, humedales, lagos, el caudal base de los ríos y ecosistemas locales, y sobre todo la pérdida de acceso al recurso de las poblaciones marginadas (CONAGUA, 2011). Por lo tanto en este trabajo se lleva a cabo una valoración de los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de agua en la Cuenca del Río Querétaro a través de un análisis estadístico de las series de datos climáticos que intervienen en la estimación de los componentes del balance hídrico superficial.

2. Antecedentes

El tercer reporte de evaluación sobre cambio climático (IPCC, 2001) establece: “es muy probable (con un intervalo de confianza de 90-99%) que las precipitaciones se hayan incrementado en un 0.5-1.0% por década en el siglo XX. Sobre todo en las latitudes altas y medias del hemisferio norte y que en esta misma región “en la última mitad del siglo XX es muy probable (con un 60-90% de confiabilidad) que la frecuencia de aparición de precipitaciones fuertes se haya incrementado en 2-4%”, por lo que se concluye que “la magnitud de las inundaciones y su frecuencia se han incrementado en muchas regiones”.

Por su parte, Milly *et al* (2005) muestra que el riesgo de precipitaciones extremas e inundaciones podría incrementarse en el futuro debido al aumento de los niveles de dióxido de carbono atmosférico. Estas conclusiones se basan, en el primer caso, en modelos climáticos de tendencias extremas y en el segundo en modelos probabilísticos en los cuales se incrementa en hasta dos veces las tasas actuales de gases de efecto invernadero. El cambio climático tendrá como efecto, en los próximos cien años, el de multiplicar por 5 la probabilidad de temporadas excepcionalmente lluviosas (Ramos y González, 2012).

En este sentido la región central de México dada su localización por debajo de trópico de cáncer está sujeta a una dinámica particular de las oscilaciones climáticas, las cuales algunos investigadores la relacionan con oscilaciones naturales del ciclo solar (Mendoza, *et al*, 2005). El ingreso de aire frío es evidente en las partes altas del norte y centro del país, en algunas ocasiones alcanza la planicie costera de sur, en ocasiones produciendo fuertes precipitaciones en la región central de México. El patrón anual de lluvias se caracterizan por dos máximos, junio y septiembre, y un disminución por el decaimiento convectivo en los meses de julio y agosto, llamado “canícula” o sequía de medio-verano (Mosiño y García, 1966, Magaña *et al*, 1999).

La relación del balance hídrico superficial es compleja y dinámica. Esta relación implica la interacción entre la atmósfera, suelo, planta y agua. Los procesos hidrológicos que ocurren en esta interacción son: precipitación, escurrimiento, infiltración, evapotranspiración (evaporación y transpiración), y drenaje. La precipitación y el escurrimiento pueden ser

conocidos a través de mediciones directas o estimaciones, pero la evaporación y la transpiración son variables climáticas difíciles de determinar. Para describir el proceso del transporte de agua en el suelo, las ecuaciones de infiltración deben tener claros los conceptos físicos que se incluyan, así pues la ecuación del movimiento de agua en suelos no saturados de Richard, la ecuación de absorción de humedad a través de las raíces y el modelo lineal de Van den Honert (1948) describen el movimiento de agua cuando en el suelo hay disponibilidad de plantas (Huang, *et al.*, 2001).

La cambiante cantidad, duración, frecuencia e intensidad en que ocurre, origina que la precipitación sea uno de los fenómenos atmosféricos más difícil de modelar y predecir, además de que es uno de los hidrometeoros más afectados por eventos naturales, como los llamados fenómenos de El Niño o de La Niña. En México, el 80% de la lluvia precipitada en un año hidrológico ocurre de mayo a octubre, en este periodo denominado ciclo primavera-verano se siembran en México cerca de 12 millones de hectáreas de temporal con cultivos cíclicos (Díaz-Padilla, *et al.*, 2011). Igualmente las cantidades de precipitación regulan la disponibilidad de agua y determinan su interacción con las características del terreno y suelo, interviniendo en los mecanismos de la transpiración, el crecimiento, la competencia y la mortalidad de las especies (Gutierrez-Jurado, *et al.*, 2006).

El balance de los diferentes flujos de agua debido a cambios en el clima es reflejado en cambios de almacenamiento de humedad en la superficie y subsuperficie; no sólo en lagos, reservorios, humedales y ríos, sino también en nieve y glaciares, y aguas subterráneas y en la humedad del suelo. La medición de cada uno de estos flujos y condiciones de almacenamiento presentan sus propios retos. Sin embargo la evapotranspiración (para la cual existen pocos modelos de estimación, a pesar de diversos esfuerzos por vincular éstos con las observaciones locales) y cambios en el almacenamiento son los más problemáticos de todos ellos. Una estrategia que ha sido utilizada para dejar de lado estos términos del problema y estimar la disponibilidad del agua superficial sobre largas áreas es utilizar los datos promedios de un periodo largo de tiempo. En este caso, los efectos sobre el balance general de las variaciones interanuales en el almacenamiento terrestre son pequeños (Lettenmaier, *et al.*, 2006).

De igual modo, la evaluación y gestión de recursos hídricos en una cuenca o región está en función del conocimiento y análisis de los procesos hidrológicos que se llevan a cabo dentro de la misma, y donde la precipitación es una componente principal. De manera tradicional, las redes de pluviómetros y pluviógrafos han sido utilizadas para analizar la variabilidad espacio-temporal de la precipitación, y generar un muestreo discreto en el espacio y continuo en el tiempo. Hoy en día, el radar es una herramienta eficaz en hidrología que permite la estimación cuantitativa de pluviometría y el conocimiento detallado del campo de tormenta, con escala temporal de 5 o 15 minutos, una resolución de 1 a 2 km², en un radio de cobertura hasta de 300 km. Con ello se obtiene un muestreo continuo de la precipitación en el espacio y discreto en el tiempo para su análisis sobre amplias regiones. Sin embargo, los datos de radar contienen errores asociados con la propagación anómala, ecos falsos, bloqueo orográfico y altura del haz sobre la superficie terrestre (Vilchis-Mata, *et al.*, 2011).

Hoy en día, los hidrólogos y especialistas involucrados en la solución de diversos problemas de los recursos hídricos y ambientales reconocen la importancia de incorporar una alta resolución a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación como uno de los factores más importantes en las aplicaciones hidrológicas. En el modelado hidrológico existe un creciente interés en el uso de datos de precipitación estimados a partir del uso de imágenes de radar, estos datos de precipitación estimada se utilizan en el modelado del fenómeno lluvia-escorrentía, lo cual permite maximizar la aplicación de modelos hidrológicos y especialmente los de tipo distribuido. Las aplicaciones del uso de estas técnicas incluyen el pronóstico hidrológico, la determinación de zonas susceptibles a inundaciones y sobre todo la evaluación de los recursos hídricos (Guerra-Cobián, *et al.*, 2011).

Por otra parte, la evaporación generada por los elementos que constituyen la superficie de la cuenca, la transpiración de la cobertura vegetal, la evaporación del suelo desnudo, la evaporación de los cuerpos de agua, la evaporación generada por la intercepción de la lluvia y la producida por la transpiración de la vegetación hidrófila son componentes primordiales de cualquier balance hídrico. Los cambios en la proporción de la evaporación a largo plazo pueden relacionarse con las modificaciones en el uso del suelo, la cobertura vegetal y el clima (González-Sosa, *et al.*, 2010). Cuando el suelo se encuentra en estado no saturado, la evaporación actual

ETa, es significativamente menor que la evaporación potencial ETo. La evaporación potencial describe una variable climática que caracteriza la cantidad de evaporación que podría ocurrir si la humedad del suelo no fuera un factor limitante bajo las mismas condiciones de clima/atmosfera. El uso de esta variable ficticia, la cual está estrechamente implícita en el cálculo del balance de radiación en la superficie, a pesar de su ambigüedad se entiende bien desde el principio que, permitió vincular climatológicamente los balances de energía y agua de la superficie terrestre sobre una base mensual en cualquier parte del mundo usando datos meteorológicos e hidrológicos disponibles (Golubev, *et al.*, 2001).

De acuerdo con Matthews (2006), las plantas pueden regular el abrir y cerrar de sus estomas en respuesta a las condiciones de cambio en el ambiente; en una atmosfera con alto contenido de CO₂ son más eficientes al utilizar la humedad del suelo. Las estomas de las plantas no se abren tanto o por mucho tiempo y por lo tanto menor cantidad de agua se pierde desde las hojas a la atmosfera. Como consecuencia, las plantas adquieren suficiente carbono a través de las estomas con menos absorción de agua del suelo. El resultado es que la evapotranspiración continental se reduce, mayor cantidad de humedad es retenida en el suelo, y esta capa adicional de agua puede conducir a incrementar el escurrimiento continental. El balance entre la precipitación y la evaporación en la tierra determina la cantidad de escurrimiento superficial, que regresa el agua de los continentes al océano. La fotosíntesis de las plantas juega un rol integral en el ciclo de agua global, mediante la transferencia de agua desde la superficie de la tierra a la atmosfera.

Las incertidumbres asociadas a los Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (GCMs, por sus siglas en inglés) y a los procesos hidrológicos son evaluadas por medio de múltiples modelos. Para evaluar el impacto del cambio climático en los procesos hidrológicos, los modelos hidrológicos son una herramienta esencial para evaluar los cambios de escurrimiento en la cuenca de interés. A la fecha varios modelos han sido usados para predecir las consecuencias potenciales del cambio climático. Para la llevar a cabo la evaluación, se han usado diversos modelos para predecir las consecuencias potenciales del cambio climático. Estos podrían incluir un amplio rango de modelos conceptuales simples de base física, por ejemplo, PDM, NWSRFS, WatBal, o modelos hidrológicos a macro escala como VIC, HBV, MODFLOW,

CATCHMOD, SWAT, o modelos de balance hídrico mensual como el ARC-SWAT, PRMS (Najafi, *et al.*, 2011).

Del mismo modo, los métodos estadísticos usados comúnmente para evaluar la incertidumbre de un modelo incluyen el análisis estadístico de los errores del modelo, algunas veces junto con los intervalos de confianza para la estimación de medias y varianzas de los resultados del modelo (Khan, *et al.*, 2006).

Dado que la precipitación es un proceso estocástico y la mayoría de las veces su medición implica un grado de incertidumbre, los modelos estadísticos hidrológicos se han configurado para usar aproximaciones estadísticas para evaluar cuantitativamente, predecir, y tratar de controlar estos procesos hidrológicos. El estudio del balance hídrico superficial para varias escalas de tiempo-espacio tiene valores teóricos así como aplicaciones para los problemas reales de agua del planeta (Huang, *et al.*, 2001). Es importante señalar que en México, la toma de decisiones respecto a en qué periodos y superficies sembrar se sustenta en muchos de los casos en el cálculo de la lluvia promedio histórica precipitada en un cierto lugar, o bien se calcula su probabilidad y anomalía con base en la distribución normal, lo cual matemática y estadísticamente es posible; sin embargo, los resultados generalmente son incorrectos (Díaz-Padilla, *et al.*, 2011).

La planeación, el diseño y manejo de los proyectos de recursos hidráulicos se basa en los recursos históricos climáticos e hidrológicos, tales como precipitaciones, evaporaciones, escurrimientos líquidos y sólidos, y crecientes. Desafortunadamente, los registros históricos son comúnmente de corta extensión y por ello pueden fallar al proporcionar una estimación confiable de la variabilidad del fenómeno hidrológico estudiado. Por lo anterior, resulta importante buscar fuentes de datos adicionales y técnicas de extensión de los registros que permitan obtener series más largas. Respecto a los procedimientos desarrollados para extender registros cortos, la mayoría son estadísticos basados en la correlación que puede existir entre las series utilizadas; presentando dos objetivos al realizar la extensión, el primero busca mejorar la estimación de los parámetros poblacionales (media y varianza) del registro corto y el otro intenta mantener o

preservar sus estimaciones. El propósito de toda extensión de un registro consiste en mejorar la confiabilidad de sus estimaciones, a través de reducir su variabilidad (Campos-Aranda, 2011).

Por otra parte, la calibración de los modelos puede ser usada para identificar los parámetros que el método requiera. Los métodos de calibración más apropiados están basados en la minimización de errores en las observaciones y en la modelación, bajo el supuesto que sólo la fuente de error es un error de medición gaussiano. En realidad, existen diferentes fuentes de error incluyendo la incertidumbre en los datos de entrada (por ejemplo en la precipitación y la temperatura), la calibración-validación del modelo, la estructura del modelo y los parámetros del mismo, tienen incidencia en la distribución de cada una de estas fuentes de error no está explícitamente reconocida, es por ello que los procesos de calibración pueden producir parámetros estimados sesgados (McMillan, *et al.*, 2010).

La mayoría de los modelos asumen que la precipitación es distribuida por partes iguales a lo largo de la cuenca. Sin embargo, la precipitación es interceptada por la vegetación, y solo aquella que excede la capacidad de intercepción (en función del tipo de vegetación) y es retornada a la atmósfera en forma de flujo de vapor. La cobertura del suelo es importante por tres razones; primero, la cantidad de precipitación interceptada está en función del tipo de vegetación; segundo, la evaporación potencial varía dependiendo de la cobertura de suelo; y tercero, la capacidad de retención de humedad del suelo depende de la profundidad de las raíces (Gosling y Arnell, 2011).

Por otra parte, en el siglo pasado, la población mundial aumentó cuatro veces y actualmente existen más de siete mil millones de habitantes, por lo que el crecimiento poblacional está deteriorando los suministros de agua dulce. La degradación de los recursos acuáticos en el mundo se ha incrementado y está relacionada con las regiones densamente pobladas, ya que las descargas antropogénicas han ocasionado que la capacidad de asimilación natural del ecosistema se vea excedida debido a que los diversos agentes contaminantes que deterioran la calidad del agua no son producidos bajo condiciones naturales, pues los procesos terrestres influyen de diversas maneras en los cuerpos de agua receptores, de acuerdo con los

usos y aprovechamientos domésticos, industriales y agrícolas; así, se estima que cerca del 50% de ellos se encuentran afectados en su calidad (Saldaña-Fabela, *et al.*, 2011).

Además, existen estudios previos en los cuales la disponibilidad de agua en el suelo se centra en la determinación de la capacidad de retención de campo y el punto de marchitez permanente, la cual define la disponibilidad de agua y sobre los factores que influyen en la cantidad de agua disponible que está fácilmente al alcance de las plantas, es decir, la parte del agua disponible que puede ser usada sin la reducción del rendimiento (Wu, *et al.*, 2011).

2.1 Objetivos

2.1.1 General

Para mejorar el conocimiento del impacto del cambio climático en el cálculo del balance hídrico, en su parte superficial, a través de las variables hidrometeorológicas, en este trabajo fue planteado el objetivo siguiente:

Llevar a cabo una evaluación cuantitativa del recurso agua y su relación con el cambio climático para mejorar el conocimiento de su disponibilidad a través de un balance hídrico para un paso de tiempo diario, mediante la hipótesis: si la diferencia de $P-ET$ (donde P es la precipitación y ET la evaporación total) es mayor que cero existe disponibilidad del recurso y en el caso contrario se considerará que existe un déficit.

2.1.2 Particulares

- Llevar a cabo un análisis histórico de las mediciones de temperaturas máximas y mínimas, así como de los eventos de precipitación para establecer una relación con lo que actualmente llamamos cambio climático o si se trata sólo de un proceso cíclico.

- Analizar las incertidumbres de los datos hidroclimatológicos que afectan el cálculo del balance hídrico de la cuenca, mediante la calibración de las estaciones meteorológicas a partir de una estación patrón.
- Estimar la evapotranspiración de la cuenca a través de 5 métodos en donde se tiene implícito el uso de la temperatura e incluir el efecto causado por la altitud.

Este objetivo se desarrolla bajo dos perspectivas: i) estimando el balance hídrico superficial de la cuenca con los datos de las variables climáticas tal y como son registrados por las estaciones meteorológicas ubicadas en la región y ii) con la estimación de un balance hídrico con datos rellenados por medio de métodos estadísticos.

3. Aspectos generales de la Cuenca del Río Querétaro.

La Zona Metropolitana de Querétaro se encuentra casi en su totalidad en la Región Hidrológica 12, dentro de la Cuenca Lerma-Chapala, una de las más importantes de México por su superficie y también por ser la más poblada y contaminada. Los cuatro principales municipios del la Cuenca están incluidos en las subcuencas del Río Querétaro. Sólo una sección muy pequeña de ella, al sureste del municipio de El Marqués, drena hacia la Región Hidrológica 26 correspondiente a la cuenca del río Pánuco. Es muy importante destacar que el parteaguas continental, que divide estas dos regiones, se encuentra muy cerca de los límites de los municipios conurbados, en una zona de clima principalmente semiseco, lo que condiciona el hecho de que existe una cantidad muy limitada de agua superficial.

3.1 Descripción de la zona de estudio.

La Cuenca del Río Querétaro forma parte de la Cuenca Lerma-Santiago. Se encuentra situada en la parte central de México, entre las latitudes 20°15'-21°00' norte y las longitudes 100°05'-100°40' oeste. El Río Querétaro corre en dirección oeste y tiene como principales afluentes los ríos Juriquilla (norte) y El Pueblito (sur). El balance hídrico de la cuenca tuvo un déficit de 129 a 106 millones de m³ en el periodo de 2003-2010, también se redujo el promedio de escurrimiento anual, (DOF, Gobierno de México, 2003, 2010). La cuenca presenta una forma de hoja ensanchada, con 20 km de longitud y 14 km de ancho. El área es de 2,142.7 Km², la cual está compuesta por 36 subcuencas con una superficie que varía de los 214 Km² a los 15 Km²; 13 de estas unidades tienen una pendiente promedio de 10%, y solo 7 tienen menor a 6%. La precipitación media anual en la cuenca del río Querétaro es de 550 mm, 30% por debajo de la media nacional. La lluvia y el clima regional están influenciados por la topografía, por las vertientes del Océano Pacífico y el Golfo de México, y localmente por los límites de las colinas de la ciudad de Querétaro.

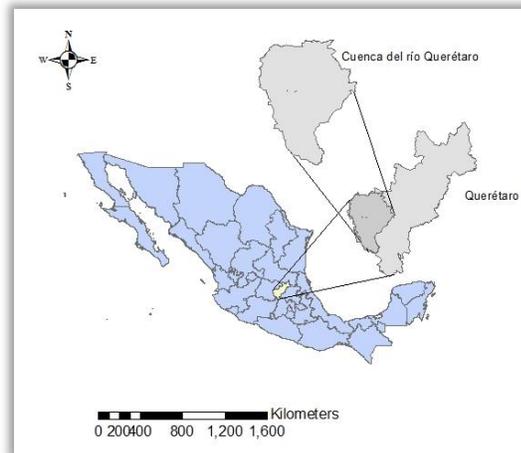


Figura 3.1.- Ubicación de la cuenca del río Querétaro.

Administrativamente la cuenca del río Querétaro, abarca los municipios de El Marqués, Colón, Corregidora, Pedro Escobedo, Huimilpan, Amealco de Bonfil y el municipio de Querétaro. La mayor parte de la población del estado se encuentra concentrada en la cuenca del río Querétaro, según informes del censo de población de 2010 del INEGI, en el estado de Querétaro habitan cerca de 1,827,937 habitantes (incluida la población estimada), de los cuales el 57.75 % habitan en la cuenca lo que corresponde a cerca de 1,055,747 habitantes, esto trae como consecuencia un uso exagerado incluso irracional de los recursos naturales presentes en la cuenca, en especial el agua, olvidando que la protección del ambiente representa un indicador importante en el desarrollo sustentable. En la figura 1 se presenta la delimitación de la cuenca de estudio y su ubicación espacial en el estado de Querétaro.

3.1.1. Historia de la cuenca del Río Querétaro.

La ciudad de Santiago de Querétaro se fundó en 1531, en terrenos del bajío Queretano, precisamente en la loma denominada del Sangremal, una de varias que sobresalen algunas decenas de metros por encima del nivel de los suelos aluviales y lacustres que rellenan la mayor parte de esta depresión. La ciudad se extendió principalmente por la ladera poniente de esta loma durante los siglos XVI y XVII, desde el cauce del río Querétaro, por el norte, hasta los límites más sureños de la ladera del Sangremal, hoy Av. Constituyentes, y desde el Convento de La Cruz hasta la hoy Av. Ezequiel Montes en sentido Oriente- Poniente, a mediados del siglo XVIII. La

ciudad creció y se consolidó en forma sostenida durante el siglo XVIII. Muchas de las construcciones más notables del hoy centro histórico, se edificaron o fueron renovadas en ese período. El área de la ciudad en esa época alcanzó aproximadamente 265 ha y, si atendemos a las cifras del Ensayo de Humboldt, 1803, que considera una población total de 27,000 habitantes para ella, la densidad de población urbana habría sido de alrededor de 10,200 habitantes/ Km², o 102 habitantes por hectárea.

En 1917 la ciudad sólo aumentó 36% con respecto a 1802, incluyendo el área amplia ocupada por las instalaciones ferroviarias al noroeste de la mancha urbana, y desde 1917 a 1950, creció únicamente en un 32%. En la década de 1960, al inaugurarse la autopista México-Querétaro, al sur de la ciudad, la av. Constituyentes se libera del tráfico pesado para iniciar un proceso de diferenciación hacia una zona comercial, de industria ligera y de servicios como hoteles, establecimientos relacionados con el flujo de vehículos y el creciente papel de la ciudad en el comercio regional. Aquí surgirían más tarde las primeras plazas comerciales y se instalará la central de autobuses, al sur de la Alameda.

El papel de la autopista México-Querétaro en el desarrollo del Querétaro de fines del siglo XX fue decisivo, no sólo por los cambios que trajo consigo la mejor comunicación, sino por hacer de la ciudad un lugar más atractivo para el asentamiento de industrias, lo cual la convirtió en un polo de desarrollo importante y activó diversos proyectos viales, así como la construcción de nuevos fraccionamientos residenciales. Querétaro experimentó así, en la década de 1970, un cambio radical en el crecimiento de la ciudad, paralelamente a la puesta en marcha de los primeros parques industriales; a la creación del desarrollo suburbano de Jurica y del primer fraccionamiento popular de gran tamaño y traza regular: Lomas de Casa Blanca. Estos desarrollos rompieron definitivamente con la orientación del eje principal de la ciudad paralelo al río, la vía férrea y la Carretera Panamericana, para establecer un largo eje norte-sur (el camino a San Luis Potosí) desde Casa Blanca hasta Jurica (que hoy se ha extendido por Juriquilla y Santa Rosa Jáuregui, hasta más al norte de la desviación a San Miguel Allende, en el parque industrial Querétaro), en el que se encuentran enclavadas todas estas nuevas adiciones al paisaje urbano de la capital. Mientras tanto, más colonias surgieron en ambos lados del anillo triangular de libramientos, principalmente de nivel socioeconómico alto al oriente, en las cercanías del

Boulevard Bernardo Quintana, y otras populares, como Satélite, para dar cabida al creciente número de familias de obreros, al poniente y noroeste, que rodean y más tarde absorben a poblados como San Pablo.

En los años siguientes, la ciudad creció a un ritmo cada vez mayor, llegando a quintuplicar en el 2000 la superficie urbanizada al inicio de la década de 1970. La inmigración, proveniente en buena parte desde el Distrito Federal y la zona conurbada de la ciudad de México, así como desde otras entidades en la región central del país, se hizo cada vez más significativa y esto no sólo reforzó cuantitativamente el ímpetu en la construcción, sino que modificó el uso del espacio urbano en varios sentidos, como el desarrollo de grandes plazas comerciales, el fraccionamiento de varios de los amplios centros de manzana virreinales para construir condominios y el trazado de enormes barrios campestres alrededor de cuerpos de agua artificiales y campos de golf, que representan hoy en día la mayor proporción de área verde en la ciudad.

Querétaro se localiza en la segunda cuenca más importante del país, Lerma-Chapala-Santiago. Desde el punto de vista hidráulico en la historia de México ocupa un lugar prominente y lo continúa siendo con la construcción del sistema Acueducto II que recorre más de 100 km para abastecer la capital del estado. Las sequías, las inundaciones, la sobre-explotación de los mantos acuíferos son signos que nos obligan a una profunda reflexión acerca de los daños que viene sufriendo en el patrimonio cultural de Querétaro en los últimos 200 años (Ramos y González, 2012).

En términos del ciclo anual de agua, en el valle de Querétaro el promedio anual de precipitación varía 410 mm a 690 mm, según sea el periodo de observación. García Quintero (1943) reporta en la evaluación de los Recursos Hidráulicos de la Republica Mexicana una lluvia anual para el estado de Querétaro de 833 mm (1943). La temperatura media diaria, oscila entre los 7 y 25°C. Los vientos provienen del este y noreste a una velocidad promedio de 17 ms-1, equivalentes a 61.2 kmhr-1. La evaporación potencial media anual es de 2,050 a 2,200 mm.

3.1.2. Estadísticas del agua en Querétaro.

Ante la falta de agua superficial y con la presión originada por el crecimiento en la población y en la economía, la demanda de agua se ha resuelto mediante el empleo intensivo del agua del subsuelo: Existen 650 acuíferos distribuidos en el país, los que suministran aproximadamente la tercera parte de la extracción nacional para todos los usos; 15% están seriamente sobreexplotados y la mayoría están contaminados. Los acuíferos abastecen a 75% de la población, a una tercera parte de la superficie agrícola de riego y a 61 % de la industria. Específicamente en Querétaro, la presión de la urbanización acelerada sobre los recursos hídricos y su calidad es muy amplia y presenta diversas facetas. Además de la demanda creciente del líquido por los procesos productivos que se han instalado en los cuatro municipios, el propio crecimiento demográfico imprime una presión cada vez más fuerte sobre este recurso. Al analizar el tipo de suministro que se tenía en 2005, queda al descubierto una situación precaria para gran parte de la población. La mayor parte del agua utilizada en la ZMQ proviene de los acuíferos en la región. En el estudio de la CEA (1999), se estiman los usos dados a cada uno de estos acuíferos. El uso agrícola es el que consume la mayor parte del recurso (54%), seguido muy de cerca por el uso doméstico urbano y rural (41%). A nivel de acuíferos hay diferencias, el acuífero de Querétaro es utilizado mayormente para el uso público urbano (64%) y en menor medida para el uso agrícola (31%) e industrial (8%). Mientras que los demás acuíferos se usan principalmente para fines agropecuarios, alrededor del 80%. De manera global, al considerar también el agua superficial, la agricultura tiene una mayor participación como usuario del agua en la región, al alcanzar un 66% según el CQRN, (2003), considerando que toda el agua superficial aprovechada es usada para fines agrícolas (aunque una pequeña parte es usada para abrevadero). En la figura siguiente (figura 3.2) se describe la cantidad de agua suministrada para los rubros más importantes en los municipios de la ZMQ para el año 2005.

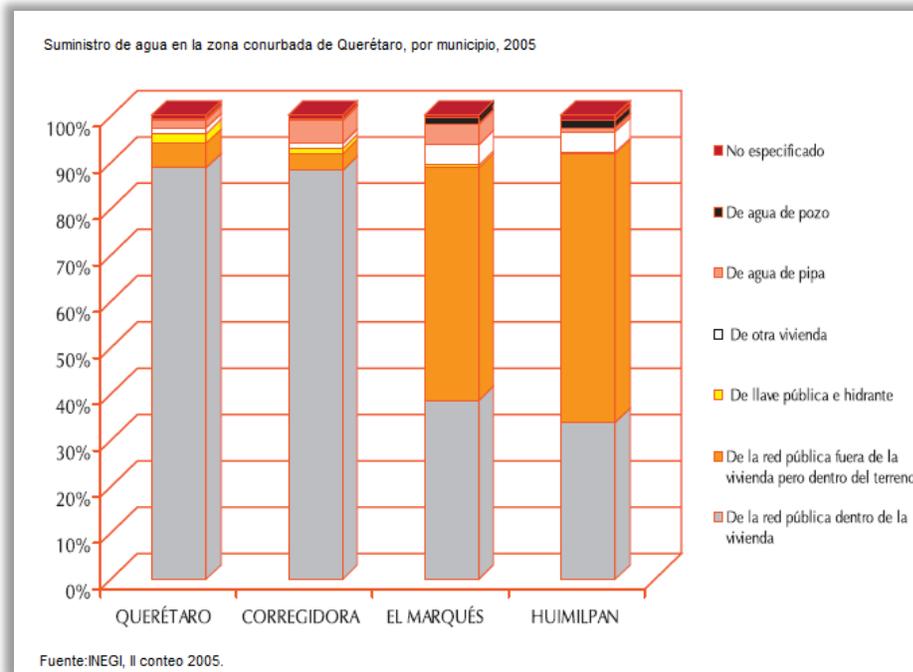


Figura 3.2.- Suministro de agua (en porcentaje) en cada municipio de la ZMQ (INEGI, II conteo 2005).

3.1.3 Aspectos socioeconómicos.

El grado de marginación representa una síntesis del nivel de desarrollo, permite dirigir políticas sociales y de inversión adecuadas y establecer prioridades de desarrollo regional, ya que posibilita identificar espacialmente los municipios y localidades en los que los rezagos socioeconómicos y las condiciones sociodemográficas asociadas son más agudas.

El estado de Querétaro está considerado a nivel nacional con marginación media, sin embargo esta condición es heterogénea en los municipios conurbados. Sin embargo, el grado de marginación municipal, a su vez plantea dinámicas diferenciadas al interior de los municipios; es decir, existen municipios cuya clasificación muestra una profunda diversidad entre las localidades que lo conforman y están presentes los cinco rangos convencionales.

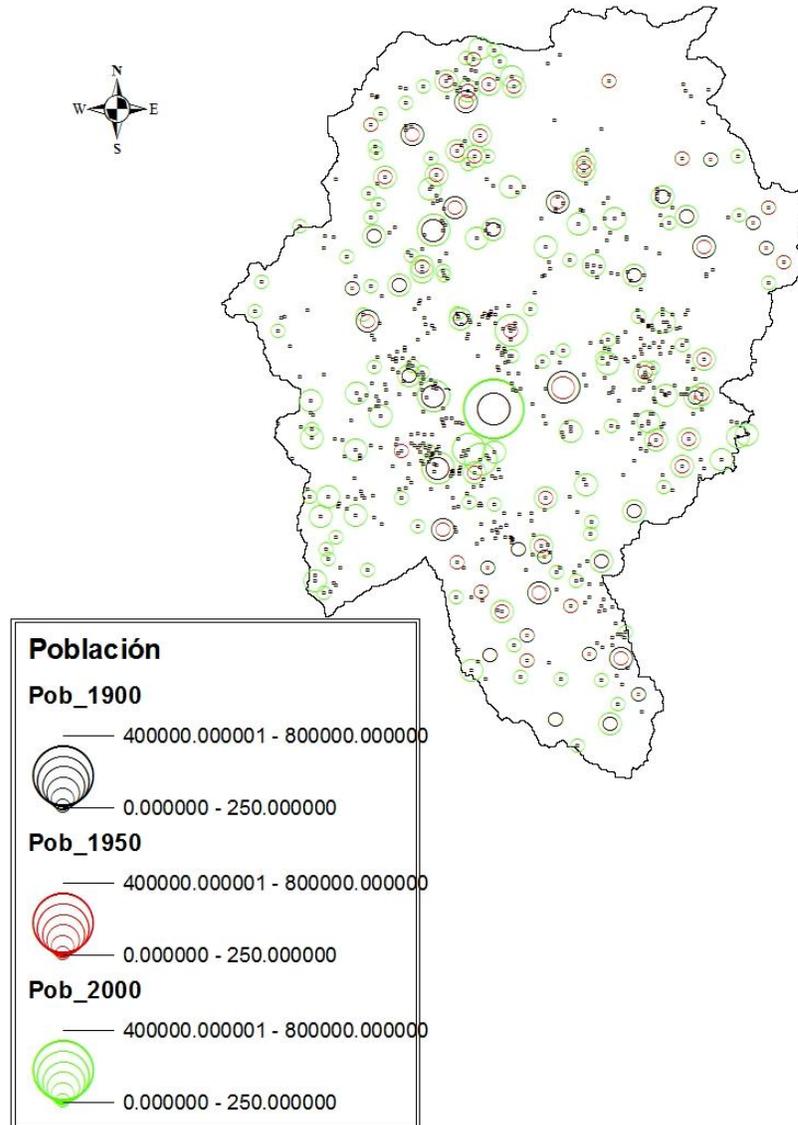


Figura 3.3.- Evolución de la población en la cuenca del Río Querétaro (fuente: INEGI, 2012).

En la figura anterior (3.3) podemos observar la evolución de la población en cada localidad que se encuentra dentro de la cuenca, se observa que en la parte de la capital y en el municipio de Corregidora se concentran cada vez más los grupos de personas, ya que en esta área se encuentran situada la mayoría de la industria del estado, lo que representa la facilidad para encontrar un trabajo estable, lo que lo hace atractivo para los inmigrantes del estado y del país, actualmente en la cuenca se tienen registrados más de un millón de habitantes lo que representa más del 50% de la población total del estado.

3.2. Morfología.

La Cuenca del Río Querétaro incluye terrenos pertenecientes a dos de las grandes regiones paisajísticas, o provincias fisiográficas de México (INEGI, 1986; CQRN, 2002): la Mesa Central, que abarca las porciones más septentrionales de los municipios de Querétaro y El Marqués; y la provincia del Eje Neovolcánico, al que pertenecen el resto de los terrenos de ella.

Los bajíos están delimitados por terrenos de mesetas lávicas (originadas por flujos de lava basáltica y andesítica principalmente), como las que sobresalen al oriente de la ciudad capital conocidas como Mesetas y Cañadas Orientales; siempre relacionadas a pequeños conos volcánicos extintos de varios tipos, todos ellos del Plioceno, formados en un período que va desde algo más de 20 hasta aproximadamente 5 millones de años atrás. Las rocas basálticas de color gris oscuro, son masivas, o se han fracturado en forma de columnas; alternan con rocas de color rojizo (tezontle) muy porosas y fracturadas, llamadas brechas volcánicas, que forman parte de las mesetas o bien sobresalen como pequeñas peñas. Las capas poco profundas de basalto descansan sobre otras de más espesor, de tobas de color crema claro, muchas de ellas ricas en pómez, que asoman por debajo de las rocas negras en las laderas de las cañadas de Menchaca, Bolaños y La Cañada, donde se encuentra la localidad llamada así, cabecera del municipio de El Marqués. Los terrenos de basaltos y brechas volcánicas se consideran como de permeabilidad moderada o alta a la recarga de agua subterránea.

Una sierra volcánica de importancia es la que se encuentra directamente al sur de la zona urbana de la capital del estado, la Sierra de El Cimatarío (2,395 msnm), cuya cumbre es un pequeño cono de brecha volcánica, que sobresale en la cumbre de un volcán en escudo de basalto muy fracturado y poroso de pendiente más suave, y una falda o pie de monte amplio formado por depósitos de cantos rodados (conglomerados), más evidente hacia el norte del volcán. Varios estudios realizados o citados indican que es precisamente en El Cimatarío donde se tiene la mayor capacidad de recarga al acuífero.

Los terrenos de la Mesa Central que forman la parte norteña de los municipios de El Marqués y Querétaro, presentan sierras volcánicas de edad mayor (15 a más de 20 millones de años) a las que se encuentran en el Eje Neovolcánico, con laderas abruptas y, en varios casos, fuertemente disectadas por cauces de arroyos. Están al norte de El Marqués y forman parte del macizo de El Zamorano; tienen altitudes de 2,600 a 2,900 msnm, y mesetas cuyas superficies rocosas rondan los 2,500 msnm.

3.3. Vegetación y Usos del suelo.

En el municipio de Querétaro los principales usos del terreno son el urbano, e industrial; en segundo término la agricultura de temporal y la de riego. Sólo se encuentran matorrales subtropicales con algunos manchones de matorral crasicaule y zonas erosionadas en la zona de La Joya y de Charape de los Pelones (al noroeste del municipio). El abandono de la actividad agrícola de temporal en zonas de pendiente moderada, particularmente en lomas y laderas de la sierra del Cimatarío, está derivando en un proceso en el que pastos y algunos arbustos propios del matorral se han vuelto a difundir por aquellas zonas.

En los municipios de El Marqués, Corregidora y Huimilpan, los terrenos están ocupados principalmente por agricultura, sea de riego o de temporal. En la zona norte de El Marqués se encuentran matorrales subtropicales y crasicaules, algunas zonas erosionadas, y bosque de encino en el cerro El Pinalito, al norte del municipio.

En las figuras siguientes se presenta la distribución de la vegetación potencial del país (figura 3.4) así como el respectivo mapa de la distribución de los usos de suelo y vegetación del INEGI agrupados por la CONABIO (figura 3.5).

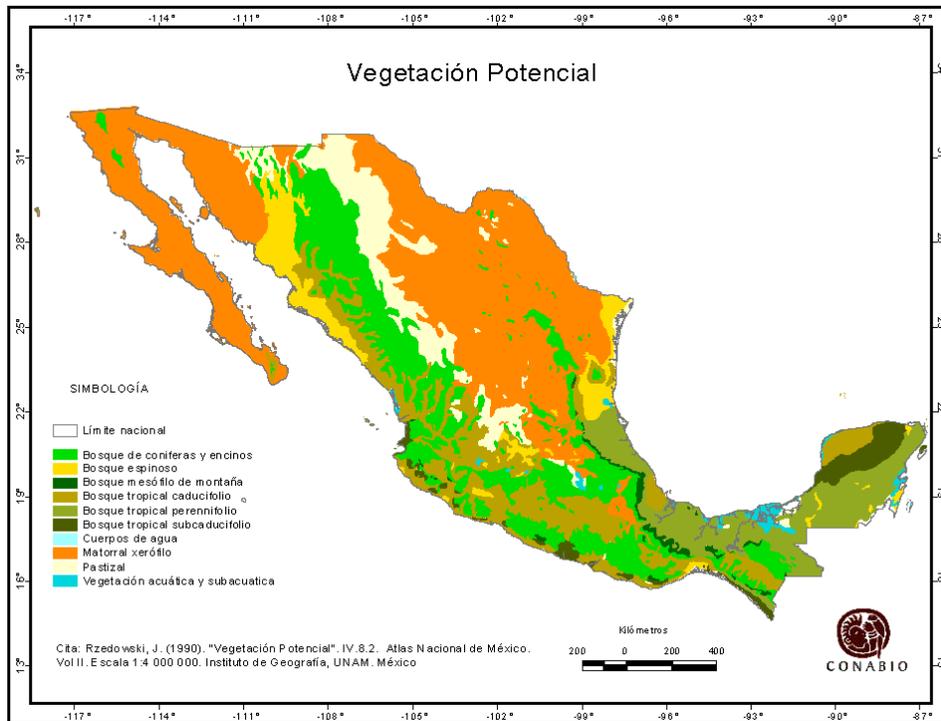


Figura 3.4.- Vegetación potencial de México (fuente: CONABIO, 2010).

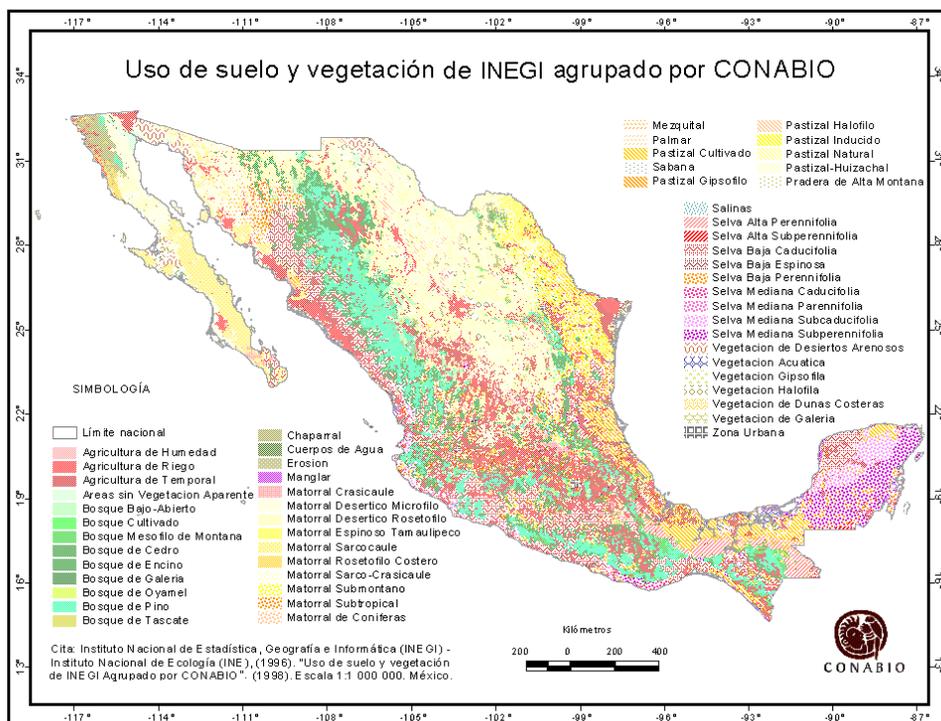


Figura 3.5.- Uso del suelo y Vegetación de México (fuente: CONABIO, 2010).

3.4. Variables climáticas.

En los siguientes párrafos se describe la situación de las variables climáticas de precipitación, evaporación y escurrimiento superficial del estado de Querétaro y en específico de la cuenca de estudio.

3.4.1. Precipitación.

De acuerdo con la FAO (2007), las regiones semiáridas (caso de estudio) tienen regímenes de lluvia altamente estacionales, una lluvia promedio de hasta 500 mm en las áreas con lluvias de invierno y de hasta 800 mm en las áreas con lluvias de verano, aunado a esto presentan una variabilidad interanual del 25 al 50 %. Es común que en estos ambientes el reparto temporal de las mismas suele presentar fuertes variaciones anuales, estacionales y mensuales, así como elevadas concentraciones diarias ya que en general las precipitaciones de estas zonas son de tipo torrencial (Tarango-Arambula, 2005). En consecuencia el volumen total anual no parece ser un indicador adecuado de las condiciones generales en que se producen los aportes hídricos (Goudie, 1987).

En estos entornos de paisaje, las cantidades de precipitación regulan la disponibilidad de agua y determinan su interacción con las características del terreno y suelo, interviniendo en los mecanismos de la transpiración, el crecimiento, la competencia y la mortalidad de las especies (Gutierrez-Jurado, *et al.*, 2006).

En México la distribución de las precipitaciones se transforma a lo largo del año, geográficamente crece armónicamente de sur-norte y de norte-sur, en este sentido la precipitación normal en el país en el período de 1971-2008 fue de 760 milímetros (CNA, 2012), en la figura siguiente (figura 3.6) se muestra la distribución espacial de la precipitación en el territorio nacional.

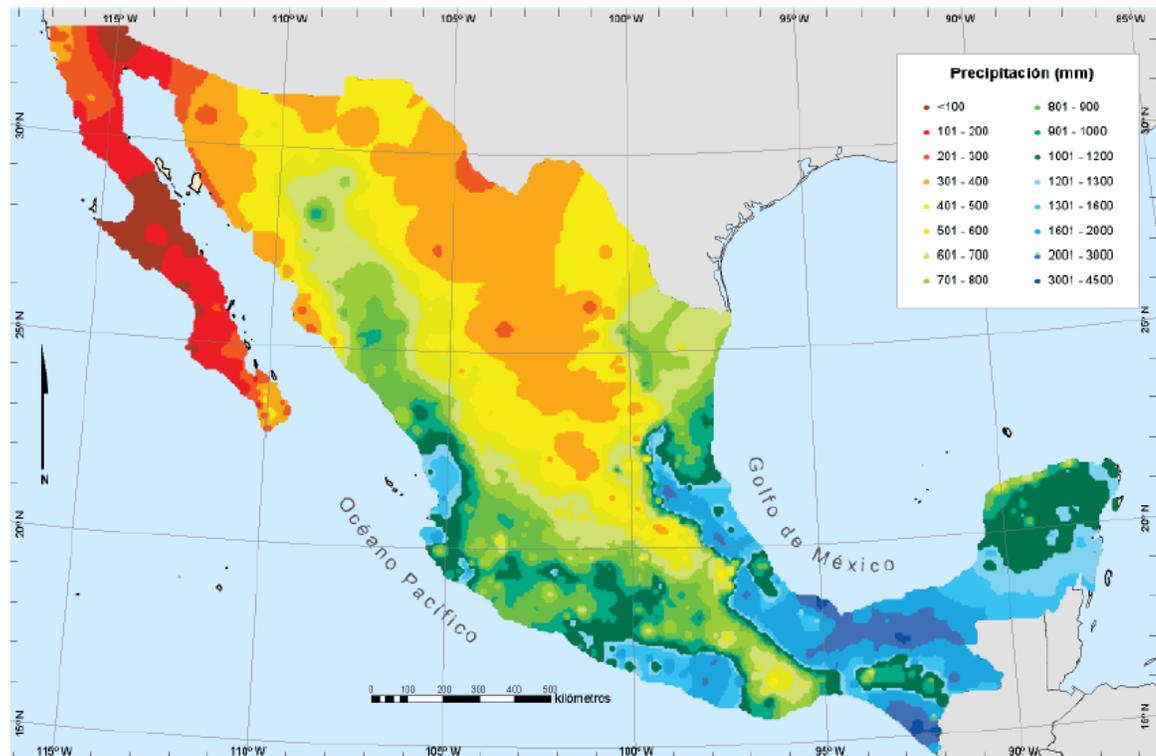


Figura 3.6.- Distribución de la precipitación en el país (CNA, 2012).

La precipitación anual en el valle del río Lerma oscila entre 700 y 800 mm, reduciendo a 500-600 en la región del noreste de Jalisco, Sierra de Guanajuato y el sur de Querétaro; en el noreste de Guanajuato y en la ciudad Querétaro no llega a los 450 mm, siendo en promedio de 350 mm por año. La zona urbana de la ciudad de Querétaro, se encuentra situada entre dos formaciones montañosas principalmente: por la zona norte de la ciudad, se localiza la cordillera de Cerro Prieto-San José El Alto con altitud aproximada de 2,440 msnm y por la zona sur la cadena montañosa del Cerro del Cimatarío con altitud de 2,380 msnm. Entre estas formaciones montañosas, se encuentra una zona baja que es donde los flujos de masas de aire se ven favorecidos en su desarrollo, por lo que se observa que las corrientes pueden desplazarse de una manera favorable de este a oeste; de la misma manera, esta zona que definen estas cordilleras, es una depresión por donde acometen los escurrimientos de las zonas altas de la cuenca del río Querétaro hacia la zona de planicie, que es donde se localiza la ciudad de Querétaro. A partir de esta zona, el desarrollo de las cañadas es múltiple, sin embargo es predominante la dirección norte y oeste, que es en esta última, donde se localizan las llanuras más importantes. En algunas regiones de México existen datos meteorológicos desde inicios del siglo XIX (SMN, CNA y

CFE) sin embargo ante la escasez de datos históricos de centenas de años, la gran parte de los estudios de la historia del clima del país ha sido reconstruida con el análisis de los anillos de los troncos de árboles (tree rings por su definición en inglés), polen y niveles de lagos. Las precipitaciones gran parte de llamado altiplano mexicano (Querétaro, Guanajuato) tienen su origen en sistemas convectivos generados por las oscilaciones térmicas del océano pacifico y del caribe, así como las corrientes frías provenientes del polo norte. Las montañas y la topografía vienen a ser otro factor clave que influye en el clima, favoreciendo lluvias torrenciales (Metcalf, 1987, Mosino and Garcia, 1973). Las lluvias en toda la zona son fundamentalmente veraniegas. En la mayor parte de los terrenos sujetos a clima semiseco semicálido o semiseco templado la precipitación media anual es relativamente escasa, cercana a 510 mm. (al oriente de El Marqués) y presenta fuertes variaciones entre los años más y menos secos. Sólo hacia el sur de los municipios de Corregidora y Huimilpan se tiene un gradiente en la precipitación, que llega a rebasar ligeramente los 750 mm. anuales en promedio en años relativamente húmedos.

3.4.2. Evaporación.

En las regiones semiáridas, casi siempre, la evapotranspiración potencial es muy elevada y la evaporación real excede la precipitación, por lo que el suelo esta principalmente seco. También, debido a que la precipitación es esporádica y de poca duración y con prolongados periodos secos; las precipitaciones de baja intensidad generalmente presentan una tasa alta de evaporación pues el agua no penetra a capas profundas del suelo y por lo tanto el contenido de agua en el suelo en los estratos profundos es reducido. Así mismo, debido a que en zonas áridas el suelo se enfría durante la noche, existe un movimiento del vapor de agua hacia la superficie del suelo donde se puede condensar (el rocío típico de las mañanas) y evaporar al salir el sol en la mañana. Después, a medida que se calienta el suelo en la mañana, y dado que la transferencia de calor es desde la superficie hacia abajo, existe un movimiento de agua hacia abajo que trata de reducir la evaporación. Este fenómeno también se hace evidente durante el transcurso del año, por ejemplo en la primavera y al comenzar el verano; hay mayor transferencia de calor de la superficie del suelo hacia abajo y en el otoño, así mismo al comenzar el invierno; cuando la transferencia de calor es de abajo hacia la superficie del suelo (Salas, 2000).

La evaporación del suelo debajo de la planta, generalmente es menor que la evaporación del suelo desnudo por unidad de área de terreno y bajo condiciones climáticas comparables. Esto se debe al efecto de la sombra que produce la planta, que reduce la radiación incidente sobre el suelo, reduce la transferencia de calor en el suelo (de la superficie hacia abajo o de abajo hacia la superficie como se describió anteriormente) y debido a que la planta reduce el efecto del viento. Plantas nativas de zonas áridas que crecen solo con el agua de la precipitación generalmente se adaptan a la reducida cantidad de agua y a periodos largos secos, lo que las somete a estrés hídrico durante una gran parte del año. Durante estos periodos la evapotranspiración decrece a medida que el estrés aumenta (Salas, 2000). Las plantas de zonas áridas se adaptan al medio reduciendo la apertura de las estomas y disminuyendo el tiempo de apertura diaria durante los periodos secos o sea reduciendo la transpiración. También se ha observado que las plantas en zonas áridas pueden absorber la humedad del suelo aun cuando estas se encuentren por debajo del punto de marchites (Slatyer y Mabbutt, 1964).

La baja cobertura vegetal de estos ambientes parece estar asociada a un ajuste de la superficie transpirante de la vegetación a la precipitación. Para mantener el abastecimiento de agua las plantas de clima semiárido necesitan explorar un volumen mayor de suelo, por ello, no solo reducen su superficie transpirante y crecen separadas unas de otras, además presentan un sistema radicular desarrollado, lo que les permite explorar volúmenes de suelo superiores (García-Ortiz, 2006), tanto en profundidad como espacio. Es así que para la región de la cuenca del Río Querétaro se tienen oscilaciones de la evapotranspiración potencial media de 300 a 400 mm al año, lo que significa que teóricamente existe un disponible de agua para que se generen los procesos de escurrimiento e infiltración en la cuenca.

3.4.3. Escurrimiento superficial.

Para el análisis de esta variable, se cuenta con información de la estación hidrométrica denominada las Adjuntas, de la cual se extrajeron los datos del caudal para diferentes periodos de tiempo, cabe mencionar que se cuenta con el máximo caudal ocurrido en cada mes para el periodo 1998-2005. Y según lo mencionado en los párrafos anteriores se dispone

aproximadamente de entre un promedio de 100 a 200 mm de lámina de lluvia para que se genere escurrimiento en la cuenca.

3.5. Climas.

Gran parte de los terrenos de los municipios de Querétaro, Corregidora y El Marqués están sujetos a un clima semiseco templado (Clasificación de Köppen modificado por García, INEGI, 1986), prácticamente en los límites con los climas subhúmedos. Este clima se caracteriza por precipitaciones relativamente bajas, que se concentran en una estación lluviosa bien definida y altas temperaturas durante el verano. La lluvia invernal no rebasa el 5 por ciento del total de la precipitación anual y se presenta una temporada de marcada sequía, en el invierno y la primavera. En la parte más baja de la zona, en el fondo de los Bajíos Queretano y de La Noria, el clima es algo más caluroso, de tipo semiseco semicálido, con proporción de lluvia de invierno similar al anterior e inviernos frescos. Hacia el sur del municipio de Corregidora, así como en Huimilpan, algunos terrenos presentan condiciones climáticas de mayor humedad, clasificadas como clima templado subhúmedo (el menos húmedo de los de este tipo), con marcada temporada de lluvias de verano y proporción de lluvia invernal menor al 5 por ciento del total anual. En estas áreas la oscilación diaria y anual de la temperatura es algo menor que en la parte semiseca; la humedad atmosférica comúnmente mayor y la sequía invernal menos intensa.

3.6. Temperatura.

En la mayor parte del área predominan temperaturas medias anuales de entre 16 y 18° C., y en las zonas más bajas, que corresponden al clima semiseco semicálido, la media anual es de más de 18° C. Las áreas bajo clima templado subhúmedo, al sur de los municipios conurbados, presentan una temperatura media anual, que va de algo más de 14 hasta los 16° C.

Algunos terrenos altos con clima semiseco templado, al norte del municipio de Querétaro, en el cerro de La Rochera, y la parte más elevada de la sierra de El Raspiño, presentan temperatura media anual ligeramente por debajo de los 16° C.

4. Balance hídrico.

El término de balance hídrico fue usado por el meteorólogo C. Warren Thornthwaite en 1944 para referirse al balance entre la entrada de agua precipitada y el agua de nieve derretida junto con la pérdida de agua por evapotranspiración, recarga de acuíferos y escurrimiento. Además el balance hídrico es de gran utilidad en la predicción de algunos de los impactos humanos sobre el ciclo hidrológico.

4.1. Componentes del balance hídrico.

El estudio de los intercambios turbulentos en sistema Suelo-Vegetación-Atmósfera permite efectuar previsiones del balance hídrico necesario para conocer la distribución espacial y temporal, cuantificación y utilización de los recursos hídricos que están disponibles en el globo terrestre. Estos recursos se distribuyen en la atmosfera, la superficie terrestre y las capas del suelo (Silva, 2003). Las interacciones de los procesos en el sistema Suelo-Vegetación-Atmósfera son el foco central de la modelación del balance hídrico. En la figura siguiente (4.1) se observan los componentes principales del balance hídrico, de las cuales la precipitación es la principal entrada del sistema y los demás componentes representan las salidas del mismo.

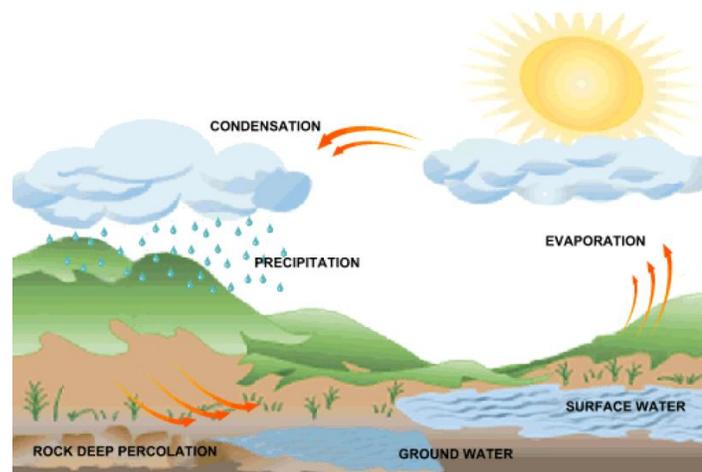


Figura 4.1.- Representación gráfica del ciclo hidrológico.

La tabla siguiente (4.1) muestra la disponibilidad de aguas superficiales del área de la cuenca Lerma-Chapala correspondiente a la superficie que aporta el estado de Querétaro (fuente: CEA 1999). Así pues se puede observar que en la cuenca existe un volumen de agua disponible para que se generen los procesos hidrológicos del ciclo del agua.

Tabla 4.1.- Agua disponible para procesos hidrológicos.

| No. | CONCEPTO | VOLUMEN (Mm ³) |
|-----|-----------------------------------|----------------------------|
| 1 | Precipitación | 1,302.7 |
| 2 | Volúmenes externos | 0.0 |
| 3 | Evaporación real | 1,094.4 |
| 4 | Infiltración neta | 91.5 |
| 5 | Escurrimiento potencial (1+2-3-4) | 116.8 |
| 6 | Aprovechamientos netos | 76.1 |
| 7 | Retornos agrícolas | 15.8 |
| 8 | Escurrimiento remanente (5+7-6) | 56.5 |

4.2. Formulación del balance hídrico.

El balance hídrico de una pequeña cuenca hidrológica puede ser representado a través de las siguientes formulaciones.

4.2.1. Thornthwaite (1957).

El método de Thornthwaite ha sido usado para una gran variedad de propósitos y ha sido modificado en varias ocasiones. El método original de Thornthwaite ha sido descrito de manera muy adecuada en el manuscrito de 1957 del cual se desprende la siguiente formulación:

$$P = I + AET + OF + \Delta SM + \Delta GWS \quad (1)$$

En cual además de las componentes usuales del balance hídrico (P , I y AET), integra el concepto de cambio de humedad del suelo (ΔSM), el cambio de almacenamiento del agua subterránea (ΔGWS).

4.2.2. Daugherty (1985).

Hablando del balance hídrico dentro de un sistema, basado en conservación de masa, este puede representarse como el cambio de masa S_s respecto al tiempo t dentro del sistema y la diferencia entre la entrada Q_1 y la salida de masa del sistema Q_2 (Daugherty, et al., 1985):

$$\frac{dS_s}{dt} = Q_1 - Q_2 \quad (2)$$

En forma detallada las componentes de entrada y salida pueden establecerse como las variables principales del ciclo hidrológico:

$$Q_1 = P \quad (3)$$

$$Q_2 = D + ET + R \quad (4)$$

Donde P es la precipitación, D corresponde al drenaje, ET evapotranspiración y R escurrimiento superficial. Por lo tanto, la ecuación de conservación o balance de masa queda como sigue:

$$\frac{dS}{dt} = P - (ET + R + D) \quad (5)$$

4.2.3. NOM-011.CNA-2000

Para conocer la disponibilidad de agua en una cuenca hidrológica la CNA propone de manera general la aplicación de siguiente modelo hidrológico:

$$DMAAS = VMA - VAA \quad (6)$$

La disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca hidrológica (DMAAS) es igual al volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo (VMA) menos el volumen anual actual comprendido aguas abajo.

El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo del sitio de interés se determina a partir de aforos o, a falta de ellos se deduce con la suma del volumen de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba mas el volumen medio anual de escurrimiento natural mas el volumen anual de retornos mas el volumen anual de importaciones menos el volumen anual de exportaciones menos el volumen anual de extracción de agua superficial.

El volumen anual de retornos, se determina mediante aforos o estimación de las descargas de los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de una cuenca. Así mismo el volumen anual de importaciones, se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se recibe en la cuenca hidrológica en estudio, de otra u otras cuencas hidrológicas o unidades hidrogeológicas. El volumen anual de exportaciones, se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se transfieren de la cuenca hidrológica en estudio, a otra u otras a las que no drena en forma natural y el volumen anual de extracción de agua superficial se determina sumando los volúmenes anuales asignados y concesionados por la Comisión, mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua para la explotación, uso o aprovechamiento de agua en la cuenca hidrológica, limitaciones que se establezcan en las vedas ysi es el caso, los volúmenes correspondientes a reservas, conservación ecológica y reglamentos conforme a la programación hidráulica.

El volumen anual de evapotranspiración, está considerado de manera implícita, en el volumen medio anual de escurrimiento natural, al restarle a los volúmenes aforados en la estación aguas abajo los volúmenes aforados en la estación aguas arriba.

4.2.4. Balance propuesto.

Para llevar a cabo la cuantificación de la disponibilidad de agua en la cuenca de estudio se propone la siguiente formulación del balance hídrico:

$$\frac{\Delta S_s}{\Delta t} = Entradas - salidas \quad (7)$$

Donde para nuestro caso las entradas estarán representadas por P, y las salidas del sistema será la ETP y el escurrimiento (este debido a que existe una estación hidrométrica a la salida de la cuenca). Así pues nuestro sistema se establece como:

$$P - ETP = R + I/D + \Delta S \quad (8)$$

Una de las variables climáticas del balance hídrico más difícil de estimar es la evaporación la cual es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) a partir de una superficie evaporante. Cerca del 70% del volumen de agua que se precipita en la superficie retorna a la atmósfera por medio de la evaporación (NOM-011-CNA-2000).

4.3. Evapotranspiración.

La evaporación directa a partir del suelo y la transpiración tienen lugar de forma simultánea en la naturaleza, y no es fácil distinguir cuánto vapor de agua es producido por cada uno de los dos procesos. Por ello, se usa el término de evapotranspiración (Liu, *et al.*, 2005; López, *et al.*, 2005) que engloba el proceso de transferencia de agua a la atmósfera tanto por acción de las plantas como por evaporación directa a partir del suelo. El concepto de evapotranspiración potencial fue definido de forma paralela en 1948 tanto por Thornthwaite como por Penman, como la evaporación a partir de una superficie extensa con césped corto que ensombrece totalmente el suelo, y siempre está bien regado con agua. La ETP no puede ser nunca superior a la de superficie libre de agua en las mismas condiciones meteorológicas.

5. Metodología: Disponibilidad de agua.

5.1. Análisis de las base de datos.

Las bases de datos o series de tiempo para este análisis fueron extraídas de la plataforma de datos CLICOM, actualizada al mes de enero de 2012.

5.1.1. Cambio climático en la Cuenca del Río Querétaro.

Se analizaron los datos de temperatura media diaria, máxima y mínima para cada una de las estaciones incluidas en este estudio, se definieron un total de 15 indicadores comúnmente utilizados por el grupo de expertos en la identificación del cambio climático CLIVAR, iniciativa europea para el estudio del cambio climático. Estos parámetros se refieren a los valores extremos de la temperatura diaria (mínimos y máximos).

Algunos de los indicadores utilizados están basados en el uso de umbrales de referencia para aplicaciones particulares. En estos casos los umbrales son los mismos para todas las estaciones analizadas. Para otros indicadores, los umbrales pueden variar de estación en estación y se definen típicamente como percentiles de las series de datos utilizados. El cálculo de estos índices se realizó con el software RClindex, el cual de acceso libre y se encuentra bajo la plataforma del paquete de cómputo R, el cual es un paquete estadístico y gráfico, que consiste en un lenguaje de programación, un entorno de ejecución, un debugger y la habilidad de ejecutar programas guardados en archivos de tipo script, tiene la ventaja además de poder ser ejecutado tanto en ambiente Windows como Unix, ser de carácter gratuito y de código abierto.

Una vez que se determinan los indicadores para cada una de las estaciones, se grafican los resultados en función de la fecha de registro. Se estiman las tendencias por medio de regresión lineal. Para fines de este trabajo, se define tendencia como el movimiento regular y estable en una serie cronológica a través del cual sus valores están, en promedio, incrementándose o disminuyendo. Este tipo de comportamiento puede ser local, en cuyo caso la

naturaleza de la tendencia está sujeta a cambios sobre períodos cortos, o global si los cambios son de larga duración (Campos, 1993).

5.2. Relleno de las series de datos.

En ocasiones las series de tiempo cuentan con algunas interrupciones en los registros de las variables climáticas ya sea en un paso de tiempo diario, semanal, mensual e incluso anual, es por esta razón que es necesario rellenar esos huecos en las series de tiempo para estimar los componentes del balance hídrico de una manera detallada.

5.2.1. Tratamiento de la información.

De manera inicial se seleccionaron las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca en estudio. Sin embargo se realizó una depuración. El primer filtro fue la disponibilidad de los datos, es decir, aquellas estaciones con registros con períodos de por lo menos el 80% del total.

El segundo filtro consistió en revisar que la disponibilidad de datos continuos fuera de al menos 20 años. Así, las estaciones que cumplieron los requisitos fueron 16 en total. Cabe mencionar que los datos faltantes en las estaciones seleccionadas se estimaron al aplicar el método de interpolación “Kriging puntual” y con el método propuesto por Saito y Simunek (2009).

Luego se obtuvieron los estimadores intercepto (ordenada asociada al origen) y la pendiente a través de análisis de regresión lineal usando Excel (Microsoft, 2007) y Statistica (StatSoft, 2000). Se estimaron también los niveles de significancia ($p \leq 0.05$) del intercepto (β_0) y la pendiente de la recta (β_1).

5.2.2. Temperaturas máximas, mínimas y observadas.

Las estaciones meteorológicas consideradas en el presente estudio están dentro o tienen influencia en la Cuenca del Río Querétaro. Al usar la base de datos proporcionada por la

CONAGUA para un periodo de registros desde 1900 hasta el 31 de Enero de 2012, se extrajeron los datos de temperatura máxima, mínima y observada para las estaciones de la cuenca en estudio.

El relleno de datos faltantes en las estaciones de la cuenca en estudio se llevará a cabo con el siguiente método. Cabe señalar que la metodología aplicada para el llenado de datos se basa en el trabajo de Saito y Simunek (2009), quienes proponen una síntesis y comparación de métodos para proponer un ciclo diurno real, cuando se dispone solamente de datos diarios (con información de máximos y mínimos) el cual a continuación se describe:

5.2.3. Método de obtención de residuales.

Consiste en una correlación entre dos o más estaciones cercanas o homogéneas, para datos faltantes mayores a 1 día de intervalo de tiempo, en el caso de que alguna de las estaciones no contará con los datos. Sin embargo, una simple correlación no es conveniente por el comportamiento sinusoidal de la temperatura, además con el método son depurados los efectos locales sobre la temperatura. Para hacer posible la correlación entre ambas estaciones se correlacionaron los residuales de la temperatura, producto del siguiente procedimiento:

1.- Se normaliza la temperatura media diaria con una función tipo sinusoidal de cuatro parámetros (Sigma plot 10), la normalización cubre un ciclo anual, dicho procedimiento se realizará para las estaciones que requieran relleno de datos.

2.- Una vez normalizada la temperatura media diaria para el ciclo anual, se determinan los residuos entre las temperaturas registradas cada día y la temperatura media diaria normalizada. En seguida las diferencias o residuales igualmente serán normalizados los ciclos diarios aplicando también una función sinusoidal de cuatro parámetros para obtener la función que describe el comportamiento medio diario de los residuos.

3.- Finalmente, son calculados los residuos de la diferencia entre la temperatura media diaria normalizada y los residuos normalizados a escala diaria. Estos últimos residuales se utilizaran

para correlacionar ambas estaciones. La correlación obtenida se utilizará para obtener los residuales donde se contaba con datos en una estación y en la otra no. Finalmente a los residuales calculados mediante la correlación se les adiciona las medias ajustadas del ciclo diario y horario correspondientes a su sitio.

5.2.4. Análisis estadístico.

Para la descripción genérica del comportamiento estadístico es necesario conocer algunas medidas de tendencia central como: la media aritmética (9), la desviación estándar (10), la varianza (11) y la curtosis (12), entre otras, de los residuales obtenidos por el método.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_i^n n_i \quad (9)$$

$$S_x = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n} \right)^{0.5} \quad (10)$$

$$S^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n} \right) \quad (11)$$

$$g_2 = \frac{\frac{1}{n} \sum (X_i - \mu)^4 * n_i}{\frac{1}{n} (\sum (X_i - \mu)^2 * n_i)^2} - 3 \quad (12)$$

Donde (g_2) representa el coeficiente de Curtosis, (X_i) los valores, (μ) la media de la muestra y (n_i) la frecuencia de cada valor, (n) número total de datos, (S^2) varianza, (S_x) desviación estándar.

5.2.5. Homogenización de estaciones.

Para obtener la correlación de las estaciones climatológicas presentes en la cuenca se llevó a cabo una homogenización de regiones a partir del método propuesto por Gutiérrez (2004), en el cual se realiza lo siguiente:

- Se obtienen las matrices de correlación [Corr(X,Y,...)] y de covarianzas en porcentaje [Cov(X,Y,...)] (%) para los datos de cada estación climatológica.

- Se calculan los valores propios, el porcentaje de la varianza y se obtiene la gráfica del porcentaje de cada valor propio para la matriz de correlación [Corr(X,Y,...)].

Los valores propios representan la varianza de los elementos sobre el eje correspondiente.

-A continuación se realiza el cálculo de los vectores propios ϕ_i para la matriz de correlación y su respectiva comprobación.

- Empleando la siguiente expresión se obtiene la matriz transformada de datos centrados estandarizados que será utilizada también para el cálculo del círculo de correlaciones.

$$Xi = \frac{X-\mu}{\sigma} \quad (13)$$

- A partir de los datos transformados, se procede a calcular el total de los componentes principales Ω_i .

Ahora también es posible conocer la aportación de cada elemento (estaciones), a la formación de los componentes principales. Es decir, cuál de los elementos contribuye más en la varianza de cada uno de los ejes o componentes principales, además se construye el dendograma obteniéndolo a partir del método del vecino más cercano y con una distancia euclidiana cuadrada.

- Con los gráficos de componentes principales y del dendograma se forman grupos de estaciones homogéneas a partir de los datos de temperatura.

5.2.6. Correlación estadística.

Una vez formados los grupos homogéneos de estaciones, se elabora un mapa de distribución, el cual será comparado con el mapa de climas de la cuenca para verificar que existe una correlación entre los datos de las estaciones que constituyen cada grupo. Luego ya después de verificados los grupos, se aplica una regresión múltiple a los datos de cada uno para obtener modelos específicos para cada estación. El cálculo de las ecuaciones de regresión se lleva a cabo con cualquier programa estadístico que cuente con la herramienta de llevar a cabo regresiones múltiples, en nuestro caso se utilizan los programas estadísticos Statistica versión 9 y el Sistas 12, sólo para comparar resultados entre las regresiones.

De la aplicación de las correlaciones múltiples y a partir de los grupos homogéneos de estaciones se obtiene un residual al que llamaremos estimado, el cual es transformado en dato de temperatura media diaria para los periodos de datos faltante, esto por medio de una simple diferencia entre el valor obtenido de la función sinoidal y el obtenido de la estimación.

5.2.7. Regresión lineal simple

La dependencia de una variable Y de una variable independiente X , se define mediante el análisis de regresión (Snedecor y Cochran, 1984). Un modelo de regresión lineal simple es un modelo con un solo regresor x que tiene una relación con una respuesta y , donde la relación es una línea recta (Montgomery *et al.*, 2007). Este modelo de regresión simple es:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (14)$$

La y se conoce como variable dependiente y la x es conocida como variable independiente (Steel *et al.*, 1997); β_0 es la ordenada al origen y β_1 la pendiente, ambas son constantes desconocidas; ε es un componente aleatorio de error. Se supone que los errores tienen promedio cero y varianza (σ^2) desconocida pero mínima (Montgomery *et al.*, 2007). Además, se supone que los errores no están correlacionados. Esto quiere decir que el valor de un error no depende del valor de otro error (Hair *et al.*, 1999).

A los parámetros β_0 y β_1 se les llama coeficientes de regresión. Éstos tienen una interpretación simple y útil. La pendiente β_1 es el cambio de la media de la distribución de y producido por un cambio unitario en x . Si el intervalo de los datos incluye $x=0$, entonces la ordenada al origen β_0 , es la media de la distribución de la respuesta y cuando $x=0$. Si no incluye al cero, β_0 no tiene interpretación práctica (Montgomery *et al.*, 2007).

5.3. Precipitación.

La precipitación dentro del periodo de estudio en la cuenca fue considerada una precipitación nula para el caso de registros faltantes.

5.4. Evaporación.

La evaporación es quizá la componente más difícil de evaluar del ciclo del agua por lo complejo de sus interacciones entre las componentes del sistema de superficie suelo-vegetación-atmósfera. La evaporación depende del suministro de energía calorífica y del gradiente de presión de vapor, la cual está en función de factores climatológicos como la temperatura del aire, la velocidad del viento, presión atmosférica, la radiación solar, la calidad del agua y la forma y naturaleza de la superficie (Morton, 1968). Para este caso se estimará por los 5 métodos propuesto, aunque se hará la consideración de que: i) se tomará el caso más desfavorable (el que presente una mayor evaporación), ii) el caso favorable (el que esté subestimado) y por último el caso medio (al graficar los 5 métodos).

5.4.1. Método de Thornthwaite.

El método de Thornthwaite (1948) fue desarrollado a partir de datos de precipitación y escorrentía para diversas cuencas de drenaje. El resultado es básicamente una relación empírica entre la ETp y la temperatura del aire. No es necesariamente el método más exacto ni tampoco el que tiene las bases teóricas más profundas. Por el contrario, probablemente esas características corresponden a aquellas que involucran flujo de vapor y balance de calor.

$$ETp = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a \quad (15)$$

$$\text{donde: } I = \sum_1^{12} i \quad (16)$$

$$a = (675 * 10^{-9} I^3) - (771 * 10^{-7} I^2) + (1792 * 10^{-5} I) + 0.49239 \quad (17)$$

$$i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (18)$$

Los cálculos de Thornthwaite están basados en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura media, con una corrección en función de la duración astronómica del día y el número de días del mes. El método es muy empleado en hidrología y en la estimación del balance hídrico para climatología e hidrología de cuencas. También es empleado en los índices y clasificaciones climáticas.

5.4.2. Método de Hargreaves simplificada.

Este método (Hargreaves y Samani, 1985) está diseñado para evaluar la evapotranspiración potencial necesita únicamente para su desarrollo datos de temperaturas y de radiación solar. La expresión es la siguiente:

$$ETp = 0.0023 (t_{med} + 17.78) * R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad (19)$$

A través de la radiación solar extraterrestre (R_0 ó R_a según los autores) la cual se puede leer de tablas en función de la latitud del lugar y del mes se puede evaluar la radiación solar incidente, R_s .

5.4.3. Método de Irmak *et al.*, (2003).

Irmak *et al.* simplifica el método de FAO56-PM expresando una función de regresión multi-lineal que requiere menos parámetros de entrada y cómputo. Este modelo usa sólo la radiación solar, la radiación neta y la temperatura media diaria como los parámetros de la entrada para estimar ET. La expresión es la siguiente:

$$ET = -0.611 + 0.149R_{sn} + 0.079T \quad (20)$$

5.4.4. Método desarrollado por Hamon.

Este método utiliza para su desarrollo datos de temperatura, debido a la poca disponibilidad en las estaciones tradicionales de otras variables climatológicas. Thorntwaite desarrolló un método empírico utilizando datos de temperatura media diaria y número de horas luz promedio. Diversos autores encontraron similitud entre la compleja relación empírica de Thorntwaite y la expresión para estimar la presión de saturación del vapor. De esta manera se obtuvo la expresión propuesta por Hamon (Dingman, 2002).

$$ETp = 29.8 D \frac{e_a(T_{med})}{T_{med}+273.2} \quad (21)$$

y la expresión para el cálculo de la presión de saturación de vapor se propone obtenerla a partir de la siguiente formulación:

$$e_a(T_{med}) = 0.611 \exp \left(\frac{17.3T_{med}}{T_{med}+237.3} \right) \quad (22)$$

5.4.5. Método de Jensen-Haise.

La ecuación de Jensen-Haise es el resultado de la revisión de unas 3000 mediciones de ET hechas en el oeste de los Estados Unidos por un período de 35 años. La ecuación es la siguiente:

$$ET = R_s(0.025T_a + 0.08) \quad (23)$$

5.4.6. Método de Papadakis.

Este método se basa en la consideración del déficit de saturación de vapor ($e^0 - e$). Para éste se requiere los datos de humedad relativa y las temperaturas, y, dado que la primer variable climática no siempre se encuentra disponible en las estaciones meteorológicas, Papadakis (1961) propuso, finalmente la siguiente expresión para poder estimar la evapotranspiración potencial:

$$ETp = 5.625(e^0(t_{max}) - e^0(t_{min} - 2)) \quad (24)$$

La tensión de vapor de saturación e^0 se puede calcular mediante la fórmula de Bossen, en función de la temperatura media (t_{med}) en °C mediante la siguiente expresión:

$$e^0 = 33.8639[(0.00738 * t_{med} + 0.8072)^8 - 0.000019 * (1.8 * t_{med} + 48) + 0.001316] \quad (25)$$

5.5. Caracterización de la red hidrometeorológica.

A partir de una estación patrón se llevará a cabo este paso de la metodología, la finalidad es encontrar la incertidumbre que genera las estaciones meteorológicas al momento de reportar los datos. La estación patrón se encuentra calibrada bajo las normas de la OMM, se colocará por un periodo mínimo de diez días, con este periodo se podrán comparar los datos de temperatura, precipitación (si fuera el caso que en el periodo existiera periodo de lluvia), dirección y velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa. El propósito de esta caracterización es analizar a detalle cada una de las estaciones de la cuenca y así poder estimar o utilizar los datos de estas estaciones con alguna reserva.

6. Resultados y Discusión.

6.1. Análisis del cambio climático en la cuenca del Río Querétaro.

Los resultados obtenidos del uso del paquete RCIndex nos arroja como resultados 25 indicadores en gráficas de temperatura y precipitación. Se mostraran algunos de los resultados de temperatura de las estaciones de la cuenca en estudio.

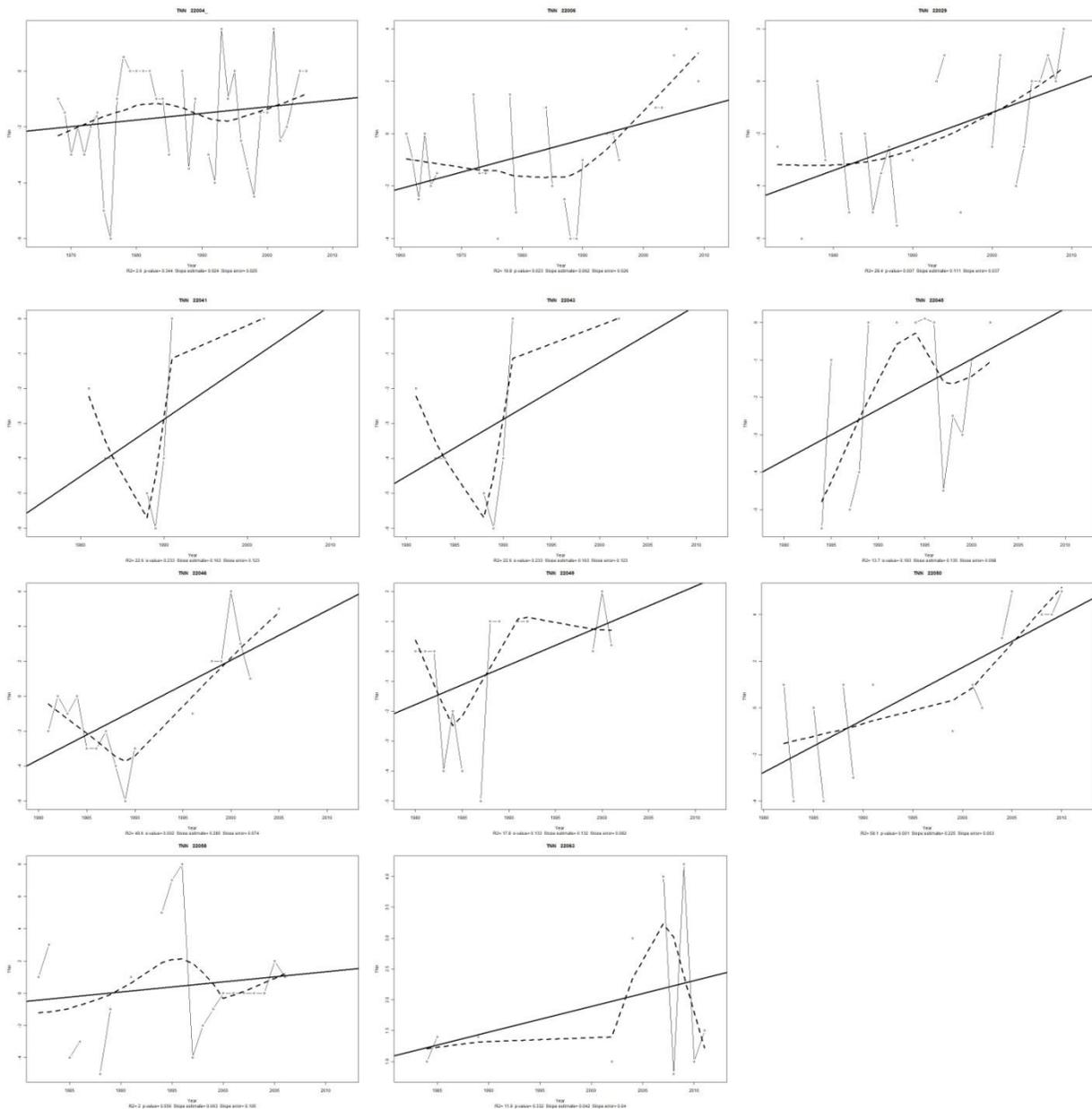


Figura 6.1.- Graficas de valor mensual mínimo de la temperatura mínima diaria Indicador TNN.

6.2. Componentes del balance hídrico.

Complementación de datos faltantes.

-Temperatura del aire.

A continuación se grafican los datos de temperatura observada de cada una de las estaciones climatológicas con el programa de cómputo Sigma plot 10, en este caso para la estación número 22043 denominada Coyotillos, asignándole a cada uno de los días el número juliano que le corresponde. Obteniendo una figura como la número 6.2 en la que se le agregan los límites de confianza al 95%.

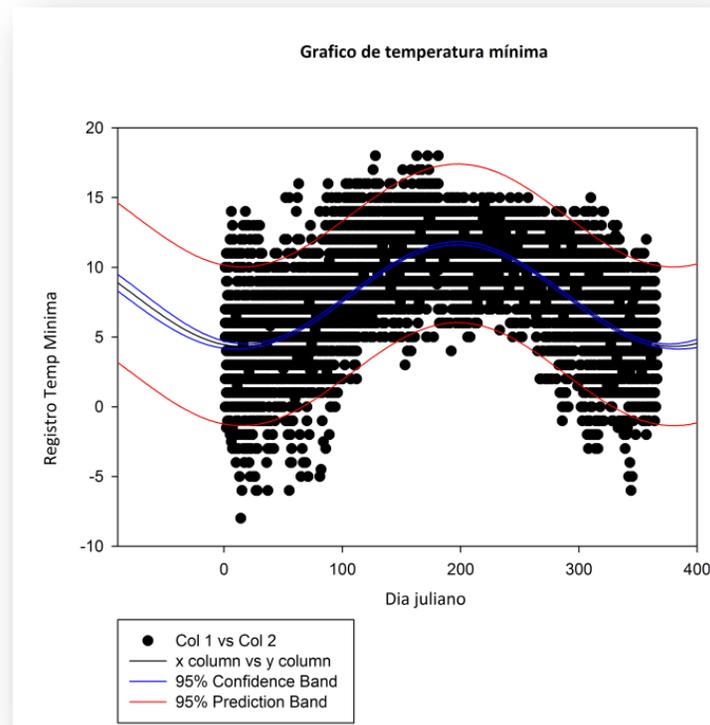


Figura 6.2.- Gráfico de registros de temperatura observada diaria para la estación La Venta.

A partir de la grafica anterior (figura 6.2), con la herramienta Fit curve del Sigma Plot se aplica a los datos una regresión senoidal de 4 parámetros (para obtener los parámetros necesarios para calcular los residuales de temperatura respectivos de cada estación, dichos parámetros se muestran en la figura 6.3, esto se aplica para los datos de temperatura mínima y máxima de cada estación.

Nonlinear Regression

Data Source: Data 1 in Notebook1
 Equation: Waveform, Sine, 4 Parameter in STANDAR
 $\pi=3.14159265358979$
 $f=y_0+a*\sin(2*\pi*x/b+c)$

| R | Rsqr | Adj Rsqr | Standard Error of Estimate | | |
|--------|-------------|------------|----------------------------|---------|----------|
| 0.6724 | 0.4521 | 0.4519 | 2.9012 | | |
| | Coefficient | Std. Error | t | P | VIF |
| a | 3.6928 | 0.0503 | 73.3815 | <0.0001 | 1.2646 |
| b | 365.0000 | 5.1991 | 70.2040 | <0.0001 | 19.7195< |
| c | 4.4534 | 0.0498 | 89.4471 | <0.0001 | 16.8592< |
| y0 | 8.0303 | 0.0600 | 133.9071 | <0.0001 | 3.5895 |

Figura 6.3.- Parámetros de la regresión.

Luego a partir del dato calculado con la regresión se obtienen los residuales de cada registro y se procede a graficarlo contra la fecha del evento obteniendo una gráfica como la que se muestra en la figura 6.4.

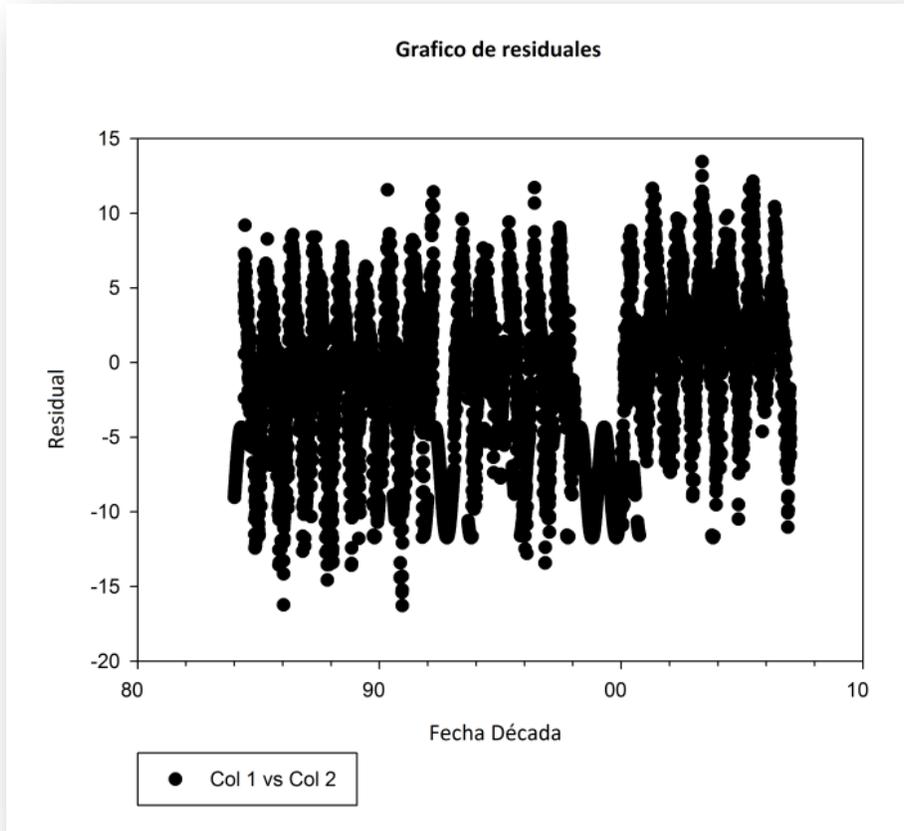


Figura 6.4.- Gráfico de residuales de temperatura observada diaria de la estación La Venta.

-Datos estadísticos.

Los datos estadísticos se muestran en la tabla 6.1, en la cual están calculados la media aritmética, la cual nos indica la forma en que cada variable se distribuye en partes iguales entre cada observación, aunque una de sus limitaciones es que es sensible a valores extremos, la desviación estándar nos proporciona la distancia media que tienen los datos respecto a su media aritmética, la varianza que muestra como los datos se dispersan respecto al cuadrado de la desviación estándar de una variable con respecto a su media aritmética y la curtosis, la que nos proporciona información de cómo los datos de temperatura se comportan, nos da la forma o apuntamiento de las distribuciones, en la tabla 6.1 se muestra un resumen de estos datos estadísticos.

Tabla 6.1.- Datos estadísticos de las observaciones de temperatura.

| | 22004 | 22006 | 22041 | 22043 | 22045 | 22046 | 22049 | 22050 | 22058 | 22063 | 22067 |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media | 11.8 | 14.6 | 13.2 | 12.6 | 11.4 | 13.0 | 12.2 | 11.6 | 14.4 | 18.1 | 11.2 |
| Desviacion | 4.6 | 4.5 | 3.1 | 4.4 | 4.3 | 4.5 | 3.6 | 3.8 | 4.1 | 3.8 | 4.3 |
| Varianza | 21.0 | 20.5 | 9.3 | 19.3 | 18.1 | 20.0 | 12.9 | 14.1 | 16.7 | 14.5 | 18.8 |
| Curtosis | 3.5 | 3.2 | 2.6 | 3.4 | 3.7 | 3.1 | 2.3 | 3.0 | 2.4 | 2.3 | 2.8 |

-Homogenización de estaciones.

Se muestran las graficas de componentes principales (figura 6.5) en la que el propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 11 variables (estaciones) que expliquen la mayor variabilidad en los datos en este caso 3 componentes se han extraído puesto que 3 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1 en conjunto ellos explican el 68.49% de la variabilidad de los datos, obtenidas a partir de los residuales de temperatura y su respectivo dendograma (figura 6.6), el cual indica la forma en que se agrupan las estaciones a partir de datos de temperatura.

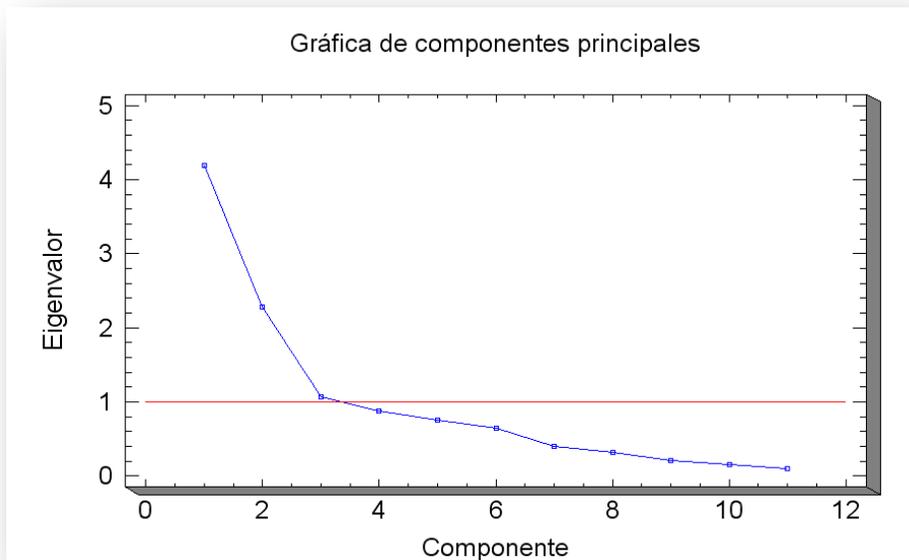


Figura 6.5.- Gráfico de componentes principales de las 11 estaciones climatológicas obtenido a partir de datos de residuales.

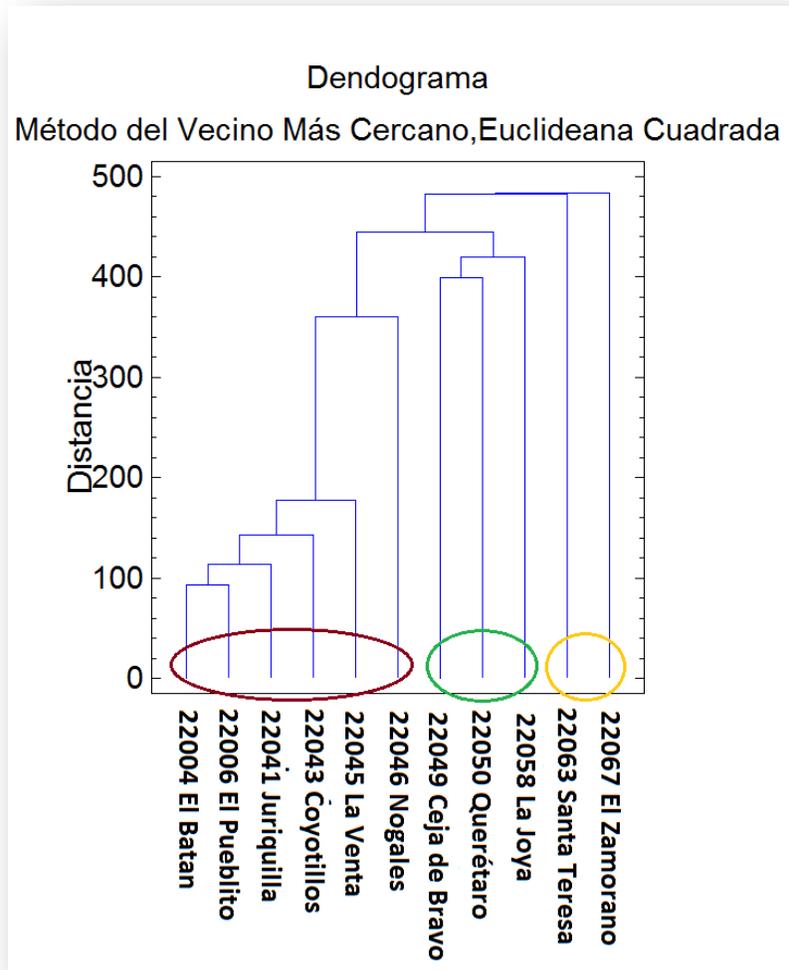


Figura 6.6.- Dendograma de las estaciones climatológicas a partir de datos de residuales.

Los grupos formados a partir de componentes principales y dendograma se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2.- Grupos formados para la aplicación de las regresiones múltiples.

| Grupo | No. Estación | Nombre |
|--------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 22004 | El Batan |
| | 22006 | El Pueblito |
| | 22041 | La Joya |
| | 22043 | Coyotillos |
| | 22045 | Juriquilla |
| | 22046 | Nogales |
| 2 | 22049 | El Zamorano |
| | 22050 | Ceja de Bravo |
| | 22058 | Santa Teresa |
| 3 | 22063 | Querétaro |
| | 22067 | La Venta |

En la figura 6.7 se muestran los tipos de climas presentes en la cuenca del río Querétaro junto con la posición de las estaciones que forman los grupos obtenidos, esto para confirmar que exista una relación entre las estaciones que forman cada grupo.

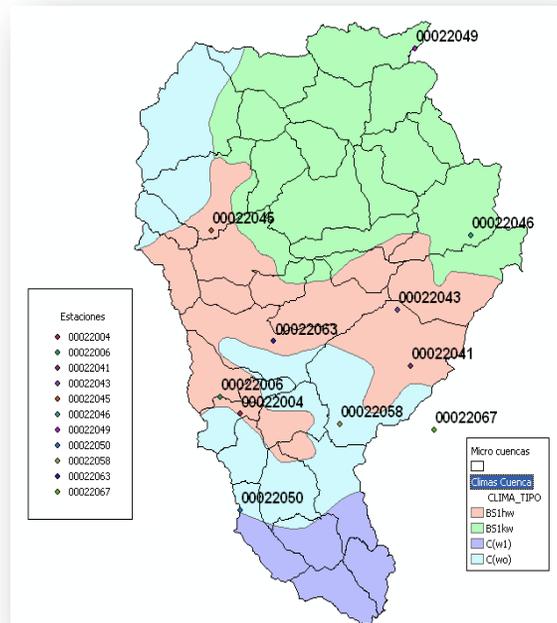


Figura 6.7.- Mapa comparativo de los climas de la cuenca y las estaciones que forman los grupos de estaciones homogéneas.

-Clusters obtenidos a partir de arcgis.

En la siguiente figura (6.8) se muestran los clusters obtenidos a partir del arcgis en base a la posición de cada una de las estaciones climatológicas, de lado izquierdo se muestra los clusters de la coordenada X y del lado derecho los de la Y.

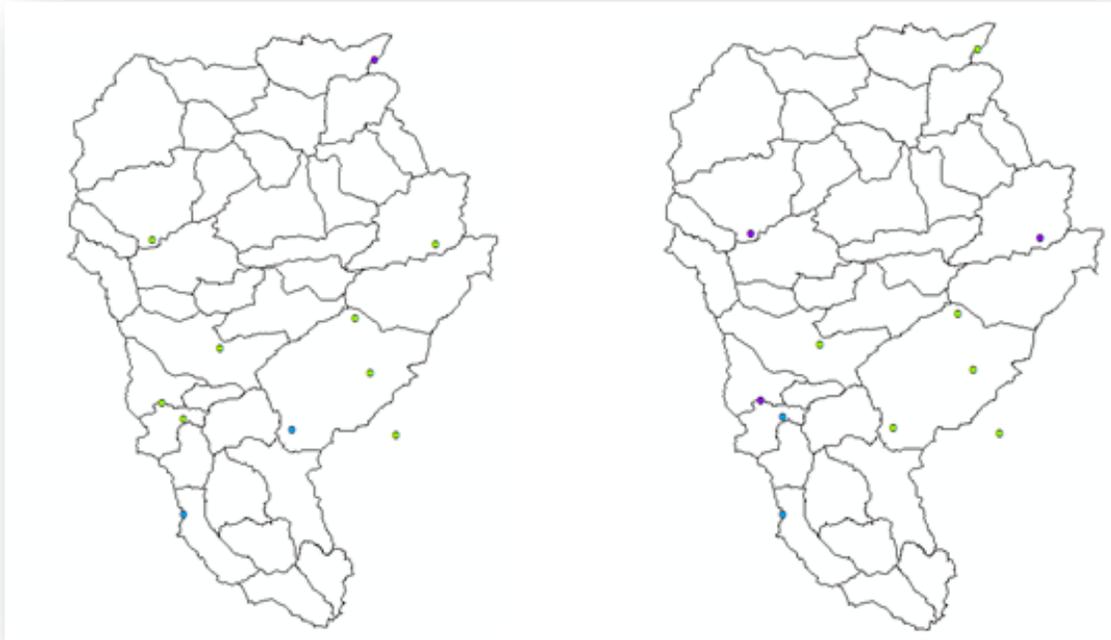


Figura 6.8.- Clusters obtenidos con arcgis 9.3.

-Regresiones múltiples.

A continuación se obtiene una tabla de correlaciones entre las estaciones de la cuenca, esto para ver cuál se encuentra más relacionada entre ellas, una vez obtenida esta tabla de correlaciones se procede a obtener una correlación entre los datos de los residuales, esta correlación es de manera múltiple, obteniendo un datos calculado, en este caso un valor de residual, luego después de obtener este residual se procede a transformarlo a registro de temperatura observada, obteniendo el valor del dato faltante en cierta estación.

Así por ejemplo para la estimación de los datos de la estación número 22045 denominada Coyotillos obtenemos la ecuación de estimación para los datos del año 2002 la cual es la siguiente:

$$T_{est} = 1,64 + 0,25 * T_{batan} + 0,17 * T_{pueblito} + 0,33 * T_{zamorano} + 0,04 * T_{joya} + 0,24 * T_{venta} + 0,43 * T_{nogales} + 0,12 * T_{queretaro} - 0,17 * T_{santa\ teresa} \quad (26)$$

La grafica de residuales para la estación 22043 denominada Coyotillos del año 2002 obtenidos de los datos observados y los obtenidos a partir de la ecuación de estimación (ec. 26) se muestra en la figura 6.9, la cual en el eje de las ordenadas muestra el día juliano correspondiente y en el de las abscisas el valor del respectivo residual.

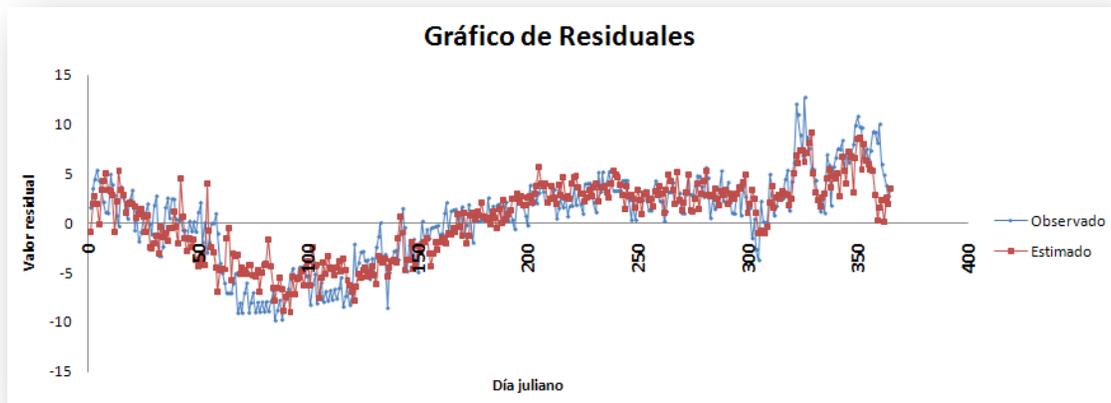


Figura 6.9.- Gráfico comparativo de residuales obtenidos a través de datos observados y de datos estimados de temperatura media diaria para la estación 22043 para el año 2002.

Una vez obtenidos los residuales estimados se procedió a transformarlos a datos de temperatura, la cual la denotamos como temperatura estimada, en la figura 6.10 se muestra un comparativo entre la temperatura observada y la obtenida de los datos de la estación en el eje de las ordenadas se graficó la fecha del dato y en el de las abscisas el valor de temperatura en °C, cabe señalar que los datos corresponden a la estación número 22043 denominada Coyotillos.

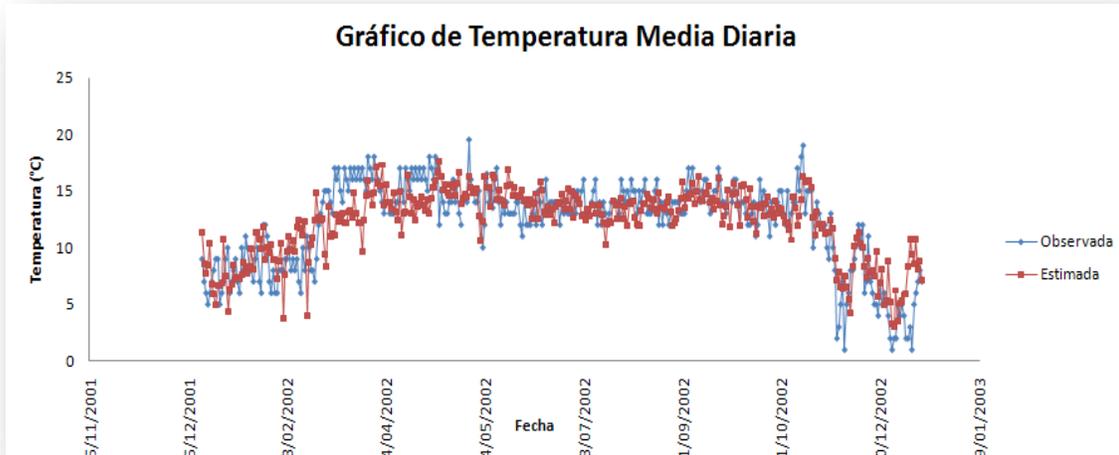


Figura 6.10.- Gráfico comparativo de temperatura obtenidos a través de datos observados y de datos estimados para la estación 22043 para el año 2002.

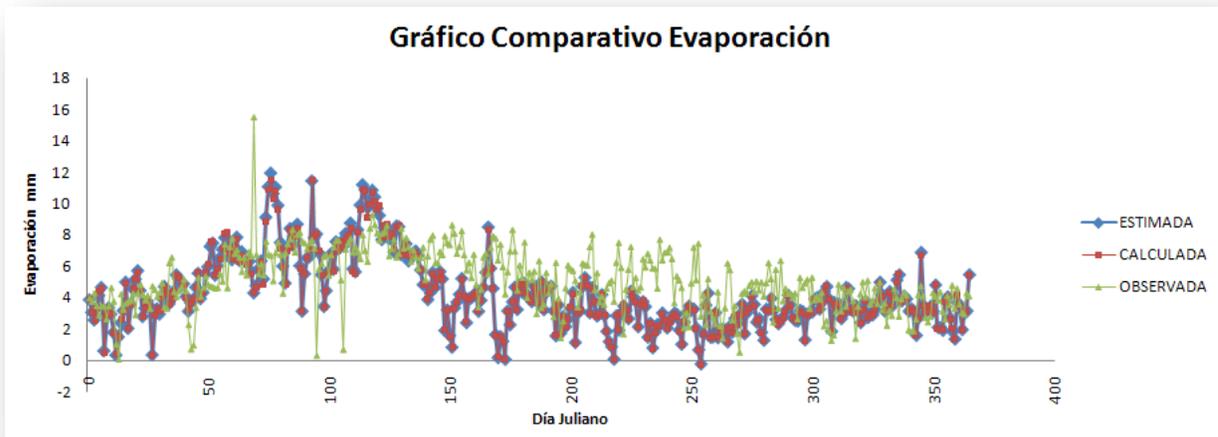


Figura 6.11.- Gráfico comparativo de evaporación obtenida a través de datos observados y de datos estimados de temperatura con el método de Penman- Monteith y los registrados en la estación 22043 para el año 2002.

De igual manera se obtuvieron los datos de temperatura mínima y máxima de los años a los que les faltaba menos del 20% de la información, para cada una de las estaciones que así lo requiriera. Después de obtener los datos de temperatura, se procedió con el cálculo de la evaporación por el método de la FAO Penman-Monteith a partir de los datos estimados y los observados, comparándolos con los registrados en cada estación, en la figura 6.11 se muestra un comparativo entre la evaporación obtenida con datos de temperatura estimados a la que llamamos

estimada, la evaporación obtenida de los datos observados de temperatura a la que llamamos calculada y los datos registrados en la estación número 22043 para el año 2002 a la que llamamos observada, en la cual el eje de las ordenadas muestra el día juliano correspondiente de cada dato y en el de las abscisas el dato de evaporación respectivo en mm.

A continuación se presenta la estación 22006 “El Pueblito”, la cual se presenta rellena con los datos estimados.

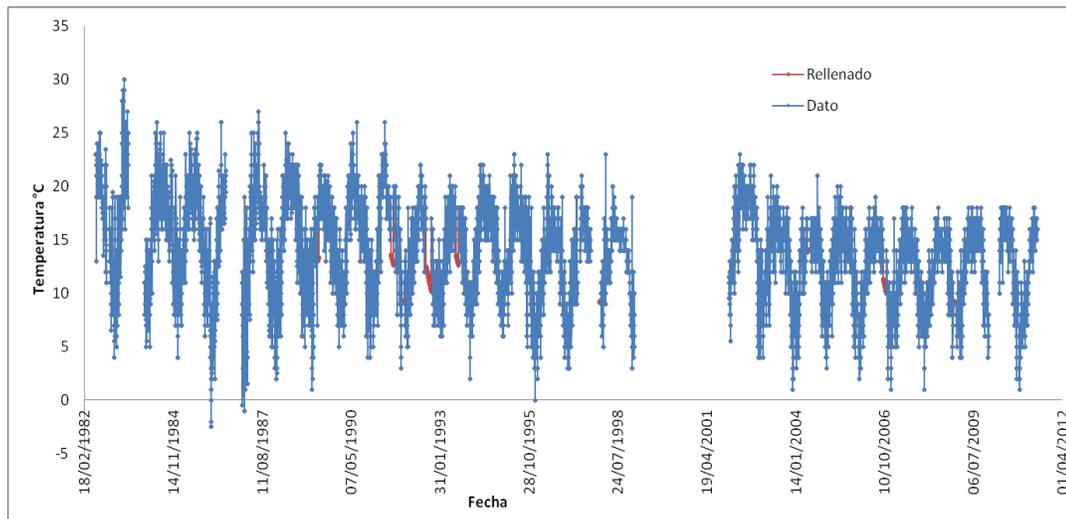


Figura 6.12.- Gráfico de la serie de datos rellena para la estación 22006.

Se presenta en la siguiente gráfica el cálculo de la ETp a través del método de Thornthwaite para la estación 22006 “El Pueblito”, los datos se obtuvieron a partir de los datos sin rellenar y de la serie rellena.

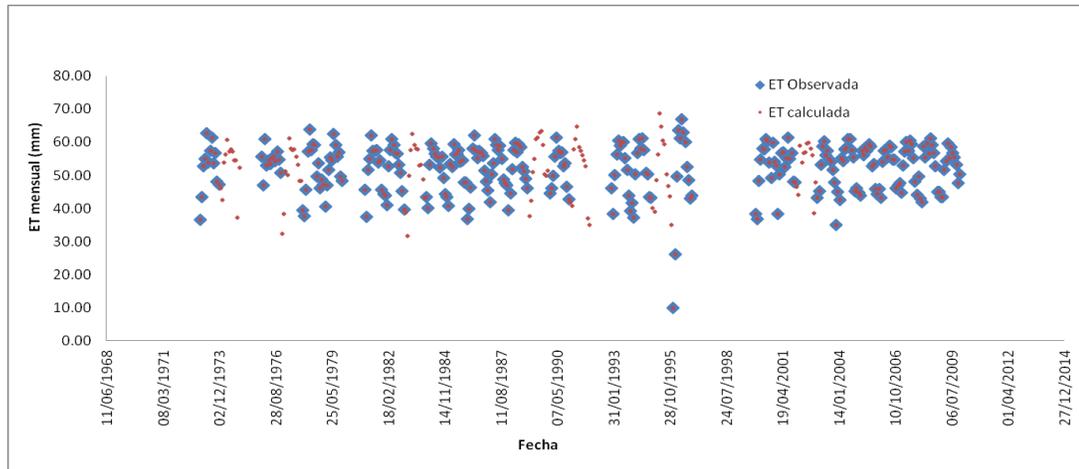


Figura 6.13.- Gráfico comparativo de evaporación obtenida a través de datos observados y de datos estimados de temperatura con el método de Thornthwaite para la estación 22006.

6.3. Disponibilidad de agua en la cuenca del Río Querétaro.

En la siguiente figura (6.14) se presenta el gráfico de P-E obtenido a partir de datos de evaporación estimada al que llamamos balance estimado, el obtenido a través de datos de evaporación calculada lo llamamos balance calculado.

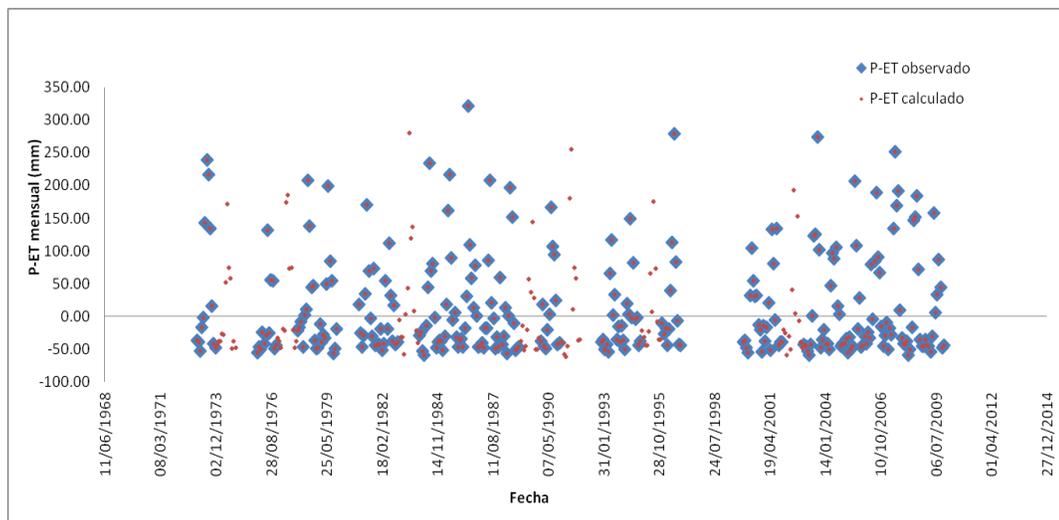


Figura 6.14.- Gráfico de P-ET para la estación 22006.

Con los respectivos valores de evaporación se procedió al cálculo de parte del balance hídrico para esta estación y para el año en estudio. Dando como resultado los siguientes valores:

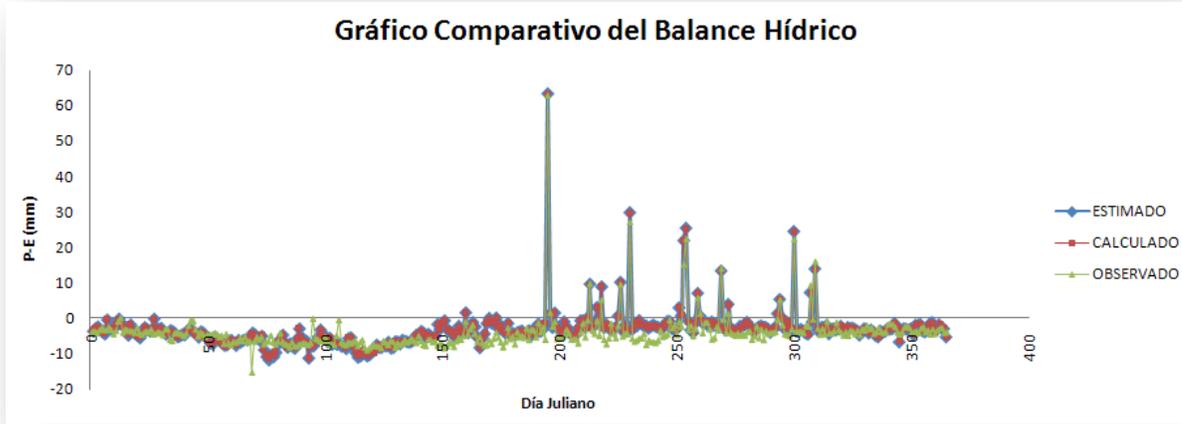


Figura 6.15.- Gráfico comparativo de parte de la ecuación del balance hídrico para la estación 22043 para el año 2002.

En la figura 6.15 se presenta el gráfico de P-E obtenido a partir de datos de evaporación estimada al que llamamos balance estimado, el obtenido a través de datos de evaporación calculada lo llamamos balance calculado, y por último el obtenido de los datos de evaporación observada en la estación 22043 para el año 2002, en el eje de las ordenadas del gráfico se presenta el día juliano correspondiente y en el de las abscisas el valor del balance hídrico.

Así pues los resultados del balance hídrico aplicado a datos diarios nos dan como resultado anual final el siguiente:

| | |
|------------------------|--------------------|
| P-E estimado = | -1209,98 mm |
| P-E calculado = | -1208,58 mm |
| P-E observado = | -1514,35 mm |

6.4. Red hidrometeorológica.

Una vez que se instaló una estación a la que denominamos patrón con los instrumentos de medición debidamente calibrados y después de obtener los datos de las variables climáticas en este caso temperatura, se procedió a comparar los resultados de nuestra estación contra los datos puntuales de la CONAGUA, en los cuales se muestra una notable diferencia en los registros de nuestra estación variando desde 0.5 hasta 2.0 °C en el peor de los casos, lo cual muestra que las estaciones tradicionales de la Comisión tiene deficiencias en el tipo de instrumentos que tienen operando en estos lugares. Las 5 figuras siguientes muestran un comparativo entre los datos de la estación patrón a cada 5 minutos contra los de las estaciones tradicionales de la Conagua.

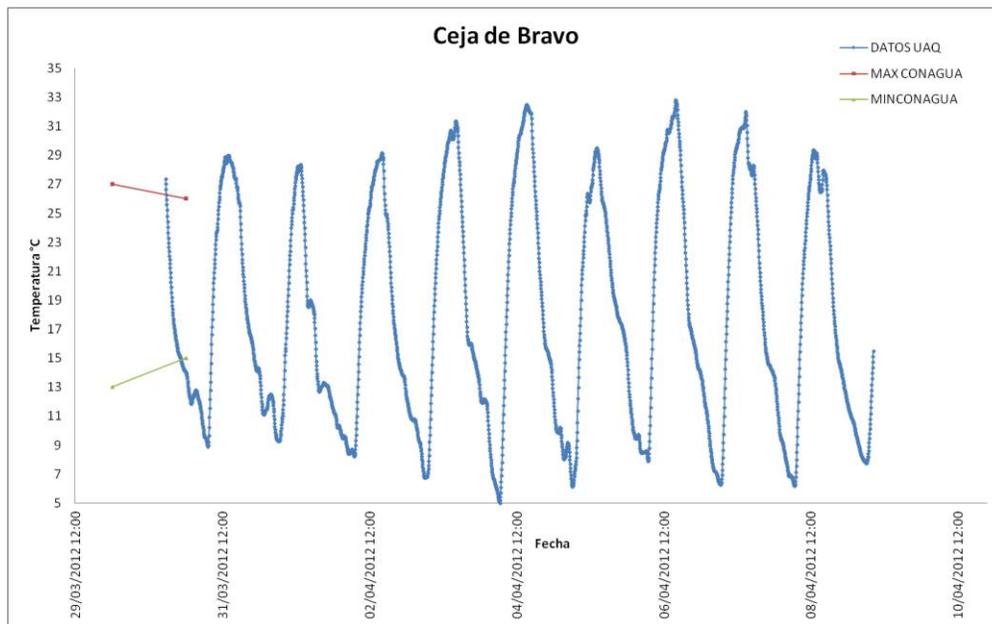


Figura 6.16.- Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación Ceja de Bravo.

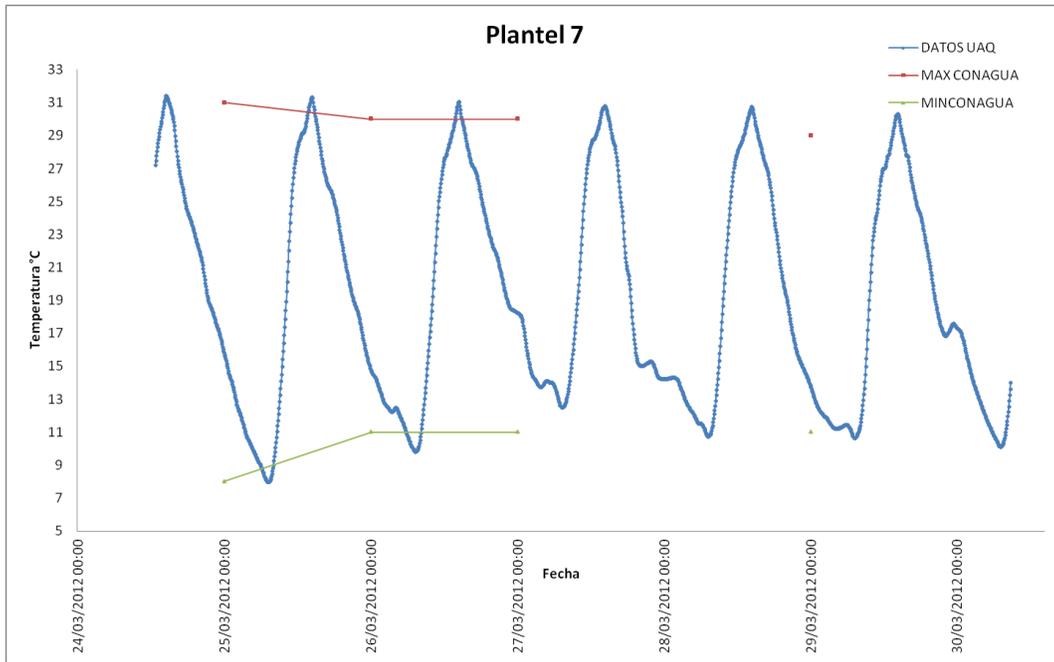


Figura 6.17.- Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación Plantel 7.

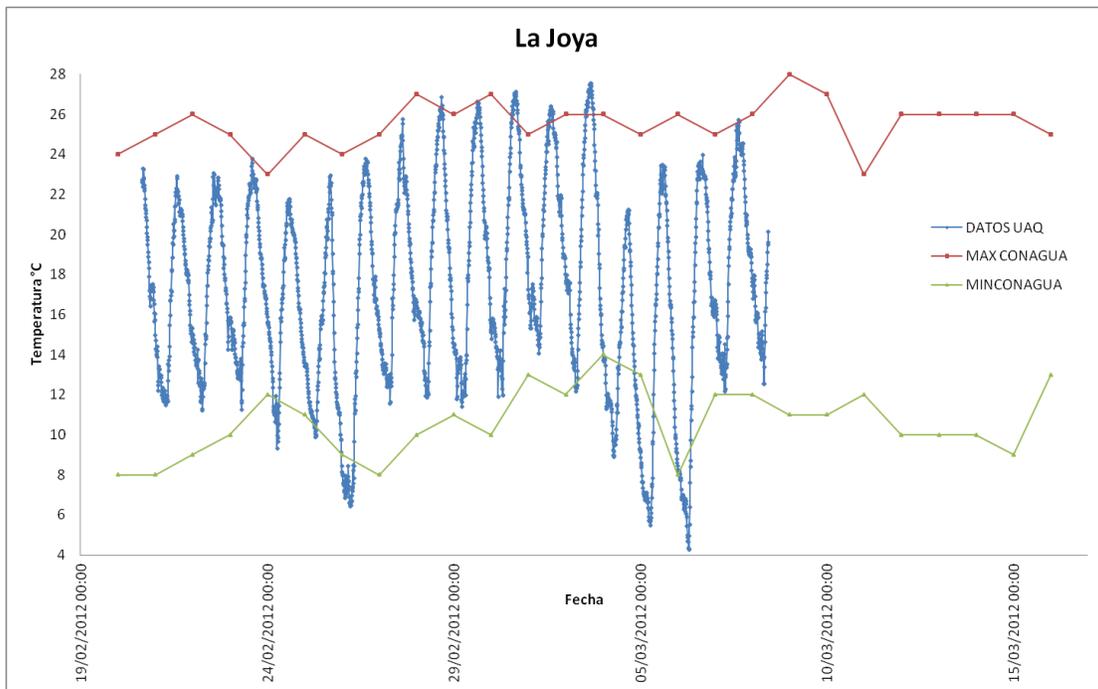


Figura 6.18.- Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación La Joya.

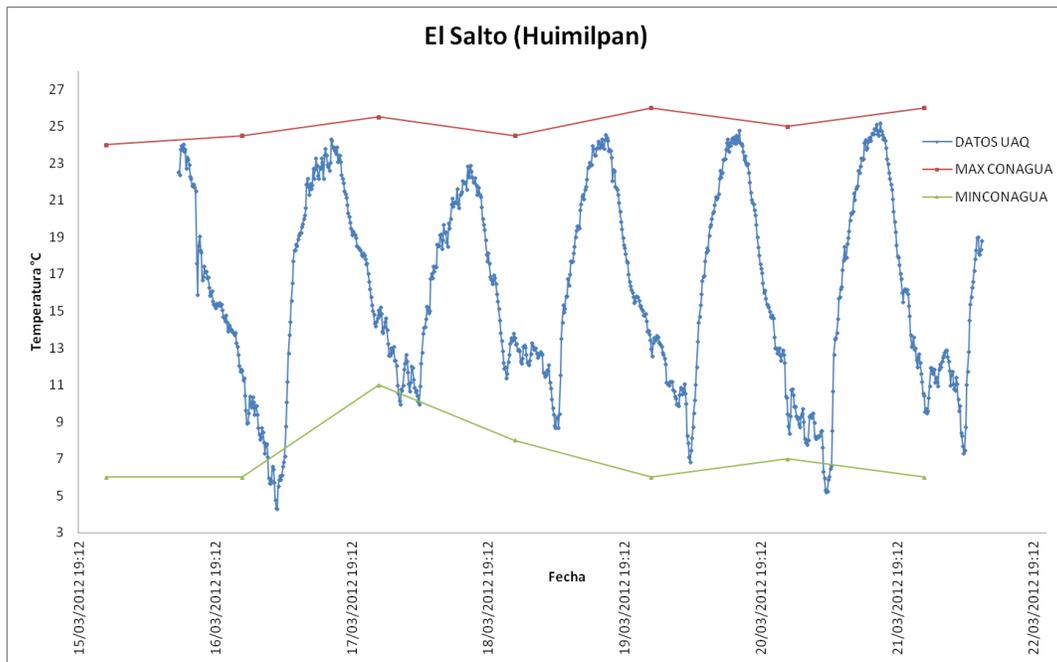


Figura 6.19.- Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación El Salto (Huimilpan).

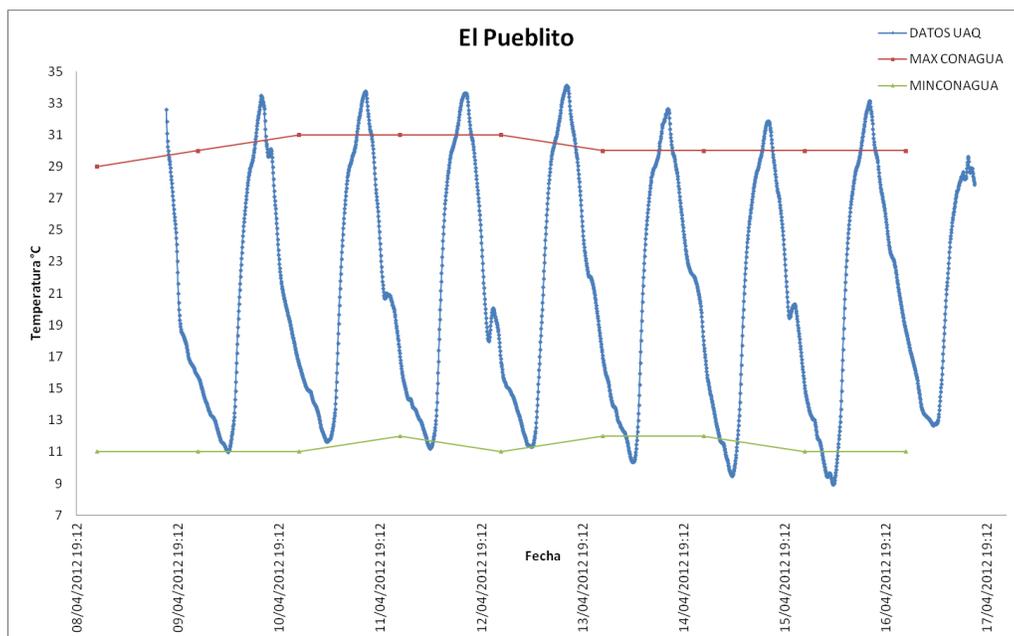


Figura 6.20.- Gráfico comparativo de los registros de temperatura de la CONAGUA con los de la estación patrón, estación El Pueblito.

7. Conclusiones y Recomendaciones.

Mediante este método de reconstitución de datos faltantes, diarios de temperatura mínima, máxima y observada nos permite reducir la incertidumbre en la evaporación y en consecuencia en la disponibilidad del agua a partir del balance hídrico interanual. Algunas conclusiones preliminares, es que el método propuesto proporciona datos estimados con una tendencia similar a la de los observados en las estaciones climatológicas, la formación de grupos homogéneos de estaciones presentan una similar tendencia de los datos obtenidos.

Podemos concluir que en general se presenta un déficit en la disponibilidad de agua en la cuenca del río Querétaro, para el año 2002 lo que nos indica que la estimación de la evaporación por el método de la FAO Penman-Monteith presenta una buena incertidumbre en los datos obtenidos.

Para enfrentar la problemática relacionada con el recurso agua, se requiere urgentemente un plan integral, realista y coordinado, en un marco interinstitucional, metropolitano y de largo plazo, que aborde, como algunas de sus prioridades: al abastecimiento, el uso y el tratamiento del agua en toda la ciudad; la conservación y rehabilitación de las zonas de recarga y los cuerpos de agua; y el control de inundaciones. Para ello, sería indispensable constituir un organismo metropolitano que analice y proponga alternativas, considerando los intereses y derechos de los diferentes usuarios e involucre desde luego a representantes directos de todos los municipios conurbados (ya que actualmente, sólo el municipio de Querétaro representa a todos los del estado). Con los resultados de este trabajo se puede concluir que es importante analizar los datos climáticos necesarios para desarrollar métodos para el cálculo de los componentes del balance hídrico, ya que si los aparatos en las estaciones meteorológicas no se encuentran ubicados de forma correcta, podrían registrar información equivocada que nos da como resultado balances hídricos erróneos.

El cálculo de un balance hídrico es complicado, ya que depende de la disponibilidad de datos y además del método de cálculo de sus componentes, en este estudio se llevo a cabo el cálculo de la evapotranspiración por medio del método de la FAO Penman-Monteith aplicándolo

para datos diarios de temperatura y para datos medios mensuales, el cálculo del volumen de la precipitación se llevo a cabo tomando los datos de cada evento registrado durante un año y a partir de la precipitación media anual para la cuenca en estudio.

Con estos resultados se concluye que para un balance más preciso se debe elaborar a partir de eventos diarios, ya que nos da una aproximación del agua disponible en la cuenca, además se puede concluir que el año de estudio (2002) fue un año relativamente seco, ya que en ambos métodos la cuenca presentaba un déficit de agua en la mayoría de las microcuencas en que se realizó el cálculo.

LITERATURA CITADA

- Allen R.G., Pereira L.S y Raes D., 1998. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop wáter requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm#Contents>.
- Berkhout F., Hertin J., Jordan A., 2002. Socio-economic futures in climate change impact assessment: using scenarios as ‘learning machines’. *Global Environmental Change*, Vol 12, pp 83-95.
- Campos-Aranda Daniel F., 1993. Análisis espectral: Bases teóricas y aplicaciones. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado (CIEP), Facultad de Ingeniería de la UASLP.
- Campos-Aranda Daniel F., 2011. Transferencia de información de crecientes mediante regresión lineal múltiple. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol II, Núm. 3, pp 239-247.
- Díaz-Padilla G., Sánchez-Cohen I., Quiroz R., Garatuza-Payán J., Watts-Thorp C., Cruz-Medina I.R., Guajardo-Panes R.A., 2011. Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol II, Núm. 4, pp 51-64.
- Easterling D.R., Evans J.L., Groisman P.Ya., Karl T.R., Kunkel K.E., Ambenje P., 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol 81, pp 417-425.
- García Quintero A. 1943. Recursos Hidráulicos de la Republica Mexicana. Irrigación en México. Septiembre-October.
- García-Ortiz E., 2006. Efecto de la estructura de la copa en la partición de lluvia de tres especies arbustivas en clima semiárido. Tesis doctoral inédita. Universidad de Almería, pp 404.
- Golubev Valentin S., Lawrimore Jay H., Groisman Pavel Y., Speranskaya Nina A., Zhuravin Sergey A., Menne Matthew J., Peterson Thomas C., Malone Rober W., 2001. *Geophysical Research Letters*, Vol 28, pp 1-4.
- González-Sosa E, Mastachi-Loza C.A., Rivera-Vázquez J.B., Gutiérrez-López A., Lafragua J., Guevara-Escobar A., 2010. La evaporación en la cuenca del lago de Pátzcuaro, México. *Tecnología y ciencias del agua*, Vol I, num 3, pp 51-69.
- Gosling Simon N., Arnell Nigel W., 2011. Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation, and sensitivity analysis. *Hydrological Process*, Vol 25, pp 1129–1145.
- Goudie A., 1987. Change and instability in the desert environment. In *Horizons in Physical Geography*, pp 250-256 (M.J. Clark *et al.*, eds).

- Guerra-Cobián V.H., M. Bâ K., Quentin-Joret E., Díaz-Delgado C., A. Cârsteanu A., 2011. Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol II, Núm. 3, pp 35-48.
- Gutierrez-Jurado H.A., Vivoni E.R., Harrison J.B.J., Guan H., 2006. Ecohydrology of root zone water fluxes and soil development in complex semiarid rangelands. *Hydrological Processes*, Vol 20, pp 3289-3316.
- Gutiérrez-López A., Thierry Lebel, Luc Descroix, 2004. "Reflexiones sobre el concepto de cuencas hidrológicamente homogéneas". XXI Congreso latinoamericano de hidráulica Sao Pedro, estado de Sao Paulo, Brasil, octubre 2004.
- Hlavinka P., Trnka M., Balek J., Semerádová D., Hayes M., Svoboda M., Eitzinger J., Mozy M., Fischer M., Hunt E., Zalud, Z., 2011. Development and evaluation of the soilclim model for water balance and soil climate estimates. *Agricultural Water Management*, article in press.
- Huang Mingbin, Shao Mingan, Li Yushan, 2001. Comparison of a modified statistical-dynamic water balance model with the numerical model WAVES and field measurements. *Agricultural Water Management*, Vol 48, pp 21-35.
- Khan Mohammad S., Coulibaly Paulin, Dibike Yonas, 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods using Canadian Global Climate Model predictors. *Hydrological Process*, Vol 20, pp 3085–3104.
- Lettenmaier Dennis P., Famiglietti James S., Water from on high. *Nature*, Vol 444, pp 562-563.
- Magaña R. Víctor O., 2004. El cambio climático global: comprender el problema, In: *Cambio climático: una visión desde México*, Instituto Nacional de Ecología, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, ISBN 968–817–704–0, México, 525 p.
- Magaña V., Amador J., Medina S., 1999. The midsummer droughts over Mexico and Central America. *Journal of Climate*, Vol 12, pp 1577-1588.
- Matthews Damon, 2006. The wáter cycle freshens up. *Nature*, Vol 439, pp 793-794.
- McMillan Hilary, Freer Jim, Pappenberger Florian, Krueger T., Clark M., 2010. Impacts of uncertain river flow data on rainfall-runoff model calibration and discharge predictions. *Hydrological Process*, Vol 24, pp 1270–1284.
- Mendoza B., Jáuregui E., Velasco V., García-Acosta V., 2005. Possible solar signals in historical droughts in central and southeastern México. 9th International Cosmic Ray Conference Pune, Vol 2, pp 369-372.
- Metcalf S.E., 1978. Historical data and climate change in Mexico: A review. *The Geographical Journal* 153, no.2. pp 211-222.

- Milly P.C.D., Dunne K.A., Vecchia A.V., 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, Vol 438, pp 347-350.
- Mosiño P., García E., 1966. The midsummer drought in Mexico. *Proc. Regional Latin Conf. VO. 3. International Geophysical Union*, pp 500-516.
- Najafi M. R., Moradkhani H., Jung I. W., 2011. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrological Process*, Vol 25, pp 2814–2826.
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua.
- Oki Taikan, Kanae S., 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, Vol 313, pp 1068-1072.
- Ramos Salinas N.M., González Sosa E., 2012. Génesis de 200 años inundaciones en Querétaro. *Catástrofes y riesgos en el patrimonio cultural. Parte I*.
- Saito H. y Simunek, J., 2009. Effects of meteorological models on the solution of the surface energy balance and soil temperature variations in bare soils. *Journal of Hydrology*, Vol 373 (3-4), pp 545-561.
- Salas J.D., 2000. Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería del Agua*, Vol 7, pp 409-429.
- Saldaña-Fabela M. del Pilar, Díaz-Pardo E., Gutiérrez-Hernández A., 2011. Diagnóstico de la calidad del agua en un sistema de embalses en cascada, cuenca del Río San Juan, Querétaro, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol II, Núm. 3, pp 115-126.
- Slatyer R.O. y Mabbutt J.A., 1964. Hydrology of arid and semiarid regions. In: *Handbook of Applied Hydrology* (edited by V. T. Chow) McGraw Hill Co.
- Stenseth N.C., Mysterud A., Ottersen G., Hurrell J.W., Chan Kung-Sik, Lima M., 2002. Ecological Effects of climate fluctuations. *Science*, Vol 297, pp 1292-1296.
- Tarango-Arámbula L., 2005. Problemática y Alternativas de Desarrollo de las Zonas Áridas y Semiáridas de México. *Revista Chapingo, Serie Zonas Áridas. Vol. 4:2*.
- Teegavarapu Ramesh S.V., 2010. Modeling climate change uncertainties in water resources management models. *Environmental Modelling&Software*, Vol 25, pp 1261-1265.
- Vilchis-Mata I., Quentin E., M. Bâ K., Díaz-Delgado C., 2011. Estimación de precipitación diaria a través de un SIG con imágenes de radar meteorológico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol II, Núm. 4, pp 167-174.
- Worden John, Noone David, Bowman Kevin, The tropospheric emission spectrometer science team and data contributors, 2007. Importance of rain evaporation and continental convection in the tropical water cycle. *Nature*, Vol 445, pp 528-532.

Wu Yuanzhi, Huang M., Gallichand J., 2011. Transpirational response to water availability for winter wheat as affected by soil textures. *Agricultural Water Management*, Vol 98, pp 569-576.

Acrónimos

| | |
|---------|--|
| CQRN | Centro Queretano de Recursos Naturales |
| CEA | Comisión Estatal de Aguas |
| CONAGUA | Comisión Nacional del Agua (CNA) |
| ZMQ | Zona Metropolitana de Querétaro |
| INEGI | Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática |
| FAO | Food and Agriculture Organization |
| SMN | Servicio Meteorológico Nacional |
| CFE | Comisión Federal de Electricidad |
| DOF | Diario Oficial de la Federación |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| UAQ | Universidad Autónoma de Querétaro |
| OMM | Organización Meteorológica Mundial |
| CONABIO | Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad |

ANEXOS

Tabla A.1.- Descripción de los indicadores del paquete RCLindex, para la cuenca del Río Querétaro.

| Nombre | Clave | Indicador | Unidad |
|--|----------|--|--------|
| Max Tmax | TXx | Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria | °C |
| Max Tmin | TNx | Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria | °C |
| Min Tmax | TXn | Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria | °C |
| Min Tmin | TNn | Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria | °C |
| Noches frías | TN10P | Porcentaje de días cuando TN<10th percentil | Días |
| Días fríos | TX10P | Porcentaje de días cuando TX<10th percentil | Días |
| Noches calientes | TN90P | Porcentaje de días cuando TN>90th percentil | Días |
| Días calientes | TX90P | Porcentaje de días cuando TX>90th percentil | Días |
| Duración de periodos calientes | WSDI | Número de días por año en que TX>90th percentil (mínimo 6 días consecutivos) | Días |
| Duración de periodos fríos | CSDI | Número de días por año en que TX<10th percentil (mínimo 6 días consecutivos) | Días |
| Rango diurno de temperatura | DTR | Diferencia media mensual entre TX y TN | °C |
| Días de heladas | FDO | Número de días en un año cuando TN (Mínimo diario)<0°C | Días |
| Días de verano | SU25 | Número de días en un año cuando TX (Máximo diario)>25°C | Días |
| Días de hielo | IDO | Número de días en un año cuando TX (Máximo diario)<0°C | Días |
| Noches tropicales | TR20 | Número de días en un año cuando TN (Mínimo diario)>20°C | Días |
| Precipitación máxima/día | RX1day | Máximo mensual de precipitación en 1 día | mm |
| Precipitación máxima en 5 días | RX5day | Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos | mm |
| Índice simple de intensidad diaria | SDII | Precipitación anual total dividida por el número de días húmedos/año (definidos por P>=1.0 mm) | mm/día |
| Número de días con precipitación intensa | R10mm | Número de días en un año en que P>=10 mm | Días |
| Número de días con precipitación muy intensa | R20mm | Número de días en un año en que P>=20 mm | Días |
| Días secos consecutivos | CDD | Número máximo de días consecutivos con RR>1 mm | Días |
| Días húmedos consecutivos | CWD | Número máximo de días consecutivos con RR>=1 mm | Días |
| Días muy húmedos | R95p | Precipitación anual total en que RR>95 percentil | mm |
| Días muy secos | R99p | Precipitación anual total en que RR>99 percentil | mm |
| Precipitación total en días húmedos/año | PRCPTOT | Precipitación anual total en los días húmedos (RR>=1 mm) | mm |
| Media de temperatura mínima | TMINmean | Temperatura mínima media | °C |
| Media de temperatura máxima | TMAXmean | Temperatura máxima media | °C |
| Número de días con precipitación torrencial | R25mm | Número de días en un año en que P>=25 mm | Días |

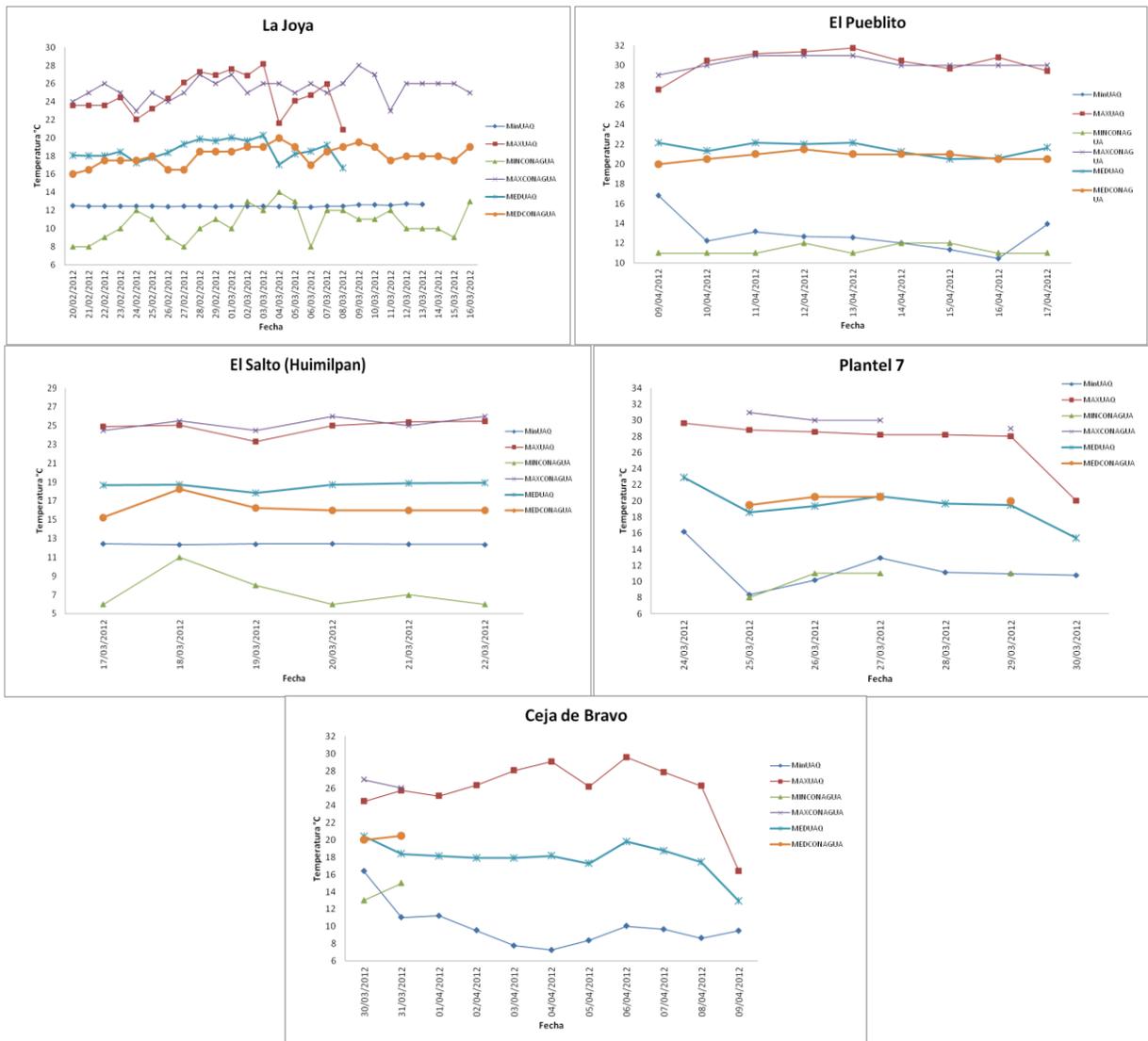


Figura A.1.- Comparativo de las estaciones de Conagua y las de la estación patrón para las temperaturas máximas y mínimas diarias.

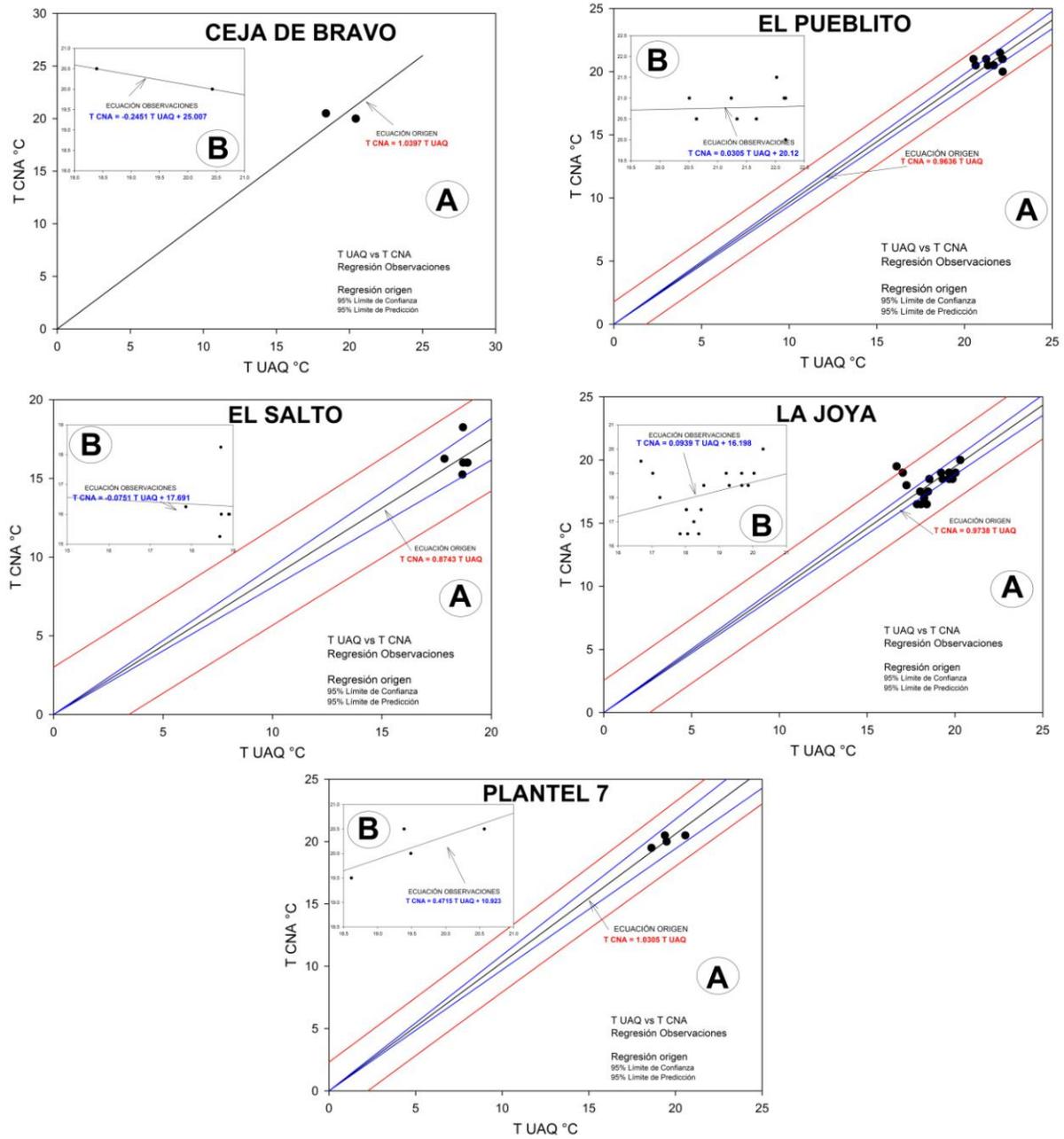


Figura A.2.- Comparativo entre las regresiones de los datos de temperatura media una a partir del origen y la otra a partir de los datos de la estación de Conagua.

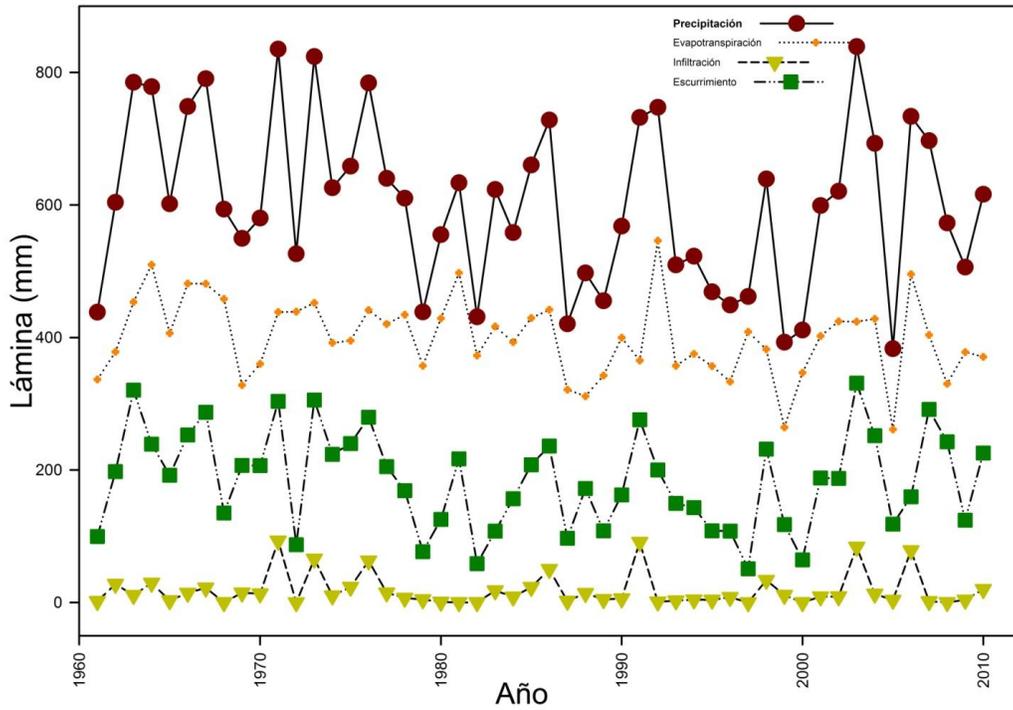


Figura A.3.- Gráfico que muestra los componentes del balance hídrico para un periodo de 1961-2012.

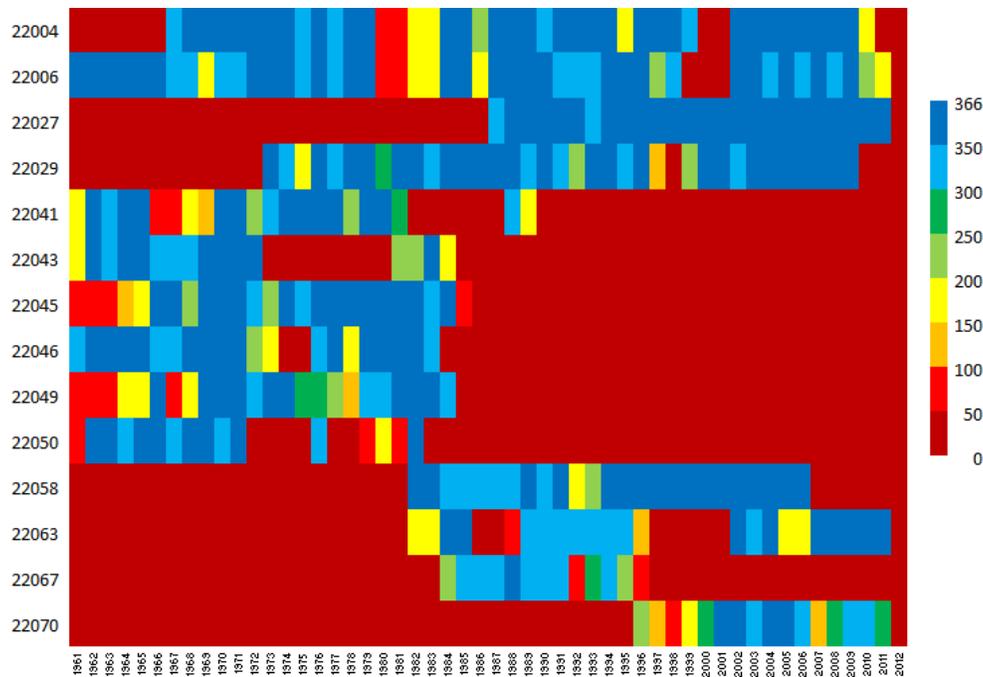


Figura A.4.- Visualización de los datos de temperatura observada diarios de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro.

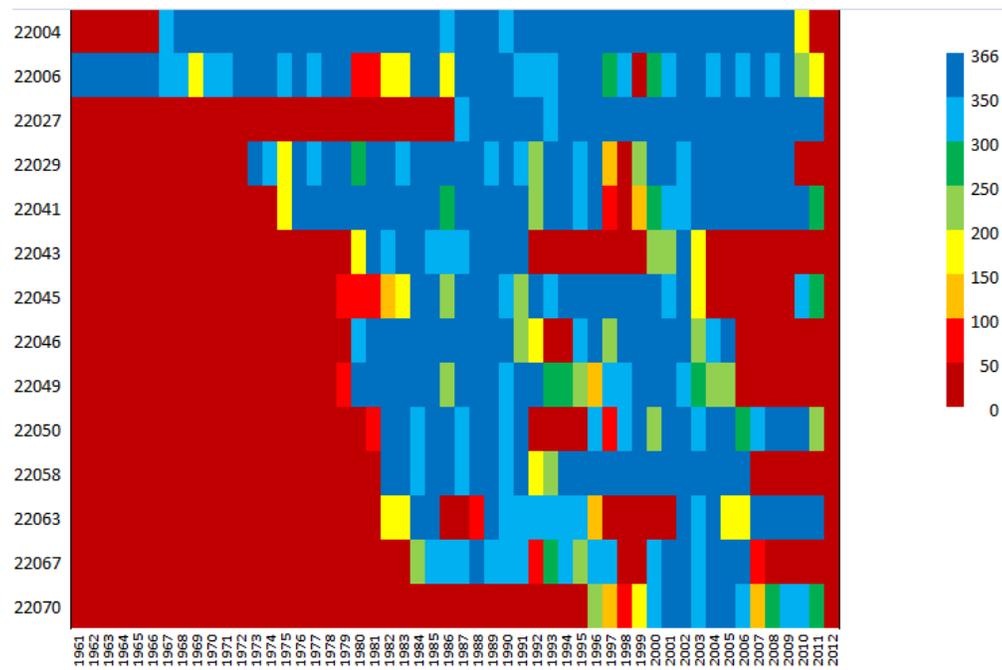


Figura A.5.- Visualización de los datos de temperatura mínima diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro.

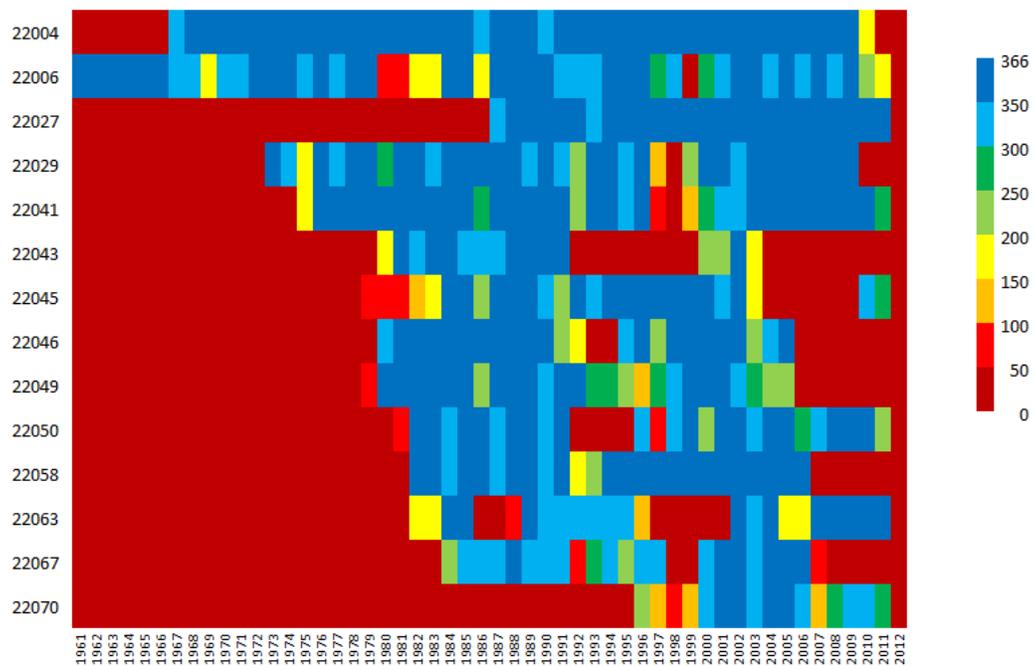


Figura A.6.- Visualización de los datos de temperatura máxima diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro.

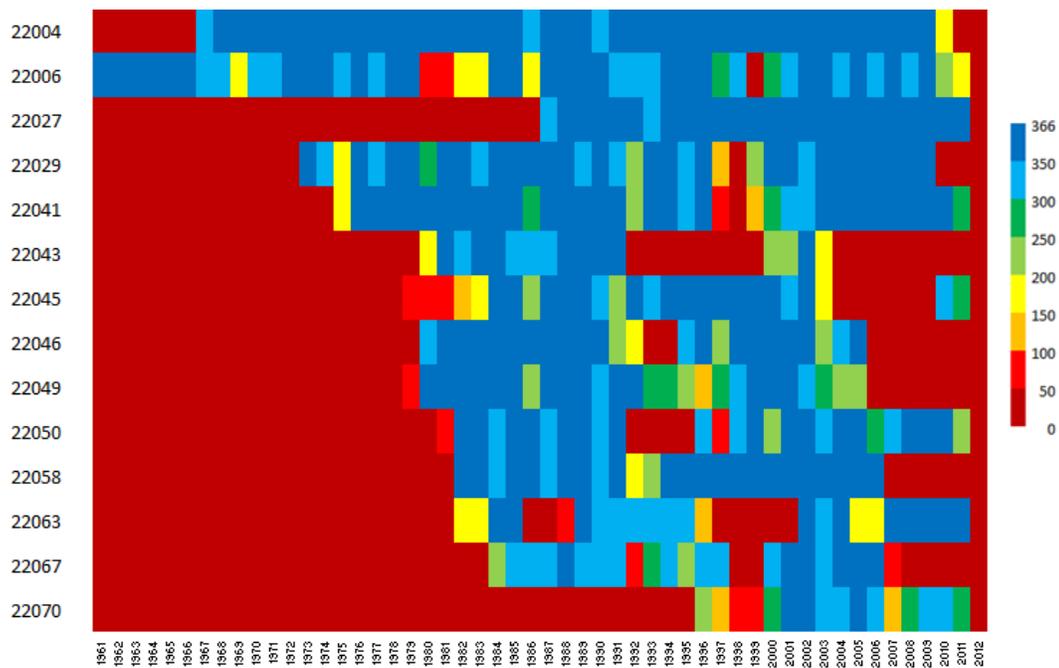


Figura A.7.- Visualización de los datos de temperatura media diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro.

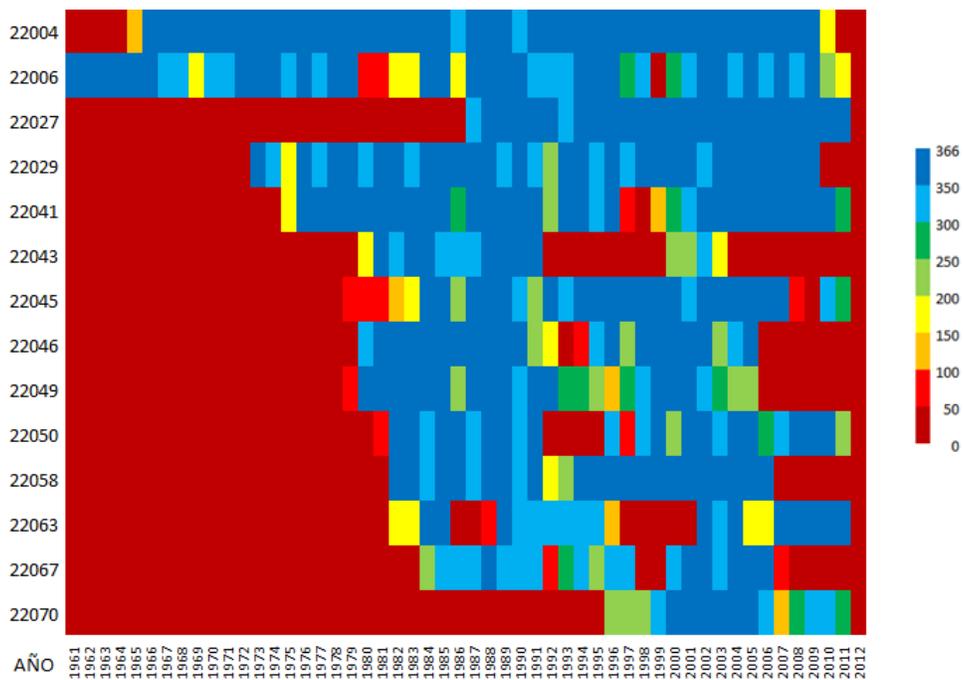
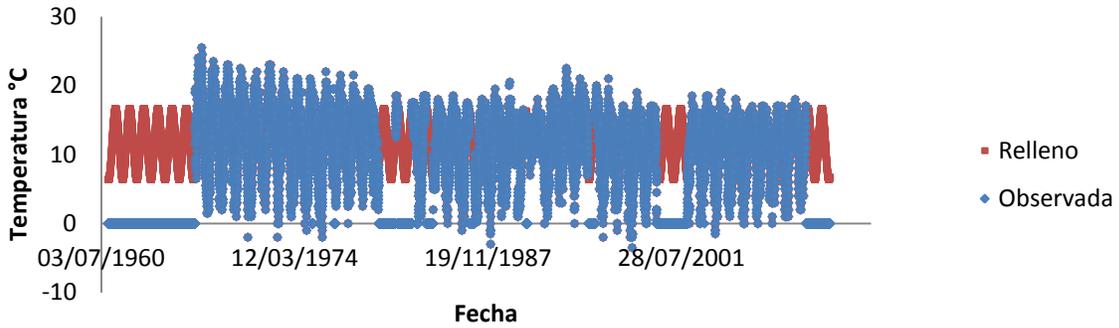
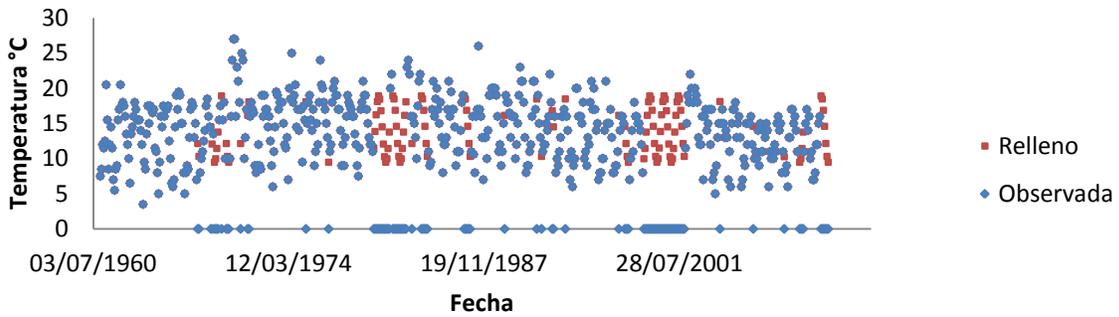


Figura A.8.- Visualización de los datos de precipitación diaria de las estaciones de la cuenca del Río Querétaro.

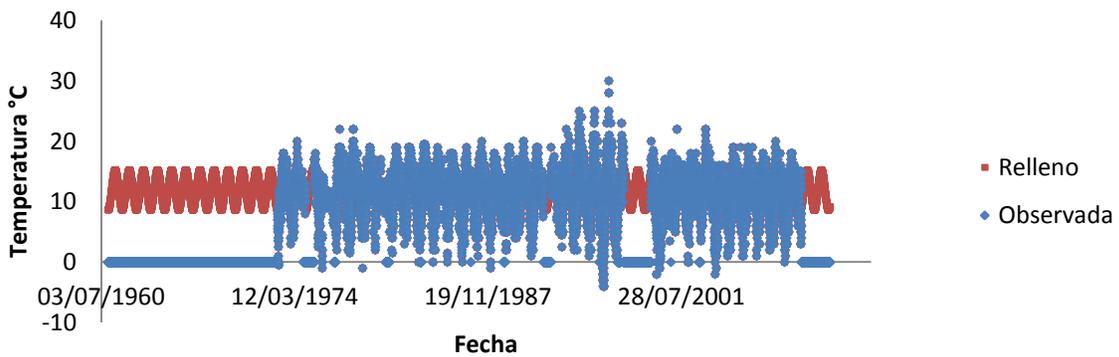
Temperatura Observada vs Relleno 22004



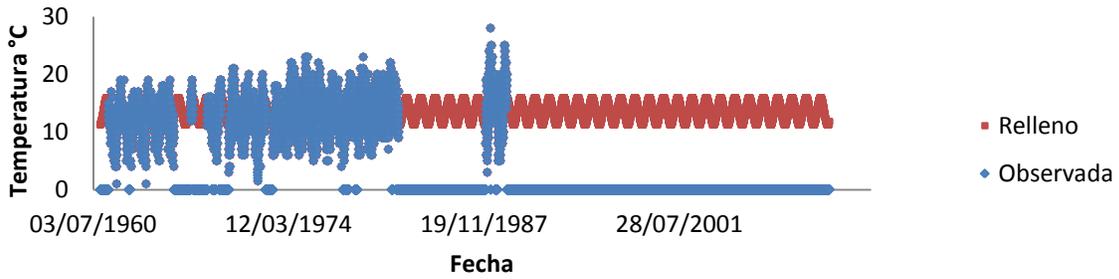
Temperatura Observada vs Relleno 22006



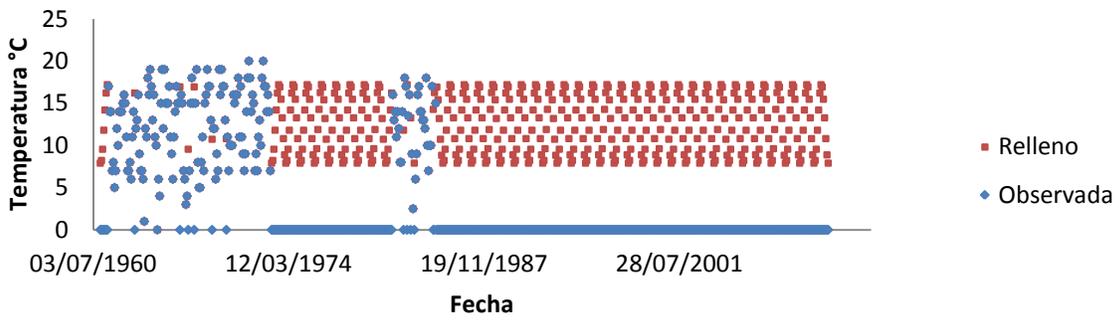
Temperatura Observada vs Relleno 22029



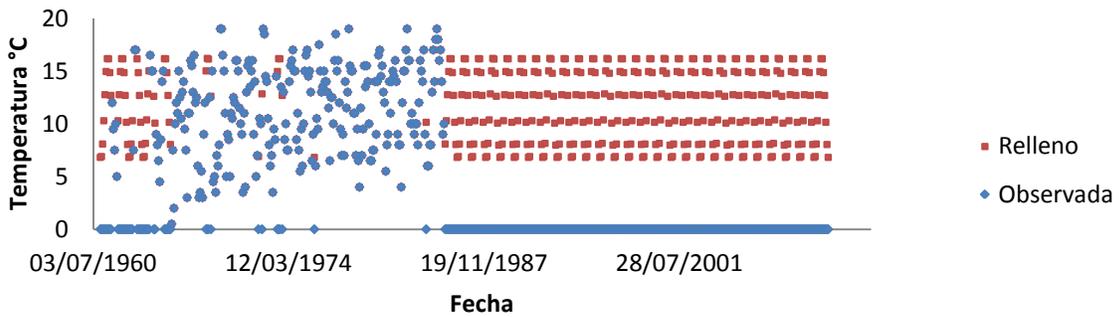
Temperatura Observada vs Relleno 22041



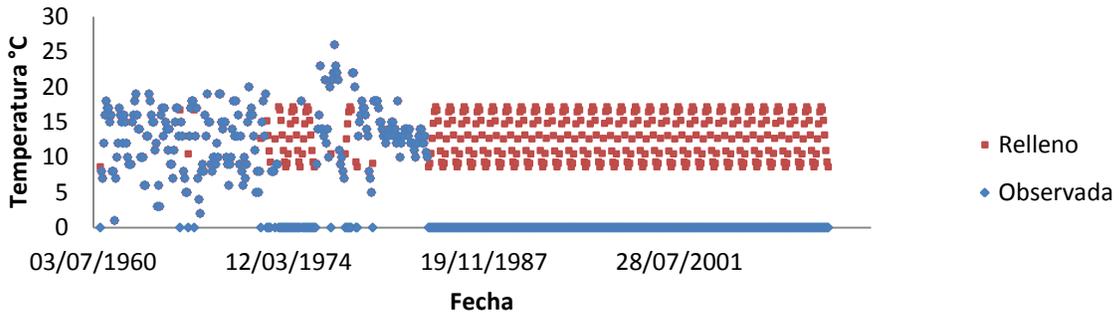
Temperatura Observada vs Relleno 22043



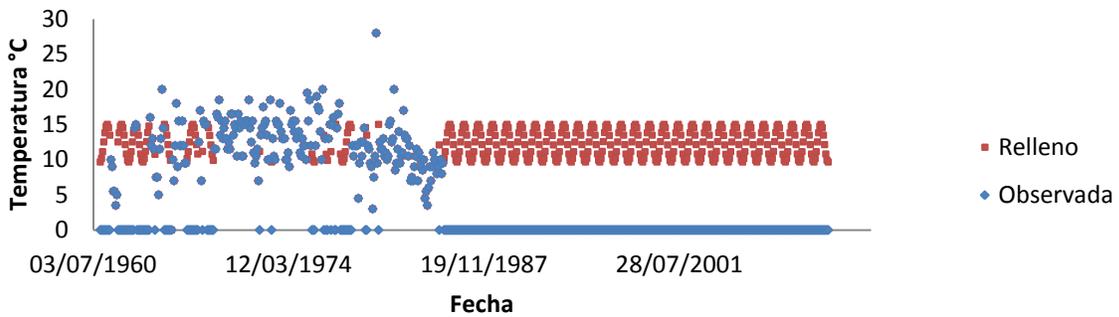
Temperatura Observada vs Relleno 22045



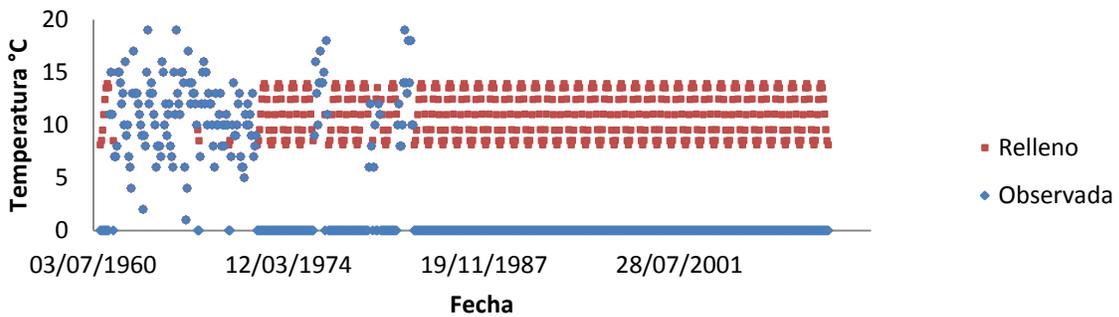
Temperatura Observada vs Relleno 22046



Temperatura Observada vs Relleno 22049



Temperatura Observada vs Relleno 22050



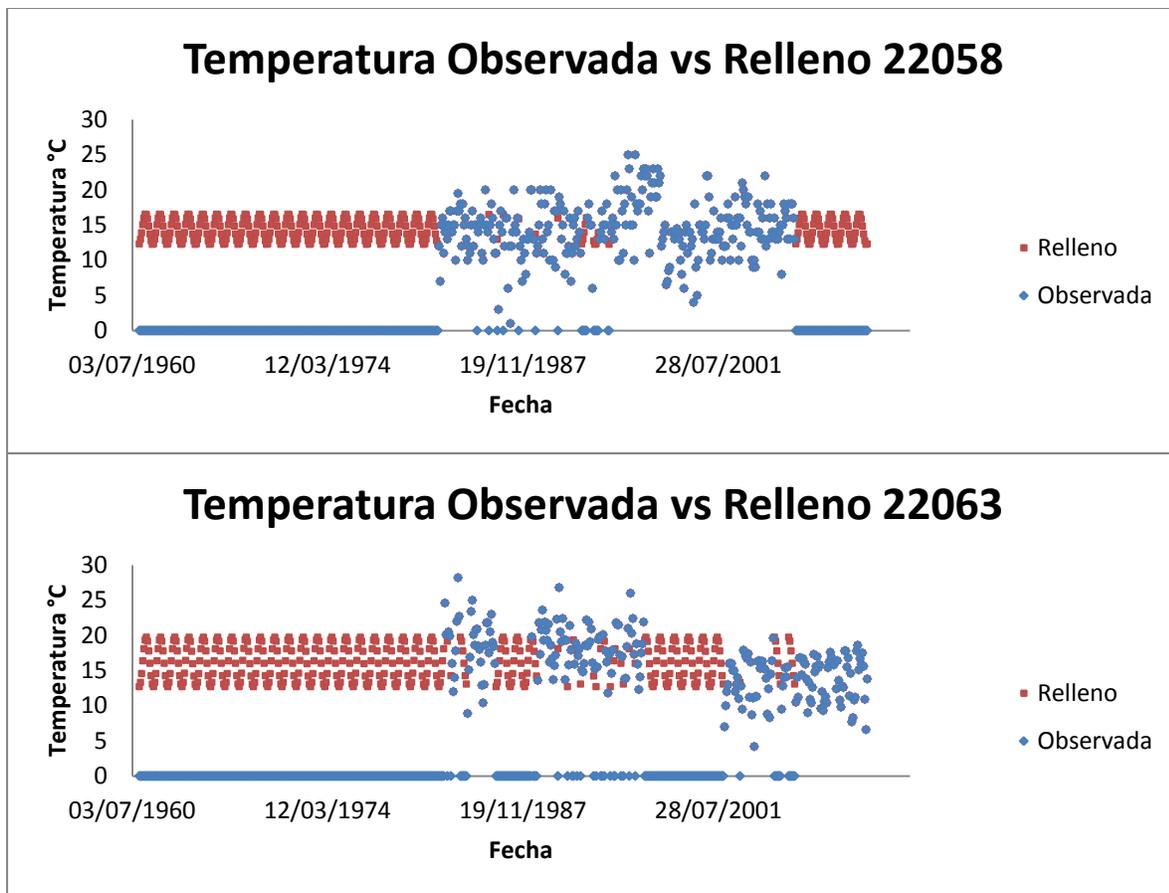


Figura A.9.- Gráfico que muestra el relleno de datos de la temperatura observada contra la registrada por las estaciones correspondiente.

Tabla A.2.- Tabla de radiación solar extraterrestre en MJ m⁻² d⁻¹ (Allen et al., 1998).

| Latitud Norte | Ene | Feb | Mar | Abril | Mayo | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|---------------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 70 | 0.0 | 2.5 | 10.4 | 23.0 | 35.2 | 42.5 | 39.4 | 28.0 | 14.9 | 4.9 | 0.1 | 0.0 |
| 68 | 0.1 | 3.7 | 11.7 | 23.9 | 35.3 | 42.0 | 38.9 | 28.6 | 16.1 | 6.0 | 0.7 | 0.0 |
| 66 | 0.6 | 4.8 | 12.9 | 24.8 | 35.6 | 41.4 | 38.8 | 29.3 | 17.3 | 7.2 | 1.5 | 0.1 |
| 64 | 1.4 | 5.9 | 14.1 | 25.8 | 35.9 | 41.2 | 38.8 | 30.0 | 18.4 | 8.5 | 2.4 | 0.6 |
| 62 | 2.3 | 7.1 | 15.4 | 26.6 | 36.3 | 41.2 | 39.0 | 30.6 | 19.5 | 9.7 | 3.4 | 1.3 |
| 60 | 3.3 | 8.3 | 16.6 | 27.5 | 36.6 | 41.2 | 39.2 | 31.3 | 20.6 | 10.9 | 4.4 | 2.2 |
| 58 | 4.3 | 9.5 | 17.7 | 28.4 | 37.0 | 41.3 | 39.4 | 32.0 | 21.7 | 12.1 | 5.5 | 3.1 |
| 56 | 5.4 | 10.8 | 18.9 | 29.2 | 37.4 | 41.4 | 39.6 | 32.6 | 22.7 | 13.3 | 6.7 | 4.2 |
| 54 | 6.5 | 12.0 | 20.0 | 30.0 | 37.8 | 41.5 | 39.8 | 33.2 | 23.7 | 14.5 | 7.8 | 5.2 |
| 52 | 7.7 | 13.2 | 21.1 | 30.8 | 38.2 | 41.6 | 40.1 | 33.8 | 24.7 | 15.7 | 9.0 | 6.4 |
| 50 | 8.9 | 14.4 | 22.2 | 31.5 | 38.5 | 41.7 | 40.2 | 34.4 | 25.7 | 16.9 | 10.2 | 7.5 |
| 48 | 10.1 | 15.7 | 23.3 | 32.2 | 38.8 | 41.8 | 40.4 | 34.9 | 26.6 | 18.1 | 11.4 | 8.7 |
| 46 | 11.3 | 16.9 | 24.3 | 32.9 | 39.1 | 41.9 | 40.6 | 35.4 | 27.5 | 19.2 | 12.6 | 9.9 |
| 44 | 12.5 | 18.0 | 25.3 | 33.5 | 39.3 | 41.9 | 40.7 | 35.9 | 28.4 | 20.3 | 13.9 | 11.1 |
| 42 | 13.8 | 19.2 | 26.3 | 34.1 | 39.5 | 41.9 | 40.8 | 36.3 | 29.2 | 21.4 | 15.1 | 12.4 |
| 40 | 15.0 | 20.4 | 27.2 | 34.7 | 39.7 | 41.9 | 40.8 | 36.7 | 30.0 | 22.5 | 16.3 | 13.6 |
| 38 | 16.2 | 21.5 | 28.1 | 35.2 | 39.9 | 41.8 | 40.8 | 37.0 | 30.7 | 23.6 | 17.5 | 14.8 |
| 36 | 17.5 | 22.6 | 29.0 | 35.7 | 40.0 | 41.7 | 40.8 | 37.4 | 31.5 | 24.6 | 18.7 | 16.1 |
| 34 | 18.7 | 23.7 | 29.9 | 36.1 | 40.0 | 41.6 | 40.8 | 37.6 | 32.1 | 25.6 | 19.9 | 17.3 |
| 32 | 19.9 | 24.8 | 30.7 | 36.5 | 40.0 | 41.4 | 40.7 | 37.9 | 32.8 | 26.6 | 21.1 | 18.5 |
| 30 | 21.1 | 25.8 | 31.4 | 36.8 | 40.0 | 41.2 | 40.6 | 38.0 | 33.4 | 27.6 | 22.2 | 19.8 |
| 28 | 22.3 | 26.8 | 32.2 | 37.1 | 40.0 | 40.9 | 40.4 | 38.2 | 33.9 | 28.5 | 23.3 | 21.0 |
| 26 | 23.4 | 27.8 | 32.8 | 37.4 | 39.9 | 40.6 | 40.2 | 38.3 | 34.5 | 29.3 | 24.5 | 22.2 |
| 24 | 24.6 | 28.8 | 33.5 | 37.6 | 39.7 | 40.3 | 39.9 | 38.3 | 34.9 | 30.2 | 25.5 | 23.3 |
| 22 | 25.7 | 29.7 | 34.1 | 37.8 | 39.5 | 40.0 | 39.6 | 38.4 | 35.4 | 31.0 | 26.6 | 24.5 |
| 20 | 26.8 | 30.6 | 34.7 | 37.9 | 39.3 | 39.5 | 39.3 | 38.3 | 35.8 | 31.8 | 27.7 | 25.6 |
| 18 | 27.9 | 31.5 | 35.2 | 38.0 | 39.0 | 39.1 | 38.9 | 38.2 | 36.1 | 32.5 | 28.7 | 26.8 |
| 16 | 28.9 | 32.3 | 35.7 | 38.1 | 38.7 | 38.6 | 38.5 | 38.1 | 36.4 | 33.2 | 29.6 | 27.9 |
| 14 | 29.9 | 33.1 | 36.1 | 38.1 | 38.4 | 38.1 | 38.1 | 38.0 | 36.7 | 33.9 | 30.6 | 28.9 |
| 12 | 30.9 | 33.8 | 36.5 | 38.0 | 38.0 | 37.6 | 37.6 | 37.8 | 36.9 | 34.5 | 31.5 | 30.0 |
| 10 | 31.9 | 34.5 | 36.9 | 37.9 | 37.6 | 37.0 | 37.1 | 37.5 | 37.1 | 35.1 | 32.4 | 31.0 |
| 8 | 32.8 | 35.2 | 37.2 | 37.8 | 37.1 | 36.3 | 36.5 | 37.2 | 37.2 | 35.6 | 33.3 | 32.0 |
| 6 | 33.7 | 35.8 | 37.4 | 37.6 | 36.6 | 35.7 | 35.9 | 36.9 | 37.3 | 36.1 | 34.1 | 32.9 |
| 4 | 34.6 | 36.4 | 37.6 | 37.4 | 36.0 | 35.0 | 35.3 | 36.5 | 37.3 | 36.6 | 34.9 | 33.9 |
| 2 | 35.4 | 37.0 | 37.8 | 37.1 | 35.4 | 34.2 | 34.6 | 36.1 | 37.3 | 37.0 | 35.6 | 34.8 |
| 0 | 36.2 | 37.5 | 37.9 | 36.8 | 34.8 | 33.4 | 33.9 | 35.7 | 37.2 | 37.4 | 36.3 | 35.6 |