



ESCENARIOS DE ABASTO Y USO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO





ESCENARIOS DE ABASTO Y USO DE AGUA EN LA ZONA METROPOLITANA DE QUERÉTARO

Roberto de la Llata Gómez¹, Alejandro Lozano Guzmán², José Guadalupe Valtierra¹,
Gilberto Muñoz Arango¹, Josué Hernández Díaz³, Alejandra Cortés Silva⁴

¹Centro Queretano de Recursos Naturales
Parque Tecnológico Querétaro
C.P. 76700, Sanfandila, Qro.

²CICATA-Qro, IPN
Cerro Blanco No. 14, Col. Colinas del Cimatarío
C.P. 76090, Querétaro, Qro.

³Comisión Estatal de Aguas de Querétaro (hasta febrero 2010)
Av. 5 de Febrero No. 35, Col. Las Campanas
C.P. 76010, Querétaro, Qro.

⁴Instituto de Geofísica, UNAM
Circuito exterior, Ciudad Universitaria
C.P. 04510, México, D.F.

PODER EJECUTIVO DEL ESTADO DE QUERÉTARO

Lic. José Eduardo Calzada Rovirosa
GOBERNADOR CONSTITUCIONAL

Dr. Fernando de la Isla Herrera
SECRETARIO DE EDUCACIÓN

CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE QUERÉTARO

Ing. Ángel Ramírez Vázquez
DIRECTOR GENERAL

© Derechos reservados. Se prohíbe la reproducción parcial o total de este reporte sin la previa autorización por escrito del autor.

CENTRO QUERETANO DE RECURSOS NATURALES

ISBN 968-5402-01-9 (Toda la obra)

ISBN 968-5402- 02-7 (Tomo I: Mejoramiento de la Red Carretera del Centro y Norte del Estado de Querétaro, un Soporte para su Desarrollo Integral y Sustentable)

ISBN 968-5402- 03-5 (Tomo II: Planeación de los Libramientos Carreteros de la Ciudad de Querétaro)

ISBN 968-5402- 04-3 (Tomo III: Uso del Suelo y Vegetación de la Zona Sur del Estado de Querétaro)

ISBN 968-5402- 05-1 (Tomo IV: Diagnóstico del Sistema de Transporte Público de Pasajeros en la Zona Metropolitana de Querétaro)

ISBN 968-5402-07-8 (Tomo V: Uso Actual y Potencial del Suelo en los Municipios Conurbados de Querétaro)

ISBN 968-5402-09-4 (Tomo VI: Sistemas Acuáticos Sustentables. Estudio para la Ciudad de Querétaro y sus Alrededores)

ISBN 968-5402-10-8 (Tomo VII: El Sistema de Agua en la Región Querétaro de la Cuenca Lerma-Chapala, Diagnóstico Proyecto: Sustentabilidad del Sistema de Agua en el Estado de Querétaro)

ISBN 968-5402-11-6 (Tomo VIII: Reordenamiento del Sistema de Transporte Público de Pasajeros en la Zona Metropolitana de Querétaro, Primer Reporte: Estudio de Campo)

ISBN 968-5402- 15-9 (Tomo IX: Medición y Análisis del Volumen de Tránsito en las Principales Vialidades de la Ciudad de Querétaro)

ISBN 968-5402- 17-5 (Tomo X: Estudio Exploratorio de las Condiciones Isotópicas e Hidrogeoquímicas de Afloramientos en la Comunidad de El Arbolito, Municipio de Cadereyta, Qro.)

ISBN 968-5402- 18-3 (Tomo XI: Estimación de la Demanda de Transporte en la Ciudad de San Juan del Río)

ISBN 968-5402- 19-1/ 968-5402- 19-4 (Tomo XII: Caracterización de los Ecosistemas, Cambios de Uso de Suelo y Unidades Paisajísticas en la Reserva de la Biosfera "Sierra Gorda" de Querétaro)

ISBN 968-5402-20-5 / 978-968-5402-20-0 (Tomo XIII: Medición y Análisis del Volumen de Tránsito en las Principales Vialidades de la Ciudad de San Juan del Río)

ISBN 978-607-7710-00-4 (Tomo XIV: Propuestas para la Conservación de Suelos y la Reforestación en el Municipio de Huimilpan)

ISBN 978-607-7710-03-5 (Tomo XV: Diagnóstico y propuestas de solución. Problemática del Sistema de Transporte. Zona Rural de la Región Centro del Estado de Querétaro)

E-Book ISBN 978-607-7710-03-5

ISBN 978-607-7710-28-08 (Tomo XVI: Escenarios de Abasto y Uso de Agua en la Zona Metropolitana de Querétaro)

Noviembre de 2010

Publicación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro

Luis Pasteur Sur No. 36, Centro Histórico, C.P. 76000 / Tel. (442) 212 7266, 214 3685

Santiago de Querétaro, Qro., México

Contenido	
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes	3
1.2. Región de estudio	4
1.3. Dinámica de Sistemas	4
1.4. Modelos de sistemas de agua	7
1.5. Principales actividades	10
2. MODELO DE POBLACIÓN	11
2.1 Introducción	11
2.2 El modelo de componentes y grupos de población	11
2.3 Proyección de los componentes	13
3. MODELO HIDROLÓGICO	15
3.1. Introducción	15
3.2. Información existente	17
3.3. Precipitación	17
3.4. Temperatura	23
3.5. Escurrimiento superficial	25
3.6. Aplicación mensual del método de los números de escurrimiento	28
3.7. Humedad del suelo y percolación	34
4. USOS DEL AGUA	37
4.1. Uso agrícola	37
4.2. Uso pecuario	37
4.3. Uso doméstico	38
4.4. Uso industrial	38
5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO	40
6. ESCENARIOS	44
6.1. Introducción	44
6.2. Definición de variables y escenarios	45
6.3. Análisis estadístico de datos de salida	46
7.1. Población	48
7.2. Escurrimientos	49
7.3. Sobreexplotación del Acuífero del Valle de Querétaro	51
7.4. Salidas de agua	51
8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	53
REFERENCIAS	54

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas tendiente a ayudar en la construcción de escenarios futuros de abasto y uso de agua en la Zona Metropolitana de Querétaro. El modelo contiene los principales componentes del medio social: población, uso de agua en los sectores agropecuario, doméstico e industrial, y su interacción con la hidrología. Para el desarrollo del presente estudio se utilizó una base de tiempo mensual y una partición espacial de la zona en municipios, subcuencas, o acuíferos.

La población se estimó con el Método de los Componentes de Población, empleando las proyecciones de estos componentes realizadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), ajustadas a nivel municipal. Con base en este método, la población se dividió por sexo y en grupos de edad de cinco años. Los usos doméstico y pecuario se estimaron con dotaciones estándar. El uso agrícola se estimó con el método de Blaney-Criddle, aplicado a los principales cultivos presentes en la región. El uso industrial se calculó con Índices de Extracción Unitaria, aplicados a las principales ramas industriales.

El modelo hidrológico involucró el análisis estadístico de las variables de precipitación y temperatura, para simularlas y estimar, con base en ellas, escurrimientos, con el método de los números de escurrimiento. El modelo de precipitaciones se desarrolló de manera desagregada. En una primera instancia se modelaron las precipitaciones anuales en cada una de las estaciones seleccionadas para la región, para posteriormente, con el método de los fragmentos, obtener precipitaciones mensuales. Las precipitaciones anuales se modelaron, para cada estación, como variables aleatorias estacionarias con distribución log-normal y correlacionadas espacialmente. Se emplearon coeficientes de infiltración profunda para estimar recarga de acuíferos. Para el abasto de agua, se consideraron las principales presas, los aprovechamientos de agua subterránea y el tratamiento y posterior reuso del agua.

En la construcción de escenarios, se seleccionaron y combinaron 10 variables críticas, las cuales se integraron en tres escenarios: tendencial, optimista y pesimista. Se evaluó el impacto del proyecto Acueducto II, obteniéndose que, en un periodo de 25 años, sus volúmenes serán suficientes para abastecer la demanda, en el escenario optimista; que se tendría una ligera sobreexplotación del acuífero del Valle de Querétaro, en el escenario tendencial, y; una fuerte sobreexplotación de este acuífero, en el escenario pesimista. Estos resultados indican que es necesario consolidar medidas adicionales –sobre todo de administración de la demanda– para complementar el abasto futuro de agua en la región.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La Zona Metropolitana de Querétaro (ZMQ) está formada por los municipios que comprenden a la zona conurbada de la ciudad de Santiago de Querétaro: Corregidora, Huimilpan, El Marqués y Querétaro, en los cuales vive cerca del 60 % de la población del estado (INEGI, 2006). En esta zona se estima que se genera el 80 % del Producto Interno Bruto (PIB) estatal, a pesar de que ha presentado, de manera crónica, problemas de disponibilidad de agua.

La localización geográfica de la ZMQ, situada a pocos kilómetros del parteaguas continental de las cuencas de los ríos Pánuco y Lerma-Chapala, no le permite tener una disponibilidad significativa de agua superficial, de ahí que sólo cuenta con el río Querétaro y sus afluentes, los cuales, además, no poseen las características geomorfológicas necesarias para poder almacenar el recurso en presas adecuadamente. El suministro de agua a la ZMQ en el pasado reciente, lo ha proporcionado el Acuífero del Valle de Querétaro, cuya sobreexplotación empezó en los años 70, corriéndose el riesgo de quedar prácticamente agotado si continúa la presente tendencia de uso. Recientemente se ha incorporado agua de acuíferos circunvecinos: primero el de Amazcala, después el de Huimilpan, y ahora el de San Juan del Río.

La mayor presión sobre el Acuífero del Valle de Querétaro ha sido consecuencia del acelerado crecimiento de la población en la ZMQ, que ha pasado de 380,000 habitantes en 1980, a 950,000 en el año 2005. Por ello, aproximadamente el 70 % de la explotación de ese acuífero (CNA, 2000) se destina al sector público-urbano e industrial, mientras que sólo el restante 30 % se dedica a la agricultura. Se tiene, también, una muy baja eficiencia en el uso público-urbano: 51 % (CNA, 2008), y un bajo porcentaje de tratamiento del agua: 35 % (CQRN, 2003), lo que podría mejorarse al entrar en operación, próximamente, la planta de tratamiento de San Pedro Mártir.

De acuerdo con el Banco Mundial, el patrón de suministro de agua en grandes ciudades, una vez agotadas las fuentes de suministro locales, es el de recurrir a la explotación de agua superficial o subterránea de áreas vecinas para después importar agua en bloque desde regiones más lejanas, en donde aún haya disponibilidad. Siguiendo este patrón, en los próximos meses se pondrá en operación el proyecto Acueducto II, el cual suministrará una cantidad considerable de agua (50 millones de metros cúbicos anuales) a la ZMQ, proveniente de la Región del Semidesierto del estado de Querétaro, requiriendo una conducción de 108 Km al punto de consumo.

Debido a los riesgos que conlleva el traer agua desde fuentes tan lejanas –y que pudieran acentuarse por los efectos del cambio climático–, cobra importancia fortalecer dos aspectos estratégicos en la gestión del sistema de agua.

El primero es el de la conservación y el uso sustentable del Acuífero del Valle de Querétaro y acuíferos circunvecinos, los cuales en la actualidad suministran de agua a la ZMQ, y que serían la única fuente importante que quedaría en caso de presentarse cualquier eventualidad de suspensión o disminución del suministro de las fuentes de abastecimiento externas. Dicha eventualidad podría tener efectos graves de presentarse en acuíferos en estado avanzado de sobreexplotación.

El segundo aspecto sería el fortalecimiento de medidas de administración de la demanda de agua, las cuales han tenido, en el pasado, menor prioridad que las tomadas para incrementar la oferta, pero que en un futuro –considerando el fuerte crecimiento demográfico y económico de la zona– serán necesarias si no se quiere que las nuevas fuentes sean, muy pronto, insuficientes.

1.2. Región de estudio

La ZMQ se ubica en la parte queretana de la cuenca Lerma-Chapala. En esta zona se identifican superficies de escurrimiento, divididas por subcuencas (**Figura 1.1**), de acuerdo con las principales corrientes: río Querétaro, río El Pueblito y arroyo Jurica, junto con pequeñas partes de otras subcuencas. No se incluye, en este estudio, una parte pequeña del municipio de Amealco, que aunque pertenece también a la cuenca Lerma-Chapala, está separada geográficamente de la región estudiada. Además de los municipios de la ZMQ, se consideran en el análisis hidrológico parte de los municipios de Colón y Pedro Escobedo, comprendidos en las subcuencas mencionadas. Los acuíferos comprendidos en la región (**Figura 1.2**) son: Valle de Querétaro, Valle de Amazcala, Valle de Buenavista y Valle de Huimilpan. Una parte del acuífero de Pedro Escobedo-San Juan del Río, aun cuando también pertenece a la región de estudio, no será considerado, pues casi todo su aprovechamiento se tiene en la subcuenca del río San Juan.

1.3. Dinámica de Sistemas

Los sistemas de abasto y uso de agua poseen una gran complejidad, no sólo por el número de sus componentes y actores involucrados, sino por las interacciones entre ellos. En estos sistemas existe una complejidad dinámica (Stermán, 2000) en la que, además de relaciones causa-efecto, se tienen ciclos de retroalimentación positivos y negativos.

Los ciclos positivos refuerzan la relación entre las variables, a lo largo del tiempo. En sistemas de agua estas relaciones se dan cuando las necesidades se satisfacen simplemente con más infraestructura, lo cual hace al sistema más atractivo y, por tanto, atrae más inversiones y personas, lo que a su vez aumenta aún más las necesidades y provoca que éstas crezcan de modo acelerado.

Los ciclos negativos, a diferencia de los anteriores, tienden a un equilibrio y pueden darse cuando los recursos (naturales y financieros) empiezan a ser insuficientes ante la presión causada por los ciclos positivos, lo que origina medidas para racionalizar el uso de esos recursos, haciendo a la región menos competitiva y, por tanto, limitando su crecimiento. Estos ciclos se dan en un contexto de retrasos o demoras en el tiempo, en el que dada una acción el

efecto resultante se experimenta después de transcurrido un cierto periodo, alterando la percepción que se tiene sobre el sistema.

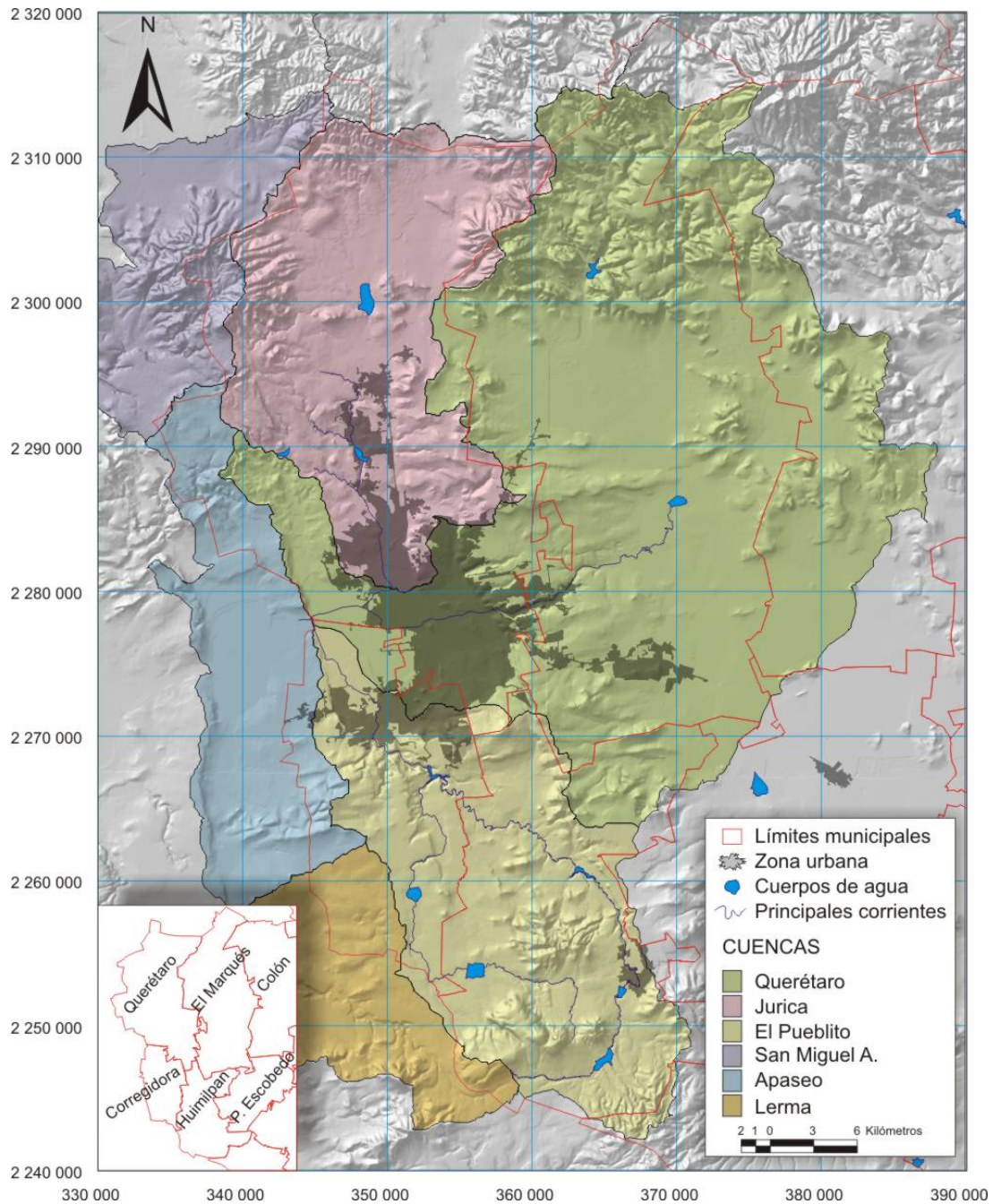


Figura 1.1. Municipios y subcuencas en la región de estudio.

El desarrollo y aplicación de estos modelos se ha apoyado en numerosas herramientas de software, desarrolladas con esta finalidad. Entre éstas destaca el paquete STELLA o el VENSIM,

que fue el utilizado para este trabajo. Ambos paquetes trabajan con tres elementos básicos: inventarios, flujos, y variables auxiliares. Los inventarios son, simplemente, depósitos en donde se acumula algún componente (materiales, información, recursos, etc.). Los flujos son elementos que permiten, al paso del tiempo, aumentar o disminuir el nivel de los inventarios. Las variables auxiliares son los elementos que permiten relacionar los inventarios con los flujos u otras variables, permitiendo, así, modelar ciclos, demoras en el tiempo, o cualquier otra relación entre variables, necesaria en el modelo. Todos estos paquetes tienen una interfase gráfica que facilita la modelación, además de herramientas que internamente plantean y resuelven los sistemas de ecuaciones diferenciales a las que llevan estos modelos.

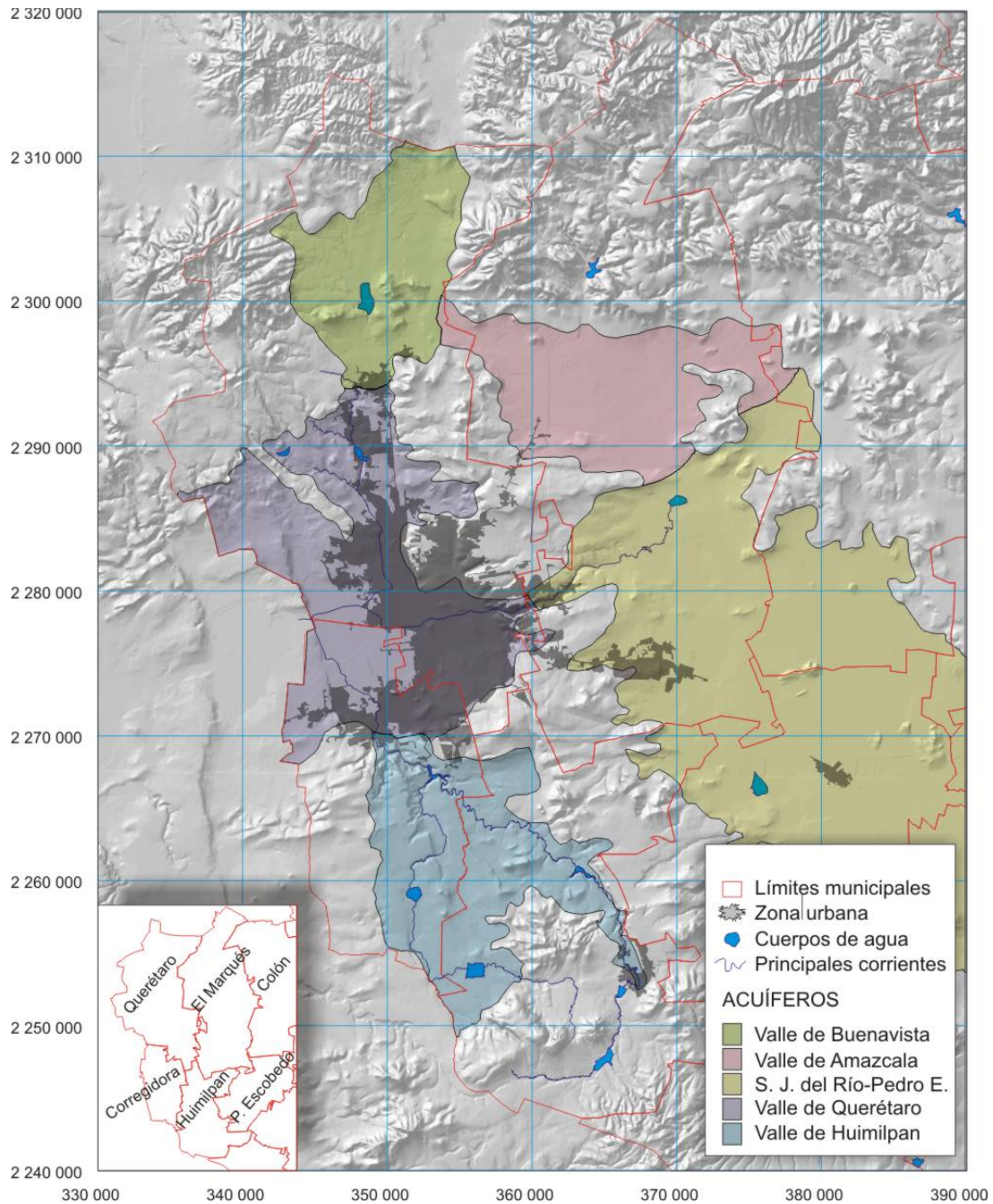


Figura 1.2. Acuíferos en la región de estudio.

1.4. Modelos de sistemas de agua

Modelos de dinámica de sistemas, relacionados con la gestión de recursos hidráulicos, han sido desarrollados para incorporar una visión sistémica a esta actividad, modelando al sistema de agua como parte de sistemas más amplios, principalmente del sistema natural, por un lado, y

de los sistemas social y económico, por el otro. Su utilidad estriba en ofrecer una base para modelar la interacción entre todos estos sistemas. De acuerdo con diferentes necesidades, se han desarrollado modelos globales, regionales o locales. Los modelos globales intentan predecir la disponibilidad global del agua. Los modelos regionales lo hacen para una región grande o, inclusive, para todo un país. En los modelos locales se modela el sistema a nivel de una o varias cuencas.

1.4.1. Modelos globales

Entre los modelos globales, se tiene el modelo *WorldWater* (Simonovic, 2002), una extensión del modelo *World3*, el cual modela la interacción dinámica entre la población y los recursos naturales necesarios para soportarla. Este último modelo se compone de cinco sectores: población, agricultura, recursos no-renovables, economía y contaminación. En *WorldWater* se incluyeron dos sectores más a este último modelo: cantidad de agua y calidad de agua. Estos modelos sirven para tener una imagen global del problema, lo que les permitió concluir que el agua es uno de los factores limitantes del desarrollo futuro, y que su contaminación será uno de los problemas más importantes a nivel global. Sin embargo, cabe señalar que una limitación de estos modelos es que, dada la escala empleada, se pierden las variaciones e interacciones en el espacio y en el tiempo, por lo que la tendencia es emplear modelos a menor escala.

1.4.2. Modelos regionales

El *CanadaWater* (Simonovic and Rajasekaram, 2004) es un modelo dinámico, desarrollado para simular la gestión de recursos hidráulicos en Canadá. Integra a los sectores de calidad y cantidad de agua, con siete sectores socioeconómicos: población, desarrollo agrícola, producción de alimentos, inversión, generación de energía, uso de recursos no-renovables y contaminación. La disponibilidad de agua se maneja de manera jerárquica, asignando primero la demanda a las fuentes de agua superficiales. Cuando éstas son insuficientes, se utilizan las fuentes de agua subterránea. Y cuando ambas son insuficientes, se considera el reuso del agua. El modelo permitió simular 12 escenarios distintos de manejo del agua en Canadá bajo diferentes condiciones de crecimiento socioeconómico, concluyendo que aunque ese país tiene una de las disponibilidades de agua más grandes en todo el mundo, su desarrollo futuro depende del mantenimiento de niveles aceptables de calidad del agua y de su consumo racional, en todos los sectores.

1.4.3. Modelos locales

En este nivel se tienen bastantes modelos desarrollados, a nivel de cuenca. En el modelo de la cuenca de Hanzhong en China (Gao and Liu, 1997) se tiene un subsistema de oferta (agua superficial, subterránea y el reuso) y un subsistema de demanda (uso doméstico, ambiental, agropecuario e industrial). En el trabajo se incluyó, explícitamente, un ciclo de

retroalimentación negativo, resultante de incluir presiones para ahorrar agua dependientes del déficit del recurso obtenido al realizar el balance entre oferta y demanda.

En México hay varios modelos locales de dinámica de sistemas, como los realizados en Guanajuato (Huerta *et al.*, 2001), en la cuenca Lerma-Chapala (Hidalgo *et al.*, 2002, Huerta, 2004), y en la cuenca del río Bravo (Martínez *et al.*, 2002).

El modelo realizado para Guanajuato (*ProEstado MAUA*), opera en tres niveles del medio ambiente: atmósfera, superficie y subsuelo, y en tres componentes del medio social agregados por subcuencas: socioeconómico (población, educación y empleo), industrial, y producción agrícola. El recurso agua actúa en los tres niveles del medio ambiente: en la atmósfera (donde se modela la precipitación); en la superficie (donde se modela el escurrimiento, la infiltración, evapotranspiración y almacenamiento de agua superficial), y; en el subterráneo (donde se modela la extracción y recarga en los acuíferos).

El modelo fue usado, sobre todo, para simular diferentes políticas de reducción del consumo de agua en la agricultura, evaluando los impactos en la producción y el empleo, de opciones tales como la disminución de la superficie irrigada o el aumento de la eficiencia en irrigación. El modelo se utilizó, también, como un apoyo durante la elaboración del Plan Estatal de Recursos Hidráulicos, a fin de construir escenarios sobre uso eficiente y uso no eficiente del agua en irrigación. Adicionalmente, cumplió con la importante labor de facilitar la comunicación entre los actores involucrados durante el proceso de planeación.

El modelo de la cuenca Lerma-Chapala (Hidalgo *et al.*, 2002) se realizó para estudiar la problemática que se presenta debido a la intensa competencia por el agua en la cuenca; la disminución de los niveles en el lago de Chapala, y; la pobre calidad del recurso. El modelo está conformado por cinco módulos: agua superficial, agua subterránea, calidad del agua, demanda de agua y política de distribución.

El primer módulo tiene modelos de lluvia-escurrimiento, y funcionamiento de vasos. El segundo tiene un modelo de funcionamiento de acuíferos. El módulo de calidad de agua tiene un modelo de transporte de contaminantes que simula la contaminación en el cauce principal del río Lerma y en el lago. El cuarto módulo calcula necesidades de irrigación, de agua potable (en función del crecimiento de la población) e industrial. El último modelo simula las reglas de asignación del agua con base en los niveles del lago de Chapala, para evaluar el acuerdo de distribución en la cuenca.

El modelo de la cuenca del río Bravo tiene una estructura muy similar al anterior, con la diferencia de que el acuerdo existente es un tratado internacional con los Estados Unidos. De ahí que se tiene un módulo que calcula distintas maneras de pagar los volúmenes de agua, a fin de cumplir con lo estipulado en dicho tratado. El modelo se empleó para estimar el impacto económico y en los volúmenes comprometidos por el tratado, de diferentes niveles de reducción de las áreas agrícolas.

1.5. Principales actividades

El presente trabajo tiene, como objetivo principal, el desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas que ayude en la formulación de escenarios de evolución de la demanda y uso de agua en la región, a mediano y largo plazos. Para desarrollar el modelo, se quiso incorporar una visión sistémica, estudiando, para ello, los principales componentes del medio físico (agua), del medio social (población y uso de agua en los sectores agropecuario, doméstico e industrial), y las relaciones más importantes entre ellos. El modelo se construyó sobre una división espacial de la zona en subcuencas (agua superficial), acuíferos (agua subterránea) y municipios (medio social), junto con las áreas de intersección entre todas estas divisiones.

Para considerar a la población, se desarrolló un modelo utilizando el método de los componentes y grupos de población, con 19 grupos de edad en cada municipio. Para el modelo de hidrología, se consideraron modelos probabilísticos de precipitación y el método de los números de escurrimiento, modificado para usar una base mensual. Para el uso agropecuario, se empleó el método de Blaney-Criddle a fin de calcular el uso consuntivo de diferentes cultivos, y se utilizaron estimaciones de dotación para el uso pecuario y doméstico, e índices de extracción unitaria para el uso industrial.

En los siguientes capítulos se presentan los fundamentos de los modelos y métodos empleados, su aplicación en el sistema objeto de estudio, y los resultados obtenidos en los distintos escenarios considerados.

2. MODELO DE POBLACIÓN

2.1 Introducción

El conocimiento sobre la población y sus principales características en una región geográfica dada, es una de las acciones más importantes cuando se llevan a cabo actividades de planeación. Aunque sus valores y características actuales pueden conocerse a partir de los resultados de los censos, para efectos de planeación éstos deben ser estimados a futuro. Para hacer estas estimaciones hay diferentes tipos de modelos, que pueden clasificarse en dos grandes grupos (Oppenheim, 1980): modelos agregados y modelos desagregados.

El primer grupo de modelos trabaja con grandes conjuntos de población y emplea métodos descriptivos, no para explicar las causas que originan los cambios en la población, sino sólo para encontrar relaciones simples, principalmente tendencias de esa variable en el tiempo. Estos métodos funcionan como “cajas negras”, en donde, a partir de datos históricos, se estiman poblaciones futuras con la suposición básica de que las tendencias permanecerán más o menos inalteradas.

El segundo grupo de modelos realiza la estimación de la población futura dividiendo a ésta en grupos diferenciados; esto es, por edades y/o por zonas geográficas. Estos modelos analizan para cada grupo, las causas que dan lugar a la dinámica de crecimiento poblacional, para encontrar posteriormente la población futura en función de la predicción de la evolución de sus principales causas. Generalmente logran proyecciones más flexibles y realistas.

Los modelos simples podrían ser también desagregados, pero dada su simplicidad, no se tendría mayor ventaja al aplicarlos de manera diferenciada para distintos grupos. Por otra parte, los modelos causales pudieran ser agregados, pero las causas de crecimiento poblacional se dan en forma diferenciada tanto en grupos distintos de edad como en regiones geográficas diferentes, haciendo necesaria su desagregación. En estos modelos el resultado final depende, principalmente, de las relaciones e interacciones entre cada grupo, lo cual no puede modelarse de manera agregada.

2.2 El modelo de componentes y grupos de población

En el presente trabajo se empleará un modelo desagregado, usado ampliamente, conocido como el “modelo de los componentes y grupos (o cohortes) de población”. Es práctica común, en este método, dividir a la población en grupos de 5 años de edad y por sexo, a partir del grupo de 0 a 4 años y hasta el último grupo que comprende a las personas de 85 y más años de edad. Se incluyó un grupo adicional: las personas de hasta un año de edad, a fin de presentar de manera diferenciada la mortalidad infantil. La mortalidad, la fertilidad y la migración, son los principales componentes del modelo de población. La población sólo puede cambiar cuando una persona nace, muere o emigra (desde o hacia otro lugar). Estos componentes son relativamente independientes entre sí, pero fuertemente dependientes del grupo de edad. De estos tres componentes, la migración es el más impredecible (Klosterman, 1990). De acuerdo con este autor, las tasas de mortalidad cambian de modo muy gradual y predecible, las tasas de

fertilidad siguen tendencias estables en el corto plazo, mientras que las tasas de migración pueden cambiar abruptamente inclusive en periodos muy cortos de tiempo.

Los componentes de población se expresan, usualmente, como tasas; esto es, el número de ocurrencias de eventos (muertes, nacimientos o migraciones) por cada cierto número de habitantes. Cuando esta base es igual a uno, tienen la misma interpretación que probabilidades de ocurrencia.

Suponiendo una unidad de tiempo igual a un año, las ecuaciones usadas en este método son las siguientes:

$$P_{s,n}^t = P_{s,n}^{t-1} S_{s,n}^{t-1} - (P_{s,n}^{t-1} S_{s,n}^{t-1}) \frac{1}{TR_n} + (P_{s,n}^{t-1} S_{s,n-1}^{t-1}) \frac{1}{TR_{n-1}} + P_{s,n}^{t-1} M_{s,n}^{t-1}, \quad \forall t,s,n \quad (2.1)$$

$$P_{s,0}^t = \sum_{\forall n} TF_n^{t-1} P_{m,n}^{t-1} f_s + P_{s,0}^{t-1} M_{s,0}^{t-1}, \quad \forall t,s \quad (2.2)$$

$$P_{s,85+}^t = P_{s,85+}^{t-1} S_{s,85+}^{t-1} + (P_{s,80-84}^{t-1} S_{s,80-84}^{t-1}) \frac{1}{TR_{80-84}} + P_{s,85+}^{t-1} M_{s,85+}^{t-1}, \quad \forall t,s \quad (2.3)$$

en donde:

$P_{s,n}^t$: población del sexo s en el grupo de edad n, tiempo t.

$S_{s,n}^t$: probabilidad de sobrevivencia del sexo s en el grupo de edad n, tiempo t.

$M_{s,n}^t$: tasa neta de migración del sexo s en el grupo de edad n, tiempo t.

TR_n : tiempo medio de residencia en el grupo de edad n.

TF_n^t : tasa específica de fecundidad en el grupo de edad n, tiempo t.

f_s : fracción de recién nacidos del sexo s.

La ecuación (2.1) se aplica en todos los grupos de edad, excepto en el primero que utiliza (2.2), y en el último que utiliza (2.3). En estas ecuaciones las tasas están dadas por habitante, y la mortalidad se expresa como su complemento: la probabilidad de sobrevivencia. Básicamente las ecuaciones, en un periodo de tiempo dado, empiezan con los habitantes que sobrevivieron en cada grupo de edad, se resta a quienes “envejecieron” alcanzando el siguiente grupo de edad, y se les suma a quienes “maduraron” desde el grupo de edad anterior. Finalmente, se les suman los que inmigraron y se les resta quienes emigraron, lo que en la ecuación se tiene como un solo término; es decir, la migración neta. El tiempo de residencia usado supone, dentro de cada grupo, una distribución uniforme de edades, por lo que en cada periodo el recíproco de este tiempo equivale a la fracción que madura y envejece. En la ecuación (2.2), para el primer grupo de edad, no hay maduración, pero se tienen los nacimientos, expresados en función de las tasas específicas de fecundidad para mujeres, las cuales son probabilidades de que una mujer, en cierto grupo de edad, dará a luz durante el periodo.

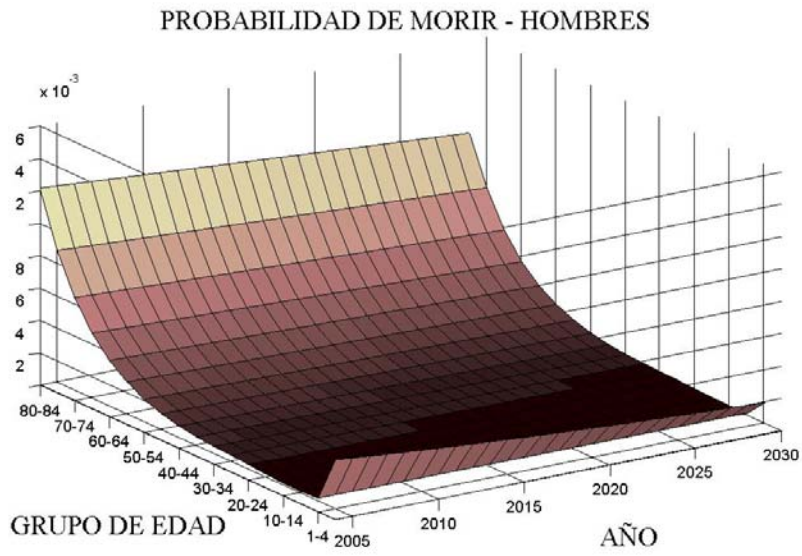


Figura 2.2. Probabilidad de morir en hombres (municipio de Querétaro).

3. MODELO HIDROLÓGICO

3.1. Introducción

Se han desarrollado una gran variedad de modelos para describir el comportamiento de cuencas hidrológicas. En Dingman (2002) se tiene una clasificación de acuerdo con seis parámetros, entre los que pueden destacarse tres: la naturaleza de la simulación de los procesos, la representación espacial, y la representación temporal.

Con respecto al primer parámetro, los modelos pueden clasificarse en: físicos, conceptuales y empíricos, de acuerdo con las herramientas empleadas para simular flujos y almacenamientos de agua. En los modelos físicos se usan ecuaciones derivadas de leyes físicas. En los conceptuales se utilizan relaciones simplificadas, pero razonables, para realizar la simulación. En los empíricos se emplean relaciones aproximadas, desarrolladas principalmente mediante modelos de regresión.

Con respecto a la representación espacial, pueden tenerse modelos agregados o modelos desagregados (o distribuidos). En la representación agregada, las variables son representadas por su promedio, a pesar de que los datos puedan variar espacialmente. Los modelos distribuidos intentan representar esta variación espacial, subdividiendo la cuenca en áreas homogéneas, y agrupando regiones con similar respuesta hidrológica (vegetación, tipo de suelo, pendiente, etc.). Cuando se tienen estas subdivisiones, pero sin tomar en cuenta las condiciones de frontera, se tienen los modelos semidistribuidos.

La representación temporal (Dingman, 2002) permite tener tres modelos: de estado estable, de evento simple, y de evento continuo. En la primera categoría los resultados del modelo son promedios a largo plazo. En la segunda se tiene una respuesta para un único conjunto de datos de entrada. En los modelos continuos se tiene una secuencia de respuestas, dado que también se tiene una secuencia de datos de entrada (uno por cada unidad de tiempo usada: día, mes, año, etcétera).

Para los fines de este trabajo no se requieren modelos muy complicados, por lo que se utilizó un modelo conceptual, continuo y agregado, aunque en forma semidistribuida, para incorporar también la variabilidad espacial. Se usó una base de tiempo mensual pues de acuerdo con varios autores (Xu and Vandewiele, 1995; Srikanthan and McMahon, 2001) es la más adecuada para simular sistemas de abastecimiento de agua. Los modelos con base de tiempo mensual son más fáciles de formular y calibrar que los modelos de base diaria, y aún así permiten modelar las variaciones estacionales inherentes a ellos (lo que no es posible con modelos de base anual). Y aunque estos modelos no pueden considerar características de corto plazo, como avenidas máximas o relaciones detalladas lluvia-escorrentía, éstas son de poca importancia para proyectos de abastecimiento.

Los procesos a modelar son únicamente los necesarios para tener una idea de la disponibilidad de agua en la región, y pueden deducirse a partir de las ecuaciones de balance, del modelo propuesto por Limbrunner *et al.* (2005):

$$S(t) = S(t-1) + I(t) - PC(t) - ET(t) \quad (3.1)$$

$$I(T) = P(t) - Q(T) \quad (3.2)$$

en donde para cada valor del tiempo t:

S(t): almacenamiento de agua en la capa de suelo no saturada.

I(t): infiltración.

PC(t): percolación.

ET(t): evapotranspiración.

P(t): precipitación.

Q(t): escurrimiento superficial.

Estas relaciones se presentan de manera esquemática en la **Figura 3.1** siguiendo el concepto de “dos recipientes”, en donde no se considera el flujo base (el cual no existe en los acuíferos severamente sobreexplotados de la región). Y aunque aparece G(t), que representa el almacenamiento de agua subterránea, no es empleado por carecer de datos al respecto. El parámetro Smax representa el almacenamiento máximo de agua en la capa no saturada.

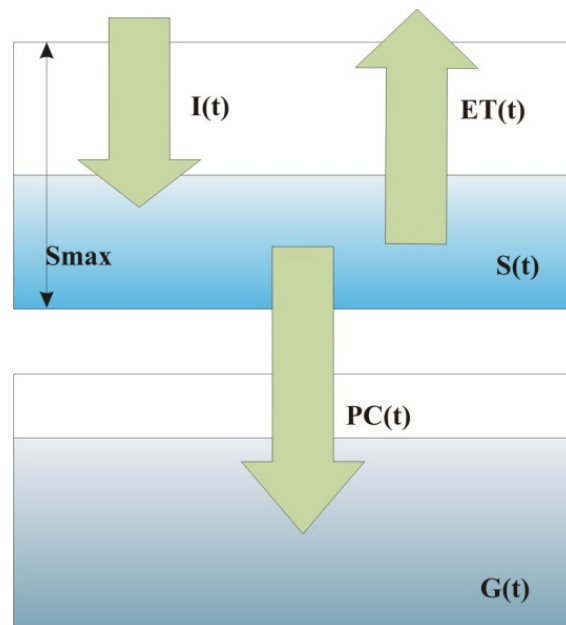


Figura 3.1. Esquema de dos recipientes (adaptado de Limbrunner *et al.*, 2005).

Para la estimación de escurrimientos se utilizó el método de los números de escurrimiento, modificado para emplear una base mensual. Estos modelos de escurrimiento son, usualmente,

modelos determinísticos, en donde para un valor de las variables de entrada (precipitación, temperatura, etc.) se obtiene un solo valor de la variable de salida (escurrimiento). Sin embargo las variables de entrada, principalmente la precipitación, son variables que presentan una gran variabilidad, por lo que se optó por modelarlas en forma estocástica para usarse como variables de entrada al realizar una simulación del sistema, de modo que puedan obtenerse resultados estadísticamente significativos. En cuanto a la temperatura, debido a que se observó una variabilidad bastante menor a la de la precipitación, simplemente se utilizaron los promedios mensuales registrados en las estaciones meteorológicas. En la parte de agua subterránea sólo se emplearon coeficientes de infiltración profunda o percolación, aplicados a los valores estimados de infiltración. En las siguientes secciones se describen los datos y métodos utilizados.

3.2. Información existente

La información climatológica existente para modelar los procesos mencionados, proviene de dos tipos de estaciones: meteorológicas e hidrométricas.

El primer tipo de estaciones cuenta, básicamente, con mediciones de precipitación y temperatura. Hay varias de estas estaciones, con un número de años de registro razonable, en las subcuencas de El Pueblito y Jurica, situación que desafortunadamente no se tiene en la subcuenca del río Querétaro, donde los registros abarcan periodos mucho más cortos. Las estaciones que se emplearon fueron: Juriquilla y Querétaro (Observatorio) en la subcuenca Jurica; El Pueblito, El Batán y Huimilpan en la subcuenca El Pueblito, y; Coyotillos y El Zamorano en la en la subcuenca del río Querétaro. Se utilizaron polígonos de Thiessen para estimar promedios por subcuenca.

Las estaciones hidrométricas miden directamente el flujo sobre las corrientes superficiales. Hay sólo dos estaciones de este tipo en la región de estudio, ambas en la subcuenca del río El Pueblito: una ubicada en El Batán, con datos desde el año 1963, y la otra en Ameche, ya fuera de la región, a unos 10 Km. del punto en donde termina el estado de Querétaro. Estas estaciones pueden ser útiles para calibrar modelos de escurrimiento, aunque en el caso de El Batán habría que ajustar previamente sus valores a fin de incorporar el efecto de la construcción de varias presas y bordos que hacen incompatibles los valores observados en la estación a lo largo de su historia. La segunda de las estaciones tiene el inconveniente adicional de presentar, junto con los escurrimientos naturales, los volúmenes aportados por las descargas residuales de la ciudad de Querétaro y su aprovechamiento agrícola antes de la estación.

3.3. Precipitación

En una simulación estocástica, Koutsoyiannis (2005) dice que los datos de entrada no deben ser las series de tiempo observadas, sino series sintéticas construidas mediante un modelo estocástico, debido a que las series observadas tienen una duración igual a la del periodo de observación, mientras que los modelos estocásticos pueden producir series en la cantidad y en la duración más conveniente para determinar la validez estadística de los resultados. La observación y análisis de procesos hidrológicos en el tiempo permite estimar parámetros para generar secuencias indistinguibles, desde el punto de vista estadístico, de la serie observada (Bras and Rodríguez-Iturbe, 1993).

La modelación de la precipitación tiene la dificultad de incorporar, simultáneamente, dos tipos de memoria o persistencia (Koutsoyiannis, 2003): de largo plazo (caracterizada por la existencia de años secos o lluviosos) y de corto plazo (caracterizada por la ocurrencia de meses secos o húmedos, y de días con o sin lluvia). Ante la dificultad de incorporar ambos efectos simultáneamente, se desarrollan modelos en forma secuencial usando el concepto de descomposición, que permite preservar las características estadísticas del proceso a lo largo de diferentes escalas de tiempo. Esto implica que, para modelar lluvias mensuales, primero se construye un modelo anual y después un modelo mensual que proporcione resultados condicionales a la ocurrencia del fenómeno a nivel anual.

Para la modelación anual pueden usarse dos tipos de modelos: auto-regresivos o markovianos (Srikanthan and McMahon, 2001), para modelar la persistencia a largo plazo; y variables aleatorias independientes, en caso de que dicha persistencia no sea significativa. De acuerdo con Salas (1993), generalmente las series hidrológicas definidas en una escala de tiempo anual son estacionarias (excepto por efectos, como el de cambio climático), mientras que las series definidas en una escala menor a la anual son no-estacionarias debido al efecto de estacionalidad en el ciclo anual. Estudios como el realizado por Dean *et al.* (1994) para modelar la precipitación en el valle de Santa Clara, en California, han encontrado estadísticamente apropiado suponer que las lluvias anuales son procesos estacionarios y, por tanto, se modelan de manera sencilla con variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas.

La existencia de estacionalidad puede verificarse mediante la construcción de un correlograma, que sirve para medir la autocorrelación, que es la correlación de una variable consigo misma pero desfasada en el tiempo por una cantidad constante llamada "tiempo de retraso". No se encontró autocorrelación significativa en las estaciones de la región. Se presenta el análisis elaborado en la estación Querétaro, que es la que tiene el mayor número de datos. En la **Figura 3.2** se ve la serie de precipitaciones anuales, desde 1922 hasta el año 2008, y en la **Figura 3.3** su correlograma. En las figuras se observa que las autocorrelaciones obtenidas para todos los retrasos, desde uno hasta 22 años, no son significativas, pues están dentro de los límites del intervalo de confianza del 95 % (en líneas punteadas en la **Figura 3.3**). Todo esto es un argumento a favor para emplear un modelo estacionario. Para contrastar esto último, puede verse en la **Figura 3.4** el correlograma de las lluvias mensuales, en la misma estación. Las series de tiempo que presentan fuertes variaciones estacionales pueden ser identificadas por funciones de correlación que no tienden a cero y presentan valores significativos muy parecidos cada 12 meses (Bras and Rodríguez-Iturbe, 1993), como puede apreciarse en la Figura mencionada.

Para encontrar una distribución de los datos anuales, se empleó el paquete MINITAB, con el que después de probar varias distribuciones pudo observarse un mejor ajuste (de acuerdo con la estadística Anderson-Darling) con la distribución log-normal. En la **Figura 3.5** puede apreciarse que, excepto por el valor mínimo de la lluvia en el año 2000 (187 mm), los demás datos están comprendidos dentro de los límites del intervalo de confianza del 95 %.

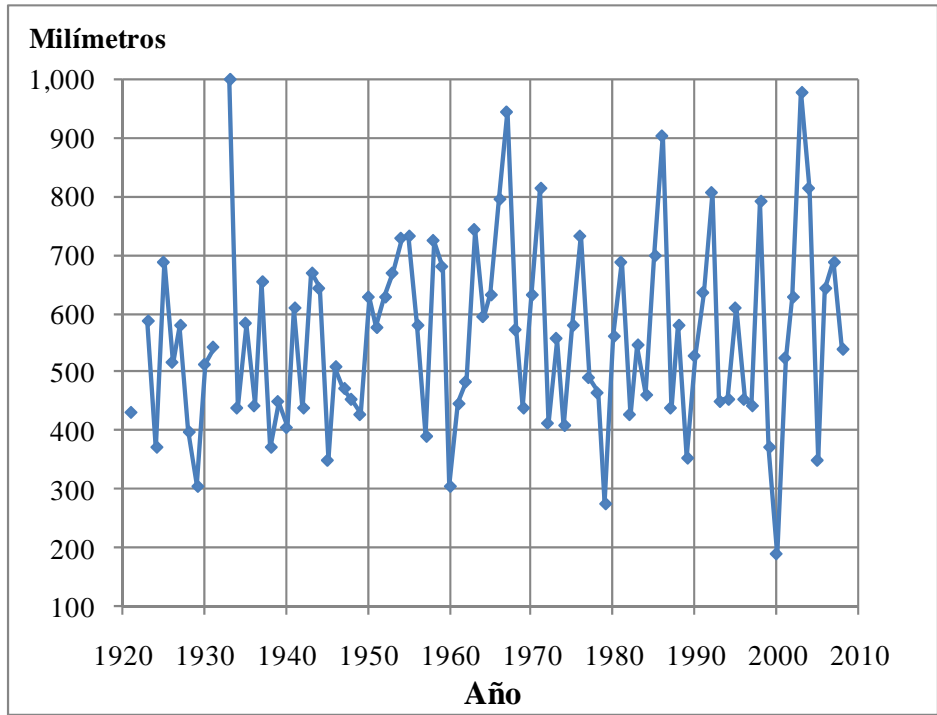


Figura 3.2. Precipitación anual (estación Querétaro).

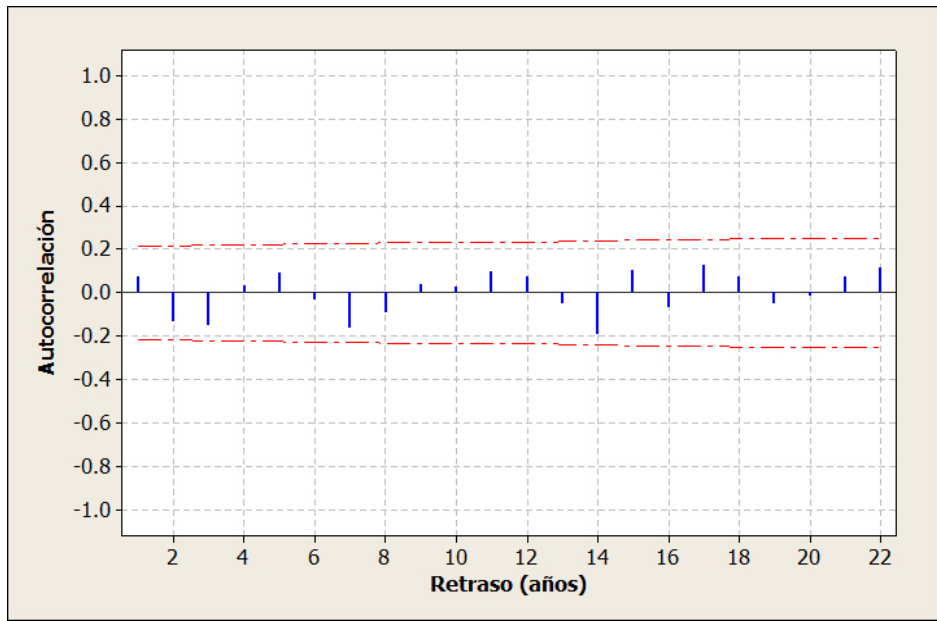


Figura 3.3. Correlograma de la precipitación anual (estación Querétaro).

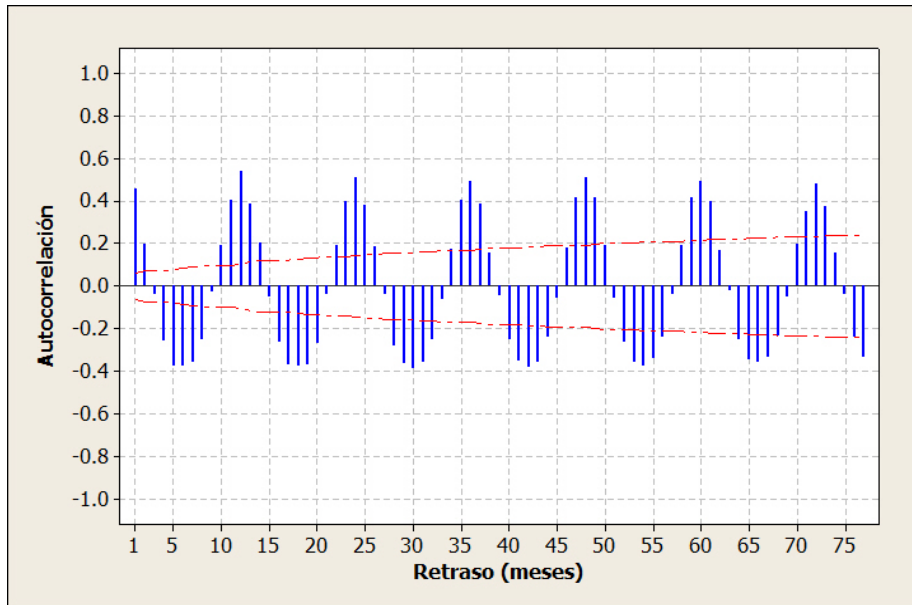


Figura 3.4. Correlograma de la precipitación mensual (estación Querétaro).

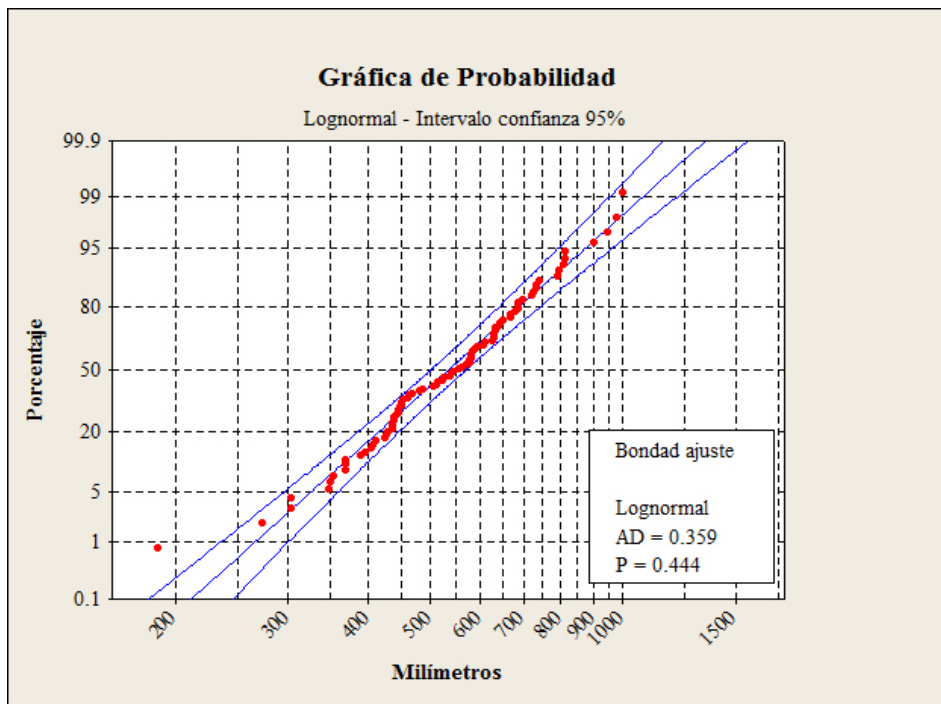


Figura 3.5. Ajuste a distribución log-normal de la precipitación anual (estación Querétaro).

Las estaciones restantes también se ajustaron a un modelo con distribución log-normal. Los parámetros obtenidos en el proceso se muestran en la **Tabla 3.1**.

ESTACIÓN	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Querétaro	557.98	161.64
Juriquilla	581.36	155.16
El Pueblito	565.66	158.97
El Batán	675.43	184.00
Huimilpan	768.21	184.23
El Zamorano	576.11	144.52
Coyotillos	495.40	141.90

Tabla 3.1. Parámetros de la precipitación anual en las estaciones seleccionadas.

Por otra parte, se encontró una fuerte correlación espacial en los datos de precipitación anual entre estaciones, con excepción de la estación El Zamorano. Estos datos se presentan en la diagonal superior de la **Tabla 3.2**. Para comprobarlo, se calcularon los valores-p, que representan la probabilidad de error al rechazar la hipótesis nula de que la correlación entre dos conjuntos de datos, es cero. Pudo observarse (los datos aparecen en la diagonal inferior de la **Tabla 3.2**) que, con excepción de algunos pares de datos –que incluyen a El Zamorano–, estas probabilidades están por debajo del valor usual de 0.05 utilizado para rechazar la hipótesis nula y, por tanto, afirmar que la correlación es significativa.

ESTACIÓN	Querétaro	Juriquilla	Huimilpan	El Batán	El Zamorano	El Pueblito	Coyotillos
Querétaro		0.744	0.598	0.726	0.324	0.771	0.857
Juriquilla	0		0.604	0.605	0.286	0.689	0.736
Huimilpan	0	0.001		0.612	0.492	0.635	0.772
El Batán	0	0.001	0		0.461	0.782	0.632
El Zamorano	0.114	0.286	0.013	0.020		0.183	0.255
El Pueblito	0	0	0	0	0.382		0.866
Coyotillos	0	0.006	0.003	0.027	0.424	0	

Tabla 3.2. Correlación (diagonal superior) y valores-p (diagonal inferior) en los datos de precipitación anual en estaciones seleccionadas.

Para incorporar esta correlación en la modelación de las precipitaciones, se generaron vectores aleatorios X con distribución log-normal multivariada, siguiendo el procedimiento descrito en Law and Kelton (2000). Este procedimiento se basa en el hecho de que si una variable aleatoria Y tiene distribución normal, entonces $X = e^Y$ tiene una distribución log-normal, cuya media y varianza pueden especificarse como funciones de los parámetros de Y . Siendo n el número de estaciones, el procedimiento consta de los siguientes pasos:

- a) Se genera el vector aleatorio $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)^T$ de variables aleatorias independientes, con distribución normal estándar.
- b) Se genera el vector aleatorio $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$ con distribución normal multivariada, media μ' y matriz de varianzas-covarianzas Σ' . Se calcula $Y = \mu' + C'Z$, en donde C' se obtiene de la factorización de Cholesky: $\Sigma' = C'C'^T$.
- c) Se obtiene X tomando la función exponencial del vector obtenido previamente: $X = (e^{Y_1}, e^{Y_2}, \dots, e^{Y_n})$.

En este procedimiento el vector μ' y la matriz Σ' son parámetros del vector Y , por lo que si se quiere que el vector log-normal X tenga media $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ y matriz de varianza-covarianza Σ con elementos $\Sigma_{ij} = \text{Cov}(X_i, X_j)$, estos parámetros tienen que sustituirse en las funciones que relacionan la media y la varianza de X con los parámetros de Y , obteniéndose las siguientes fórmulas para emplear en el procedimiento anterior (Law and Kelton, 2000):

$$\mu'_i = E(Y_i) = \ln\left(\frac{\mu_i^2}{\sqrt{\mu_i^2 + \sigma_i^2}}\right) \quad (3.3)$$

$$\sigma'_{ij} = \text{Cov}(Y_i, Y_j) = \ln\left(1 + \frac{\sigma_{ij}}{|\mu_i \mu_j|}\right) \quad (3.4)$$

Para hacer la desagregación de datos anuales a datos mensuales, se empleó el método de los fragmentos (Srikanthan and McMahon, 2001), que consiste en calcular, para cada uno de los años en que se tengan registros, la fracción de lluvias mensuales con respecto al total anual, obteniendo un conjunto de fracciones que suman a uno y representan distribuciones observadas de la lluvia anual a lo largo de los meses. Cuando se generan lluvias anuales, se toma el conjunto de fracciones con el total anual más cercano al de la lluvia generada, para multiplicar a ésta por las fracciones y, así, obtener un conjunto de lluvias mensuales.

El principal atractivo de este método es que genera lluvias mensuales representativas de las variaciones mensuales. Entre sus desventajas (Srikanthan and McMahon, 2001) se tiene que, primero, las lluvias de diciembre y de enero del siguiente año son independientes; segundo, cuando se simula por un número grande de años se obtendrán repeticiones en el patrón de repartición mensual de las lluvias, sobre todo cuando no se cuenta con series grandes. La primera desventaja no parece ser muy importante en nuestro medio, donde no se presentan lluvias significativas en diciembre y enero. La segunda es relevante en todas las estaciones, excepto la de Querétaro, por lo que se optó por usar sólo datos de esta estación para construir los fragmentos (**Figura 3.6**).

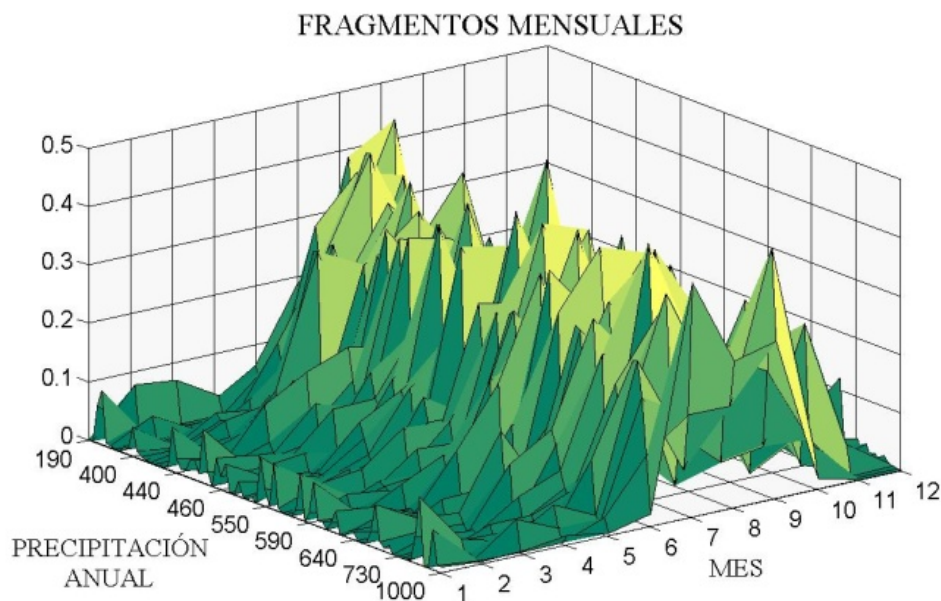


Figura 3.6. Fragmentos mensuales (estación Querétaro).

3.4. Temperatura

Se presenta la estación Querétaro para analizar el tipo de modelo a usar para esta variable. La **Figura 3.7** muestra la temperatura media anual desde el año 1922 hasta el año 2003. A diferencia de lo encontrado con las precipitaciones anuales, las temperaturas medias anuales presentan autocorrelación significativa, la que es particularmente importante para uno y dos años de retraso (**Figura 3.8**) pues pudiera indicar la existencia de una tendencia en la serie. Esto puede corroborarse al hacer el análisis de tendencia lineal, en donde se obtiene la ecuación $Temp = 18.35 + 0.011 * T$, siendo T la variable tiempo, y su coeficiente representa un incremento de 0.011 °C por año, significativo para niveles de confianza mayores al 99 % (la estadística t fue igual a 4.50).

Sin embargo, en la **Figura 3.7** se observa que en los primeros 11 años se tienen temperaturas significativamente menores que en el resto de la serie. Al llevar a cabo un análisis de tendencia lineal para los datos restantes (a partir del año 1933), se encontró que el coeficiente de la tendencia disminuía drásticamente (a 0.0046) y que ya no era significativo a un nivel de confianza del 90 % (la estadística t fue igual a 1.96). Esto pareciera indicar que se tiene un cambio abrupto en esta variable para después seguir con un proceso estacionario, lo cual no concuerda con la percepción de que estos cambios se dan de manera gradual.

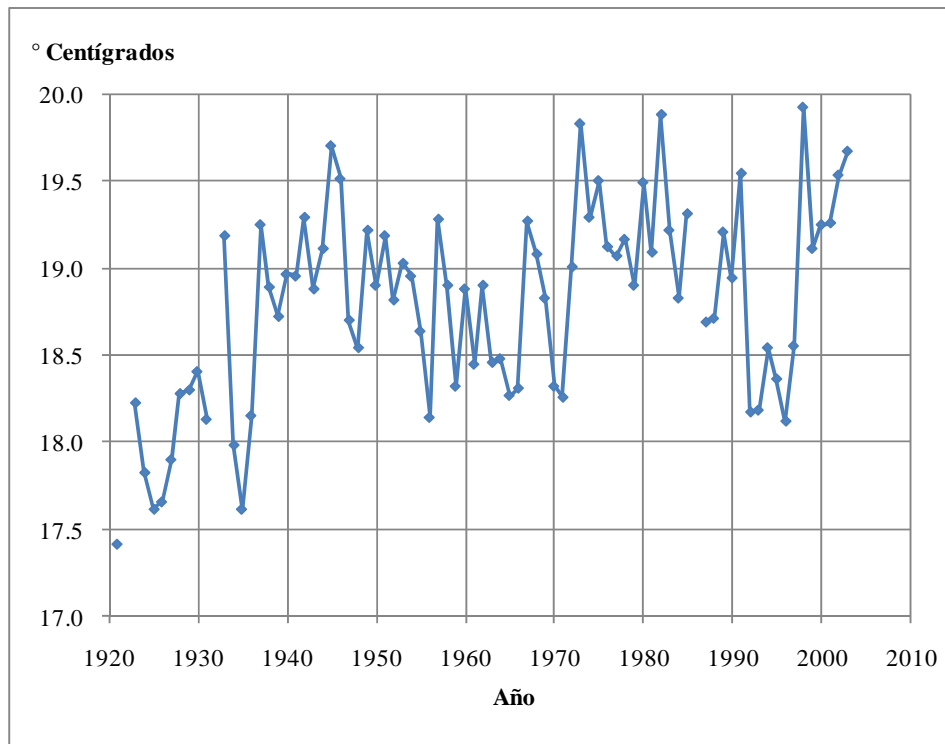


Figura 3.7. Temperatura media anual (estación Querétaro).

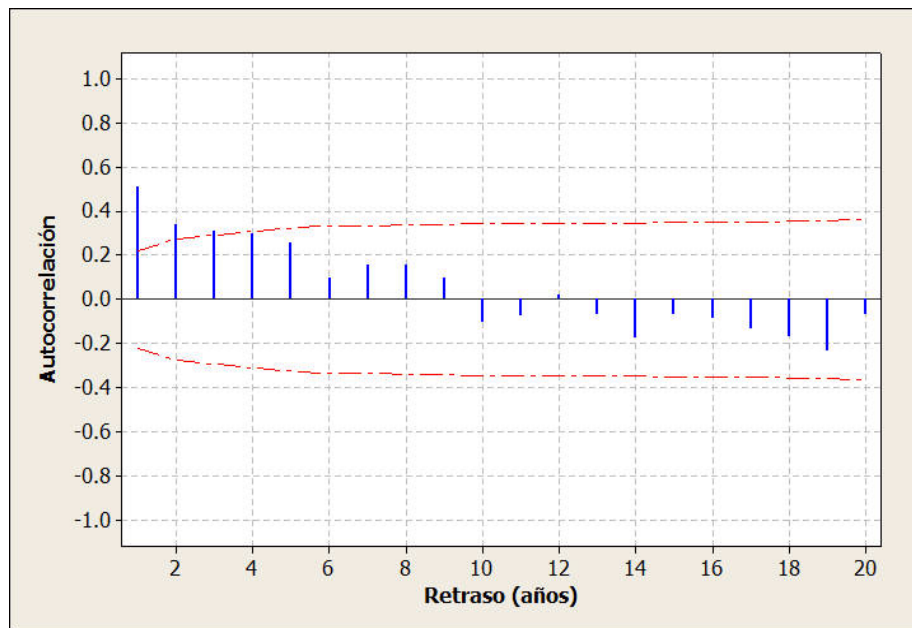


Figura 3.8. Correlograma de la temperatura media anual (estación Querétaro).

Se tiene, por otra parte, que la variación de las temperaturas medias mensuales es muy pequeña. El coeficiente de variación (relación entre la desviación estándar y la media) de las temperaturas medias mensuales va de un valor mínimo de 0.049, en junio, a un valor máximo de 0.073, en enero. En comparación, los coeficientes de variación de las precipitaciones medias mensuales tuvieron un rango de 0.546 a 1.611. Todo esto llevó a la decisión de utilizar sólo valores promedios mensuales de temperatura en cada una de las estaciones consideradas. En la **Figura 3.9** se muestran los valores empleados para la estación Querétaro.

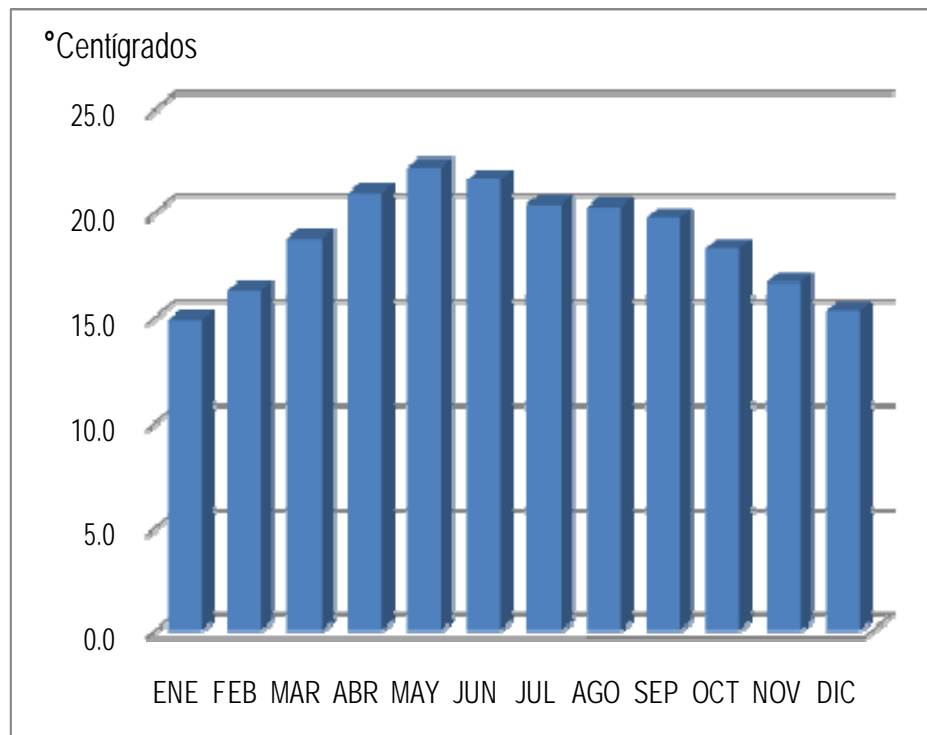


Figura 3.9. Temperaturas medias mensuales (estación Querétaro).

3.5. Esguerrimiento superficial

3.5.1 Método de los números de esguerrimiento

Uno de los métodos más usados para calcular el esguerrimiento superficial a partir de datos de precipitación, es el método de los números de esguerrimiento, desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) al relacionar datos de precipitación, esguerrimiento, características del suelo y cobertura vegetal en cuencas agrícolas pequeñas (Soil Conservation Service, 1972). Posteriormente, el método fue extendido para aplicarse en cuencas urbanas pequeñas (Soil Conservation Service, 1986). Las variables se relacionan a través de:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S_{\max})^2}{P + 0.8S_{\max}}, & \text{si } P > 0.2S_{\max} \\ 0, & \text{encaso contrario} \end{cases} \quad (3.5)$$

en donde:

Q: escurrimiento.

P: precipitación.

S_{\max} : capacidad máxima de retención del suelo.

La expresión fue derivada por el SCS a partir del concepto de abstracción inicial, que es el agua de lluvia que se pierde (intercepción, infiltración, almacenamiento en depresiones) antes de comenzar a escurrir. Con datos calibrados en cuencas agrícolas pequeñas, el SCS estimó la abstracción inicial como un 20 % de la capacidad máxima de retención del suelo, lo que queda expresado en la ecuación (3.5). El parámetro S_{\max} está relacionado con las características del suelo y de la cobertura vegetal mediante el número N, como se indica en la siguiente expresión, dada en milímetros:

$$S_{\max} = \frac{25400}{N} - 254 \quad (3.6)$$

El valor de N se obtiene de tablas (Rawls *et al.*, 1993) disponibles para diversas categorías de vegetación y cuatro tipos de suelos (de acuerdo con sus condiciones hidráulicas). Sus valores van desde 40 (coberturas muy permeables) hasta un máximo de 100 (coberturas impermeables). Dado que el escurrimiento depende de las condiciones previas de humedad del suelo, se consideran tres de estas condiciones: normal (condición II), seca (condición I) y húmeda (condición III). El SCS publicó tablas para ajustar los números N a las dos últimas condiciones, pero también hay expresiones que relacionan a la condición normal (representada con el número N_2) con las otras dos condiciones. La primera expresión (3.7) proporciona un número N_1 para condiciones secas, y la segunda (3.8) un número N_3 para condiciones húmedas (Limbrunner *et al.*, 2005):

$$N_1 = \frac{N_2}{2.334 - 0.01334N_2} \quad (3.7)$$

$$N_3 = \frac{N_2}{0.4036 + 0.0059N_2} \quad (3.8)$$

Para seleccionar la condición a utilizar, el Soil Conservation Service usó la precipitación durante los cinco días anteriores, como puede verse en la **Tabla 3.3** (tomada de Dingman, 2002 y convertida en milímetros):

CONDICIÓN	HUMEDAD DEL SUELO	TEMPORADA INACTIVA	TEMPORADA DE CRECIMIENTO
I	Seca, pero arriba del punto de marchitamiento	< 12.7	< 35.6
II	Promedio	12.7-27.9	35.6-53.3
III	Cerca de la saturación	> 27.9	> 53.3

Tabla 3.3. Lluvia durante los cinco días previos (en milímetros) para determinar la condición de humedad del suelo.

Como puede observarse, esta Tabla se orienta hacia datos en terrenos agrícolas, pero hay criterios más simples. En nuestro país (Aparicio, 2005) se usa la condición I para una lluvia acumulada en los cinco días previos de 25 mm, la condición II para valores de esta variable entre 25 y 50 mm, y la condición III con más de 50 mm. Este criterio fue el que se empleó en el presente trabajo.

Para no tener discontinuidades fuertes al pasar de una condición de humedad a otra, pueden interpolarse los valores de acuerdo con el porcentaje de humedad en el suelo (lo cual se describe en Limbrunner *et al.*, 2005). En esa referencia, se toma como base para la interpolación el que la condición I se tiene para el 0 % de humedad, y la condición III para el 100 %, de donde se deduce la ecuación (3.9).

$$N(t) = (N_3 - N_1) \frac{S(t-1)}{S_{\max}} + N_1 \quad (3.9)$$

Esta ecuación se aplica para una determinada categoría, y los índices indican que N se estima en el tiempo t, usando la estimación de humedad en el periodo de tiempo anterior.

Se ha reconocido que las condiciones previas de humedad no son sino uno de varios factores que determinan la gran variabilidad observada en la determinación del número N (Ponce and Hawkins, 1996). Otras causas importantes de variabilidad son los efectos de los cambios espacial y temporal de las lluvias, lo que ha llevado a considerar a las condiciones de humedad como un indicador de variabilidad, correspondiendo la condición II a una probabilidad acumulada del 50 % de obtener un escurrimiento para un nivel de precipitación dado, y las condiciones I y III a probabilidades del 10 y del 90 %, respectivamente.

3.5.2 Ventajas y desventajas del método de los números de escurrimiento

El método de los números de escurrimiento ha sido considerado un método conceptual, que tiene la simplicidad de los métodos empíricos y algunas ventajas de los métodos físicos (Ponce

and Hawkins, 1996), pues sólo depende de un parámetro (N) y, sin embargo, éste incorpora factores físicos que permiten explicar el escurrimiento. El método puede fácilmente extenderse de agregado a distribuido (o semidistribuido), al estimar N para cada unidad homogénea y de esa manera puede ser usado para estimar el impacto de cambios en la cobertura vegetal.

El método puede fácilmente extenderse de agregado a distribuido (o semi-distribuido), como es implementado en el modelo SWAT (Neitsch *et al.*, 2002). En este modelo la cuenca es dividida en partes homogéneas, en cada una de las cuales se aplica el método de los números de escurrimiento para posteriormente considerar la interacción entre ellas al momento de integrar sus resultados. El modelo simula escurrimientos superficiales, además de estimar el arrastre de sustancias químicas y sedimentos. La estructura del modelo permite predecir el impacto en estos resultados al haber cambios en la cobertura vegetal de la cuenca, lo cual es una de las razones por la cual el método de los números de escurrimiento sigue siendo aplicado de manera muy amplia.

Sin embargo, debe tomarse en cuenta que fue calibrado con datos de sólo algunas cuencas en Estados Unidos, por lo que su utilización en otras partes debe ser llevada a cabo con cautela (Ponce and Hawkins, 1996), procurando, de ser posible adaptar los parámetros a las condiciones locales, incluyendo el valor de la abstracción inicial de 20 % de la capacidad máxima de retención del suelo. El método presenta, además, una gran variabilidad en sus resultados, sobre todo cuando se tienen valores pequeños de N y de la precipitación, para los que cambios pequeños en la precipitación antecedente pueden llevar a cambios muy grandes en los escurrimientos. Lo anterior puede, sin embargo, ser el reflejo de un fenómeno que, en sí mismo, presenta una gran variabilidad, por lo que de acuerdo con Ponce and Hawkins (1996) la debilidad real estriba en no ofrecer un lineamiento claro para utilizar la precipitación antecedente.

3.6. Aplicación mensual del método de los números de escurrimiento

El método de los números de escurrimiento fue diseñado para usarse en eventos simples. Y aun cuando parece inmediata su utilización con datos de precipitación diaria, no lo es tanto cuando se trata de aplicar con datos mensuales. Algunos autores como Garen and Moore (2005), inclusive critican su empleo a nivel diario. Sin embargo, Wurbs and Sisson (1999) han encontrado que el uso del método a nivel mensual proporciona aproximaciones razonables, al transferir flujos mensuales de corrientes aforadas a corrientes no aforadas. Por su parte, Golding (1997) afirma que, en vista de la gran variación observada en los volúmenes de escurrimiento producidos por una precipitación determinada, el ajuste de datos de medición a la expresión dada por los números de escurrimiento mejorará con el empleo de datos agregados temporalmente. En nuestro trabajo, esto significa que la estimación de escurrimientos mensuales a partir de lluvia mensual, tendrá menos variación que si estimáramos escurrimientos diarios a partir de lluvia diaria.

La fórmula (3.5) no puede utilizarse directamente, pues para un mismo valor de precipitación el escurrimiento debe ser bastante mayor cuando ocurre en un solo evento (o inclusive en un día)

que cuando ocurre a lo largo de todo un mes. Hay, sin embargo, procedimientos para aplicarlo a nivel mensual. En Wurbs and Sisson (1999) se observan escurrimientos mensuales en cuencas aforadas, y usando el número de escurrimiento promedio en ella se obtiene, mediante la inversa de la ecuación (3.5), la altura de precipitación que ocasionaría el escurrimiento observado. Este valor puede interpretarse como una precipitación modificada para corregir por los efectos de agregación. Se usa para modificar la precipitación mensual en cuencas no aforadas (similares), que requiere la ecuación (3.5) para estimar escurrimientos mensuales.

En este trabajo se utilizó un procedimiento similar, pero, dado que prácticamente no se tienen datos de cuencas aforadas, en vez de la precipitación se modificó el parámetro N para corregir por la agregación de datos. El procedimiento sigue la misma idea de modificar el valor de N empleado en Luna (2000), en donde se aplicó a nivel anual. En nuestro caso, el siguiente procedimiento se aplicó a todos los valores de N a considerar, y en todas las estaciones que contenían datos diarios. Los pasos a seguir, fueron:

- Dado el valor N, se usó la ecuación (3.5) para calcular escurrimientos diarios con los datos de precipitación diaria y precipitación en los cinco días anteriores. Estos escurrimientos se acumularon para obtener escurrimientos mensuales.
- Para cada mes, dada la precipitación mensual, se calcula el valor de N' que daría el volumen de escurrimiento mensual obtenido previamente con la fórmula (3.5). Para esto, primero se invierte esa ecuación para tener:

$$S_{\max} = 5 \left[P + 2Q - \sqrt{4Q^2 + 5PQ} \right] \quad (3.10)$$

en donde se usa la raíz negativa para cumplir con la condición de que la precipitación sea mayor a la abstracción inicial. Después se usa el valor S_{\max} para obtener N' a partir de (3.6).

Posteriormente, se tienen para cada valor de N considerado una serie de datos (P-N'), de los cuales sólo se tomaron los que se derivaron de escurrimientos positivos. Estos valores se ajustaron a una curva, en donde dada una precipitación mensual, se tiene el valor modificado de N a utilizar en la ecuación (3.5) para obtener escurrimientos mensuales equivalentes. Para el ajuste, se usó una función de la forma:

$$N' = \frac{1}{\alpha + \beta P} \quad (3.11)$$

Esta familia de funciones fue elegida tras probar distintas opciones de curvas con pendiente negativa y segunda derivada decreciente, como sugieren los datos obtenidos. Asimismo, los datos (P-N) debían cumplir (cuando menos la mayor parte de las veces) con la condición $P > 2S$, límite teórico para que exista el escurrimiento. En Lewis *et al.* (2000) se graficó la condición de

frontera de esta desigualdad, para que al sustituir S en (3.6) se obtuviera la envolvente teórica de estos datos, la cual se muestra en la ecuación (3.12) y en la **Figura 3.10**.

$$N = \frac{5080}{50.8 + P} \quad (3.12)$$

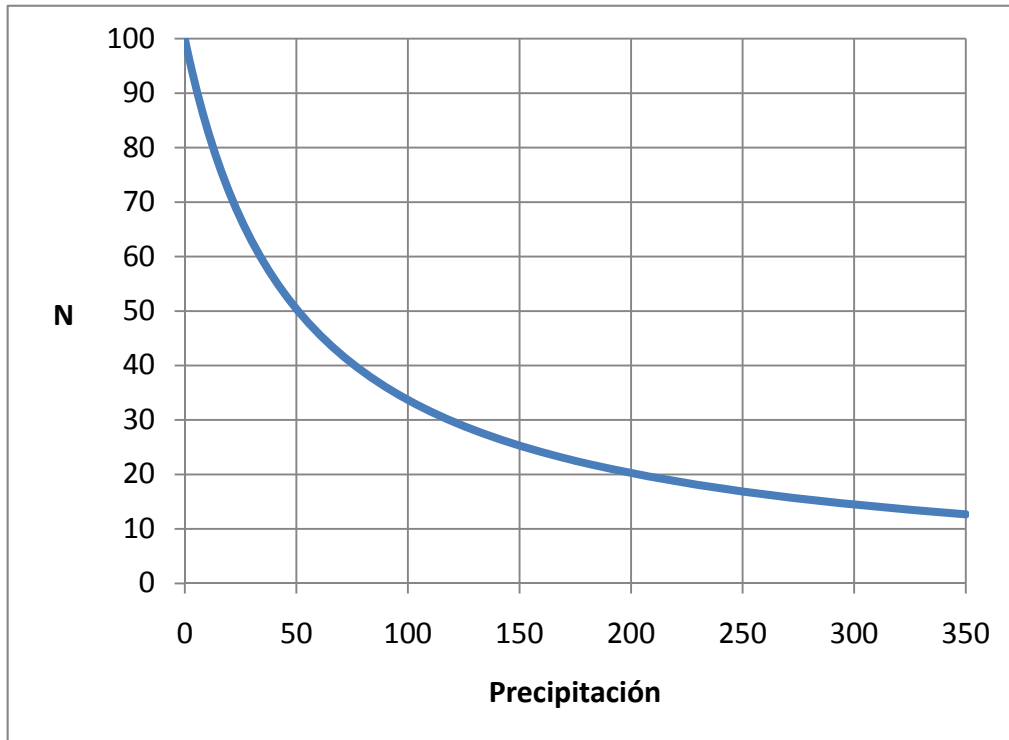


Figura 3.10. Envolvente de datos precipitación-número de escurrimiento.

La función elegida para el ajuste de datos (3.11) sería igual a esta envolvente, con los parámetros $\alpha = 0.001$ y $\beta = 0.00019$. Estos datos para la estación Huimilpan y un valor de N igual a 90, junto con la curva de la forma (3.11) ajustada, se muestran en la **Figura 3.11**. La **Figura 3.12** es para la misma estación, pero una N igual a 70. En general, la curvatura aumenta al disminuir los valores de N debido a que, al disminuir el escurrimiento, se acercan los valores a la envolvente dada por la ecuación (3.12). En la **Tabla 3.4** se presentan los parámetros de las curvas ajustadas para las diferentes estaciones y valores de N empleados. Estos valores se transfirieron a las subcuencas, usando polígonos de Thiessen.

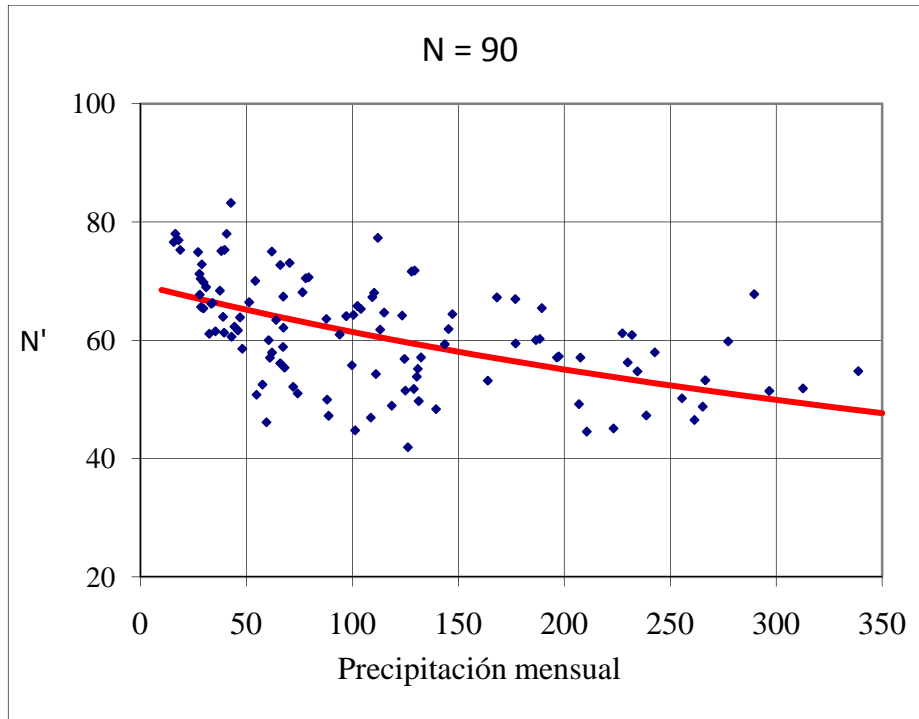


Figura 3.11. Curva Precipitación mensual -N', para N = 90, estación Humilpan.

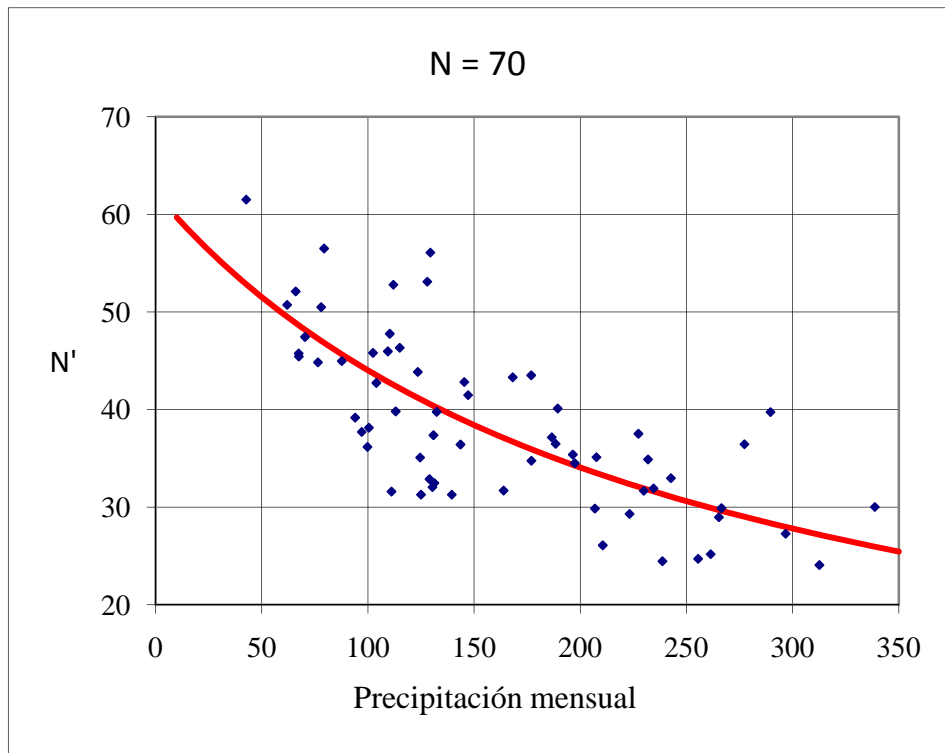


Figura 3.12. Curva Precipitación mensual -N', para N = 70, estación Humilpan.

	ESTACIÓN		
	Querétaro	Batán	Huimilpan
N = 90			
R ²	0.356747	0.277159	0.255136
α	0.013823	0.014349	0.014475
β	0.000029	0.000020	0.000017
N = 80			
R ²	0.353663	0.238421	0.307472
α	0.016057	0.017641	0.016862
β	0.000051	0.000033	0.000035
N = 70			
R ²	0.552831	0.407057	0.542195
α	0.015605	0.017846	0.016094
β	0.000088	0.000063	0.000066
N = 60			
R ²	0.759001	0.625068	0.723723
α	0.012588	0.016005	0.014727
β	0.000134	0.000099	0.000101

Tabla 3.4. Parámetros de la curva (P-N').

Posteriormente se aplicaron estos datos en forma semidistribuida, dividiendo la región en unidades homogéneas pero sin tomar en cuenta condiciones de frontera. Las coberturas del suelo consideradas, y su extensión en cada una de las subcuencas, se tienen en la **Tabla 3.5**. Estas coberturas se calcularon a partir de la actualización de los estudios realizados por el Centro Queretano de Recursos Naturales, para determinar el uso del suelo y vegetación en los municipios del sur del estado y en la ZMQ (CQRN, 2001; CQRN, 2002). Las coberturas actualizadas se presentan en la **Figura 3.13**.

COBERTURA	SUBCUENCA		
	Río Querétaro	Arroyo Jurica	Río El Pueblito
Bosque	1,541	2,207	4,547
Matorral	53,088	15,641	10,071
Pastizal natural	3,638	1,513	2,082
Pastizal inducido	1,197	53	2,376
Agricultura	49,540	17,223	21,766
Erosionado	1,116	1,286	1,371
Urbano	11,891	5,707	3,264
TOTAL	122,010	43,631	45,478

Tabla 3. 5. Coberturas de suelo utilizadas, y su superficie en hectáreas.

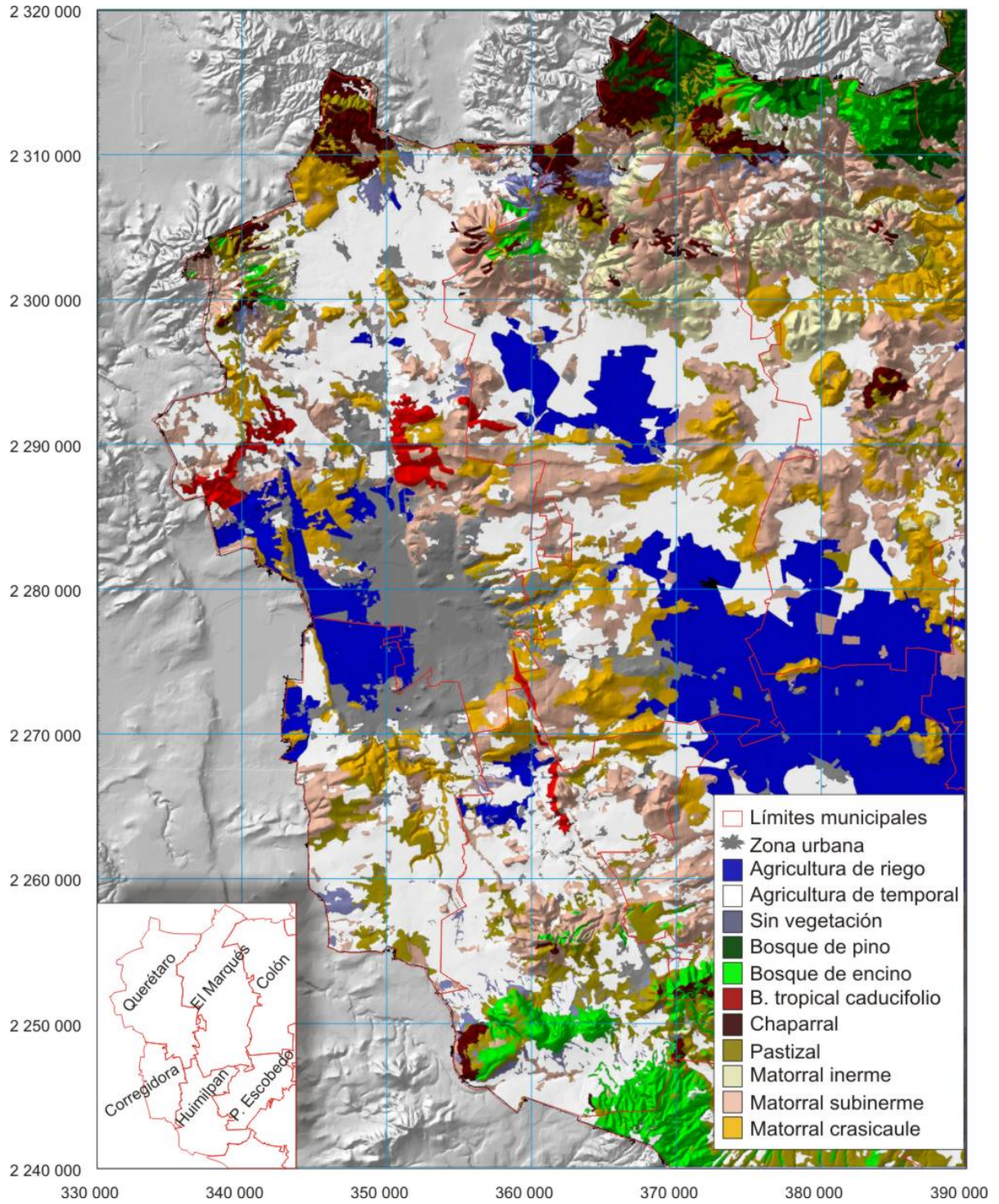


Figura 3.13. Uso del suelo en la región.

Finalmente, las unidades se subdividieron de acuerdo a los tipos de suelo definidos con el método de los números de escurrimiento. Por cada unidad y por cada subcuenca se determinó un número promedio, el cual fue modificado de acuerdo con las funciones (3.11) y con los parámetros de la **Tabla 3.4**.

3.7. Humedad del suelo y percolación

La evapotranspiración (Dingman, 2002) mide todos los procesos por los cuales el agua se transforma en vapor, e incluye principalmente la evaporación en cuerpos de agua, suelo desnudo y cubiertas vegetales, así como la transpiración de las hojas de las plantas. La evapotranspiración potencial es la tasa a la que ocurre la evapotranspiración cuando se tiene acceso a una cantidad ilimitada de agua. La estimación de esta variable, junto con la de la humedad de un suelo, es usada para estimar la evapotranspiración real en casos específicos (Deliang *et al.*, 2005). Dado que la evapotranspiración potencial depende de la cobertura del suelo existente, se definió la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 1998) como la evapotranspiración potencial de un pasto corto. Así, esta variable es independiente de cualquier tipo de cobertura y sirve de referencia para calcular la evapotranspiración potencial en otros tipos de cobertura.

Los métodos de medición se clasifican de acuerdo con sus necesidades de datos. Los principales métodos (Dingman, 2002) son los basados en temperatura, en radiación, en los que combinan los dos primeros tipos de datos, y en los que la derivan a partir de datos de evaporación mediante evaporímetros.

El método combinado de Penman-Montheit es considerado uno de los más precisos y universales, por basarse en principios físicos. Se emplea como el único método de referencia por la Food and Agriculture Organization (Allen *et al.*, 1998). Ha sido también usado como referencia para comparar con otros métodos en regiones específicas, como China (Deliang *et al.*, 2005) y Suiza (Xu and Singh, 2002). Sin embargo sus requerimientos de datos meteorológicos –como la radiación neta y el flujo de calor– hacen que no puedan ser aplicados de manera amplia (Deliang *et al.*, 2005; Singh and Xu, 1997). Por ello, los métodos basados sólo en datos de temperatura aún se usan en forma extensa. De acuerdo con Xu and Singh (2001), ante problemas de disponibilidad de datos tendrán que seguir empleándose estos métodos, pero convendría calibrarlos con datos locales. Así, encontraron que métodos como los de Thorntwaite, Blaney-Criddle modificado, y Hargreaves, proporcionaron resultados adecuados al calibrarse con datos locales en una región de Ontario, Canadá.

En este trabajo –debido a la poca disponibilidad de datos– se utilizará un método relacionado con el método de Thorntwaite, que mide la evapotranspiración de modo empírico utilizando sólo datos promedio de temperaturas y número de horas-luz diarias. Diversos autores encontraron similitud entre la relación empírica de Thorntwaite y la expresión para estimar la presión de saturación del vapor. Así, se obtuvo la expresión desarrollada por Hamon (Dingman, 2002).

$$ETP = 29.8D \frac{e_a^*(T_a)}{T_a + 273.2} \quad (3.13)$$

en donde:

ETP: evapotranspiración potencial en mm./día.

D: número de horas-luz diarias promedio.

$e_a(T_a)$: presión de saturación del vapor a la temperatura media diaria.

T_a : Temperatura media diaria en °C.

La expresión para la presión de saturación del vapor se obtiene como:

$$e_a^*(T_a) = 0.611 \exp\left(\frac{17.3 T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (3.14)$$

Dadas la ecuaciones (3.1) y (3.2) y dejando la estimación de la percolación para una etapa posterior (tal como está en Xu and Vandewiele, 1995), la determinación de la humedad del suelo puede calcularse al estimar la evapotranspiración con los datos de precipitación, escurrimiento y evapotranspiración potencial.

Para calcular la evapotranspiración se han descrito condiciones mínimas que deben cumplirse, como las siguientes, derivadas a partir de principios físicos básicos en Xu and Vandewiele (1995):

- $ET(t)$ es una función creciente de $P(t)$ y $S(t)$.
- $ET(t)=0$ si $S(t)=0$ ó $ETP(t)=0$.
- $ET(t) \leq ETP(t)$.
- $ET(t) \leq S(t)$.
- $ET(t) \rightarrow \infty$ cuando $S(t) \rightarrow \infty$

Expresiones como la siguiente (Xu and Vandewiele, 1995) son típicamente empleadas para calcular $ET(t)$, y cumplen con las condiciones anteriores:

$$ET(t) = \text{Min}\left\{S(t)\left(1 - e^{-aETP(t)}\right), ETP(t)\right\} \quad (3.15)$$

en donde la constante a debe ser calibrada con datos locales.

Ante la falta de datos para hacer esta calibración, en este trabajo se usará una fórmula más sencilla que también cumple con las condiciones anteriores, y es tomada de Limbrunner *et al.* (2005). En esta fórmula, la evapotranspiración se reduce proporcionalmente con la evapotranspiración potencial de acuerdo al porcentaje de humedad del suelo con respecto a la humedad máxima, con lo que se toma en cuenta el carácter decreciente de la

evapotranspiración bajo condiciones de baja humedad. La ecuación que representa este proceso, es:

$$ET(t) = \frac{S(t)}{S_{\max}} ETP(t) \quad (3.16)$$

La humedad máxima se considera, por simplicidad, igual a la capacidad máxima de retención del suelo, en el método de los números de escurrimiento, ecuación (3.6). En Limbrunner *et al.* (2005) se calcula la percolación a partir del “exceso de humedad” SS , considerando que toda la humedad, después de haber descontado la evapotranspiración, desciende hasta las capas saturadas:

$$SS(t) = S(t-1) + I(t) \quad (3.17)$$

$$PC(t) = \begin{cases} SS(t) - S_{\max} & \text{si } SS(t) > S_{\max} \\ 0, & \text{de otra manera} \end{cases} \quad (3.18)$$

En el Acuífero del Valle de Querétaro, dada la existencia de una secuencia superficial de arcillas y limos que pueden funcionar como acuitardos (Carreón-Freyre *et al.*, 2005), la recarga vertical puede ser retardada o impedida, dando como resultado que la expresión (3.18) sobrevalore demasiado este proceso, por lo que se usará una forma más sencilla:

$$PC(t) = kS(t-1) \quad (3.19)$$

en donde k es un coeficiente de infiltración profunda, cuyo valor, ante la imposibilidad de estimarlo de modo más o menos preciso, se hará variar en la simulación desde valores grandes –equivalentes a la recarga producida por los modelos elaborados para el Acuífero del Valle de Querétaro (CEA, 2002)– hasta valores más pequeños, a fin de capturar la sensibilidad de este parámetro en los diferentes escenarios a considerar. Asimismo, se consideraron recargas laterales a partir de estimaciones de CNA (1999).

4. USOS DEL AGUA

Para los fines de este trabajo, se consideraron los cuatro principales usos del agua: agrícola, pecuario, doméstico, e industrial. El primero se estimó mediante un modelo. Los otros tres se estimaron a partir de coeficientes unitarios que se aplicaron a sus actividades más representativas.

4.1. Uso agrícola

La determinación detallada del uso consuntivo del agua en el sector agrícola ha sido estimada en nuestro país (Aparicio, 2005) usando métodos para calcular evapotranspiración basados en datos de temperatura, principalmente Thorntwaite y Blaney-Criddle. Este último es el que se empleará en este trabajo. A nivel mensual el método usa, principalmente, datos de temperaturas medias, número medio de horas-luz, tipos de cultivo y duración del ciclo vegetativo.

Siguiendo el desarrollo de Xu and Singh (2001), se calcula el uso consuntivo (para cada cultivo) con la siguiente expresión:

$$ET_i = k_i P_i (0.46 T_i + 8.13) \quad (4.1)$$

en donde:

ET_i : evapotranspiración en mes i , mm.

k_i : coeficiente de desarrollo parcial durante el mes i .

P_i : porcentaje de horas-luz del mes i con respecto al total anual.

T_i : temperatura media del mes i en $^{\circ}C$.

En Aparicio (2005) se tienen tablas con valores de P_i y gráficas con coeficientes k_i (**Tabla 4.1**). Finalmente, los requerimientos de agua se obtienen al restar la precipitación obtenida del uso consuntivo, y aplicar una eficiencia total en el riego.

4.2. Uso pecuario

Para determinar los coeficientes de uso unitario, se consultaron fuentes en México: CNA (1999) y Valdez (2005); Estados Unidos y Canadá: Chapagain and Hoekstra (2003), Government of Alberta (2009). Los valores usados presentan grandes diferencias, como puede apreciarse en la **Tabla 4.2**. Estas diferencias pueden explicarse porque en el consumo influye la raza, el tamaño del animal y la temperatura ambiente. Se optó por seleccionar los valores reportados en nuestro país, excepto en los casos en que los datos en el extranjero presentan mayor detalle (por ejemplo, en los datos reportados por Chapagain and Hoekstra, para el consumo del ganado vacuno, se hace la distinción entre ganado lechero y ganado de engorda).

	Maíz	Frijol	Sorgo	Trigo	Cebada	Alfalfa
Enero	0	0	0	1.45	1.25	0.65
Febrero	0	0	0	1.4	1.6	0.75
Marzo	0	0	0	1.2	1.35	0.85
Abril	0	0	0	0.3	0.6	1
Mayo	0.6	0.8	0.7	0	0	1.1
Junio	0.9	1.1	1.1	0	0	1.13
Julio	1.1	1	0.8	0	0	1.12
Agosto	1	0.6	0.55	0	0	1.08
Septiembre	0.8	0	0	0	0	1
Octubre	0	0	0	0	0	0.9
Noviembre	0	0	0	0	0	0.8
Diciembre	0	0	0	1	0.6	0.65

Tabla 4.1. Coeficientes de desarrollo mensual utilizados (Aparicio, 2005).

	CNA	Valdez	Government of Alberta	Chapagain and Hoekstra
Bovinos	60	100	40-110	38-70
Porcinos	50	15	75	14
Ovinos	30	5	8-11.4	7.6
Caprinos	30	5	8-11.4	3.8
Equinos			20-40	
Pollos		3	0.26	0.18-0.30
Guajolotes		5	0.61	

Tabla 4.2. Consumos diarios de agua (en litros por cabeza) para el ganado considerado.

4.3. Uso doméstico

De acuerdo con los datos reportados a la CNA (2008) por organismos operadores, se tiene un consumo estimado de 162 litros por habitante por día (lhd) en la ciudad de Querétaro, por lo que se consideró un consumo promedio, para la ZMQ, de 150 lhd, dado que en poblaciones rurales se tienen menores consumos.

4.4. Uso industrial

Para describir el uso del agua en la industria, se emplean cinco variables (Scharf *et al.*, 2002): entradas de agua, agua reciclada, uso total de agua, agua consumida, y agua descargada. Las entradas se refieren al agua tomada directamente de las fuentes naturales (subterráneas o superficiales). El agua reciclada es la que después de salir de un proceso vuelve a entrar en él, o es usada en otro proceso diferente. La suma de estas dos primeras variables define el uso total de agua en distintos procesos industriales: enfriamiento, lavado, generación de vapor, procesado (agua que entra en contacto con productos finales o intermedios), usos sanitarios,

etc. El agua usada se descompone en dos flujos: agua consumida (agua que se pierde en los procesos; por ejemplo, el agua que forma parte del producto) y agua descargada (agua que se regresa a la naturaleza, ya sea después de un tratamiento o sin tratar). La relación entre estas variables, es (Scharf *et al.*, 2002):

$$U=E+R \quad (4.2)$$

$$D=E-C \quad (4.3)$$

en donde:

E: entradas de agua.

R: agua reciclada.

U: uso total de agua.

C: consumo de agua.

D: descarga de agua.

Para estimar las entradas de agua se usaron como base los índices de extracción industrial reportados en el *Programa Hidráulico de Gran Visión para el Estado de Querétaro* (CNA, 1999). Aun cuando estos índices no están actualizados, dan idea sobre los consumos relativos. Teniendo los datos de consumos globales en el uso industrial (CNA, 1999) y, para el mismo año, los datos de producción en todos los sectores de la industria manufacturera de los censos económicos (INEGI, 2005), se hizo un ajuste global de los índices. Aunque no se tienen estimaciones precisas del agua reciclada, se emplearon estimaciones de esta variable para simular los diferentes escenarios construidos.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

De acuerdo con lo descrito en secciones anteriores, se construyeron cinco módulos de dinámica de sistema: población, hidrología, abasto de agua, uso agrícola y ganadero, y uso doméstico e industrial. Las relaciones entre los módulos se presentan gráficamente en la **Figura 5.1**, en donde pueden verse las principales entradas y salidas de cada módulo, incluyendo las variables externas que, en su mayoría, son las variables clave empleadas en la construcción de escenarios. Estos módulos se implementaron en el paquete VENSIM, y se presenta en las **Figuras 5.2 a 5.6** su representación gráfica.

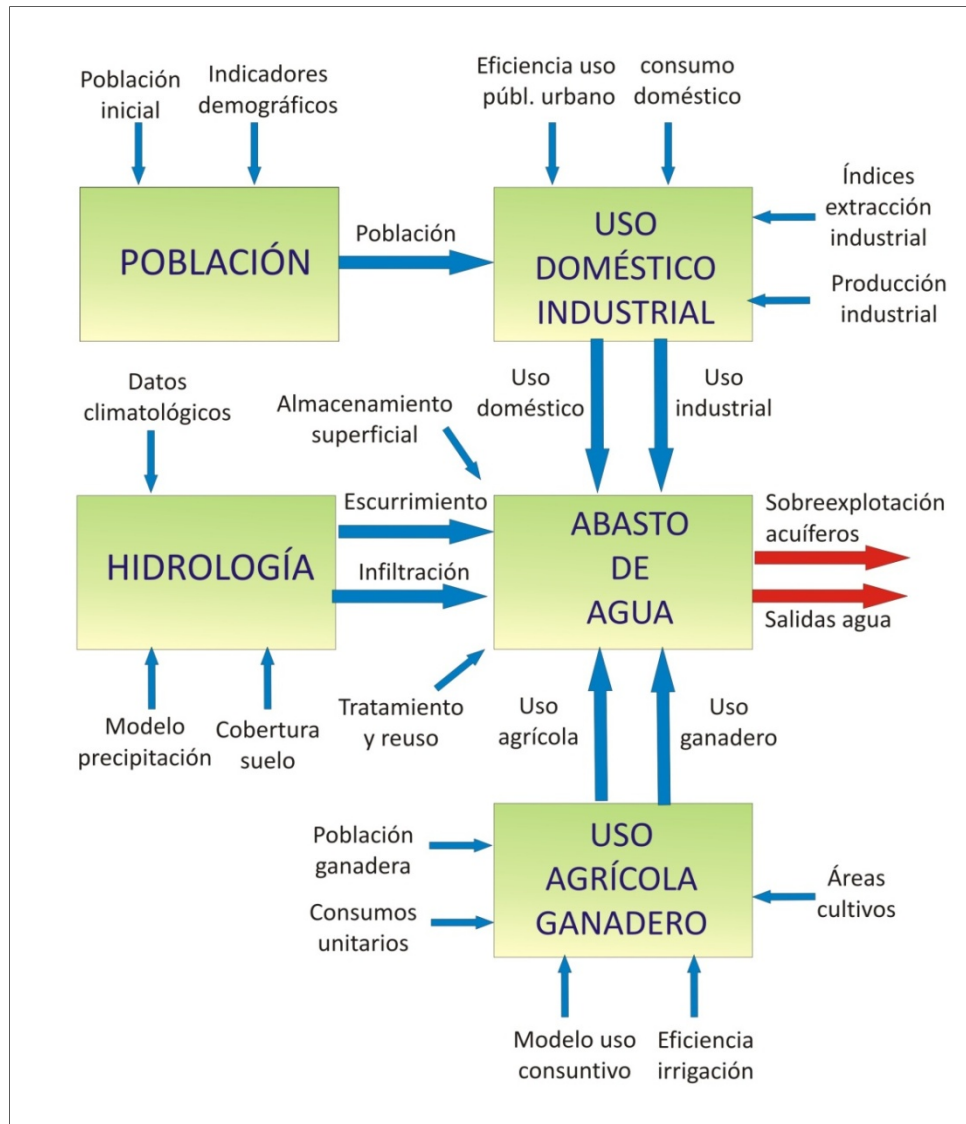


Figura 5.1. Módulos usados en el modelo de dinámica de sistemas.

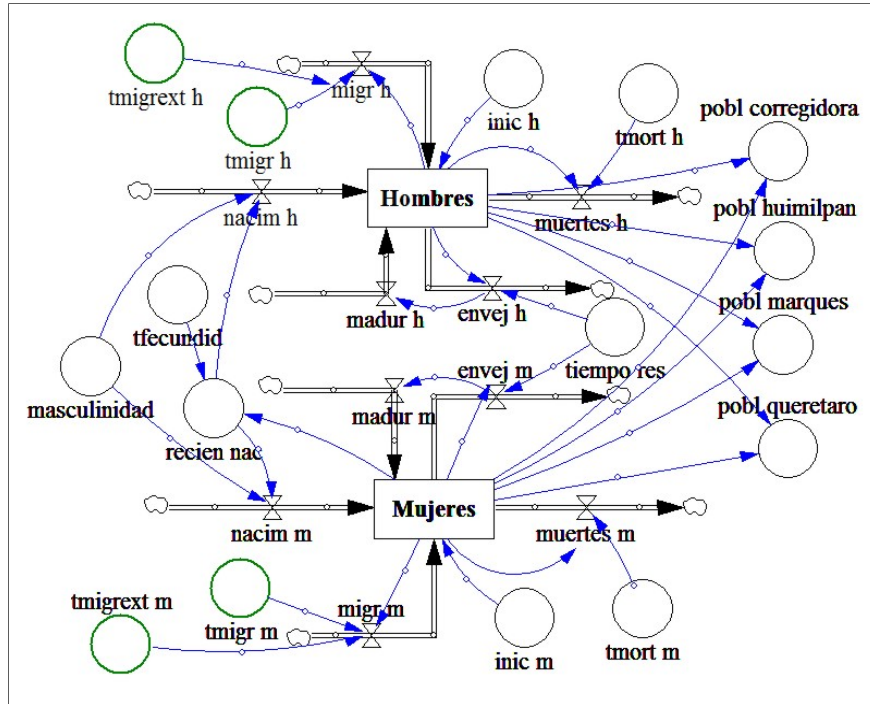


Figura 5.2. Módulo de población.

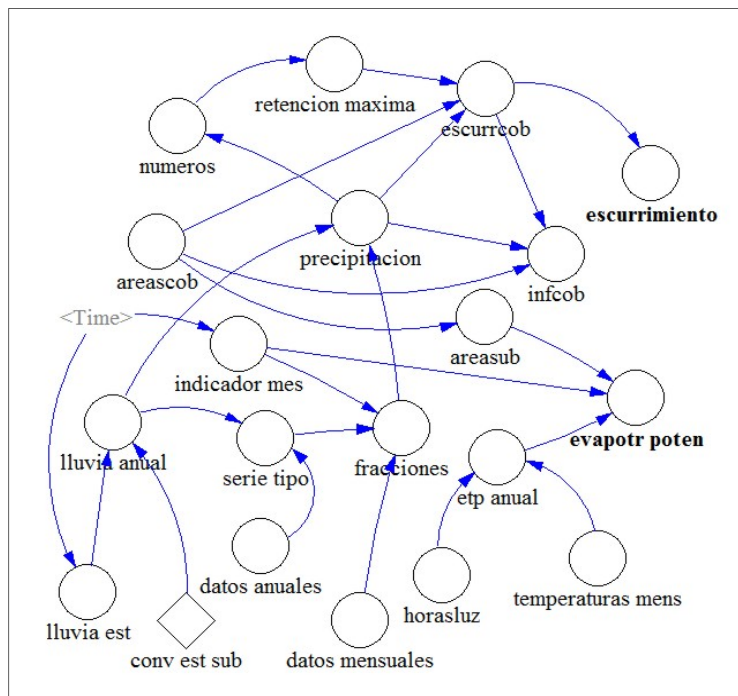


Figura 5.3. Módulo de hidrología.

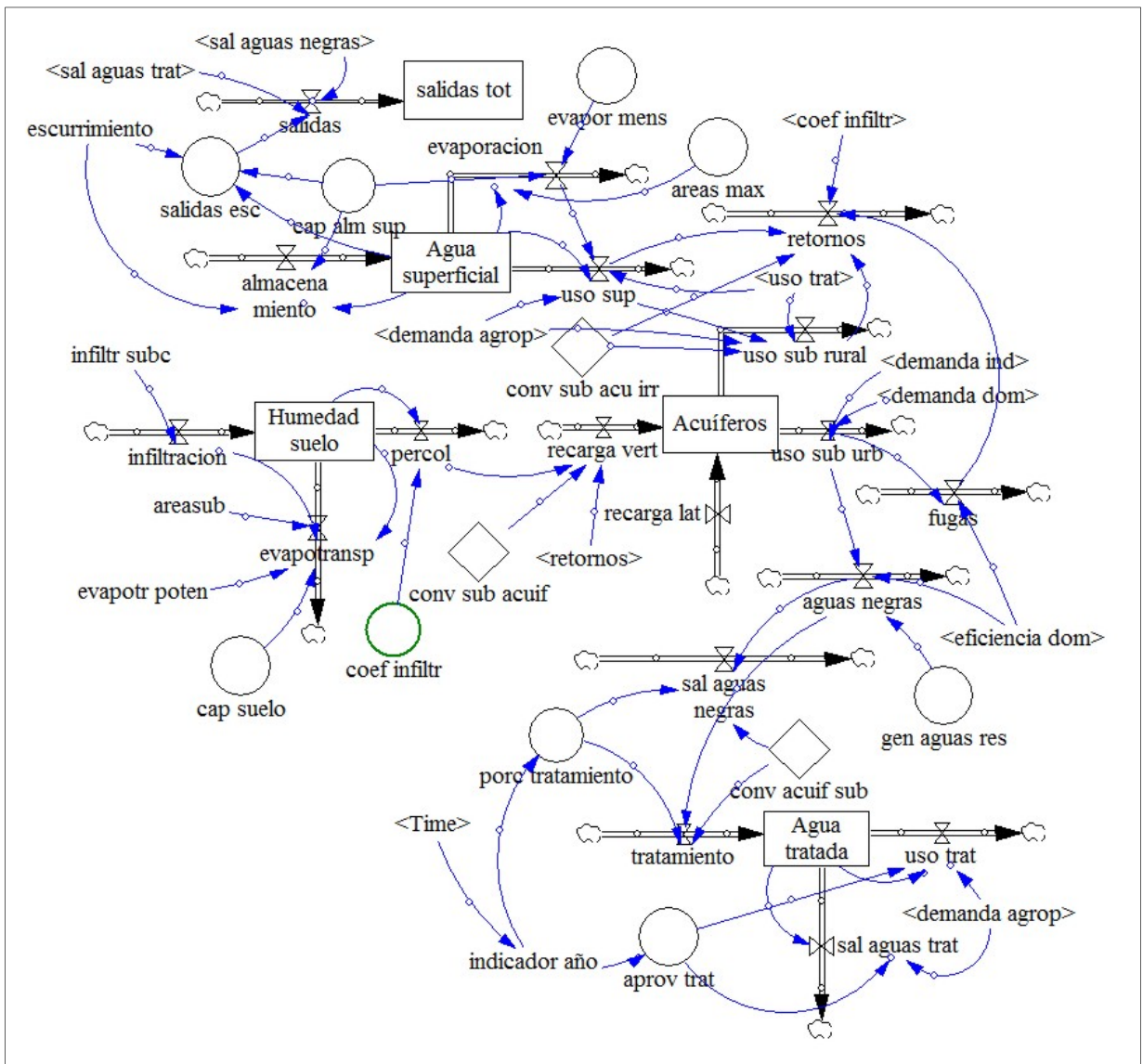


Figura 5.4. Módulo de abasto de agua.

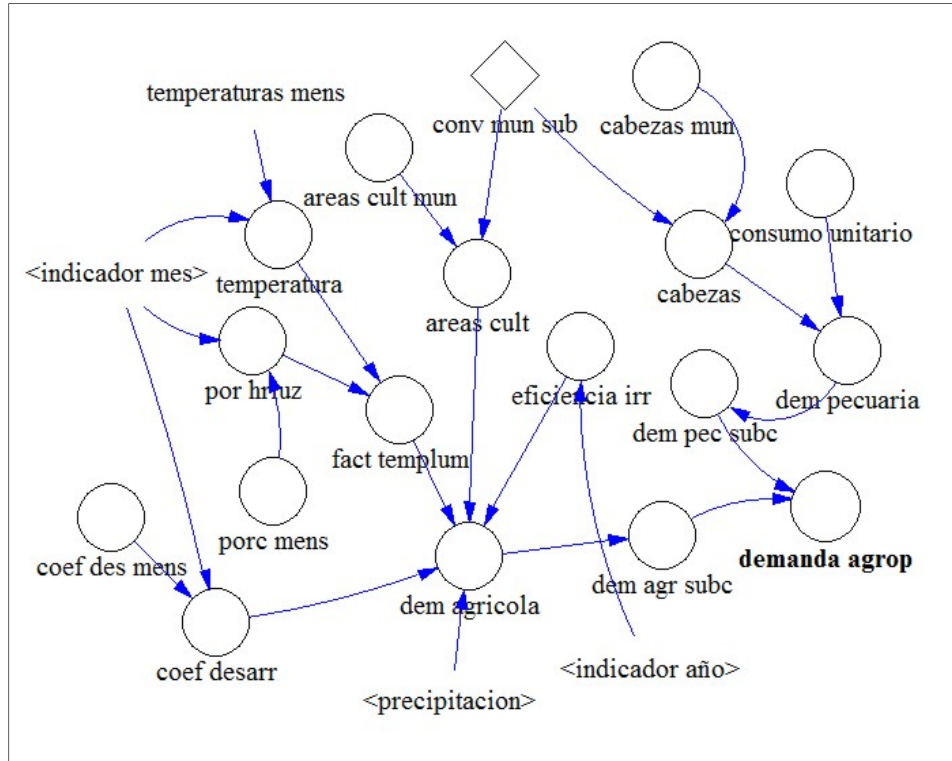


Figura 5.5. Módulo de uso agrícola y ganadero.

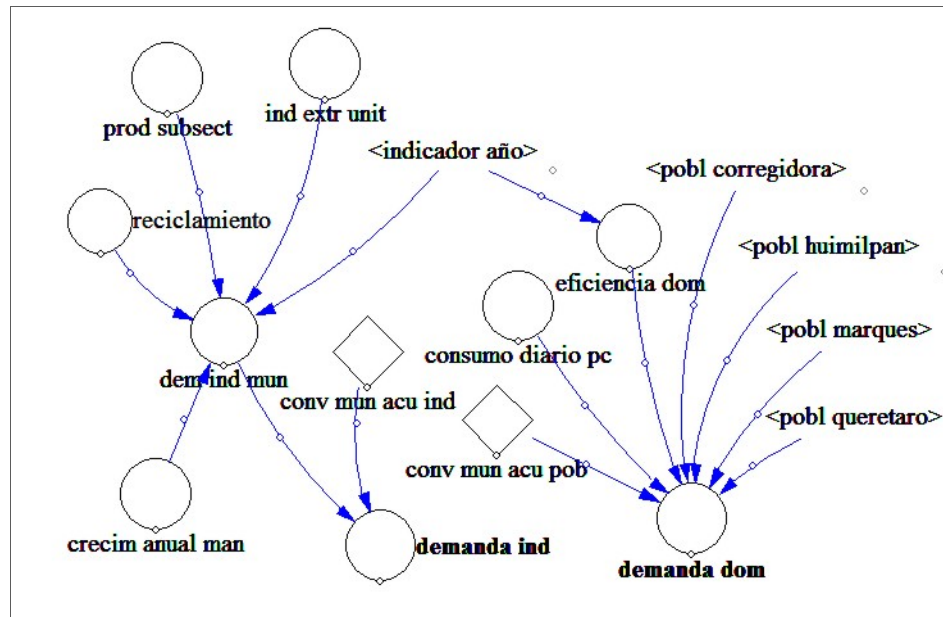


Figura 5.6. Módulo de uso doméstico e industrial.

6. ESCENARIOS

6.1. Introducción

Cuando se utiliza un modelo computacional para explorar posibles evoluciones futuras de un sistema, se tiene el inconveniente de que puede generarse un número demasiado grande de estas posibilidades, haciendo muy difícil su análisis. Una manera de evitar este problema es trabajar con un número pequeño de escenarios, pero que –con base en la experiencia de los autores– sean representativos del futuro del sistema.

La técnica de escenarios empezó a desarrollarse como una alternativa a la elaboración de pronósticos con técnicas estadísticas o cuantitativas, sobre todo en sistemas con alto grado de incertidumbre, en donde no es fácil aplicar este tipo de técnicas (Postma and Liebl, 2005). La metodología de construcción de escenarios fue desarrollada por el grupo de planeación de la empresa petrolera Shell. Los primeros reportes sobre estos métodos fueron elaborados por Pierre Wack (Wack, 1985), entonces jefe de este grupo. Posteriormente, varios de sus integrantes escribieron recuentos más detallados de sus técnicas y fundamentos (Van Der Heijden, 1998), al igual que académicos que, tras colaborar con Shell, escribieron sobre esta metodología (Schoemaker, 1997).

Un escenario es, simplemente, la descripción de un futuro posible del sistema, y su construcción involucra varios pasos (como puede verse en Schoemaker, 1997). De manera simplificada, el proceso cubre las siguientes acciones:

a) Definición de las variables importantes y su comportamiento.- Las variables clave se definen a partir de los temas relevantes del sistema. Para estudiar su comportamiento se analizan sus tendencias y su incertidumbre. Se distinguen dos formas de incertidumbre (Van Der Heijden, 1998): los elementos predeterminados, y la incertidumbre estructural. Los elementos predeterminados son aquellos eventos que, hasta cierto grado, son predecibles. Un ejemplo citado usualmente es la demografía, en donde los cambios en variables –como natalidad o mortalidad– se dan muy lentamente, por lo que pueden predecirse de modo razonable si el periodo de planeación no es muy grande. La incertidumbre estructural (o crítica) está formada por eventos para los que –a diferencia de los anteriores– no existen antecedentes que permitan cuantificar sus probabilidades, llegándose a ellos sólo a través de cadenas de razonamiento causa-efecto.

b) Construcción de escenarios.- Los diferentes escenarios se forman al combinar incertidumbres estructurales y variables clave, mientras que los elementos predeterminados permanecen más o menos constantes en todos los escenarios. No existen reglas generales para llevar a cabo esta actividad, pero sí algunos lineamientos. Uno es que el número de escenarios debe ser pequeño, pues no pueden analizarse muchos de ellos al prepararse para tomar decisiones. Otro es que conviene contrastar las visiones optimistas con las pesimistas, a fin de abarcar un rango amplio de posibilidades. Una forma usual es comenzar con tres escenarios: el escenario tendencial o de referencia, construido a partir de tendencias pasadas que llevan a un futuro probable, y; dos

escenarios más en contraste: un escenario deseado u optimista, y un escenario temido o pesimista.

c) Revisión de escenarios.- Los escenarios se revisan identificando temas que requieren mayor estudio, y se evalúan con respecto a su consistencia. De ser necesarios, se crean nuevos escenarios. Este proceso se repite hasta tener un número suficiente de escenarios, a fin de apoyar la toma de decisiones.

6.2. Definición de variables y escenarios

Para el análisis de escenarios de abasto y uso de agua en la ZMQ, se seleccionaron 10 variables críticas con base en el impacto que tienen sobre el principal problema de esta zona: la sobreexplotación de los acuíferos, sobre todo el del Valle de Querétaro. Entre los principales factores que inciden en este problema, podemos citar:

- Crecimiento acelerado de la población en la ZMQ.
- Elevado consumo agrícola (aunque su crecimiento no sea ya tan importante).
- Baja eficiencia en los usos doméstico y agrícola.
- Niveles bajos de tratamiento y reuso de agua.

El único componente del crecimiento de la población que presenta incertidumbre estructural, es la migración (natalidad y mortalidad son elementos predeterminados). La eficiencia y el consumo en el uso doméstico están muy relacionados con la población pues, en conjunto, determinan el nivel total de su consumo de agua. En el uso agrícola, su consumo lo determinan, sobre todo, el área agrícola, el tipo de cultivos, y la eficiencia.

Por estar muy vinculadas con el uso agrícola, se incluyeron dos variables más: el porcentaje de tratamiento del agua de uso doméstico, y su posterior utilización. Adicionalmente se incluyó una variable relacionada con el aprovechamiento de aguas superficiales, y dos variables relacionadas con la recarga de los acuíferos de la zona, las cuales, aunque deberían ser elementos predeterminados, se consideraron como elementos con incertidumbre, debido al desconocimiento general que se tiene del proceso.

Considerando lo anterior se procedió a construir sólo tres escenarios, de acuerdo con la práctica de tener un escenario tendencial: uno deseado (optimista) y otro temido (pesimista). En los tres escenarios se toma en cuenta la puesta en marcha, en el año 2010, del proyecto Acueducto II.

El escenario tendencial supone que las variables siguen las tendencias recientes: fuerte crecimiento poblacional; aumento moderado en la eficiencia de los usos doméstico y agrícola; consumo doméstico *per cápita* sin cambios; disminución del área agrícola debido al crecimiento de zonas urbanas; aumento moderado en el tratamiento y reuso de agua, y; ninguna acción importante para captar más agua superficial dentro de la cuenca.

El escenario optimista supone un crecimiento poblacional menos acelerado, como consecuencia de una menor migración hacia la zona y un cambio en la administración del agua que da mayor prioridad a las acciones de administración de la demanda, sin descuidar las medidas relacionadas con la oferta. Así, se tendrían aumentos importantes en las eficiencias de los dos principales usos; una disminución importante en el consumo doméstico *per cápita* debido a la concientización de la mayor parte de la población; una disminución de uso agrícola no sólo por la disminución del área de cultivo, sino también por la adopción de cultivos apropiados para la zona; un aumento importante en el tratamiento y reuso del agua, y; un mayor aprovechamiento de agua superficial.

El escenario pesimista supone un crecimiento poblacional más acelerado como consecuencia de una mayor migración hacia la zona, y una administración ineficiente del agua. Como consecuencia, se tendrían aumentos poco importantes en las eficiencias de los dos principales usos; un aumento en el consumo doméstico *per cápita* y en el uso agrícola debido a la percepción de una mayor oferta con el proyecto Acueducto II; aumentos poco importantes en el tratamiento y reuso del agua, y; una menor capacidad en los aprovechamientos de agua superficial, al no reponer las pérdidas por azolvamiento (de manera resumida se presentan estos escenarios en la **Tabla 6.1.**) Algunas variables –como la superficie de agricultura de riego– también tienen valores diferenciados por cultivo, que no se incluyen en la Tabla. Cuando se tienen dos valores, se supone que la variable cambia en forma lineal del primero al segundo valor, a lo largo del periodo a simular.

6.3. Análisis estadístico de datos de salida

Dado que el resultado de una simulación es sólo una realización dentro de un número muy grande de éstas, el modelo tiene que repetirse muchas veces, o simularse por un tiempo muy grande. Las condiciones del modelo impiden usar la segunda opción, por lo que se optó por la primera (método del horizonte finito), en donde se corre el modelo por un tiempo finito pero llevando a cabo un número muy grande de réplicas. El modelo se corrió para 1,000 réplicas, cada una utilizando el mismo estado inicial y secuencias diferentes de números aleatorios. Cada réplica se corrió por 25 años, empezando a mediados del año 2005 (se escogió como punto de partida por ser el año con la mayor cantidad de datos históricos) y terminando a mediados del año 2030. Los resultados del modelo son los promedios obtenidos en las 1,000 réplicas. Previamente se verificó que, para los resultados más importantes, la media convergiera a un valor, antes de las 1,000 réplicas.

VARIABLE	ESCENARIO		
	PESIMISTA	TENDENCIAL	OPTIMISTA
Tasa de migración	150 % CONAPO	Proyección CONAPO	50 % CONAPO
Coefficiente de infiltración	0.15	0.2	0.25
Recarga lateral (Mm3):			
Acuífero Valle de Querétaro	20	30	30
Acuífero de Amazcala	10	15	15
Acuífero de Huimilpan	0	0	0
Acuífero de Buenavista	0	0	0
Porcentaje de tratamiento (%):			
Acuífero Valle de Querétaro	40-60	40-70	40-90
Acuífero de Amazcala	20-40	20-50	20-80
Acuífero de Huimilpan	20-40	20-50	20-80
Acuífero de Buenavista	20-40	20-60	20-80
Capacidad de almacenamiento superficial (Mm3):			
Subcuenca río Querétaro	14-13	14	14-20
Subcuenca arroyo Jurica	19-18	19	19-30
Subcuenca río El Pueblito	32-30	32	32-45
Aprovechamiento tratamiento (%):			
Subcuenca río Querétaro	50	50-70	50-90
Subcuenca arroyo Jurica	60	60-80	60-90
Subcuenca río El Pueblito	50	50-70	50-90
Agricultura de riego (ha):			
Municipio de Corregidora	1,030	1,030-900	1,030-700
Municipio de Huimilpan	1,300-1,400	1,300	1,300-1,050
Municipio de El Marqués	10,600-11,000	10,600	10,600-8,500
Municipio de Querétaro	2,450	2,450-2,200	2,450-2,000
Eficiencia en irrigación (%)	40-50	40-60	40-80
Consumo diario doméstico (litros)	150-180	150	150-110
Eficiencia uso público-urbano (%)	50-60	50-70	50-80

Tabla 6.1. Variables clave y sus valores en los diferentes escenarios.

7. RESULTADOS

7.1. Población

Los resultados obtenidos en el módulo de población (escenario tendencial) concuerdan con los del CONAPO (2006). Lo anterior era previsible pues se usó el mismo modelo, y las proyecciones de los componentes de población para cada municipio se basaron en las que proporciona CONAPO a nivel estatal. Los resultados se muestran en la **Figura 7.1**, en donde se observa la previsión de población para el año 2030, de aproximadamente 1'450,000 habitantes en la región. Usando los otros dos escenarios como límites, puede señalarse que se espera que la población esté entre 1'300,000 y 1'650,000 habitantes.

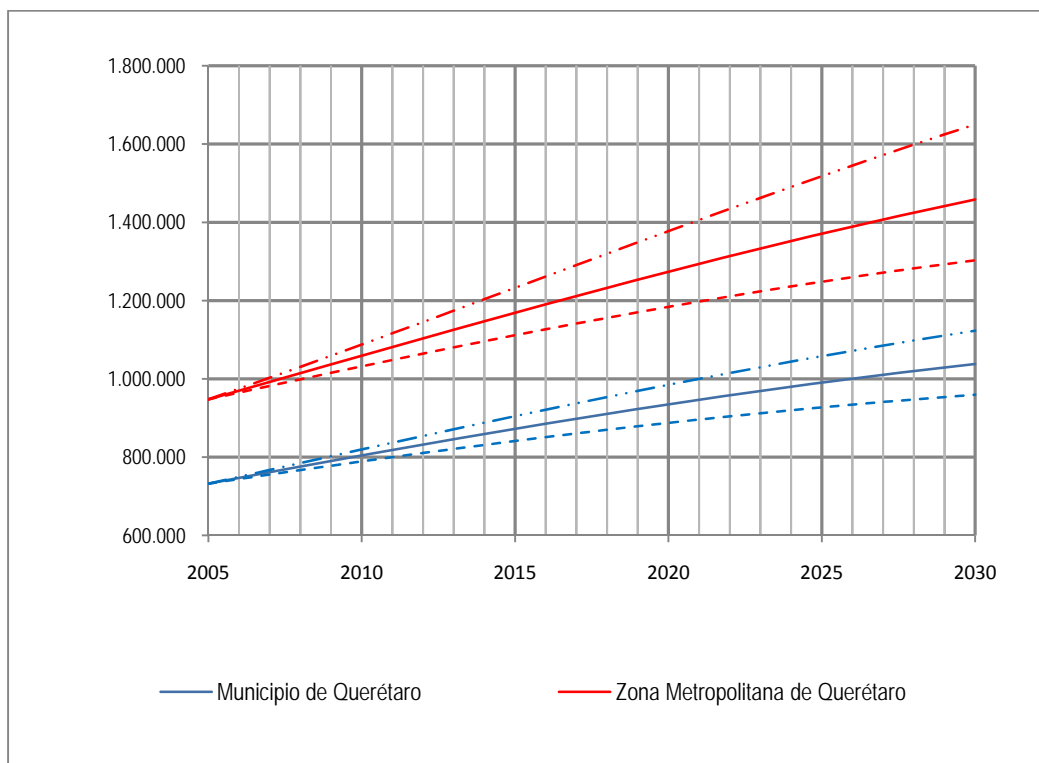


Figura 7.1. Población en la región en estudio.

En la misma Figura se presentan las predicciones de población para el municipio de Querétaro. El fenómeno de envejecimiento acelerado de la población puede verse en la **Figura 7.2**, al graficar de modo porcentual a los grupos de edad en el año 2005 (CONAPO, 2006) y la proyección al año 2030.

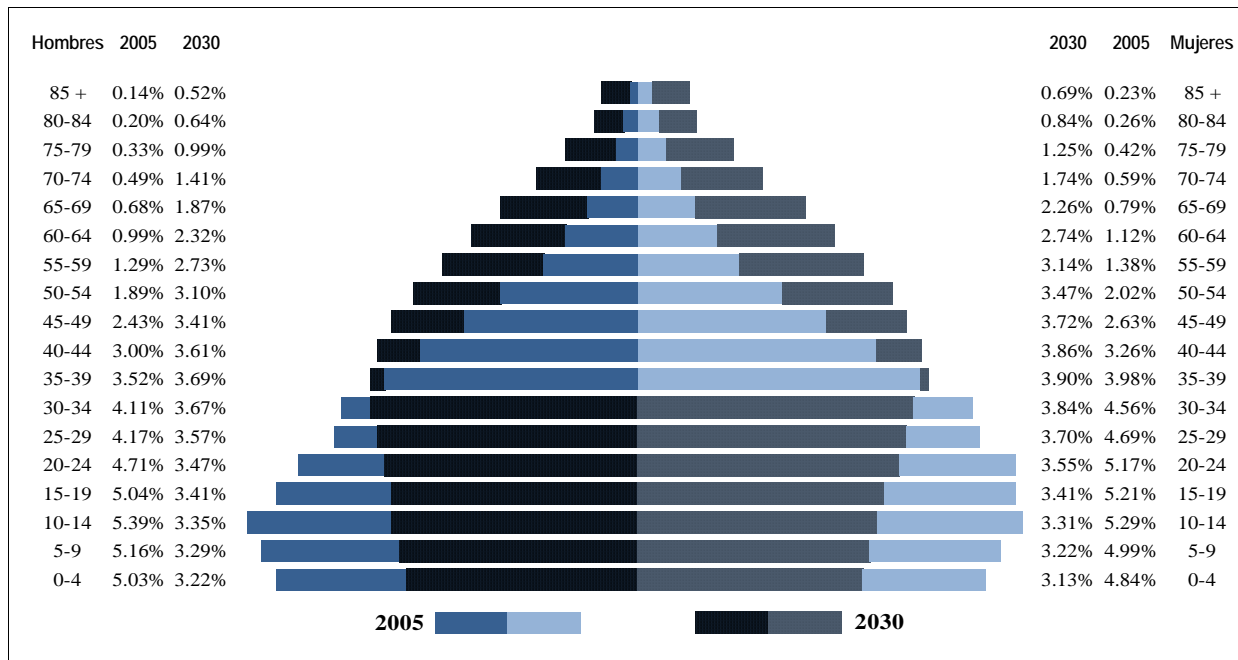


Figura 7.2. Distribución porcentual de los grupos de edad en la región (escenario tendencial).

7.2. Esguimientos

La modelación del ciclo hidrológico empieza con la generación de precipitaciones, mismas que son divididas –en un primer paso– en dos componentes: infiltración y esguimiento. A manera de ejemplo, se presentan resultados para la subcuenca del río El Pueblito durante un periodo de cinco años (60 meses) en la **Figura 7.3**. De acuerdo con los modelos empleados, puede observarse que, en meses con baja precipitación, el esguimiento es nulo y coinciden la precipitación y la infiltración, siendo hasta los meses con mayor precipitación cuando el esguimiento cobra importancia.

Los esguimientos generados se presentan en la **Tabla 7.1**. El volumen generado (114 Mm^3) es muy similar al reportado en el *Plan Hidráulico del Estado de Querétaro* (CEA, 1999), de 117 Mm^3 para la misma región, o al estimado en el *Estudio Técnico para la Reglamentación de la Cuenca Lerma-Chapala* (SEMARNAT, 2002), de 126.9 Mm^3 para una cuenca un poco mayor. En este último caso, el volumen estimado comprende la cuenca hasta la estación Ameche, en Guanajuato, a unos 10 km de la terminación de la cuenca en estudio. El coeficiente de esguimiento promedio (9.6 %) puede compararse también con el reportado en dicha referencia (9 %) o con el estimado en las Cartas Hidrológicas del INEGI (8.9 %).

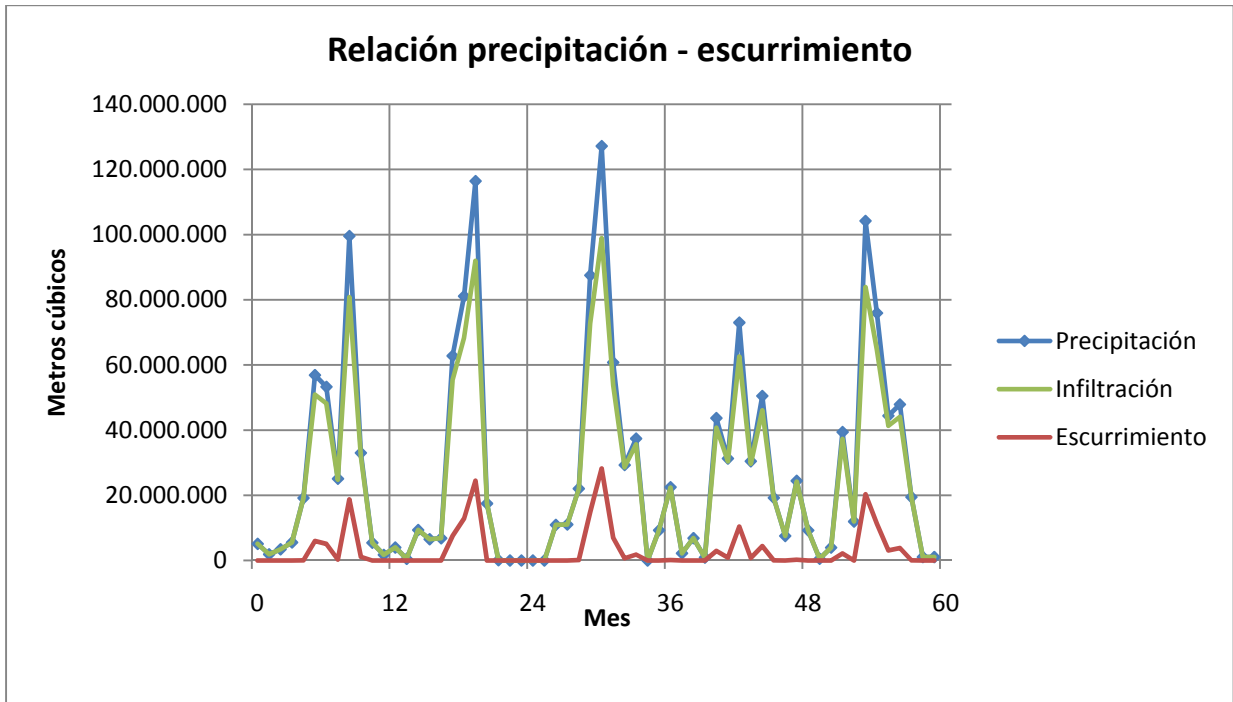


Figura 7.3. Escurrimientos en la subcuenca del río El Pueblito (cinco años).

Subcuenca	Precipitación (m ³)	Escurrimiento (m ³)	Coficiente escurrimiento
Río Querétaro	642,067,684	52,610,920	8.20 %
Arroyo Jurica	239,176,867	22,091,326	9.20 %
Río El Pueblito	315,997,897	39,927,981	12.60 %
TOTAL	1,197,242,448	114,630,226	9.60 %

Tabla 7.1. Precipitación y escurrimiento en la región.

En la **Figura 7.4** se observa cómo se modela la descomposición de la infiltración en evapotranspiración y humedad, en las capas no saturadas del suelo. Esta Figura se presenta también a modo de ejemplo para un periodo de cinco años, ahora en la subcuenca del río Querétaro. La evapotranspiración potencial tiene los mismos valores en cada uno de los años, debido a que se usaron promedios de temperatura mensuales. La evaporación es igual a la infiltración cuando ésta variable es menor a la evapotranspiración potencial, y sólo en caso contrario se acumula humedad en el suelo. Esta humedad contribuye, entonces, a la evapotranspiración, y una parte se modela como percolación hacia las capas saturadas.

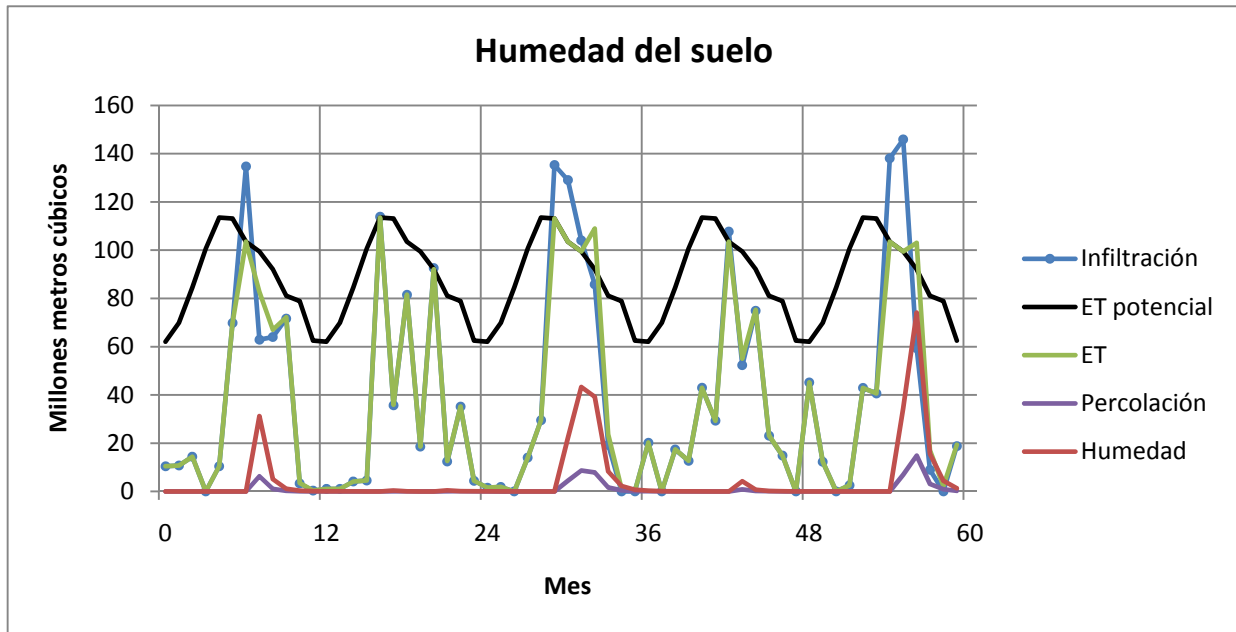


Figura 7.4. Humedad en la subcuenca del río Querétaro (cinco años).

7.3. Sobreexplotación del Acuífero del Valle de Querétaro

Dadas las suposiciones descritas anteriormente en cuanto a los volúmenes de agua disponibles y las necesidades en los diferentes usos del agua, se tiene como consecuencia principal la sobreexplotación del Acuífero del Valle de Querétaro (y en mucho menor medida, en los demás). Puede verse, en la **Figura 7.5**, el volumen acumulado de esta sobreexplotación a lo largo de los 25 años del periodo de simulación para cada uno de los escenarios, y el efecto de los volúmenes aportados por el proyecto Acueducto II. En el escenario optimista, se tiene un pequeño superávit. En el tendencial se tiene una ligera sobreexplotación. Pero para el escenario pesimista se tendría, de cualquier manera, una sobreexplotación importante. Esto pone de relieve la importancia de tomar medidas complementarias de administración de la demanda (presentes en mayor o menor medida en los escenarios tendencial y optimista) a fin de tener un sistema funcionando adecuadamente en el futuro.

7.4. Salidas de agua

Como se observa en la **Figura 7.6**, el volumen de aguas que salen de la región (agua de lluvia, aguas negras, aguas tratadas sin reusar, etc.) es de gran consideración, y seguirán creciendo en el futuro. Aunque tal vez no puedan aprovecharse en su mayor parte, los volúmenes aprovechables son de consideración y pueden ser complementos importantes a las acciones planeadas en la región.

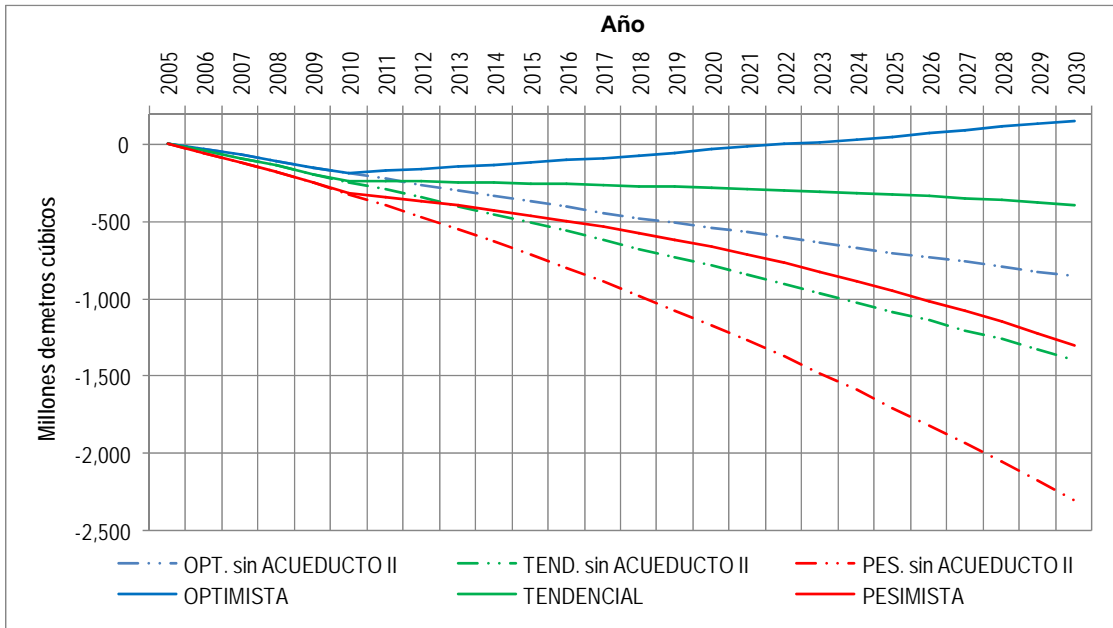


Figura 7.5. Evolución del volumen del Acuífero del Valle de Querétaro.

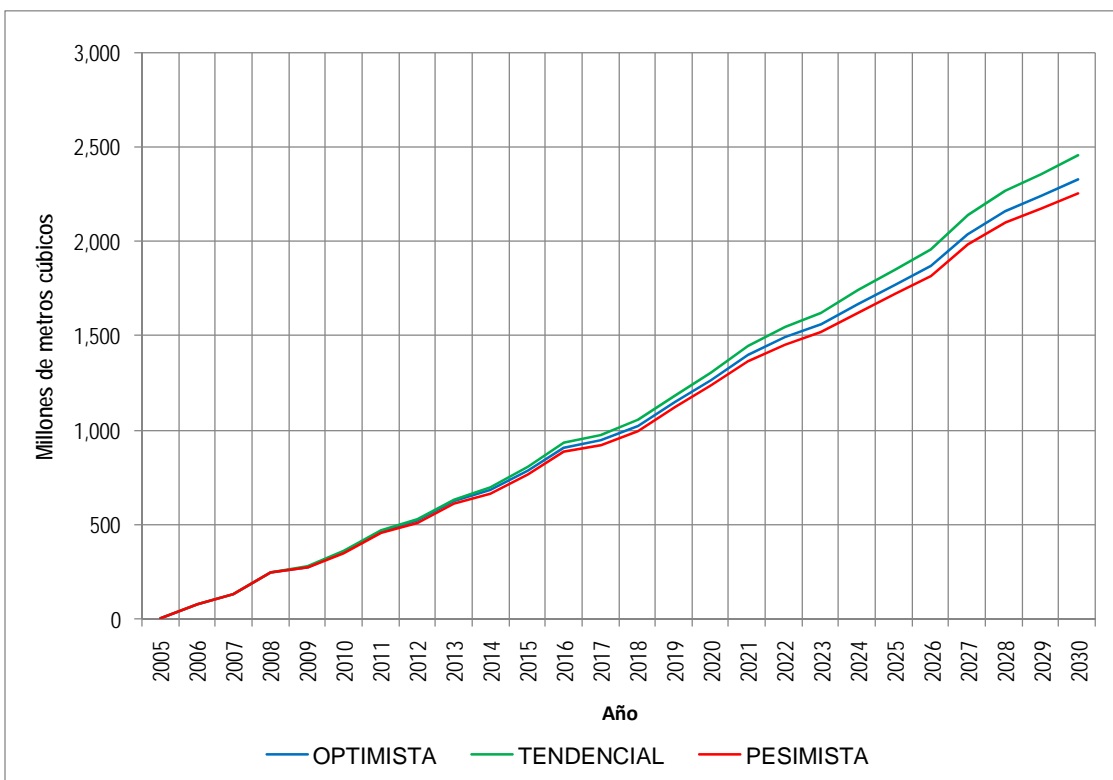


Figura 7.6. Salidas totales acumuladas.

8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Debido a la escasa disponibilidad de agua en la ZMQ, es prácticamente imposible satisfacer la demanda del recurso sin el uso de fuentes externas de abasto, como es el proyecto Acueducto II. Sin embargo, y como los escenarios tendencial y pesimista lo sugieren, estas acciones por sí solas únicamente resuelven el problema en el corto plazo, por lo que deben de ser complementadas con medidas tendientes a hacer el mejor uso posible de los reducidos volúmenes internos existentes en la región. Para esto, es necesario cambiar la estrategia de gestión del agua con la finalidad de dar mayor prioridad a las medidas de administración de la demanda que pueden ayudar a obtener soluciones a largo plazo.

Sería entonces importante avanzar en lo siguiente: una mayor eficiencia en irrigación y en el uso público urbano; limitar el dispendio de agua de uso doméstico mediante una adecuada política tarifaria; tratamiento de la totalidad de las aguas residuales y su posterior reuso, y; un mayor aprovechamiento del agua superficial en la cuenca. Finalmente, es importante mencionar la necesidad de una planeación regional que controle y ordene el crecimiento en la ZMQ, pues de otro modo se corre el riesgo de depender cada vez más de fuentes más lejanas y costosas.

El modelo desarrollado puede ser más útil cuando los usuarios potenciales lo usen y modifiquen, para que pueda apoyarlos en la evaluación de sus proyectos. El trabajo no está concluido. El diseño modular de los modelos de dinámica de sistemas permite incorporar, de manera sencilla, mayores opciones o cambios a los existentes. En este sentido se tiene pensado continuar su desarrollo, e incluir un modelo económico que vaya más allá de simples tasas de crecimiento en la industria, y que pueda vincularse con las variables de migración.

REFERENCIAS

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith (1998). **Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements**. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). Irrigation and Drainage Paper 56. Rome.
- Aparicio, F. J. (2005). **Fundamentos de hidrología de superficie**. Limusa. México, D. F.
- Bras, R. L. and I. Rodriguez-Iturbe (1993). **Random Functions and Hydrology**. Dover Publications. New York.
- Carreón-Freyre, D., M. Cerca, L. Luna-González y F. J. Gámez-González (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, 22(1), 1-18.
- CEA (1999). **Plan Hidráulico del Estado de Querétaro**. Comisión Estatal de Aguas. Querétaro, Qro.
- CEA (2002). **Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro**. Comisión Estatal de Aguas y Universidad Autónoma de Querétaro. Reporte Técnico, Tomos I y II. Querétaro, Qro.
- Chapagain, A.K. and A.Y. Hoekstra (2003). **Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products**. Institute for Water Education of the United Nations Education, Science and Culture Organization (UNESCO-IHE). Value of Water Research Report Series No. 13. Institute for Water Education. Delft, The Netherlands.
- CNA (1999). **Programa Hidráulico de Gran Visión del Estado de Querétaro 2000-2025**. Comisión Nacional del Agua. Informe Final. México, D. F.
- CNA (2000). **Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Querétaro**. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. México, D. F.
- CNA (2008). **Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento**. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua. México, D. F.
- CONAPO (2006). **Proyecciones de la población de México 2005-2050. Municipales**. Consejo Nacional de Población. En línea: <http://www.conapo.gob.mx/00cifras/proy/municipales.xls>. Consulta: 28 de septiembre de 2009. México, D. F.
- CQRN (2001). **Uso del suelo y vegetación en la zona sur del estado de Querétaro**. Centro Queretano de Recursos Naturales. Reporte Técnico Núm. 3. Querétaro, Qro.
- CQRN (2002). **Uso actual y potencial del suelo en los municipios conurbados de Querétaro**. Centro Queretano de Recursos Naturales. Reporte Técnico Núm. 5. Querétaro, Qro.
- CQRN (2003). **El sistema de agua en la cuenca Lerma-Chapala de la Región Querétaro. Primer reporte: diagnóstico**. Centro Queretano de Recursos Naturales. Reporte Técnico Núm. 6. Querétaro, Qro.
- Dean, B. V., R. L. Salstrom, J. Fielder, B. Mollnar and K. Haake (1994). Statistical and Simulation Analysis Assists Santa Clara Valley Water Districting Planning. **Interfaces**, 24 (6), 82-99.
- Deliang, C., G. Gao, C. Y. Xu, J. Guo and G. Ren (2005). Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. **Climate Research**, 28, 123-132.
- Dingman, S. L. (2002). **Physical Hydrology**. Second edition. Prentice-Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- Gao, Y. and C. Liu (1997). Research on Simulated Optimal Decision Making for a Regional Water Resources System. **Water Resources Development**, 13 (1), 123-134.
- Garen, D. C. and D. S. Moore (2005). Curve Number Hydrology in Water Quality Modeling: Uses, Abuses, and Future Directions. **Journal of the American Water Resources Association**, 41 (2), 377-388.
- Government of Alberta (2009). **Farm Water Supply Requirements**. Government of Alberta, Ministry of Agriculture and Rural Development. Agricultural

Engineering Publications, Agdex FS716(C01). Alberta, Canada.

Golding, B. L. (1997). Discussion: "Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity?", by Ponce and Hawkins. **Journal of Hydrologic Engineering**, 2(3), 145-148.

Hidalgo, J. A., B. Jiménez, R. Martínez y J. C. Valencia (2002). Modelo de Prospectiva de la Cuenca Lerma-Chapala. En: **Memorias del XVII Congreso Nacional de Hidráulica**. Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Monterrey, N. L.

Huerta, J. M. (2004). A Systems Dynamics Approach To Conflict Resolution. In: **Proceedings of the 22st. International Conference of the Systems Dynamics Society**. Systems Dynamics Society. Oxford. U. K.

Huerta, J. M., M. Serra and R. Sandoval (2001). ProEstado MAUA. A Systems Dynamics Approach for the Design of Sustainable Water Use Strategy in the Middle Lerma Chapala Basin. In: **The Lerma-Chapala Watershed, Evaluation and Management**, ed. by A. M. Hansen and M. van Afferden. Kluwer Academic/Plenum Publishers. Dordrecht, The Netherlands.

INEGI (2005). **Censos Económicos 2004**. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. En línea: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce1999/saic>. Consulta: 28 de septiembre de 2009. Aguascalientes, Ags.

INEGI (2006). **Conteo de Población y Vivienda 2005**. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. En línea: http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/zip/iter_22.xls. Consulta: 28 de septiembre de 2009. Aguascalientes, Ags.

INEGI (2008). **Anuario Estadístico del Estado de Querétaro Arteaga**. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags.

Klosterman, R. E. (1990). **Community Analysis and Planning Techniques**. Rowman and Littlefield Publishers. Savage. Maryland.

Koutsoyiannis, D. (2003). Rainfall Disaggregation Methods: Theory And Applications. In: **Proceedings**

of the Workshop on Statistical and Mathematical Methods for Hydrological Analysis. Universita di Roma "La Sapienza". Rome, Italy.

Koutsoyiannis, D. (2005). Stochastic Simulation of Hydrosystems. In: **Water Encyclopedia: Surface and Agricultural Water**, ed. by J. H. Lehr and J. Keeley. John Wiley and Sons. New York.

Law, A. M. and W. D. Kelton (2000). **Simulation Modeling and Analysis**. Third edition. McGraw-Hill. New York.

Limbrunner, J. F., R. M. Vogel and S. C. Chapra (2005). A Parsimonious Watershed Model. In: **Watershed Models**, ed. by V.P. Singh and D.K Frevert. CRC Press. Boca Raton, FL.

Luna, F. (2000). **Herramientas para el manejo de cuencas hidrográficas**. Tesis para obtener el grado de maestro en Ingeniería Hidráulica. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro.

Martínez, R., B. Jiménez, C. Saldivar, J. A. Hidalgo y J. F. Echeverría (2002). Modelo Prospectivo de la Cuenca del Río Bravo. En: **Memorias del XVII Congreso Nacional de Hidráulica**. Asociación Mexicana de Hidráulica (AMH)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Monterrey, N. L.

Neitsch, S. L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams and K.W. King (2002). **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation. Version 2000**. Texas Water Resources Institute. TWRI Report TR-191. College Station, Texas.

Oppenheim, N. (1980). **Applied Models in Urban and Regional Analysis**. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, N. J.

Partida, V. (2008). **Proyecciones de la población de México, de las entidades federativas, de los municipios y de las localidades, 2000-2050 (Documento Metodológico)**. Consejo Nacional de Población. México, D. F.

Ponce, V. M. and R. H. Hawkins (1996). Runoff Curve Number: Has it Reached Maturity? **Journal of Hydrological Engineering**, 1 (1), 11-19.

- Postma, T. J. and F. Liebl (2005) How to improve scenario analysis as a strategic management tool? **Technological Forecasting & Social Change**, 72 (2), 161-173.
- Rawls, W. J., L. R. Ahuja, D. L. Brakensiek and A. Shirmohammadi (1993). Infiltration and Soil Water Movement. In: **Handbook of Hydrology**, ed. by D. Maidment. McGraw-Hill, New York.
- Salas, J. D. (1993). Analysis and modeling of hydrologic time series. In: **Handbook of Hydrology**, ed. by D. Maidment. McGraw-Hill, New York.
- Scharf, D., D.W. Burke, M. Villeneuve and L. Leigh (2002). **Industrial Water Use, 1996**. Minister of Public Works and Government Services of Canada. Ottawa, ON.
- Schoemaker, P. J. H. (1997). Disciplined Imagination. From Scenarios to Strategic Options. **International Studies of Management and Organizations**, 27 (2), 43-70.
- SEMARNAT (2002). **Estudio Técnico para la Reglamentación de la Cuenca Lerma-Chapala**. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.
- Simonovic, S. P. (2002). World water dynamics: global modeling of water resources. **Journal of Environmental Management**, 66, 249-267.
- Simonovic, S. P. and V. Rajasekaram (2004). Integrated analysis of Canada's water resources: A systems dynamics approach. **Canadian Water Resources Journal**, 29 (4), 223-250.
- Singh, V. P. and C. Y. Xu (1997). Sensitivity of Mass Transfer-Based Evaporation Equations to Errors in Daily and Monthly Input Data. **Hydrological Processes**, 11, 1465-1473.
- SCS (1972). **SCS National Engineering Handbook. Sec. 4: Hydrology**. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington, D.C.
- SCS (1986). **Urban Hydrology for Small Watersheds**. Technical Report 55. US Department of Agriculture. Soil Conservation Service. Washington, D.C.
- Srikanthan, R. and T.A. McMahon (2001). Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. **Hydrology and Earth System Sciences**, 5(4), 653-670.
- Sterman, J. D. (2000). **Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. McGraw-Hill. Boston, MA.
- Valdez, I. (2005). **Cuenta patrimonial del recurso agua en la cuenca Lerma-Chapala (región Querétaro)**. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería con línea terminal en Hidráulica. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro.
- Van Der Heijden, K. (1998). **Escenarios. El arte de prevenir el futuro**. Panorama. México, D. F.
- Wack, P. (1985). Scenarios: Uncharted Waters Ahead. **Harvard Business Review**, 63 (5), 72-89.
- Wurbs R. A. and E. D. Sisson (1999). **Comparative Evaluation of Methods for Distributing Naturalized Streamflows from Gaged to Ungaged Sites**. Prepared for Texas Natural Resource Conservation Commission by Texas Water Resources Institute. Technical Report 179. Texas A&M University. College Station, TX.
- Xu, C. Y. and V. P. Singh (2001). Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. **Hydrological Processes**, 15, 305-319.
- Xu, C. Y. and V. P. Singh (2002). Cross Comparison of Empirical Equations for Calculating Potential Evapotranspiration with Data from Switzerland. **Water Resources Management**, 16, 197-219.
- Xu, C. Y. and G. L. Vandewiele (1996). Parsimonious monthly rainfall-runoff models for humid basins with different input requirements. **Advances in Water Resources**, 18, 39-48.



CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
DEL ESTADO DE QUERÉTARO

Publicación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro



SECRETARÍA
DE EDUCACIÓN

