

IMPORTANCIA DE LOS RECURSOS HIDRICOS EN EL DESARROLLO DE UNA SOCIEDAD. ANALISIS ESPECIFICO: ESTADO DE QUERETARO, DISCUSION Y RECOMENDACIONES.

Tesis

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

GONZÁLEZ CELIS JOSÉ ALEJANDRO

ASESOR:

FÍS. ALEJANDRA CORTES SILVA



UNAM

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería Civil y Geomática

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

México D.F. 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIAS:

Este trabajo es dedicado ha:

Mayra
y
Danna Lesly

Mi esposa
y
Mi hija

AGRADECIMIENTOS:

A mis padres

Gabriel
y
Alicia

Que siempre me han apoyado en todos los aspectos y etapas de mi vida.

A la Fis. Alejandra Cortés Silva

Por darme la oportunidad de colaborar con ella como prestador de Servicio Social en el grupo de Hidrología Isotópica, en el Instituto de Geofísica, y por brindarme sus valiosos consejos, ayuda y asesoría técnica como directora de esta Tesis.

A los Ingenieros catedráticos:

Ing. Enrique Cesar Valdez.
Ing. Ernesto Rene Mendoza Sánchez.
Ing. Carlos Chavarri Maldonado.
Ing. Héctor Legorreta Cuevas.

Por sus conocimientos y clases que me dieron en la Facultad de Ingeniería, además de su apoyo en esta Tesis.

A los compañeros de trabajo:

Ing. Juan Alvarado Solís
Ing. Marco Antonio López Castrejon.

Deseándoles a todos los mencionados la mejor de las suertes y que Dios los conserve con buena salud a ellos y a su apreciable familia.

Índice

Prólogo

Introducción

Panorama general de la problemática del agua en el Estado de Querétaro.

Objetivos.

Metodología.

Conceptos fundamentales

I. Marco Físico

I.1 Localización

I.2 Fisiografía

I.3 Geología

I.4 Hidrología

I.5 Geohidrología

.

II. Acuíferos y abastecimiento

II.1 Monitoreo

II.2 Situación actual

II.3 Balance Integral hídrico

III. Aguas residuales

III.1 Análisis de cantidad

III.2 Análisis de calidad

III.3 Impacto ambiental

III.4 Presa Zimapán

III.5 Perspectivas

IV. Discusión

V. Conclusiones y recomendaciones

Bibliografía

Glosario

Prólogo

El presente trabajo se derivó de las actividades realizadas durante el servicio social en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México; donde una de las directrices principales de los institutos es la investigación en los diferentes campos del conocimiento, en particular en el Instituto de Geofísica en el departamento de Recursos Naturales, en donde la Física Alejandra Cortés Silva, que se encuentra a cargo del grupo de hidrología isotópica, el cual lleva acabo estudios hidrológicos y geohidrológicos en diferentes zonas del país.

El proyecto que se desarrolló fue investigar, documentar, recopilar y capturar información referente a los recursos hídricos en el Estado de Querétaro para elaborar una publicación patrocinada por el Centro Queretano de Recursos Naturales, dependencia perteneciente al CONCYTEQ (Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro).

INTRODUCCION

México y el aprovechamiento del agua subterránea

México es un país con una gran diversidad de ambientes, en los que podemos encontrar diferentes tipos de climas a lo largo y ancho del territorio mexicano; desde desiertos, climas húmedos, tropicales, estepas con algunas regiones bosques de pinos, encinos y coníferas, además de una basta y rica zona de litorales, como lo son el Océano Pacífico, el Mar de Cortés, el Mar Caribe y el Golfo de México. En el interior de la nación se cuenta además, con importantes cuerpos de agua como lagos, lagunas, ríos y presas.

En este punto podríamos hacer una mención y recuento, de manera muy general, de los recursos hídricos en el país, tanto de aguas superficiales, como de aguas subterráneas, con el fin de tener un panorama de estos recursos y poder visualizar que desafortunadamente, estos no se encuentran en donde mas se necesitan.

En el sureste del país, se tienen una gran cantidad de ríos de diferentes caudales; la precipitación media anual es abundante y el clima propicia que el ciclo hidrológico local sea constante. En contraste la densidad de población en esta región es muy baja. Por otro lado, el centro y norte de nuestro territorio, se presentan condiciones climáticas adversas, la precipitación media anual es baja, el clima semidesértico y desértico, agregando el problema de la densidad de población que es alta y concentrada en regiones como la Cuenca de México, el Bajío, o en ciudades como Monterrey, Guadalajara, San Luis Potosí, Hermosillo, Zacatecas, Torreón, por mencionar algunas.

Dar solución a los diferentes problemas que aquejan a la población, en muchos casos ha resultado una tarea difícil. Según el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI, en la actualidad, se ha suministrado agua potable en un 93% a grandes ciudades y a la mayoría de las comunidades rurales. Se han explorado y cuantificado, una gran cantidad de

acuíferos, los mismos que se han explotado, unos en mayor o en menor medida. Los ríos se encuentran regulados casi al 100%, se han levantado un sin número de presas de diferente utilidad, como la generación de energía eléctrica, abastecimiento de agua potable, regulación de corrientes, abastecimiento a distritos de riego o parcelas de cultivo, entre lo mas relevante.

Actualmente se ha puesto un esmerado énfasis en el tratamiento de las aguas residuales, como resultado de las actividades económicas de la población; teniendo en cuenta que este es un campo de proyección de trabajo muy importante ya que, en la actualidad se cuenta con un porcentaje muy bajo en el numero de plantas de tratamiento a escala nacional. Además, la norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, especifica que todas la ciudades con número determinado de habitantes, deberá contar con su propia planta de tratamiento para el año 2005, y para poblaciones con un mayor número de habitantes, para el año 2010, deberán también, contar con su propia planta de tratamiento de aguas residuales.

Una consecuencia natural que se deriva del crecimiento económico y demográfico es un incremento en la demanda de agua. Lo anterior se ha visto acentuado en la región del Altiplano Mexicano, particularmente donde se localizan las grandes concentraciones industriales y urbanas. El abastecimiento de agua potable a las grandes ciudades se obtiene básicamente de dos fuentes: las corrientes superficiales y los almacenamientos de agua subterránea. Según datos de la Comisión Nacional del Agua, CNA, las tres cuartas partes del país son áridas, por lo que los recursos superficiales son escasos y representa un porcentaje mínimo. Los pocos que existen han sido insuficientes para satisfacer las necesidades en la demanda y son además, altamente susceptibles a la contaminación. Los almacenamientos de agua subterránea son en apariencia, un recurso mayormente distribuido, abundante y que no se contamina fácilmente, por lo que se han convertido en la mejor alternativa de abasto de los últimos 30 años, constituyendo una fuente atractiva para el consumo humano y actividades agrícolas e industriales. A pesar de haberse advertido una importante sobreexplotación de los acuíferos regionales, forzándolos a llegar hasta los límites de sus reservas y llevándolos a producir bajo condiciones extremas es el único recurso con el que se cuenta en la mayoría de los casos.

La desventaja más grande del agua subterránea es el desconocimiento que se tiene acerca de su potencial y susceptibilidad. Con frecuencia, se piensa que el recurso es inagotable; sin embargo, la capacidad de los sistemas es limitada debido principalmente, a que no se les da un tiempo adecuado de recuperación, esto es, se excede la capacidad natural de recarga del subsuelo y como consecuencia estos, se ven sometidos a una sobreexplotación, que provocará una diversidad de daños y consecuentemente el agotamiento del recurso. El efecto más notable que provoca el bombeo excesivo se manifiesta con el descenso acelerado de los niveles de agua subterránea. Las

consecuencias adicionales son varias: el costo de bombeo se incrementa año con año, el terreno sufre procesos de asentamiento que dañan las estructuras superficiales, pueden ocurrir agrietamientos que favorezcan la entrada de contaminantes al subsuelo, y lo más grave, con la compactación del material se pierde de manera irreversible el espacio de almacenamiento.

La sobreexplotación de acuíferos, si bien es un problema de difícil solución, puede reducirse mediante políticas de manejo basadas en estudios científicos y técnicos; educación sobre la cultura del agua aunadas a un programa tarifario no subsidiado, así como de un control y monitoreo, para garantizar el abasto equitativo y con estas medidas se impida alcanzar un estado irreparable del sistema geohidrológico.

En los últimos años los centros de investigación han enfocado sus esfuerzos para diseñar nuevas tecnologías que ayuden a estudiar y entender “algo” que no vemos a simple vista, como lo es el agua subterránea. Un ejemplo de lo anterior es el desarrollo de modelos, tanto hidrogeoquímicos como matemáticos, que han ayudado a generar conocimiento para llevar a los sistemas hídricos a un manejo sustentable. Los resultados han ayudado progresivamente a la Comisión Nacional del Agua, CNA, y los organismos operadores a entender y evaluar de manera más racional los volúmenes disponibles de agua en función de las demandas requeridas por la población, el sector industrial y agrícola.

Panorama general de la problemática del agua en el Estado de Querétaro

Con base en el planteamiento anterior, tomaremos como ejemplo al Estado de Querétaro, que en los últimos años ha venido sufriendo un crecimiento demográfico muy acelerado. Este crecimiento ha sido acompañado de un gran desarrollo económico en la parte sur, que comprende los alrededores del corredor industrial Querétaro-San Juan del Río, debido, sobre todo, a su excelente ubicación geográfica, que lo sitúa como el punto de paso de los principales flujos económicos del centro del país, ya que comunica, entre otras, a la región del bajío, Guadalajara, San Luis Potosí, Zacatecas, Torreón, Saltillo y Monterrey.

Asimismo, el desarrollo acelerado ha agudizado el problema del suministro de agua en gran parte de la entidad. Este problema podría adicionarse al hecho de que el Estado de Querétaro se sitúa cerca del parte aguas continental. Además, las características climáticas no favorecen una precipitación abundante, por lo que los recursos hídricos superficiales son muy limitados, es por ello que se ha generado una dependencia excesiva del agua subterránea, la cual ha sido sobre explotada en las últimas décadas.

El problema de abastecimiento se agrava por la ineficiencia en el manejo del agua en todos los ámbitos, pero principalmente en los usos agrícola, industrial y público urbano. Por otra parte, el escaso tratamiento de las aguas residuales y la falta de una cultura ambiental, han provocado problemas de contaminación importantes.

Sin lugar a dudas, el agua representa para todos los sectores y en todas las regiones del estado, una limitante fundamental para alcanzar el desarrollo sustentable y el bienestar de la población. Se cuestiona si habrá agua en la cantidad y calidad suficiente para hacer frente a las necesidades en un mediano y largo plazo, o si los daños hechos al medio ambiente son ya irreversibles.

Por esta razón, a nivel estatal diversas instituciones gubernamentales e instituciones académicas han puesto particular atención, en el estudio de la problemática y análisis profundo en cuanto a la disponibilidad del recurso, proponiendo diferentes soluciones. Desgraciadamente muchas de las soluciones posibles están en función de los recursos económicos y un radical cambio de paradigmas.

El panorama general sobre la información histórica en El Valle de Querétaro (VQ), es limitada, pero se cuenta con datos importantes como son los registros de niveles del agua subterránea, que se iniciaron en el año 1970, con un total de 20 pozos piloto. Así mismo, a partir de 1990, se ha medido sistemáticamente esta variable, dos veces por año mediante un sistema de al menos 45 pozos piloto. Esta red de monitoreo se ha venido adecuando año con año por diversas razones, una de las más comunes es debida al cambio de equipamiento que llega a obturar el orificio usado para colocar la sonda de medición. Otras irregularidades se deben a la operación continua de los equipos de bombeo. Desafortunadamente estos problemas aunados a algunos otros, ocasionan que el historial piezométrico se vea afectado, ocurriendo esto en la mayoría de los acuíferos estatales.

Lo anterior obliga a tener una red de monitoreo bien diseñada que nos ayude a determinar, en cualquier tiempo y espacio el comportamiento de niveles del agua subterránea. Disponer de un censo completo y actualizado de las captaciones de agua subterránea el cual no sólo ayuda a diseñar una red de monitoreo, sino que permite también, a identificar las zonas con mayor explotación y abatimiento. Los resultados podrán utilizarse, entre otros objetivos, para la calibración precisa de un modelo de flujo regional y la identificación de zonas que favorezcan la recarga. Otro aspecto fundamental es que facilita la definición del marco físico conceptual de funcionamiento hidráulico subterráneo.

En el estado de Querétaro, se han hecho modelos para conocer la situación real del agua subterránea en los valles de Chichimequillas–Amazcala, Huimilpan, Tequisquiapan–Ezequiel Montes, Buenavista, San Juan del Río–Pedro Escobedo y Querétaro. Los modelos matemáticos han sido una

excelente herramienta para poder simular las condiciones de los acuíferos y han permitido, además, representar las condiciones futuras de explotación que, en su momento, impondrán las nuevas demandas.

El abastecimiento de agua potable a las grandes ciudades se obtiene básicamente de dos fuentes: las corrientes superficiales y los almacenamientos de agua subterránea. De ambas, la primera es más susceptible a la contaminación –a medida que las poblaciones van creciendo– lo cual dificulta su aprovechamiento directo para el consumo humano. El agua subterránea, en cambio, no se contamina fácilmente; su distribución espacial favorece la explotación (se construyen pozos en el lugar donde exista una demanda); y la regulación interanual de los medios acuíferos contribuye a mejorar su disponibilidad. Por eso, la explotación del recurso ha sido siempre atractiva para el consumo humano y para su empleo en actividades agrícolas e industriales.

La sobreexplotación de acuíferos, si bien es un problema de difícil solución, puede reducirse mediante políticas de consumo racional, aunadas a un programa de control y monitoreo que garantice el abasto mínimo a los sectores usuarios e impida alcanzar un estado *dañino* e irreparable del sistema geohidrológico. En los últimos años, por ejemplo, se han desarrollado modelos matemáticos de simulación del flujo subterráneo que posibilitan, a la CNA y los organismos operadores, programar los volúmenes disponibles de agua en función de las demandas requeridas por la población, industria y el sector agrícola.

Objetivos:

Comprender la importancia que tiene el agua en el desarrollo de una sociedad civil, para hacer una correcta planeación, a corto, mediano y largo plazo.

Hay que tener presente que, la mayoría de las soluciones que se presentan para entender la problemática de los recursos hídricos, debe tener una participación multidisciplinaria. Donde la mano y visión del ingeniero civil tiene una importante participación. Ya sea desde la extracción y/o captación de una fuente de abastecimiento, pasando por la conducción, almacenamiento y distribución del vital líquido. Solucionando también, el desalojo del agua usada, convertida en un agua residual; desde la proyección, diseño, construcción y mantenimiento de plantas de tratamiento de agua residuales, que mediante procesos físico-químicos devuelve parte de la calidad del agua usada para ser nuevamente aprovechable y cumplir con la normatividad vigente, según su uso.

Por lo anterior, es necesario contar con una buena recopilación de información histórica de cada área o región donde se aborda el problema a analizar. Esta actividad forma parte principal del objetivo de esta tesis para así, poder obtener las soluciones y/o recomendaciones más adecuadas que se amolden a la problemática, en tiempo y espacio teniendo presente, los recursos técnicos, tecnológicos y económicos.

Metodología

La metodología que se llevó a cabo, fue la de consultar el material bibliográfico de diferentes bibliotecas, centros de investigación y organismos operadores. Dentro del campus de Ciudad Universitaria fueron; la Biblioteca Dovalí Jaime en la Facultad de Ingeniería, la Biblioteca Enzo Levi en el Postgrado de Ingeniería y la Biblioteca Conjunta de Ciencias de la Tierra (BCCT). Además de la Biblioteca de Escuela de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Unidad Zacateco y la Biblioteca de ESIA, Ciencias de la Tierra Unidad Ticoman, del IPN. En Querétaro fueron; el Centro Queretano de Recursos Naturales, la Universidad Autónoma de Querétaro y la Comisión Estatal del Agua.

Se recopilaron, analizaron y discutieron los resultados de una serie de estudios, entre tesis, reportes técnicos, reportes internos y publicaciones tanto de instituciones académicas, como de revistas científicas que estuvieron disponibles y a nuestro alcance.

Se describe de manera breve la geología, hidrología y principales características de la zona, después se lleva a cabo un análisis de la información respecto a los acuíferos del estado y la situación de sus aguas residuales. Finalmente con base en todo lo anterior discutiremos y propondremos conclusiones y recomendaciones para mejorar las perspectivas del agua en el Estado de Querétaro.

Conceptos fundamentales

A continuación se describen en forma de glosario, y de manera muy general, los conceptos hidrológicos, que nos ayudarán a caracterizar, a entender y/o describir las principales unidades que se encuentran presentes en la zona de estudio.

La **hidrología** ha sido definida como la ciencia que estudia la ocurrencia, distribución y movimiento del agua en la naturaleza.

Algunas rocas pueden transmitir el agua en cantidades variables, pero no todas pueden proporcionarla en cantidades económicamente explotables. Se le llama **acuífero** a la zona natural situada por debajo del suelo (paquete de roca), que es capaz de almacenar y transmitir agua en cantidades suficientemente grandes como para ser económicamente explotables. El 90% de los acuíferos, se presentan en depósitos no consolidados como arenas y gravas, sin importar su origen geológico.

Dentro de los depósitos consolidados y bajo ciertas condiciones de arreglo estructural, las unidades de rocas que son consideradas como buenos acuíferos son:

- Calizas cársticas. Roca formada por Carbonatos de Calcio, esto es calcita (CaCO_3) y dolomita (CaMgCO_3).
- Caliza no cárstica, margas, conglomerado y areniscas. En estas el cemento ínter granular hace disminuir su porosidad y permeabilidad en proporción inversa.
- Riolitas. Son menos permeables que las calizas cársticas.

El término **acuitardo** se deriva del latín *tardere* = retardar; y son todas aquellas unidades litológicas o formaciones geológicas que, conteniendo cantidades apreciables de agua la transmiten muy lentamente y por lo tanto no es suficiente para obtener una producción en pozos. Sin embargo, a nivel regional y bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical a los acuíferos que sobrepasen.

El movimiento del agua en el subsuelo es el proceso del cambio de una partícula de agua de un punto a otro. Este proceso se inicia con la **infiltración** que es la entrada del agua después de la precipitación, deshielo o irrigación. El papel que juega el movimiento del agua subterránea es muy importante, ya que controla el suministro de agua ocupada por las plantas y la evaporación en la superficie del suelo; además, junto con la infiltración controlan la escorrentía superficial, recarga de agua subterránea, evapotranspiración, erosión del suelo, y transporte de material en el agua de superficie y de subsuelo.

La porción de una roca que no es ocupada por material mineral sólida, puede ser ocupada por el agua subterránea, estos espacios se les conoce como intersticios vacíos, poro o espacio de poro, puesto que los intersticios pueden actuar como conductos al agua subterránea; típicamente están caracterizados por el tamaño, forma, irregularidad y distribución.

La **porosidad** de un material viene expresada por la relación de su parte vacía u ocupada por aire y/o agua y su volumen total. A los intersticios creados por los procesos geológicos que denominan el origen de las formaciones geológicas de rocas sedimentarias e ígneas, se les llama *porosidad primaria*; mientras que a los intersticios que se desarrollan después de que la roca fue formada, se les llama *porosidad secundaria*, como por ejemplo: juntas, fracturas, aberturas por disolución y aberturas formadas por plantas y animales

Con respecto al tamaño de los poros, estos pueden ser supercapilares, capilares y subcapilares. En términos de suministro de agua subterránea los depósitos sedimentarios granulares son los de mayor importancia. La porosidad en estos depósitos depende de la forma y el arreglo de las partículas individuales, distribución por tamaño, grado de cementación y compactación. En las formaciones consolidadas, la remoción del material mineral por solución y grado de fractura son también importantes. El rango de porosidad es de cero a más de 50%.

Un medio poroso es un cuerpo que puede almacenar agua, para que éste la pueda transmitir es necesario que sus poros estén conectados entre sí; a la medida de la capacidad de un medio para transmitir agua, se le llama

permeabilidad o conductividad hidráulica, y se define como el coeficiente de proporcionalidad con dimensiones de velocidad, el cual depende de las características del medio, es decir, naturaleza del terreno: porosidad total, distribución y tamaño de poro, tamaño de grano, forma de grano, empaquetamiento, estratificación, disposición y distribución de los granos, y también de la viscosidad del fluido que a su vez es función de la temperatura y presión.

Tabla 1. Clasificación de terrenos por la permeabilidad

K (m/día)	$10^{-6} - 10^{-5}$	$10^{-4} - 10^{-3}$	$10^{-2} - 10^{-1}$	$10 - 10^2$	$10^3 - 10^4$
Calificación	Impermeables	Poco permeables	Algo permeables	Permeable	Muy permeable
Calificación de acuífero		Acuitardo	Acuífero pobre	Acuífero bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	-Arcilla compacta -Pizarra -Granito	-Limo arenoso -Limo -Arcilla limosa	-Arena fina -Arena limosa -Caliza fracturada	-Arena limpia -Grava y arena -Arena fina	- Grava limpia

Un terreno muy poroso puede ser permeable o no, dependiendo de si sus poros se encuentran bien interconectados, tal como sucede en algunas gravas limpias, o bien puede ser casi impermeable si sus poros no están interconectados, sin importar su tamaño, como sucede en una arcilla o en ciertos materiales volcánicos.

Tanto las arenas de grano relativamente redondeado como las de forma angulosa tienen una porosidad menor que las arcillas, las cuales están constituidas por partículas laminares de amplia superficie específica que origina la presencia de altas fuerzas moleculares entre el agua y las partículas de arcilla. Por ello a pesar de su menor porosidad, los materiales arenosos son permeables y buenos acuíferos, mientras que las arcillas dan lugar a acuitardos.

Las calizas por naturaleza propia presentan baja porosidad, debido al desarrollo de cementarse en sus poros. Sin embargo cuando ocurre el proceso de disolución del Carbonato de Calcio por acción del agua, se forman oquedades que llegan a constituir verdaderas cavernas y grutas haciendo de la roca una unidad con alta permeabilidad.

Para materiales granulares relativamente homogéneos y para temperatura del orden de 20° C se presenta la tabla 2.

Tabla 2. Valores de porosidad y permeabilidad.

Clasificación geológica	Porosidad	K en cm/s	K en m/día aprox.
Grava limpia		>1	>1000
Arena gruesa limpia		1 a 10^{-2}	1000 a 10
Mezcla de arena		10^{-2} a $5 \cdot 10^{-3}$	10 a 5
Arena fina		$5 \cdot 10^{-3}$ a 10^{-3}	5 a 1
Arena limosa		$2 \cdot 10^{-4}$ a 10^{-4}	2 a 0.1
Limo		$5 \cdot 10^{-4}$ a 10^{-5}	0.52 a 0.001
Arcilla		$<10^{-6}$	<0.001
Caliza arcillosa	2		$8.3 \cdot 10^{-5}$
Caliza	16		$2.2 \cdot 10^{-3}$
Arenisca limosa	12		$1.2 \cdot 10^{-1}$
Arenisca de grano grueso	12		$9.2 \cdot 10^{-12.0}$
Arenisca	29		2.0

Al caudal de agua que se infiltra a través de una franja vertical de terreno se le conoce como **Transmisividad (T)** y sus dimensiones son las de una velocidad (K) por una longitud (b), expresándose en consecuencia en $m^2/día$ o cm^2/s .

El **coeficiente de almacenamiento** se define, como el volumen de agua que puede ser liberado, por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura igual a la del acuífero saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico o de carga hidráulica; está representado por $2S''$ y no tienen unidades.

I. MARCO FISICO.

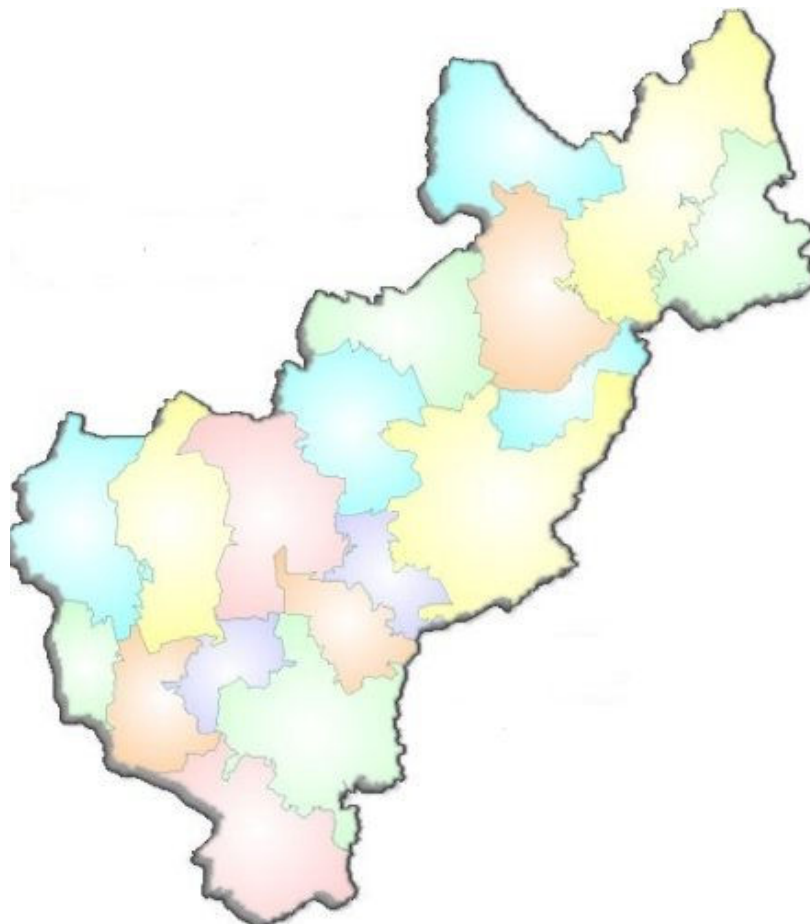
I.1 Localización.

El Estado de Querétaro se localiza en la parte central de la República Mexicana. El estado de Querétaro se encuentra en la parte central del territorio mexicano, entre las coordenadas geográficas 20° 01' y 21° 40' de latitud Norte; y los 99° 03' y los 100° 36' de longitud Oeste.

La mayor altitud en el estado es el cerro de El Zamorano, de unos 3,300 metros sobre el nivel del mar. Las menores altitudes las encontramos al norte del estado, en el cañón del río Santa María, con menos de 600 m.s.n.m.

El estado está dividido en 18 municipios. La capital del estado, la ciudad de Santiago de Querétaro, se encuentra en el municipio más occidental del estado.

Querétaro limita al norte con los estados de San Luis Potosí; al noroeste y poniente con Guanajuato, al sur con Michoacán, México y al sureste y oriente con Hidalgo.



Mapa del Estado de Querétaro

I.2 Fisiografía

El paisaje queretano presenta esencialmente tres fisonomías:

El eje Neovolcánico: ocupa una superficie de 5,516 km², situado en la porción centro y sur de la entidad, se localiza principalmente en los municipios de Corregidora, Pedro Escobedo, Huimilpan, Amealco de Bonfil, Tequisquiapan, El Marqués, Querétaro y San Juan del Río. Las elevaciones principales comprenden la Sierra Queretana y específicamente los cerros Redondo (2,840 msnm), Grande (2,820 msnm) Bravo (2,820 msnm) y Gordo (2,520 msnm).

La Mesa Central: comprende unos 1,148 km² en la porción centro oriental del estado, está integrada por las llanuras angostas entre sierras volcánicas, destaca hacia el noreste el cerro El Zamorano (3,360 msnm) la elevación más alta del estado.

La Sierra Madre Oriental: abarca cerca de 5,314 km² en la porción nororiental del estado, esta casi formada en su totalidad por rocas calizas; su relieve es el más abrupto del estado, por lo que las diferencias de altitud y clima permiten el desarrollo de zonas boscosas y selva mediana; las elevaciones principales las constituyen los cerros El Espolón (3,240 msnm), La Pinguica (3,160 msnm), De la Vega (3,120 msnm), La Laja (3,120 msnm) y La Calentura (3,060 msnm).

La vegetación existente y su distribución en el valle de Querétaro obedecen a las diferencias de altitud, clima, y tipo de suelo, predominando la vegetación xerofítica, siendo en su mayoría nopales, garambullo y huisache.

I.3 Geología

Geológicamente, las planicies localizadas al centro-sur del estado de Querétaro descansan sobre rocas que datan del Paleozoico Superior al Cretácico Superior, originadas durante los períodos Terciario y Cuaternario. Destacan algunos conglomerados calcáreos y rocas graníticas de edad terciaria, ignimbritas y tobas que datan del Oligoceno al Mioceno –localmente ínter digitadas con sedimentos lacustres–, andesitas y piroclásticos asociados del Plioceno; ignimbritas y basaltos del Cuaternario y, por último, los materiales aluviales del Cuaternario que forman la parte superior del relleno y la superficie. Las estructuras geológicas son producto de la intensa actividad tectónica acaecida durante la Orogenia Laramide; de la intrusión de las rocas graníticas que levantaron, deformaron y mineralizaron a los estratos sedimentarios; de un nuevo episodio tectónico, distensivo, que generó sistemas de fracturas y fallas, así como pilares y fosas tectónicas; y la etapa de actividad volcánica acontecida en el período Terciario durante la cual fueron formadas las rocas ígneas que configuraron los rasgos estructurales típicos de esta región.

Las rocas más antiguas del territorio queretano, presentes en la región norte de la entidad, se originaron en el Jurásico inferior (entre 195 y 170 millones de años atrás), a partir de depósitos o sedimentos submarinos de esqueletos calcáreos de coral, así como de arena y arcilla llevadas por los ríos hasta el

fondo de un mar poco profundo que abarcaba todo lo que hoy es la superficie del estado.

Las capas de material, que frecuentemente contienen conchas y otros restos duros de animales marinos, se fueron endureciendo o consolidando para formar rocas sedimentarias: calizas, lutitas y areniscas. Este proceso continuó hasta el final del período Cretácico (hace 65 millones de años), último de la Era Mesozoica.

Después, estas capas de roca se fueron plegando por efecto de presiones en la corteza terrestre, para formar las elevaciones de la Sierra Gorda y de toda la Sierra Madre Oriental. En algunos casos los plegamientos son muy intensos y las rocas presentan además múltiples fracturas y fallas.

I.4 Hidrología

El norte del estado que comprende parte de los municipios de Jalpan, Arroyo Seco, Pinal de Amoles y Landa de Matamoros, se presenta topografía contrastada con altitudes desde los 600 a los 3, 000 msnm; en la áreas de menos altitud, predomina el clima cálido con temperatura media anual entre 22 y 26 °C y un régimen de humedad entre seco y subhúmedo, a medida que se incrementa la altitud, se registra un clima semicálido (18 - 20 °C) y en las partes altas un clima templado (12 – 18 °C) con precipitaciones en el rango de 700 a 1,200 mm. La zona de Cadereyta de Montes, al centro-norte del estado, se encuentra enclavada en la vertiente occidental de la Sierra Gorda, región predominantemente árida cuyos climas en cuanto a humedad van de subhúmedo a seco con precipitaciones entre los 200 y 400 mm anuales, con una temperatura media anual en el rango de los 16 a los 25 °C. Al centro de la entidad, que se incluyen las zonas de Querétaro y San Juan del Río, las condiciones de humedad determinan la presencia de climas secos ligeros, con precipitación media anual entre 500 y 800 mm y una temperatura media anual entre 17 y 19 °C; por último la zona de Amealco de Bonfil, ubicada al sur de la entidad, presenta predominantemente temperaturas medias anuales entre los 13 y 17 °C con régimen de humedad subhúmedo, con precipitaciones anuales en el rango de 600 a 800 mm.

I.5 Geohidrología

El recurso hidráulico subterráneo constituye para el estado de Querétaro y sus diversos tipos de usuarios, la principal fuente de abastecimiento, sobre todo para los asentamientos humanos, pero también para sustentar los centros industriales y las áreas de producción agrícola, en donde las fuentes superficiales no son accesibles o bien, resultan insuficientes para cubrir las demandas.

El modelo conceptual de un acuífero es el esquema geohidrológico que explica las características físicas y el comportamiento del flujo de agua subterránea a través de las unidades hidrogeológicas que conforman y limitan la estructura de un valle. El modelo conceptual no es la geología, ni la geofísica, ni la piezometría ni el esquema de bombeo en dicho valle; es toda

esa información y los elementos geohidrológicos de análisis que se emplean para explicar, en su conjunto, la hidrodinámica y el potencial del recurso subterráneo de cierta región.

Son nueve los acuíferos identificados dentro de la entidad, los cuales se encuentran concentrados en la mitad sur del estado, coincidiendo con las zonas de mayor concentración poblacional y de desarrollo industrial.

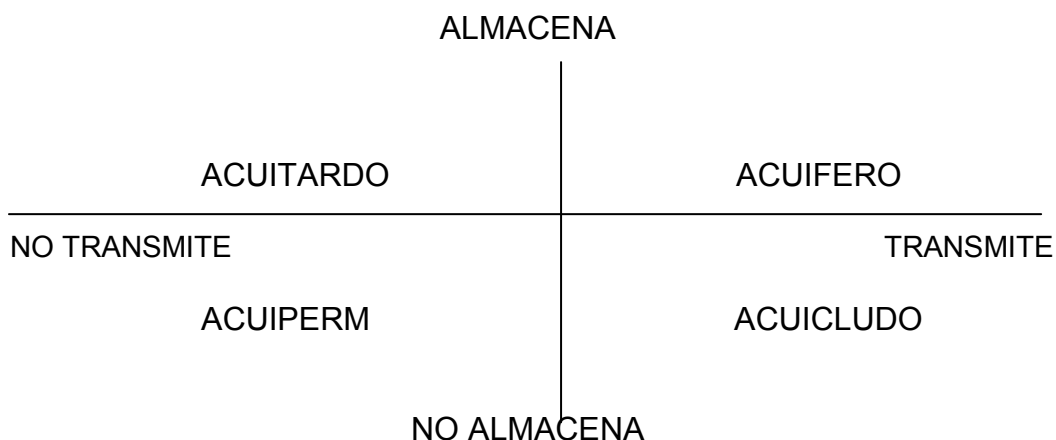
Tabla 3. Acuíferos de la entidad

Clave	RH	Nombre del acuífero	Área (Km ²)	No. de Aprov.	Tipo de Acuífero	Espesor medio (m)
1	RH-12	Querétaro.	484	239	Semiconfinado	300
2	RH-12	Amazcala	217	134	Semiconfinado	290
3	RH-26	San Juan del Río	1,225	715	Semiconfinado	400
4	RH-12	Buenvista	350	73	Semiconfinado	300
5	RH-26	Tequisquiapan	531	310	Semiconfinado	250
6	RH-12	Huimilpan	211	87	Libre	300
7	RH-12	Amealco	310	54	Libre	200
8	RH-26	Tolimán	114	49	Libre	90
9	RH-26	Cadereyta.	103	3	Confinado	300

II. ACUIFEROS Y ABASTECIMIENTO EN EL ESTADO DE QUERÉTARO.

La salud es de suma importancia para el buen desarrollo de una población y el agua es parte fundamental, por ello, no sólo se debe atender la forma de llevar el agua a la población, sino también su calidad y cantidad. La calidad ha sido establecida en las normas oficiales mexicanas correspondientes y la cantidad depende de los usos y costumbres de la población en estudio. Las poblaciones rurales de la Republica Mexicana cuentan con una infraestructura deficiente; se abastecen en forma rudimentaria todavía muchas de ellas, ejemplos de estos son los aljibes, que consisten en depresiones en los terrenos para la captación de las aguas pluviales, envío de pipas para la distribución en tambos, etc. En estas circunstancias la calidad del agua es inadecuado para el consumo humano, además de la dispersión de las comunidades en el medio rural, es una de las causas por las que es difícil el suministro, ya que entre más retiradas estén, se requiere mayor inversión en construcción y en operación.

Un acuífero es una unidad geológica que almacena o transmite agua , en la siguiente figura se puede apreciar la diferencia que existe entre diferentes formaciones geológicas las cuales dan una idea de un acuífero y este queda definido como almacenador y transmisor de agua. Existen acuíferos confinados y semiconfinados, los cuales pueden ser recargados por diferentes fuentes como son ríos, lagos, presas y la lluvia mediante la infiltración.



II.1 Monitoreo

El monitoreo del agua subterránea es el instrumento más importante que se tiene para obtener información sobre su cantidad y su calidad, la información que se obtiene del monitoreo, apoya y complementa la evaluación de la situación que guardan los acuíferos, además, es variable en el tiempo, por lo que se hace necesario realizar mediciones periódicas; esta actividad se refiere específicamente a la colección de datos, generalmente en sitios y profundidades diferentes a intervalos regulares de tiempo con el propósito de proveer información para ser utilizada en:

- 1) Determinar el estado actual del agua subterránea tanto cualitativa como cuantitativamente.
- 2) Proporcionar las bases para detectar tendencias en el tiempo y en el espacio sobre la evolución de los abatimientos del agua subterránea y las variaciones de calidad.
- 3) Facilitar el establecimiento de las relaciones causa-efecto.
- 4) Actualizar y calibrar los modelos matemáticos de flujo de agua subterránea y de transporte de contaminantes.

Por otro lado, una red de monitoreo bien diseñada ayuda a determinar, en cualquier tiempo y espacio: el comportamiento de niveles del agua subterránea, la calibración precisa del modelo de flujo regional, la identificación de zonas que favorezcan la recarga; así como las condiciones de calidad del agua. Tal conocimiento apoyaría a profesionales en planeación para que puedan ordenar el crecimiento urbano.

La piezometría, es el principal indicador del flujo subterráneo si las cargas están referenciadas a la elevación media del nivel del mar, de esta forma las zonas de saturación de mayor elevación, generan movimientos del agua subterránea en dirección a los sitios donde la elevación de los niveles de saturación es menor.

Disponer de un censo completo y actualizado de las captaciones de agua subterránea, no sólo ayuda a diseñar una red de monitoreo; permite también identificar la distribución espacial de los pozos; conocer su profundidad, y volumen de explotación (por usos); así como identificar las zonas con mayor explotación y abatimiento. Otro aspecto fundamental es que facilita la definición del marco físico conceptual de funcionamiento hidráulico subterráneo.

II.2 Situación actual

El acuífero del valle de Querétaro, está conformado por su parte superior por materiales de acarreo sin compactación (aluvión), el espesor del acuífero que subyace al aluvión es muy variable e irregular y va desde los 200 hasta los 600 m de profundidad, por lo que se estima un espesor promedio de 300 m. En la porción norte de la zona, el acuífero está limitado por afloramientos impermeables de rocas sedimentarias marinas e ígneas intrusivas, que lo separan parcialmente del acuífero de Buenavista. De los 239 pozos activos reportados en 1997, 110 estaban destinados al uso público-urbano, 67 al uso agrícola, 45 para la industria, 5 para uso recreativo, 8 de abrevadero y 17 de servicio.

De estos aprovechamientos se extrae para los diferentes usos 103 Mm³/año; la profundidad promedio del nivel estático es de 110 m y la evolución de éste del periodo 1990-1997 fue de 3.3 m anual, siendo las evoluciones negativas más agudas en las zonas de Carnation y Gerber con 6.6 m y en San Pedro Mártir con 4.0 m anual; por otra parte, la recarga natural del acuífero se calcula en 70 Mm³/año, por lo que se reporta una sobreexplotación del 30% aproximadamente.

Dentro del acuífero del valle de Amazcala se tienen registrados 223 aprovechamientos de los cuales sólo 134 están activos; en la zona predominan los pozos agrícolas (105), seguidos de los destinados al uso público-urbano con 18 y 11 más para abrevadero.

La profundidad del agua subterránea varía entre los 57 y 110 m y la evolución promedio es de 2.5 m por año; es de tipo semiconfinado y tienen un espesor medio de 290 m. La extracción se calcula en 55 Mm³/año, contra una recarga de 34 Mm³/año, por lo que se observa una sobreexplotación de 21 Mm³/año. Este acuífero, está integrado por una capa superficial de aluvión y, subyaciendo, rocas fracturadas andesíticas y riolíticas que asoman en las sierras circundantes.

El acuífero del valle de San Juan del Río, tiene una extensión calculada en 1,225 km², ubicándolo en el más grande del estado; su parte superior está constituida por relleno aluvial de geometría irregular y espesor máximo de 150 m en la porción central del valle, y su parte inferior por rocas fracturadas de composición basáltica y andesítica, con espesor registrado de 300 a 400 m; está hidráulicamente conectado con el acuífero de Tequisquiapan, al oriente, y con el de Querétaro al poniente, a los cuales alimentaba en condiciones naturales, su aportación a este último ha sido casi anulada.

De acuerdo con los datos de 1997, se ubicaban dentro del valle 713 pozos de los cuales 500 son agrícolas, 124 se destinaban para abastecimiento de agua potable a los centros de población asentados sobre este acuífero, 39 pozos para el uso industrial y 52 para abrevadero; la evolución del nivel estático dentro del periodo 1993-1997, es aproximadamente de 2.0 m por año con abatimientos puntuales de hasta 3.0 m en las zonas de los poblados de San Clemente, La Valla, La Fuente, El Colorado y Saldarriaga; la extracción que se realiza mediante los aprovechamientos existentes es de 396 Mm³/año, mientras que la recarga es de 279 Mm³/año por lo que el déficit es de 117 Mm³/año.

El acuífero de Buenavista contiene 73 aprovechamientos de los cuales se extraen 29 Mm³/año, contra una recarga estimada en el mismo volumen anual, por lo que se considera en equilibrio; su espesor medio es de 300 m y es de tipo semiconfinado. Este acuífero alimenta por flujo subterráneo a los de Amazcala y de Querétaro; esta integrado por una capa de aluvión y, subyaciendo, rocas fracturadas andesíticas y riolíticas que asoman en las sierras circundantes.

El acuífero de Tequisquiapan tiene registrados en activo 310 captaciones con 198 pozos de uso agrícola, 88 para uso público-urbano y 24 de abrevadero. El nivel estático del acuífero varía entre los 20 y los 120 m de profundidad y su evolución dentro del periodo 1991-1997 se presentó entre rangos que oscilaron entre 0.5 y 0.3 m por año; este es un acuífero semiconfinado que tiene un espesor medio de 250 m. En este acuífero la extracción conjunta se calcula en 118 Mm³/año contra una recarga natural estimada en 109 Mm³/año, lo que ubica al acuífero en equilibrio, además esta

compuesto, en orden creciente de profundidad por aluvión de poco espesor, conglomerados poco cementados y rocas fracturadas de composición riolítica expuestas en la montañas adyacentes.

En el acuífero del valle de Huimilpan se tienen registrados 87 pozos de los cuales 74 se reportan en operación, de este total, 67 pertenecen a usuarios agrícolas, 9 son para abasto de agua potable y 11 son de abrevadero. La profundidad del nivel del agua varía de 30 a 120 y se tienen registros de abatimientos anuales máximos y mínimos de 1.0 m y 0.2 m respectivamente; cuenta con un espesor medio de 300 m y se considera de tipo libre. Se extraen mediante los aprovechamientos 22 Mm³/año y se recargan naturalmente 20 Mm³/año. En esta zona, las rocas acuíferas predominantes son tobas riolíticas y derrames basálticos, siendo el espesor explorado apenas de unos 200 m.

El acuífero del valle de Amealco, contiene 52 aprovechamientos a través de los cuales se realiza la extracción de 19 Mm³/año, el cual equivale aproximadamente a la recarga natural del acuífero; la profundidad del nivel estático varía y se ubica alrededor de los 35 y los 110 m. Se considera de tipo un acuífero libre y su espesor medio es de 200 m. En la zona de Amealco, las rocas predominantes al igual que en Huimilpan, son tobas riolíticas y derrames basálticos.

El acuífero de Tolimán, contrario a otros acuíferos, se destina predominantemente al uso público urbano, se tienen registrados 49 aprovechamientos de los cuales 46 son pozos y 3 son manantiales con un volumen de extracción de 2 Mm³/año y una recarga de igual de magnitud; este acuífero también se considera de tipo libre cuyo espesor medio es de 90 m aluvión, depósitos lacustres y tobas riolíticas forman el acuífero de Tolimán, sobreyaciendo los conglomerados que en esta zona constituyen el basamento impermeable.

En el acuífero del valle de Cadereyta, se tienen registrados sólo 5 aprovechamientos, 3 pozos y 2 manantiales destinados en su totalidad para el abastecimiento de agua potable, con una extracción de 3.8 Mm³/año; la profundidad del nivel estático se ubica entre los 180 y 200 m. Se considera como acuífero confinado con un espesor medio de 300 metros.

A nivel regional, la mayoría de las unidades funcionan como un acuífero en medios granulares, con intercalación de rocas volcánicas. Todos ellos son del tipo semiconfinado a libre pues, en términos generales, se observan siempre respuestas piezométricas similares, configurables regionalmente, que conforman gradientes hidráulicos relativamente suaves a lo largo y ancho de todo el sistema, además se puede apreciar el mosaico regional de los acuíferos del estado de Querétaro en a **Figura 1**.

De acuerdo con pruebas de bombeo, realizadas a lo largo de los años en los distintos acuíferos queretanos, la conductividad hidráulica parece variar entre 0.1 y 200 m/día, y el coeficiente de almacenamiento regional entre 6 y 12%. En el valle de Querétaro, la capacidad específica varía de 0 a 10 L/s/m en promedio. La resistividad tiene un rango de 0 a 20 ohms-m, y los valores de

conductividad eléctrica del agua van de 500 a 1000 ohms/cm (en la zona industrial).

II.3 Balance Integral hídrico

La sobreexplotación de acuíferos, si bien es un problema de difícil solución, puede reducirse mediante políticas de consumo racional, aunadas a un programa de control y monitoreo que garantice el abasto mínimo a los sectores usuarios e impida alcanzar un estado *dañino* (irreparable) del sistema geohidrológico. En los últimos años, por ejemplo, se han desarrollado modelos matemáticos de simulación del flujo subterráneo que posibilitan, a la CNA y los organismos operadores, programar los volúmenes disponibles de agua en función de las demandas requeridas por la población, industria y el sector agrícola.

En el estado de Querétaro, se han hecho modelos para conocer la situación real del agua subterránea en los valles de Chichimequillas–Amazcala, Huimilpan, Tequisquiapan–Ezequiel Montes, Buenavista, San Juan del Río–Pedro Escobedo y Querétaro. Los modelos matemáticos han sido una excelente herramienta para poder simular las condiciones de los acuíferos y han permitido, además, representar las condiciones futuras de explotación que, en su momento, impondrán las nuevas demandas.

A nivel regional, la mayoría de las unidades funcionan como un acuífero en medios granulares, con intercalación de rocas volcánicas. Todos ellos son del tipo semiconfinado a libre pues, en términos generales, se observan siempre respuestas piezométricas similares, configurables regionalmente, que conforman gradientes hidráulicos relativamente suaves a lo largo y ancho de todo el sistema.

Por ubicarse allí la ciudad capital, el valle de Querétaro es considerado el de mayor importancia a nivel estatal; por lo que en el acuífero de Querétaro los mecanismos de recarga mediante flujo subterráneo son desde diversos lugares de la periferia. En el caso del valle de Querétaro, la recarga ocurre por el oriente, a través de La Cañada; por el norte, proveniente del valle de Buenavista, con dos entradas (Jurica y Tlacote El Bajo) con direcciones N–S en ambos casos; y por el sur, desde el acuífero de Huimilpan. Este mecanismo de recarga tiene que ver seguramente con el fracturamiento abierto y el gradiente hidráulico observado en el área. Por el sur se manifiesta un flujo local profundo procedente de la Sierra de Huimilpan que desemboca en Villa Corregidora. Las entradas subterráneas son controladas por el flujo regional proveniente del valle de San Juan del Río, desde el parte-aguas dinámico formado en sus inmediaciones, así como del flujo subterráneo proveniente de la porción norte del valle de Querétaro.

El acuífero de Buenavista, al norte del valle de Querétaro, recibe alimentación lateral por el norte del área, situación similar que se repite en el caso del acuífero denominado de Chichimequillas. Al parecer, no existe comunicación entre estos dos medios; pero la evidencia de los estudios isotópicos y el tipo de

respuesta piezométrica observada en la zona, han revelado que hay un intercambio de flujo desde Chichimequillas hacia el lado nororiental del valle de Querétaro.

En el área de San Juan del Río, el flujo regional indica que existe una comunicación franca con el acuífero de Chichimequillas, situación confirmada también con las cartas gravimétricas regionales y la propia geología del valle de San Juan. Todo la frontera poniente y sur-poniente de este valle manifiesta efectos de recarga lateral; esto puede deberse, en efecto, al flujo regional procedente del área de Huimilpan (por el rumbo de Pedro Escobedo, Los Cues, El Sauz) y, en parte, a procesos importantes de recarga vertical en los alrededores de la presa Constitución. Por el lado oriente, los afloramientos de andesita e ignimbrita generan una barrera entre los acuíferos de San Juan y Tequisquiapan, aunque por el extremo sureste del primero (y sur del segundo) existe franca comunicación entre ambos medios, situación que también se ha podido confirmar con las cartas gravimétricas y los gradientes piezométricos orientados con dirección SW-NE.

El acuífero de Tequisquiapan, en efecto, muestra la tendencia de dos flujos regionales: el que proviene del norte, en particular por el lado de Ezequiel Montes (y en menor medida por el rumbo de la Peña de Bernal); y el que aporta el acuífero de San Juan desde el sur, conforme a la dirección regional del flujo superficial que observa la subcuenca del río San Juan. En la zona de confluencia, cerca del lugar donde se ubica la presa Centenario, el flujo es sumamente irregular y anisotrópico, lo cual se acrecienta por la presencia, aquí y allá, de afloramientos volcánicos de ignimbritas riolíticas y tobas pumíticas, localmente interdigitadas con sedimentos lacustres. De hecho, salvo en la zona de comunicación con el acuífero de San Juan, las conductividades hidráulicas registradas fluctúan apenas entre 1 y 5 m/día.

En general, la recarga superficial se lleva a cabo a través de retornos de riego e infiltración de aguas pluviales a los depósitos aluviales. También mediante las sierras periféricas a esta unidad, utilizando el fracturamiento como medio de conducción de agua a profundidad. La descarga subterránea ocurre entre los propios acuíferos, aunque en el más bajo de ellos –el de Querétaro– este flujo se orienta hacia la subcuenca de Celaya, mediante el estrechamiento estructural que coincide con los límites estatales. Pero la principal descarga de agua, como es sabido, se lleva a cabo a través de la explotación intensiva del mismo recurso.

De acuerdo con estudios previos, así como resultados de los trabajos complementarios, el acuífero regional es prácticamente de tipo *libre*. Una prueba es la evidencia de una respuesta piezométrica única en toda el área de los valles. Otra es la propia caracterización geomorfológica del área, en la que se ha identificado mayormente *unidades de planicie acumulativa*, constituidas por depósitos volcano-sedimentarios de material no consolidado, aluvión y suelo residual.

Tabla 4. Superficies de los acuíferos regionales de Querétaro

ACUÍFERO LOCAL	Superficie (km²)
Buena Vista	81.9
Querétaro	484.3
Huimilpan	123.2
Chichimequillas	223.8
San Juan del Río–P. Escobedo	850.8
E. Montes–Tequisquiapan	424.8
TOTAL	2188.8

Con relación al comportamiento hidráulico del medio, es un hecho conocido que el recurso subterráneo se encuentra sometido a una sobreexplotación importante desde hace varios años, especialmente en los valles de Querétaro y San Juan del Río. Probablemente se pueda identificar una condición estacionaria de la superficie piezométrica (esto es, sin variación anual significativa) a principio de la década de los setenta; sin embargo, la información de niveles estáticos y caudales de extracción no era entonces tan completa ni sistemática como se tiene hoy en día. Puede decirse que los datos de carácter hidrológico eran suficientes para establecer balances anuales del agua subterránea, pero en todo caso inadecuado para configurar un modelo matemático de simulación del flujo regional. Lo anterior supone, evidentemente, que el modelo por desarrollar tiene que ser construido con información reciente –más completa– y en condiciones de régimen transitorio, es decir, las que observan una evolución o abatimiento anual de niveles piezométricos por efecto de una extracción que excede la capacidad natural de recarga en el acuífero.

Según los datos el acuífero de San Juan del Río–Pedro Escobedo tiene la mayor cantidad de pozos, con un total de 615, de los cuales 467 (75.9%) son para uso agrícola. En cuanto a número, los siguientes en importancia son los de Querétaro y Ezequiel Montes–Tequisquiapan, con 307 y 291 pozos, respectivamente; sin embargo, debe destacarse que, en el caso de Querétaro, casi la mitad de ellos (141, o sea el 45.9%) se utilizan en el sector público–urbano (potable). En cuanto a los volúmenes de extracción en los distintos valles, con base en los datos del año 1995 (el más completo, disponible para el estudio), en la región se extraen alrededor de 580.0 millones de m³ anuales; de éstos, casi el 80% (462 millones) son usados por el sector agrícola. Tan sólo el valle San Juan del Río–Pedro Escobedo se beneficia, en cuanto a riego, con más de 266 millones de m³/año (57.7% del total en el sector).

Por lo que se refiere a las fronteras de carga, se supusieron de inicio las identificadas desde hace años; sin embargo, se tomó en cuenta la inferencia de los estudios isotópicos respecto a que hay cierta comunicación (a profundidad) entre los acuíferos de Chichimequillas y Querétaro, y a que no la hay (o es mínima) entre este último y el valle de Los Apaseos, Guanajuato. Con respecto a las fallas y fracturas, en especial las del valle de Querétaro, se asociaron bloques de celdas al modelo, susceptibles de justificar un valor mínimo (si fueran barreras) o máximo (si favorecieran al flujo subterráneo) de conductividad hidráulica. La diferencia de valores entre bloques serviría también para explicar la heterogeneidad provocada por la presencia de estos elementos estructurales.

Una representación más del flujo se hace en la **Figura 2**, donde se simboliza, mediante vectores, la dirección preferencial del movimiento de agua subterránea. Las trayectorias, en efecto, confirman el comportamiento del flujo regional: con dirección norte-sur en el acuífero de Buenavista y lado norte de los acuíferos de Querétaro, Pedro Escobedo y Ezequiel Montes; y con dirección contraria en los de Huimilpan y lado sur de Querétaro, San Juan del Río y Tequisquiapan. Se advierte también una orientación hacia los valles de los ríos Querétaro y San Juan, en el área de sus respectivos acuíferos y, en contraste, trayectorias poco definidas y complejas al centro del acuífero de San Juan, donde la geología reporta la incidencia de domos riolíticos y afloramientos andesíticos, por la zona de Pedro Escobedo, y la hidrología destaca la cercanía del conocido parte aguas continental.

Otro resultado de la modelación se esquematiza en la **Figura 3**, que ilustra la distribución de los abatimientos anuales promedio para el período de calibración, 1992–1995. En ella se aprecia la evolución de niveles en los acuíferos del mosaico regional, advirtiéndose la zonificación de los lugares más críticos: áreas con abatimiento anual de 3m o más, al centro del valle de Querétaro (sobre todo por la zona industrial), y otras de 2m/año en el mismo acuífero (cerca de los conos más pronunciados) y el valle de San Juan del Río.

La Tabla 6 muestra, a manera de resumen, el valor de abatimiento promedio en cada uno de los valles que integran el acuífero regional. Tal resultado se ha utilizado para contrastar el impacto benéfico de una reducción en el descenso de niveles piezométricos cuando se aplican distintas políticas de ahorro en los volúmenes de extracción. En el caso del valle de Querétaro, por cierto, se ha obtenido un valor para toda el área de modelación, y otro asociado exclusivamente con la zona de la mancha urbana.

Tabla 5. Abatimiento medio anual, acuíferos regionales de Querétaro (Período 1990–2000 para el valle de Querétaro y 1992–1995 para los restantes)

ACUÍFERO LOCAL	Abatimiento (m/año)
Buenavista	-0.95
Querétaro (toda el área)	-2.14
Querétaro (mancha urbana)	-2.70
Huimilpan	-0.80
Chichimequillas	-1.45
San Juan del Río(P.Escobedo)	-1.60
E. Montes(Tequisquiapan)	-1.00

De acuerdo con la Tabla 7, se concluye que es posible reducir considerablemente los abatimientos en los acuíferos sobreexplotados y, en el de Querétaro, aproximarse a la condición de equilibrio dinámico (sin alcanzarla). En el valle de Pedro Escobedo, San Juan del Río, por mucho el más grande y aprovechado, difícilmente podría frenarse la pérdida de almacenamiento y el deterioro consecuente, a menos que se apliquen medidas estructurales y no estructurales definitivas para modificar drásticamente las prácticas agrícolas (tecnificación exhaustiva del campo, restricciones severas al cultivo forrajero, eliminación del subsidio en costos de agua y electricidad, sustitución del bombeo por agua tratada (incluyendo la posibilidad de transferencias desde la presa Zimapán). Para el acuífero de Querétaro, la reducción en las extracciones de agua potable depende de la factibilidad de importar agua desde otras fuentes pues, de lo contrario, el ahorro en el consumo no aseguraría un escenario demasiado optimista (acaso el uno o tres de los casos descritos).

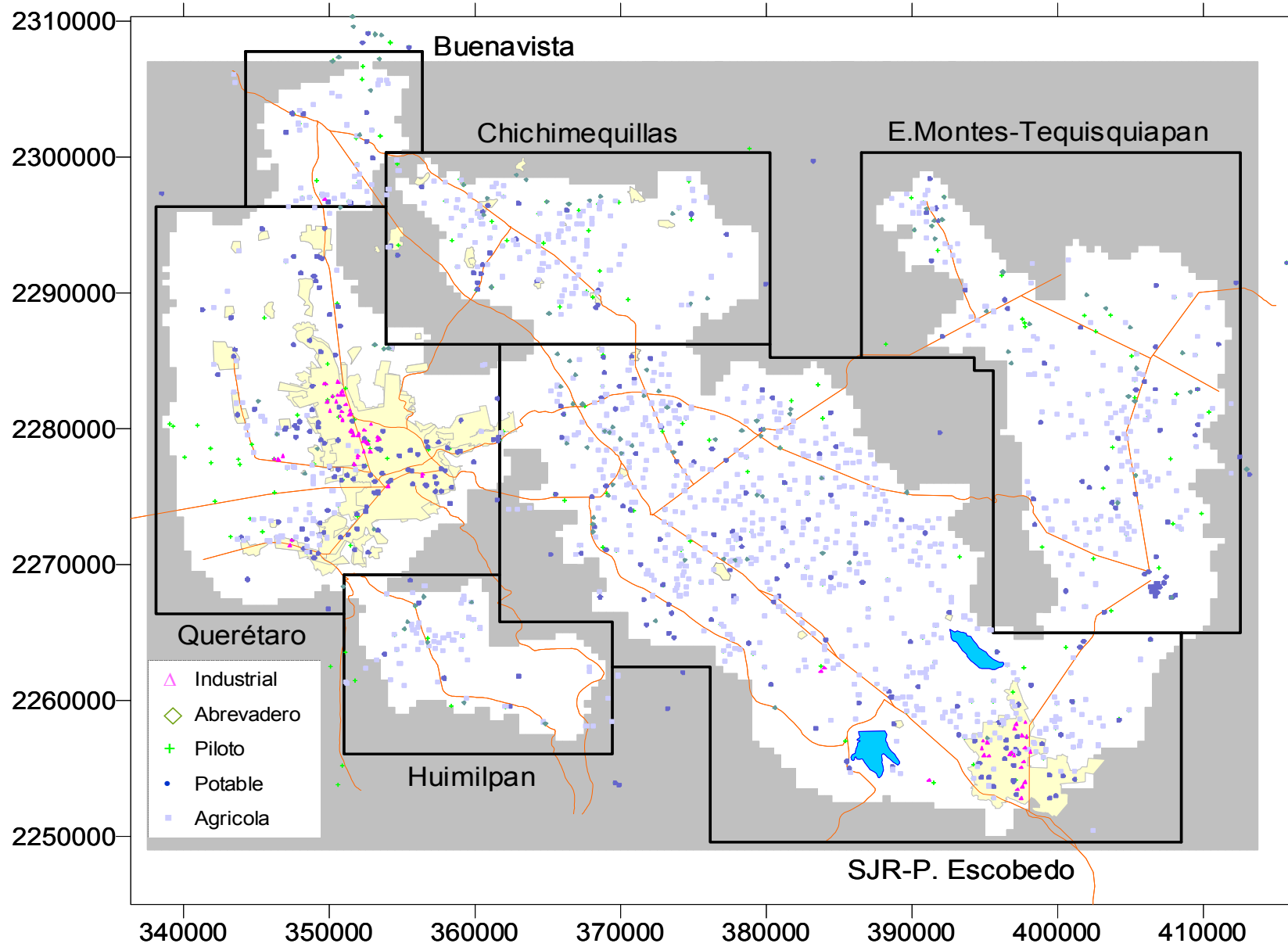


Figura 1
Mosaico regional de
acuíferos en el estado
de Querétaro

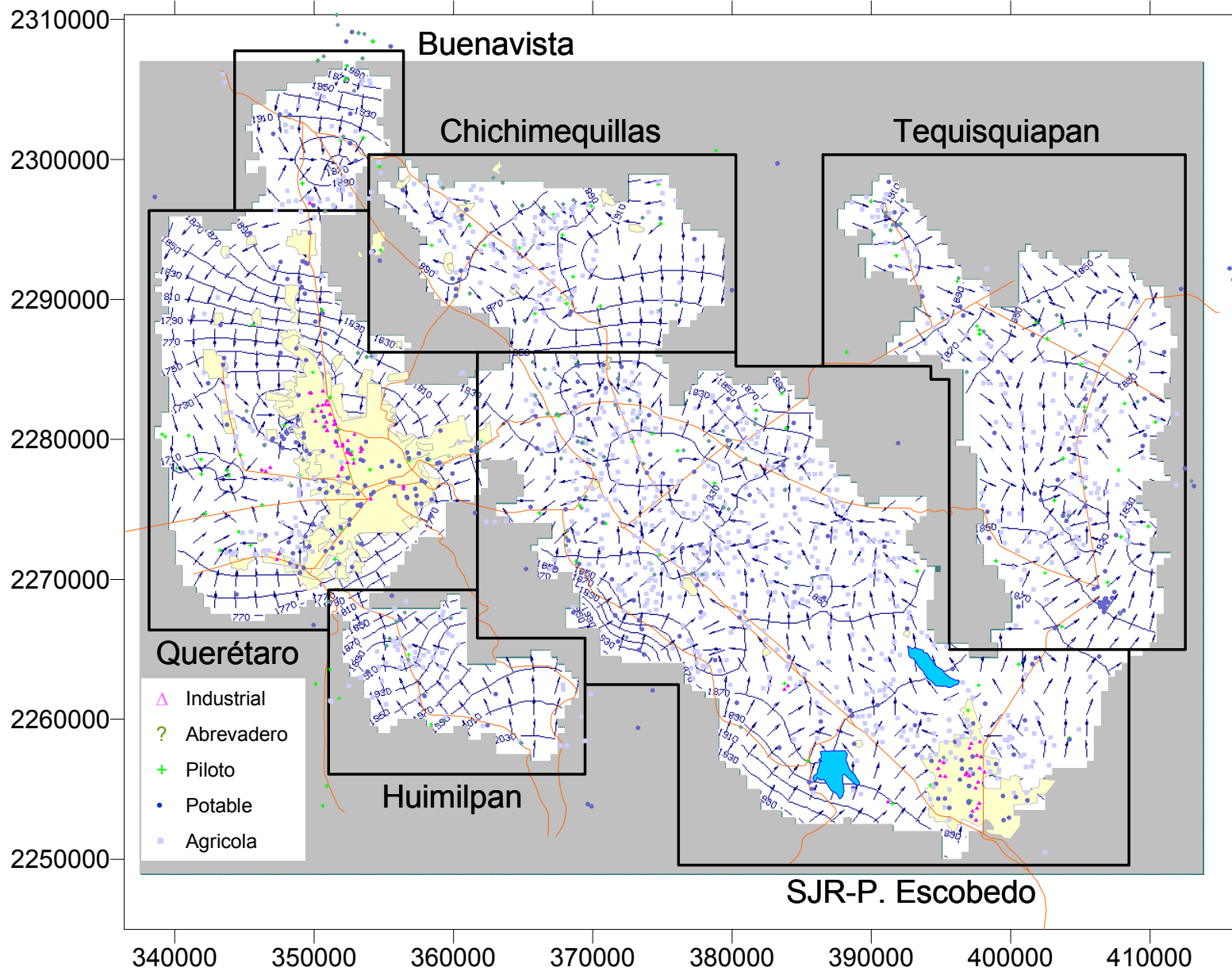


Figura 2
 Mosaico de acuíferos mostrando dirección preferencial del flujo subterráneo regional. Los vectores se asocian claramente con las zonas de recarga lateral, salida e intercambio de flujo entre acuíferos.

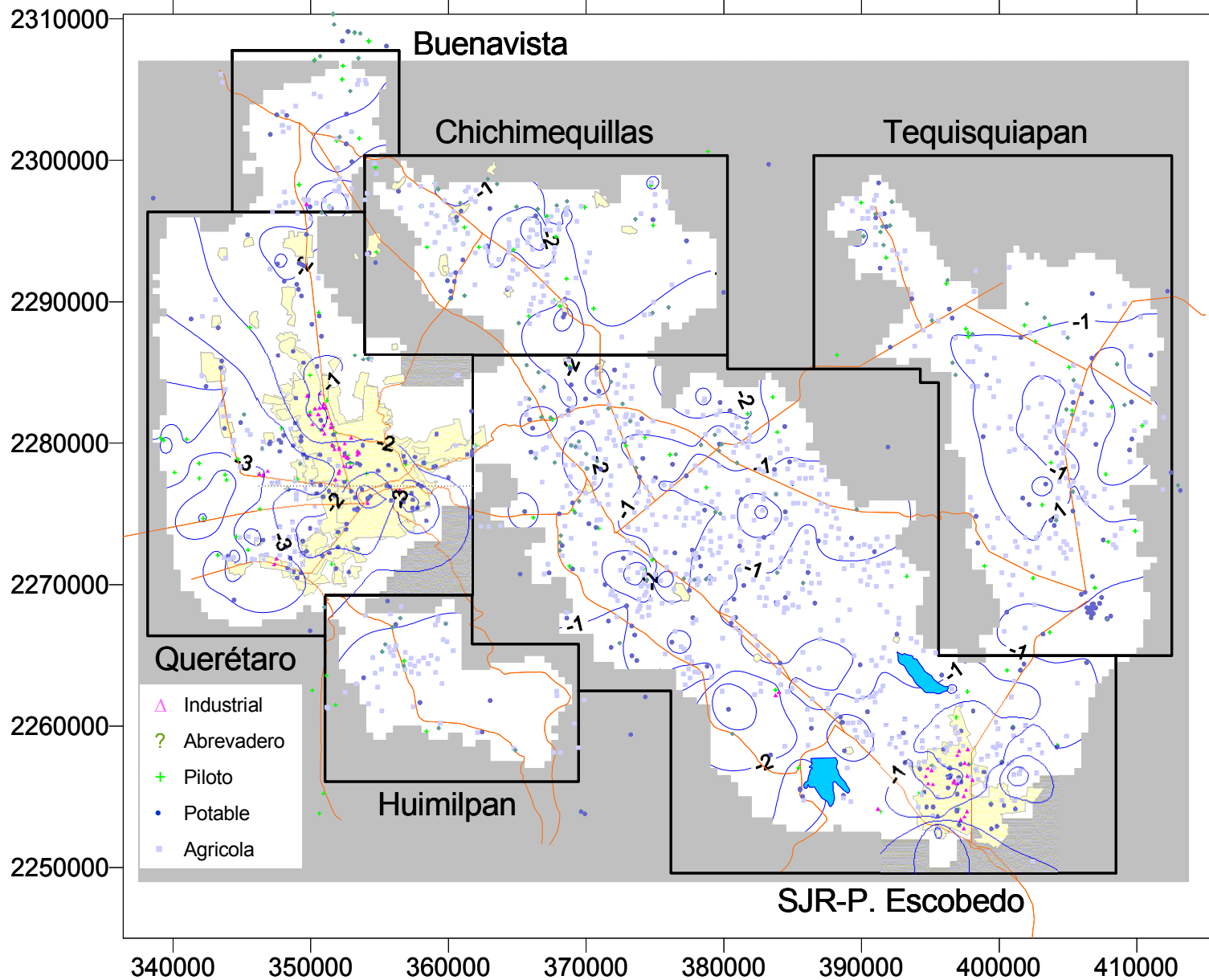


Figura 3
 Mosaico de acuíferos con distribución de abatimientos anuales promedio para el período de calibración 1992–1995. Los lugares más críticos señalan 3 m o más por año, en algunas zonas del valle de Querétaro

Tabla 6

Balance integral del agua en los valles de Querétaro, período 1990–2000
(Los términos de volumen están expresados en millones de m³ por año)

Acuífero	Superficie (km ²)	Infiltración y Retornos	Bombeo	Flujo regional		Oferta	ΔV	Abatimiento (m/año)	Coeficiente S (adim.)
				Entrada	Salida				
Buenavista	81.9	13.10	-23.00	6.50	-1.40	19.60	-4.80	-0.95	0.062
Querétaro	484.3	28.00	-105.00	11.50	-0.80	39.50	-66.30	-2.14	0.064
Huimilpan	123.2	12.40	-17.40	0.00	-5.30	12.40	-10.30	-0.80	0.105
Chichimequillas	223.8	34.70	-60.40	11.70	-17.00	46.40	-31.00	-1.45	0.095
S.J.R. – P. Escobedo	850.8	101.30	-284.30	24.10	-9.90	125.40	-168.80	-1.60	0.12
Tequisquiapan	424.8	39.70	-86.40	7.30	-1.00	47.00	-40.40	-1.00	0.095
TOTAL	2188.8	229.20	-576.50	(34.1)	(-6.4)	290.30	-321.60		

Tabla 7

Acuífero regional de Querétaro. Balance hídrico integral por ESCENARIOS (1992–2000)

Acuífero	Recarga y flujo regional			ESCENARIO	Bombeo	ΔV	Abatimiento (m)	
	Inf / Ret	Entrada	Salida				VMF (8 años)	BAL (final)
Querétaro	28.0	11.5	-0.8	Actual	-105.0	-66.3	-2.20	-2.20
				1	-83.5	-44.8	-1.85	-1.49
				2	-59.8	-21.1	-1.50	-0.70
				3	-74.7	-36.0	-1.65	-1.19
				4	-51.0	-12.3	-1.32	-0.41
Chichimequillas	34.7	11.7	-17.0	Actual	-60.4	-31.0	-1.45	-1.45
				3	-48.9	-19.5	-1.32	-0.92
S.J.R. – P. Escobedo	101.3	24.1	-9.9	Actual	-284.3	-168.8	-1.60	-1.60
				3	-227.0	-111.5	-1.40	-1.09

NOTAS GENERALES: **a)** Los escenarios corresponden a: 1, reducción de 1/3 en extracciones del sector público–urbano; 2, reducción de 2/3 en extracciones de igual sector; 3, el escenario 1 menos 20% en extracciones del sector agrícola; y 4, el escenario 2 menos 20% en extracciones del sector agrícola. **b)** El abatimiento VMF es el que alcanza cada acuífero después de 8 años, conforme a la respuesta del modelo *Visual MODFLOW*. El otro (BAL), se refiere al resultado del balance regional y equivale a un valor promedio esperado a largo plazo. **c)** El descenso medio anual en el valle de Querétaro es característico sólo del área de la mancha urbana.

III. AGUAS RESIDUALES

El agua residual proviene de muchas fuentes, tales como las descargas domésticas e industriales, de la infiltración del agua subterránea y del escurrimiento meteorológico. Las descargas domésticas son el resultado de las actividades que la gente realiza día con día, las secreciones corporales, el lavado, la preparación de alimentos y las actividades recreativas, promediando unos 227 a 250 litros por persona por día, el volumen y la naturaleza de las descargas industriales varían significativamente, en función del tipo de industria, de la forma en que las empresas administran su consumo de agua y del nivel de tratamiento de sus aguas residuales antes de ser descargadas. Una acería por ejemplo, puede descargar un volumen que oscila entre los 5700, hasta unos 151000 litros, por cada tonelada de acero producido, aunque este volumen puede reducirse significativamente si las aguas se reciclan.

La composición de las aguas residuales se analiza utilizando parámetros físicos, químicos y biológicos, los análisis comunes son la medición de sólidos, de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), de la demanda química de oxígeno (DQO), temperatura y del pH. Debido a que las aguas residuales industriales son más variables que el agua doméstica de desecho, su tratamiento también es variable, frecuentemente las aguas residuales industriales son más concentradas que las de origen municipal.

La mayor parte de las aguas residuales industriales orgánicas deben de recibir algún tratamiento antes de ser descargadas a los sistemas de aguas residuales municipales o a las unidades biológicas en el sitio industrial; con respecto al tratamiento, algunas aguas residuales industriales responden tan bien al tratamiento químico como al tratamiento biológico, otras responden favorablemente al tratamiento químico anterior al tratamiento biológico ó viceversa. Ahora bien, el industrial sabe perfectamente que contaminantes incorpora a su proceso productivo; el conocimiento de qué contaminantes se agregan son los parámetros clave para analizar y cuidar; si el responsable de la supervisión de una planta de tratamiento sabe que el tratamiento es secundario y los desechos se degradan biológicamente, entonces el parámetro clave es la DBO, si los desechos provienen de talleres de maquinado, el parámetro será grasa y aceites y el proceso de tratamiento adecuado será de naturaleza química, si el proceso industrial se involucran metales pesados, tal como en la industria de la curtiduría y actividades pecuarias, su propietario sabe bien en que tintes se utilizan metales pesados, así como en los medicamentos de los animales. En el ámbito industrial, el ingeniero de proceso sabe exactamente lo que va a ocurrir en su planta de tratamiento, antes de que inicie el proceso ó si va a ver cambios en éste.

III.1 Análisis de cantidad

La finalidad de estimar el crecimiento anual de la población del estado de Querétaro en un horizonte de 25 años, a partir del año 2000 y proyectar la población a nivel municipal, y además por subregiones hidrológicas, servirá como base para el cálculo de la demanda de agua potable del estado, tanto en el escenario de tendencias, como en los que se elaboren a partir de diferentes fechas y diferentes alternativas.

Tabla 8. Proyección de población.

Subregión alto Panuco

CLAVE	NOMBRE	2000	2005	2010	2015	2020	2025
22003	Arroyo Seco	13,251	13,269	13,275	13,278	13,279	13,279
22004	Cadereyta de Montes	59,336	65,337	69,821	73,073	75,383	77,000
22005	Colón	51,063	57,152	61,759	65,146	67,570	69,276
22007	Ezequiel Montes	29,993	33,481	36,124	38,059	39,443	40,416
22009	Jalpan de Serra	24,378	27,385	30,720	34,413	38,497	43,008
22010	Landa de Matamoros	19,603	20,180	20,617	20,945	21,189	21,212
22013	Peñamiller	19,498	20,803	21,748	22,418	22,887	23,212
22002	Pinal de amoles	27,819	28,597	29,227	29,734	30,141	30,465
22015	San Joaquín	9,006	10,244	11,199	11,907	12,419	12,781
22018	Tolimán	22,227	23,982	25,228	26,117	26,742	27,176

Subregión San Juan Qro.

CLAVE	NOMBRE	2000	2005	2010	2015	2020	2025
22001	Amealco de Bonfil	54,631	58,933	63,294	67,695	72,119	76,548
22012	Pedro Escobedo	53,938	60,005	64,586	67,932	70,320	71,998
22016	San Juan del Río	180,176	207,936	238,197	270,906	305,975	343,274
22017	Tequisquiapan	53,993	63,608	74,849	87,977	103,291	121,136

Subregión la Laja

CLAVE	NOMBRE	2000	2005	2010	2015	2020	2025
22006	Corregidora	75,246	88,789	99,976	108,793	115,509	120,501
22008	Huimilpan	29,345	31,495	33,282	34,745	35,929	36,876
22011	Marques El	65,608	69,621	72,828	75,354	77,323	78,844
22014	Querétaro	650,537	750,374	858,475	974,437	1,097,714	1,227,593

Estado de Querétaro	1,439,698	1,631,181	1,828,203	2,022,930	2,225,750	2,434,223
---------------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Los requerimientos de agua en el futuro, dependerán básicamente de tres variables: una es la población estimada a esa fecha, otra es la cobertura del servicio de agua potable y alcantarillado con que cuenta la población, y por último la dotación correspondiente a la población de acuerdo al número de habitantes (rural, urbana media y grandes ciudades). Con una base de datos y considerando el crecimiento de la población, se calculó la demanda correspondiente al período 2000-2025.

Tabla 9. Proyección de demanda de agua para uso público urbano.

Subregión Alto Pánuco

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	15.58	16.89	17.92	18.72	19.36	19.89
2500-49999	4.85	5.39	5.83	6.19	6.49	6.75
50 000 y más	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	20.43	22.28	23.74	24.91	25.85	26.64

Subregión San Juan

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	12.31	12.82	13.19	14.62	16.12	17.72
2500-49999	10.23	11.72	13.27	14.92	16.70	18.65
50 000 y más	11.58	13.37	15.31	17.42	19.67	22.07
	34.13	36.91	41.77	46.96	52.50	58.43

Subregión La Laja

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	13.27	12.66	13.92	15.12	16.26	17.36
2500-49999	12.43	14.21	15.87	17.41	18.85	20.20
50 000 y más	69.29	79.91	91.42	103.77	116.90	130.72
	94.99	106.78	121.22	136.30	152.01	168.30

Estado de Querétaro

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	41.17	41.37	45.03	48.47	51.75	54.97
2500-49999	27.51	31.31	34.97	38.51	42.03	45.60
50 000 y más	87.53	99.94	113.40	127.85	143.23	159.46
	156.19	172.63	193.40	214.83	237.02	260.03

Como parte del estudio general del diagnóstico y de la problemática existente en la entidad, es indispensable tomar en cuenta, que además de la demanda de agua potable que requerirá la población en el futuro, los volúmenes de aguas residuales de tipo doméstico que se generarán a efecto de considerar en la planeación el desarrollo de los sistemas de alcantarillado sanitario, así como los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Para proyectar el volumen de descarga que generará la población en el período del año 2000 al año 2025 se tomará como base de datos los valores actuales proporcionados por la CNA de agua residual de origen municipal generada en el estado.

Tabla 10. Proyección de las descargas en el uso público urbano.

Subregión Alto Pánuco

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	13.01	14.10	14.96	15.63	16.17	16.61
2500-49999	4.05	4.5	4.86	5.17	5.42	5.64
50 000 y más	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	17.06	18.6	19.83	20.80	21.59	22.24

Subregión San Juan

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	9.21	8.85	9.87	10.94	12.07	13.26
2500-49999	7.66	8.77	9.93	11.16	12.50	13.95
50 000 y más	8.67	10.00	11.46	13.03	14.72	16.52
	25.54	27.62	31.26	35.14	39.29	43.73

Subregión La Laja

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	6.04	5.76	6.34	6.89	7.41	7.91
2500-49999	5.66	6.47	7.23	7.93	8.58	9.20
50 000 y más	31.55	36.39	41.63	47.26	53.23	59.53
	43.25	48.62	55.20	62.07	69.22	76.64

Estado de Querétaro

Rango de habitantes	Demanda en Mm ³ 2000	Demanda en Mm ³ 2005	Demanda en Mm ³ 2010	Demanda en Mm ³ 2015	Demanda en Mm ³ 2020	Demanda en Mm ³ 2025
1 – 2499	22.56	22.67	24.68	26.56	28.36	30.12
2500-49999	15.08	17.16	19.16	21.11	23.04	24.99
50 000 y más	47.97	54.77	62.15	70.07	78.50	87.39
	85.61	94.61	105.99	117.74	129.89	142.51

III.2 Análisis de calidad

En cuanto a la calidad del agua subterránea, solamente se tienen estudios para los acuíferos de Querétaro, San Juan del Río y Tequisquiapan, en los cuales se detectaron los siguientes resultados por contaminante:

Grasas y Aceites: En Querétaro se presentaron los valores mayores a cero, aunque se ha tenido una tendencia a disminuir hasta en 10 mg/l; para los acuíferos de San Juan del Río y Tequisquiapan se presentan concentraciones importantes de 16 y 25 mg/l respectivamente.

Plomo: En los tres acuíferos se presentaron trazas menores a lo que marca la normatividad de salud que son 50 µg/l.

Coliformes fecales: Los tres acuíferos presentan buena calidad del agua, apta para el consumo humano, con valores menores a 1000 NMP (número más probable) que marca la norma, sin embargo se recomienda eliminar cualquier concentración.

Demanda química de oxígeno: Se sobrepasan los límites permisibles de 2 mg/l en el acuífero de Querétaro, en San Juan y Tequisquiapan se presentan valores mayores a cero pero sin rebasar la norma.

Nitrógeno: Solamente se presentaron algunos valores de nitrógeno total, el 45% de las muestras en Querétaro, y del total de muestras en San Juan y Tequisquiapan solamente 3 de ellas en cada caso, presentaron valores de nitrógeno.

Conductividad eléctrica: Sin inconvenientes para los tres acuíferos, dentro de las normas de salud establecidas, aunque los mayores valores se presentaron en la zona industrial de Querétaro, debido quizá a que en esa porción el acuífero es más arcilloso.

Sólidos totales disueltos: Sin inconvenientes para los tres acuíferos, dentro de las normas de salud establecidas.

Sulfatos: En los tres acuíferos se presentan valores sin rebasar la norma de 500 mg/l, en los casos de San Juan y Tequisquiapan muy por debajo de la norma establecida.

Nitratos: En Querétaro se presentan valores de 6 y hasta 10 veces por encima de la norma que son 5 mg/l; para los otros acuíferos se presentan hasta 4 veces el límite máximo permisible.

III.3 Impacto ambiental

La contaminación de origen urbano ó municipal se compone principalmente de materias orgánicas, minerales y detergentes, además de la basura inorgánica. Por su parte la contaminación de origen industrial se compone de material mineral y orgánico, sustancias corrosivas, venenosas y flamables por mencionar algunas; sus efectos en el medio ambiente, aún cuando en volumen son significativamente menores a las de origen municipal, son más graves y pueden afectar incluso la salud humana.

Existen registros de algunas emergencias hidroecológicas para el estado de Querétaro debidas principalmente a descargas industriales fuera de la normatividad y que, en su momento, la CNA atendió las denuncias por parte de los usuarios; los informes finales muestran principalmente mortandad de peces en canales de conducción, en presas de almacenamiento y derivación cercanas a las descargas industriales, mortandad de aves acuáticas y contaminación por derrames de hidrocarburos a los cuerpos de aguas; los retornos agrícolas son otra fuente de contaminación, por su aportación de residuos de productos agroquímicos.

III.4 Presa Zimapán

Un almacenamiento artificial de agua debido a la construcción de un embalse ya sea para generación de energía eléctrica, control de avenidas, disponibilidad de agua para abastecimiento urbano, afecta de alguna forma el ciclo hidrológico local y regional. Los embalses constituyen anomalías del ciclo hidrológico, que retardan el arribo del agua a los mares y océanos. Incrementan localmente los volúmenes de agua evaporados y modifican los regímenes hidrodinámicos superficiales y subterráneos. Al incrementarse la carga hidráulica por las infiltraciones se inducen incrementos en la potencialidad de los sistemas de acuíferos y por lo tanto en los caudales de descarga de manantiales y/o de escorrentías superficiales localizadas aguas abajo. Las relaciones costo-beneficio son complejas, pero siempre se parte del principio que los beneficios serán mucho mayores que las posibles afectaciones adversas. El impacto ambiental que representa una termoeléctrica, por ejemplo, es varias órdenes de mayor magnitud que el de una hidroeléctrica.

La construcción de una Presa siempre representa cambios de algún tipo en su entorno inmediato debido a que, además el volumen de agua almacenado. Altera el microclima. El agua actúa como un eficiente regulador térmico lo cual provoca alteraciones a los ecosistemas establecidos en las inmediaciones del embalse. El cambio de uso de suelo también induce modificaciones en las actividades humanas en la zona; el área inundada pudo haber albergado asentamientos humanos, construcciones de valor histórico y/o cultural, hábitat de especies endémicas y terrenos productivos agrícolas, agropecuarios, industriales o mineros. En el caso de la Presa de Zimapán, debido a su tamaño y magnitud, se han llevado a cabo un diagnostico preliminar por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ) conjuntamente con el Instituto de Geofísica de la UNAM, para tener un

parámetro de las repercusiones adversas, tanto físicas como sociales y ambientales, donde la calidad del agua de los 2 afluentes de la misma, el río Tula y el río San Juan son de pésima calidad, ya que los dos provienen de las ciudades de México y San Juan del Río respectivamente.

Restricciones para uso recreativo: Los contenidos de metales pesados y la constante entrada de materia orgánica restringen y limitan el uso recreativo del embalse. Una exposición aguda (una única ingesta) a agua con metales o hidrocarburos no representa un serio problema a la salud. Se pueden presentar problemas por contacto cutáneo, sólo en condiciones de exposición muy particulares. La ingesta de agua contaminada bacteriológicamente, con virus, hongos u otro tipo de flora y fauna patógena, puede provocar afectaciones severas a la salud.

La inmersión, natación o buceo, por lo tanto no es recomendable en el embalse. Por otro lado, las medidas de seguridad de este tipo de obras, no permiten actividades “riesgosas” en las inmediaciones de la cortina o de los túneles de acceso o de desvío. La pesca deportiva debe de estar también descartada, ya que la especie predominante, tilapia, puede contener microorganismos patógenos.



Impacto en la Biota e implicaciones a la salud: En la presa Zimapán se introdujo una variedad de tilapia. Localmente llamada “mojarra”, la cual es una importante fuente barata de proteínas. Sin embargo, esta especie de peces acumula metales como el cadmio, Cd, plomo, Pb, mercurio, Hg y cobre, Cu, en músculos y vísceras. La tilapia también puede adquirir flora y fauna patógena que se encuentre en el agua cloacal, convirtiéndose de esta manera en un foco de infección. Consumos prolongados de alimentos con cadmio afectan la estructura ósea. Periodos prolongados de consumo de alimentos contaminados con plomo, pueden causar anemia y disturbios neurológicos. El consumo de pescado contaminado por mercurio afecta el sistema nervioso central.

El rápido aumento de cardúmenes de la voraz tilapia propicia su captura y comercialización en el embalse de la PHZ. El consumo de “mojarras” se ha convertido en una alternativa barata y a la mano de las comunidades de escasos recursos económicos del lugar. Las autoridades sanitarias del estado de Hidalgo han prohibido su consumo a los pobladores de las comunidades cercanas al embalse. La delegación Estatal de SEMARNAT manifiesta que hacia Querétaro no existe venta de tilapia proveniente de la presa.

Impacto a los acuíferos locales y regionales: La construcción de una presa de almacenamiento representa la creación de una carga hidráulica adicional que altera los gradientes piezométricos regionales. A lo largo del cauce del río Moctezuma, se ha incrementado el caudal de algunos manantiales como los de Saja, unos 8 km. Aguas debajo de la cortina. Las infiltraciones en las paredes del cañón del Infiernillo, pudieran corresponder a agua de algún acuífero colgado con una mayor carga hidráulica. Después de la construcción del túnel de conducción se bajaron los niveles del acuífero explotado por el manantial La Ortiga, situado aguas arriba del mismo. Si se tienen las condiciones de comunicación hidráulica, al agua del embalse alimentará a los acuíferos regionales, dados los grandes volúmenes de agua, no se percibirá una alteración de la calidad en un radio de un par de kilómetros del embalse, aunado a esto se recomienda mejorar la calidad de las aguas que llegan a la presa; Es por esto que no se recomienda perforar pozos en las márgenes de la presa, bajo la suposición de que el medio geológico actuará como “filtro”.

Interacción agua roca: Las rocas calizas fracturadas presentan condiciones favorables para ser agredidas por agua con concentraciones importantes de bióxido de carbono, CO₂. Este proceso de certificación consiste en la disolución de rocas calizas que incrementan las dimensiones de los espacios entre roca (fracturas) y aumenta la porosidad secundaria. Los procesos tectónicos que afectaron las rocas de la zona generaron fallas y fracturas en las mismas, tan solo en las inmediaciones de la cortina, en el Cañón del Infiernillo, se pudieron identificar más de 2 000 fracturas y caso 200 fracturas cársticas. Existen algunas evidencias de que pudieran estar alterando la permeabilidad del medio calizo. Al pie de la cortina sobre el macizo rocoso se presentan algunas infiltraciones, pequeños manantiales y “lloraderos”, que pudieran corresponder a agua del embalse, o a agua de los sistemas acuíferos locales impulsada hacia afuera al incrementarse la carga piezométrica.

La carstificación es un fenómeno lento, en términos temporales humanos y rápidos en tiempos geológicos.

Sismicidad inducida: Existen antecedentes de que el llenado de presas pudiera inducir sismicidad local. Cambios importantes en los niveles de los embalses pueden afectar los estados de esfuerzo. En las inmediaciones del embalse han tenido lugar algunos sismos de magnitud pequeña, 2 a 3° en la escala de Richter. Un análisis más detallado de la microsismicidad medida pudiera dar mayor información sobre el origen de la sismicidad en la zona PHZ. Sismos de mayor magnitud fueron localizados por CFE hacia el norte y sudeste del embalse. CFE notifica que no se tienen evidencias de sismicidad inducida por el llenado del embalse, aunque se tienen reportes de sismos posteriores al llenado sentidos en Pueblo Nuevo y Zimapán.

III.5 Perspectivas

Dentro de los objetivos, metas y acciones a plantear en el Programa Hidráulico, debe considerarse particularmente y con un grado importante de atención, a lo referente al rehusó. De las aguas residuales y/o a la modificación de los patrones del uso del agua, para evitar desde el origen la producción de contaminantes. Se deberá lograr la aplicación de las condiciones particulares de descarga en las regiones prioritarias y la aplicación de las normas ecológicas del estado. La entidad ha manifestado en los últimos años un notable incremento en la población, lo cual ha generado mayores volúmenes de aguas residuales, mismas que requieren su tratamiento para no contaminar las corrientes superficiales que tienen diferentes reusos aguas abajo, incluyendo el doméstico, agrícola, recreación, piscícola, etc.

Las aguas residuales municipales son un recurso valioso y juega un papel muy importante en la gestión de los recursos hídricos; el rehusó de estas para riego, en la acuacultura y otras actividades, tienen un valor económico importante; sin embargo, la utilización no controlada de aguas residuales sin tratar, para riego, práctica común en varios municipios del estado ó para otros usos, genera riesgos sanitarios, principalmente por el alto contenido de organismos patógenos y posiblemente sustancias tóxicas peligrosas, metales pesados que también son un riesgo para la salud. De acuerdo al diagnóstico efectuado para el estado, muestra que se deben ampliar los programas de aforo y caracterización de las aguas superficiales y subterráneas en la entidad; inventariar las fuentes de contaminación, efectuar la revisión de los permisos y condiciones particulares de descargas en zonas detectadas como críticas; en cuanto a la contaminación, se requiere la eliminación inmediata de tiraderos clandestinos y la ejecución de campañas de ahorro y reciclamiento.

Después de hacer un análisis de diferentes alternativas es, es decir, hacer una proyección a futuro, tanto de la población donde se incluye la dotación de agua potable y además el desalojo de las aguas residuales, como el aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos, para realizar las actividades pertinentes de acuerdo a las necesidades conforme transcurre los años.

Algunas de las actividades recomendadas corresponden a requerimientos de infraestructura, tecnificación exhaustiva del campo, restricciones severas al cultivo forrajero, eliminación del subsidio en costos de agua y electricidad, sustitución del bombeo por agua tratada –incluyendo la posibilidad de transferencias desde la presa Zimapán. Para el acuífero de Querétaro, la reducción en las extracciones de agua potable depende de la factibilidad de importar agua desde otras fuentes pues, de lo contrario, el ahorro en el consumo no aseguraría un escenario demasiado optimista.

Ejecución de proyectos y obras para el intercambio de volúmenes de aguas residuales tratadas por volúmenes aprovechados por otros usos, para procesos productivos y/o riego de áreas verdes. Construcción de los proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales de origen industrial y rehabilitar aquellas que no operen eficientemente.

Programación de fuentes futuras.

Es conveniente que se programen durante los primeros años, para que su efecto ayude a reducir el déficit, teniendo en cuenta que la importación de agua de lugares lejanos como un objetivo a mediano ó largo plazo e ir analizando los diferentes proyectos y alternativas factibles.

Tabla 11. Programación de fuentes futuras

Fuente	Para abastecer:	Año	Gasto l.p.s.	Mm3/año
Sistema Chichimequillas II	Querétaro	2000	150	4.73
S.A.B. Amealco	Amealco			
S.A.B. Ayutla	Amealco			
S.A.B. Poza Verde	Pinal de Amoles			
S.A.B. La Gloria	Pinal de Amoles			
S.A.B. Chuveje	Jalpan	2000-2005	371	11.7
S.A.B. Arrollo Seco	Arrollo Seco			
S.A.B. Sta Ma. Tancoyol	Jalpan			
S.A.B. Arroyo Tolimán	Tolimán			
S.A.B. Peñamiller	Peñamiller			
S.A.B. Río Blanco	Peñamiller			
Sistema Picacho	Querétaro	2005	500	15.77
Transferencia de Volúmenes	Querétaro	2007	635	20
Sistema Peñamiller	(Río Extoraz)			
S.A.B.= Sistema de	Agua en Bloque	2013	2500	78.84

Una vez que se han definido las acciones, sus costos y su programación en el tiempo, corresponde ahora establecer las fuentes de financiamiento que proveerán los recursos para la ejecución de las acciones. Las fuentes de recursos son en términos generales:

- Gobierno Federal.
- Gobierno Estatal.
- Instituciones financieras nacionales e internacionales.
- Usuarios beneficiados.
- Iniciativa privada.

En el Plan Hidráulico de Gran Visión 2000-2025, se analizan las posibles fuentes de financiamiento, pero en ningún lado se analizan las posibilidades reales de obtener esos recursos, por que deben ser “recaudados”, no basta con buscar “fuentes de financiamiento” para “pedir prestamos”, esta es la imposibilidad real del Plan Estatal, aunque este bien presentado y sustentado en buenas proyecciones. Ninguna institución de crédito seria (como el banco mundial) va a otorgar créditos a nuestro país, sin que existan estudios económicos que reflejen los ingresos con los que se habrán de solventar las obligaciones contraídas.

Como las facultades de recaudación son exclusivas del ámbito central del Gobierno Federal, las entidades federativas quedan exentas de responsabilidades en este proceso de modificación; pueden pedir todos los recursos que necesiten, de todos modos no los van a obtener, por el solo hecho de fundamentar sus necesidades. La SHCP, está en la misma situación que las entidades federativas, puede proponer “paquetes” de reformas para la aprobación de la legislación en materia de ingresos, pero es responsabilidad de H. Congreso de la Unión su aprobación y enmienda; y , el H. Congreso de la Unión, terminará por aprobar “paquetes” de modificaciones, como resultado del cabildeo de grupos políticos, más que de análisis técnicos específicos.

El problema estriba en que la escasez del recurso es un “secreto a voces”; la CNA no puede reconocer ni cuantificar la precaria disponibilidad del recurso, ni mucho menos hacer del conocimiento de la ciudadanía el monto de las reservas, por que ésta contaría con los elementos, para tomar acciones de graves repercusiones económicas y políticas; por lo que la dependencia no va a generar información documental sencilla y clara que de origen a demandas ciudadanas contrarias a las políticas institucionales (por ejemplo, conflictos de asignación entre usos).

En la Gerencia Estatal, el personal operativo, que tienen acceso a los volúmenes declarados utilizados por los usuarios reporta que los volúmenes extraídos cada vez son menores y que los pozos son frecuentemente reposicionados sin que se notifique a la CNA o se solicite autorización; estas actividades se realizan clandestinamente, aún a riesgo de ser detectados y ser sancionados.

Finalmente, para el caso del acuífero de Querétaro y al ritmo actual de explotación, la noción empírica es de que las reservas serán suficientes para unos 10 años, ¿Qué objeto tiene invertir significativos montos en determinar científicamente que esta estimación es correcta?, si en lo que hay que invertir los recursos es en la corrección del desbalance actual.

IV. DISCUSIÓN

En el estado de Querétaro predomina un clima semi-árido, con una precipitación anual promedio de 500 mm, además, esta región que es la parte sur y poniente de la entidad, es donde se localizan los municipios con mayor densidad de población, como lo son la Ciudad de Querétaro, San Juan del Río, Tequisquiapan, Pedro Escobedo, Ezequiel Montes y otros más, donde la escasez de agua superficial es notoria, lo que origina que la mayor parte del agua aprovechable para las diferentes actividades económicas provenga del subsuelo, poniendo en riesgo algunos acuíferos.

Después del análisis de la información que se recabó para presentar esta tesis, se tiene una preocupación latente, en especial en el acuífero de Querétaro y el de San Juan del Río, ya que el descenso de niveles estáticos y dinámicos es en algunas zonas de hasta tres metros por año. Aunque en otros acuíferos cercanos como el de Huimilpan, Buenavista, Chichimequillas-Amazcala el descenso de los niveles sea menor, alrededor en 1 m por año, si no se lleva a cabo una buena planeación y se aplican las acciones correctas para liberar grandes volúmenes de riego por aguas tratadas también se pondrá en riesgo los acuíferos restantes ya que se prevé un aumento de la población del 69 % para el año 2025 con respecto al año 2000.

La sobreexplotación de acuíferos, si bien es un problema de difícil solución, puede reducirse mediante políticas de consumo racional, aunadas a un programa de control y monitoreo que garantice el abasto mínimo a los sectores usuarios e impida alcanzar un estado *dañino* (irreparable) del sistema geohidrológico. En los últimos años, por ejemplo, se han desarrollado modelos matemáticos de simulación del flujo subterráneo que posibilitan, a la CNA y los organismos operadores, programar los volúmenes disponibles de agua en función de las demandas requeridas por la población, industria y el sector agrícola.

En el estado de Querétaro, se han hecho modelos para conocer la situación real del agua subterránea en los valles de Chichimequillas-Amazcala, Huimilpan, Tequisquiapan-Ezequiel Montes, Buenavista, San Juan del Río-Pedro Escobedo y Querétaro. Los modelos matemáticos han sido una excelente herramienta para poder simular las condiciones de los acuíferos y han permitido, además, representar las condiciones futuras de explotación que, en su momento, impondrán las nuevas demandas.

En el caso del San Juan del Río, se deberán de aplicar la normatividad a las descargas al alcantarillado municipal ya que esta ciudad es un corredor industrial donde las aguas de desecho contienen gran variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos así como de diferente composición y concentración; aunado a lo anterior se deberán de diseñar, construir y operar plantas de tratamiento para la aguas residuales municipales y las aguas residuales industriales, claro que la operación y responsabilidad de las

primera estará a cargo del organismo operador de agua y alcantarillado de la Ciudad y las segundas serán responsabilidad de las propias industrias ya que dependiendo de sus procesos físicos y químicos, se escogerán el tipo de proceso de la planta de tratamiento.

V. Conclusiones

Después de hacer la recopilación de la información para este trabajo, seguido de un minucioso análisis se enunciarán las siguientes conclusiones:

En primer lugar es lógico pensar que la problemática en estudio se deba particularmente a las condiciones climatológicas adversas para la región donde se localizan los acuíferos en el Estado de Querétaro, ya que la precipitación media anual varía en promedio entre los 350 a 600 mm anuales y en consecuencia se tienen pocos o nulos recursos superficiales dando como consecuencia una región semiárida.

En la mayoría de los acuíferos se han localizado las zonas de recarga, y esta se da año con año, pero el balance del recurso es negativo debido a la extracción constante del recurso de los acuíferos, la mayoría de ellos, tienen abatimientos anuales de entre 1 y 2 m, provocando un déficit acumulativo en función del tiempo. En otras palabras, el uso de recurso se está llevando a cabo de una manera irracional.

Es importante hacer notar que las actividades agropecuarias, en especial los distritos de riego, consumen grandes cantidades de agua y la mayoría de las ocasiones es agua extraída del subsuelo (agua potable), si se regará con aguas tratadas se liberarían estos volúmenes de agua y se destinarían al sector público e industrial, además se disminuiría el déficit acumulativo en los acuíferos. Además el volumen de agua adquirido por los distritos de riego, no representa ningún tipo de costo para los usuarios, más que el costo de extracción, bombeo y distribución.

La Ciudad de Querétaro y la Ciudad de San Juan del Río, por ser ciudades netamente industrializadas, se emiten aguas residuales muy contaminadas, esta agua pueden contener grandes cargas de contaminantes orgánicos o también grandes cargas de contaminantes inorgánicos, lo más grave es que los contaminantes inorgánicos pueden contener metales pesados, que son peligrosos para la salud humana de mil maneras, ya sea que estos contaminantes se infiltren a los mantos acuíferos y sean directamente ingeridos por el hombre o los pueden ingerir indirectamente en los alimentos (carne y verduras), poniendo en riesgo la salud pública. El tipo de contaminante en las aguas residuales varía dependiendo del giro de la industria, ya que los contaminantes que ella emite tienen que ver con el tipo de procesos y productos que maneja.

Debido al constante incremento de la población, se espera que para los próximos 25 años que la demanda de agua potable también se incrementara, por lo que sea necesario tener acciones inmediatas a corto, mediano y largo plazo para dar solución o soluciones a la problemática del agua en el estado de Querétaro.

Por último se cumplen cabalmente los dos objetivos perseguidos al inicio de este trabajo, ya que, se encontró información actual y diversa, además de empaparse de la situación en cuanto a los recursos hídricos del estado de

Querétaro, el cual es un reflejo fiel de lo que sucede en gran parte del país y de otros lugares del mundo.

Recomendaciones

Debido a una situación tan compleja a la que se está enfrentando, además de tener presente que el estado de Querétaro es un escenario actual de las condiciones en que se encuentran muchas ciudades y regiones del norte del país, las recomendaciones que aquí se sugieren tendrán aplicación en diferentes campos de acción, tal vez algunas se encuentren en proceso de ser aplicadas, otras se estudiarán mediante rigurosa una evaluación tanto técnica, científica y por supuesto económica, para saber si son recomendaciones o proyectos viables.

En primer lugar se deberán de liberar un cierto porcentaje del volumen que se destina para el riego, mediante el uso de aguas negras ó aguas residuales que han recibido un tratamiento adecuado para este fin. Hay que hacer la aclaración que cuando un agua residual se utilizara para ciertos cultivos, no necesariamente se tendrá que medir el parámetro de DBO, ya que la materia orgánica sirve a las parcelas como un abono orgánico, solo se tendrá sumo cuidado con los metales pesados, grasas y aceites, materia flotante y los organismos patógenos por lo que el tratamiento se vuelve más accesible.

Aunado a lo anterior, se recomienda, como es sabido por muchos conocedores del problema, incrementar el gasto ó volumen de aguas residuales tratadas, claro para ello se necesitan recursos económicos, pero hay que involucrar a la sociedad, gobierno e iniciativa privada (empresas) para captar los recursos necesarios ó suficientes para llevar a cabo la construcción, equipamiento y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales. No necesariamente se tienen que levantar una obra magna, tal vez la obra se puede llevar a cabo en dos etapas, una que contemple los primeros 15 ó 20 años y la segunda etapa para los siguientes 15 ó 20 años más, tal vez para ese tiempo ya halla nuevos adelantos científicos y tecnológicos para aplicar nuevas técnicas de tratamiento para disminuir los costos de tratamiento.

Ya que se ha mencionado a los distritos de riego, estos deberán de mejorar y remodelar su infraestructura hidráulica (canales, compuertas, bombeo etc.), con el fin de tener mejor eficiencia en el riego y uso del agua, además de añadir una pequeña cuota por el volumen de agua utilizado para el riego, ya que el agua tratada tampoco se les regalara por que representa un costo el tratarla; esto por la idea de que cuando un servicio es gratuito, este se desperdicia ó se utiliza irracionalmente, por ello las cuotas se implementan con el fin de que el usuario haga un uso más racional del agua, en especial el sector agrícola ya que es el que consume mayor volumen.

Una situación que es muy importante para los acuíferos es la recarga de los mismos, es por esto que hay que tener demasiado cuidado en este factor, por lo que se recomienda ubicar las zonas de recarga y después ayudar a que la infiltración se lleve a cabo con diferentes propuestas relativamente sencillas;

por ejemplo, no hay que dar licencias de construcción en las zonas de recarga, para ello se necesita denominar el tipo y uso de suelo como zona de recarga de los acuíferos; plantar diferentes tipos de árboles frutales para que las raíces faciliten la filtración de agua de lluvia en el suelo; tal vez llevar a cabo una serie de perforaciones para conducir de alguna forma las aguas residuales tratadas excedentes en la época de lluvias, ya que en este periodo el volumen de agua para el riego disminuye como consecuencia del aumento del agua pluvial.

Como consecuencia de la complejidad de la situación, hay que estudiar soluciones similares aplicadas en otras ciudades que tuvieron o tienen la misma problemática. El caso más semejante es la ciudad de México, que tienen que tratar, bombear, y conducir un determinado volumen de agua mediante el sistema Lerma-Cutzamala desde 154 km de retirado, para suministrarla en la ciudad de México. Por lo que se propone crear un sistema similar que aporte un determinado volumen de agua potable, aunque este se transfiera desde otra cuenca y represente un costo más por la conducción y el bombeo. Los lugares con que se cuenta un excedente de agua no necesariamente potable, es La Presa de Zimapán Hgo. El acuífero del valle del mezquital de Hgo. que debido al distrito de riego de la zona, el acuífero ha presentado en los últimos años un aumento en sus niveles piezométricos. Y por último la sierra Gorda del estado de Querétaro.

Como resultado de la recomendación anterior, conducir agua potable desde lugares retirados para suministro de la Ciudad de Querétaro, representa primero contar con una infraestructura de almacenamiento seguido de un sistema de potabilización. En primer lugar se elige a la Sierra Gorda del estado de Querétaro debido a que cuenta con una mayor precipitación, por lo tanto cuenta con un mayor escurrimiento, escurrimiento que la mayoría de las veces no se aprovecha, por lo que se sugiere analizar la factibilidad de llevar a cabo la construcción de una presa de almacenamiento en algún lugar de la accidentada topografía de la Sierra Gorda. Una obra de semejantes dimensiones representa también una cuantiosa inversión y que la mayoría de las ocasiones no se cuenta con los recursos económicos suficientes, pero a la vez hay que visualizar los beneficios que se obtendrán como consecuencia de la aceptación del proyecto; por ejemplo, la creación de empleos directos e indirectos, la presa se utilizaría para abastecimiento de agua, ya sea para consumo humano ó para riego, también sería un atractivo turístico en esta zona del estado y a la vez se tendrán beneficios en la piscicultura.

Hay que señalar que el organismo operador del sistema de agua potable y alcantarillado de Querétaro (CEA Querétaro), conoce la problemática a la que se enfrenta, dando solución a las complicaciones que se suscitan en función de sus recursos humanos, técnicos y económicos, pero hay que remarcar que es de vital importancia tener un adecuado manejo del sistema, desde el bombeo, conducción y distribución en la red del agua potable, a la vez, un eficiente desalojo de las aguas negras.

A continuación se presenta una serie de propuestas técnicas para el mejoramiento del sistema de agua potable, que pueden ser aplicadas, tanto en la Ciudad de Querétaro como en todos sus municipios y comunidades que cuenten con el servicio.

- Revisar los sistemas de Bombeo, tanto eléctrica como mecánicamente, con el fin de que trabajen con una mayor eficiencia y así disminuir costos.
- Dar mantenimiento preventivo y predictivo a los sistemas de bombeo.
- Revisar periódicamente posibles fugas en el sistema, desde la conducción, tanque elevado ó de almacenamiento y en la propia red de distribución.
- Dar soluciones óptimas y económicas al punto anterior y visualizar futuros problemas.
- Analizar las redes de distribución en los sectores de la Ciudad y las redes de distribución de cada comunidad, si son redes abiertas ó redes cerradas, de ser redes abiertas, considerar la factibilidad de cambiarla a redes cerradas, esto con el fin de aliviar los puntos de mayor presión.
- Racionar en algunos sectores de la ciudad y en algunas comunidades, el suministro de agua potable y además hacer ver a los usuarios que es una forma de mejorar el aprovechamiento y cuidado de este escaso recurso.
- Hacer campañas de concientización en escuelas, oficinas, lugares públicos, con platicas, folletos, volantes, y en le recibo de pago, sobre el mejor aprovechamiento del agua potable y del NO desperdicio.
- Dar asesoría técnica a los comités de administración descentralizados en el interior del estado.

Las propuestas técnicas anteriores son conocidas por todos los operadores de sistemas de agua potable, pero hay que insistir en ellas ya que al aplicarlas se reducen las pérdidas por fugas y se concientiza a la población en un uso racional del vital líquido, además se aumenta el volumen a disponer por un periodo más de años.

Lo anterior son solo recomendaciones, no quiere decir que son la solución perfecta al problema, pero si pueden mejorar con mucho el funcionamiento y aumentar en tiempo, además de la cantidad y calidad del recurso.

BIBLIOGRAFÍA

México y el aprovechamiento de sus aguas subterráneas. (Perforadora Latina S. A. 1971) pp. 100-105.

Estudio Geohidrológico para el parque nacional, cerro el Cimatario, Estado de Querétaro. Facultad de Ingeniería. UNAM. BCCT. (1984).

Estudio hidrogeoquímico preliminar de la zona de San Juan del Río y Tequisquiapan, Querétaro. Facultad de Ingeniería. UNAM. BCCT. (1991).

Huicochea Ortiz Raúl. **Modelo Geoeléctrico del valle de Lagunillas municipio de Huimilpan.** Facultad de Ingeniería. UNAM. (2004).

Síntesis Geográfica, Nomenclátor y Anexo Cartográfico del estado de Querétaro. INEGI. BCCT. (1986).

Escutia Téllez Licelda. **Estudio de prospección geoelectrónico en la zona del Batán – Quiotillos, Querétaro.** Facultad de Ingeniería. UNAM. (2003).

González León Carlos Alberto. **Diseño de una red de monitoreo piezométrico por análisis estadístico para el control de la cantidad y calidad del agua subterránea en el valle de Querétaro.** Facultad de Ingeniería. UNAM. (2003).

Míreles Calixto Pedro Rubén. **El soporte de la Geología estructural en el estudio de la continuidad hidráulica en medios fracturados entre las cuencas de San Juan del Río, Querétaro y los Apaseos.** Facultad de Ingeniería. UNAM. (2004).

Santín Martínez José Vicente. **Proyecto ejecutivo de abastecimiento de agua en bloque del sistema múltiple a Río Blanco, municipio de Peñamiller, Querétaro.** Facultad de Ingeniería. UNAM. (2004).

Díaz Martínez Day Carlos. **Aguas industriales, estudio de viabilidad del certificado de calidad del agua en Querétaro.** Facultad de Ingeniería. UNAM. (2003).

CNA. **El agua y su aprovechamiento múltiple, presas construidas por la Comisión Nacional del Agua 1989-1994.** (Nov. 1994).

CEA Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Instituto de Geofísica de la UNAM (IGF). **Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro.** (Marzo 2002).

Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ), Instituto de Geofísica de la UNAM. **Diagnostico preliminar del estado de las afectaciones ambientales potenciales asociadas a la Presa Zimapán.** (SEP. 1998).

CNA. **Ley General de Aguas Nacionales y su reglamento.** (2004).

Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 22, núm. 1 p. 1-18 **Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro.** (2005).

Pagina Web. – <http://www.concyteq.org.mx>

Glosario

- Acuífero.- Zona natural por debajo de la superficie del suelo que es capas de almacenar y transmitir agua.
- Agua subterránea.- Agua presente en la zona saturada de los huecos bajo la superficie del terreno.
- Caudal.- Cantidad de agua de una corriente que atraviesa un punto dado en un periodo concreto.
- Clima seco.- Clima en el cual la precipitación anual es menor que la perdida potencial de agua por evaporación.
- Corteza.- La delgada capa sólida externa de la tierra.
- Cuenca.- Conjunto de aguas que afluyen a un mismo punto de desagüe.
- Escorrentía.- Agua que fluye sobre la tierra en vez de infiltrarse al suelo.
- Evapotranspiración.- Efecto combinado de la evaporación y transpiración.
- Manantial.- flujo de agua subterránea que emerge de forma natural a la superficie del terreno.
- Nivel freático.- Es el nivel superior de la zona saturada de las aguas subterráneas.
- Permeabilidad.- La medida de capacidad de un medio para transmitir agua.
- Porosidad.- La porción de una roca que no es ocupada por materia mineral sólida, puede ser ocupada por el agua subterránea. Se expresa por la relación entre el volumen de los huecos y el volumen total del medio.
- Precipitación.- La formación de una fase condensada (sólida o líquida) durante una reacción.
- Roca.- Mezcla consolidada de minerales.
- Suelo.- Combinación de materia orgánica, mineral, agua y aire.

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Clasificación de terrenos por su permeabilidad

Tabla 2. Valores de porosidad y permeabilidad.

Tabla 3. Acuíferos de la entidad.

Tabla 4. Superficies de los acuíferos regionales de Querétaro.

Tabla 5. Abatimiento medio anual, acuíferos regionales de Querétaro

Tabla 6. Balance integral del agua en los valles de Querétaro, periodo 1990-2000

Tabla 7. Balance hídrico integral por escenarios 1992-2000

Tabla 8. Proyección de población.

Tabla 9. Proyección de demanda de agua para uso publico urbano.

Tabla 10. Proyección de las descargas en el uso publico urbano.

Tabla 11. Programación de fuentes futuras.

INDICE DE FIGURAS

Mapa del Estado de Querétaro

Figura 1. Mosaico regional de acuíferos en el Estado de Querétaro.

Figura 2. Mosaico regional de acuíferos mostrando el flujo preferencial subterráneo.

Figura 3. Mosaico de acuíferos con distribución abatimiento anual promedio.