



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Propuesta de identificación de sitios para la infiltración de agua al acuífero de Querétaro

Tesis profesional
Que para obtener el título de
Ingeniero Geólogo
Presenta

Arturo Manuel Morales Behar

Director: Ing. Francisco Alejandro Arroyo Carrasco

Ciudad Universitaria, Agosto de 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
60-I-210

SR. ARTURO MANUEL MORALES BEHAR
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Francisco Arroyo Carrasco y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

PROPUESTA DE IDENTIFICACIÓN DE SITIOS PARA LA INFILTRACIÓN DE AGUA AL ACUÍFERO DE QUERÉTARO

- I INTRODUCCIÓN
 - II MARCO GEOGRÁFICO, GEOLÓGICO, HIDROGEOLOGICO Y GEOTÉCNICO DEL ACUÍFERO DE VALLE DE QUERÉTARO
 - III NORMATIVIDAD
 - IV PROCESO DE INFILTRACIÓN DE AGUA AL SUBSUELO
 - V PROPUESTA DE PROYECTO PARA INFILTRACIÓN DE AGUA AL ACUÍFERO DE VALLE DE QUERÉTARO
 - VI CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

CD. Universitaria, D. F. a 19 de Mayo de 2011

El Presidente del Comité de Titulación de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

DR. RICARDO JOSÉ PADILLA Y SÁNCHEZ

RJPYS*RHL*srs

Agradecimientos

A mis padres, Vicky y Arturo, por el apoyo, soporte y el amor que me han brindado para llegar hasta donde me encuentro ahora.

A mi tutor y amigo Ing. Alejandro Arroyo por lo mucho que me ha enseñado en las diferentes etapas de mi carrera, por la motivación, el apoyo y la paciencia me ha mostrado.

A mi hermana, Myriam, por estar presente cuando la necesité.

A mi novia, Sonia, por su compañía, ayuda y comprensión cuando lo requería.

A mis amigos, Christian, Michael, Mauricio y Miguel, por su compañía.

A mi familia por sus consejos y apoyo.

A mis sinodales por su tiempo, consejos y conocimiento para el desarrollo de este proyecto.

A la UNAM y en particular a la Facultad de Ingeniería y a todos los que la integran (profesores y personal administrativo) por todas las facilidades que nos brinda en el desarrollo de nuestra carrera.

Índice

Resumen	10
1 Introducción.....	12
2 Marco hidrológico, geológico, hidrogeológico y geotécnico del acuífero	13
2.1. Situación global del recurso hídrico en el estado de Querétaro	13
2.2. Evolución de la administración del agua en el estado de Querétaro	15
2.3. Acciones encaminadas a la recarga del acuífero del valle de Querétaro	17
2.4. Marco geográfico del acuífero del valle de Querétaro.....	17
2.4.1. Localización.....	17
2.4.2. Vías de comunicación.....	18
2.4.3. Aspectos socioeconómicos del acuífero del valle de Querétaro	19
2.5. Marco geológico	20
2.5.1. Fisiografía.....	20
2.5.2. Geomorfología.....	21
2.5.3. Geología regional	24
2.5.4. Estratigrafía	25
2.5.5. Historia geológica.....	31
2.5.6. Geología estructural	31
2.5.7. Geología del subsuelo	33
2.6. Marco hidrogeológico	38
2.6.1. Región hidrológica.....	38
2.6.2. Clima, precipitación y temperatura.....	39
2.6.3. Censo de aprovechamientos	41
2.6.4. Piezometría	42
2.6.5. Hidrometría.....	42
2.6.6. Propiedades hidrodinámicas.....	42
2.6.7. Unidades hidroestratigráficas	44
2.6.8. Acuífero del área	45
2.6.9. Disponibilidad de agua superficial.....	45

2.6.10.	Disponibilidad de agua subterránea.....	48
2.6.11.	Situación administrativa del acuífero	49
2.7.	Marco geotécnico	49
2.8.	Calidad del agua.....	54
2.9.	Medio ambiente	55
2.9.1.	Suelo	55
2.9.2.	Vegetación	55
2.9.3.	Uso del suelo.....	56
2.9.4.	Áreas naturales protegidas	59
3	Normatividad	65
4	Proceso de infiltración de agua al subsuelo	71
4.1.	Interacción entre el agua superficial y el agua subterránea	71
4.2.	Aprovechamiento del agua	73
4.3.	Aspectos hidrogeológicos	76
4.4.	Formas de recarga	78
4.4.1.	Superficiales	78
4.4.2.	Subterráneos	79
4.4.3.	Ventajas y desventajas.....	79
4.5.	Técnicas y diseños de recarga artificial	80
4.5.1.	Técnicas directas de superficie.....	80
4.5.2.	Técnicas directas en el subsuelo	84
4.5.3.	Dificultades y retos en la estimación de la recarga	87
4.6.	Métodos para estimar la recarga	88
4.7.	Proceso de infiltración del agua para el acuífero del valle de Querétaro.....	95
5	Propuesta de proyecto para infiltración de agua al acuífero del valle de Querétaro	99
5.1.	Situación del acuífero del valle de Querétaro.....	99
5.2.	Ciclo de vida del acuífero del valle de Querétaro	102
5.3.	Estrategia para el rescate del acuífero del valle de Querétaro	103
5.4.2.	Proceso para definir el modelo de manejo del agua en el acuífero del valle de Querétaro	105
5.4.2.	Acciones e implicaciones para desarrollar el modelo de manejo del agua	106

5.4.2.	Productos de la estrategia	111
5.4.2.	Factores críticos de éxito para el logro de la estrategia	112
5.4.2.	Políticas.....	113
5.4.	Información necesaria para aplicar el proceso de infiltración en el acuífero del valle de Querétaro.....	113
5.4.1.	Proyecto caracterización de la zona drenada	115
5.4.2.	Aprovechamiento del agua de los bordos	126
5.4.3.	Captación de agua de lluvia de los techos de las obras civiles (casa habitación, centros comerciales, industrias).....	135
5.4.4.	Estimación de la conductividad hidráulica en la zona no saturada.....	138
5.4.5.	Resguardar las áreas naturales protegidas	141
6	Conclusiones y recomendaciones	142
6.1.	Conclusiones	142
6.2.	Recomendaciones.....	145
	Bibliografía.....	146
	Anexos	149

Resumen

El crecimiento demográfico desmedido y el fuerte desarrollo industrial que presenta la ciudad de Querétaro ha generado una demanda de agua cada vez mayor y, siendo el agua subterránea la principal fuente de abastecimiento, ha ocasionado que el acuífero del valle de Querétaro (AVQ) sufra una explotación intensiva y presente un abatimiento promedio anual de tres metros y hasta los diez metros (en la zona industrial). Algunos de los efectos de esta explotación intensiva son escasez de agua, profundización del nivel estático, la reactivación de fallas, erosión del suelo, deterioro del ecosistema, entre otros efectos.

La infiltración de agua en zonas favorables es una alternativa para recuperar o mantener los niveles del agua subterránea. En este trabajo se plantea una metodología y se ubican zonas, que de acuerdo a la información disponible puede llevarse a cabo este proceso.

Una parte importante para llevar a cabo este tipo de proceso es contar con la mayor cantidad de información que permita tener el contexto geohidrológico. Se encontró que existe bastante información, sin embargo está muy dispersa, por lo que es necesario que algún organismo de cualquier nivel de gobierno la concentre, la evalúe, la clasifique con base en una taxonomía y almacene en un sitio que esté disponible para su consulta.

A fin de coadyuvar a contrarrestar los efectos de la explotación intensiva a la que se encuentra sometido el AVQ, la atención del presente trabajo se centra en proponer sitios favorables para llevar a cabo el proceso de infiltración de agua al subsuelo, tarea que requiere recopilar la información disponible y realizar estudios complementarios. Con estos datos podrían generarse modelos tridimensionales, con el propósito de predecir el comportamiento de dicho acuífero. Además, se propone diseñar un plan para el reaprovechamiento del agua y la protección de las zonas de abastecimiento y de recarga, así como monitorear la calidad del agua, tanto la que se extrae como la que se infiltra, junto con la propuesta de algunas técnicas para llevar a cabo la infiltración. Una propuesta complementaria consistiría en instrumentar campañas para concientizar a la población sobre la magnitud del problema al que se estarán enfrentando en un futuro si no se toman las medidas adecuadas hoy.

La zona drenada del AVQ alcanza los 160 m en la zona industrial Benito Juárez. La dirección de flujo presente en el AVQ, se encuentra deformada por la explotación intensiva.

El AVQ se encuentra en la etapa de profundización, antes de pasar al límite técnico, últimas dos etapas de la vida de un acuífero. El desequilibrio del acuífero se comenzó a dar desde los años setenta.

El modelo propuesto para infiltrar agua al subsuelo consta de los siguientes pasos: recolección e integración de información, cuantificación de los balances de agua tanto superficial como subterránea, evaluación de la calidad del agua para determinar el

tratamiento necesario, propuesta de acciones para aprovechar el agua excedente, evaluación del proyecto de infiltración y finalmente mantener actualizada la información referente al acuífero y a las actividades desarrolladas. Estos pasos deben revisarse periódicamente.

En este proyecto se identifican 5 zonas y 4 bordos que considero favorables para llevar a cabo la infiltración de agua al acuífero. Se evaluaron las condiciones hidrogeológicas, profundidad del nivel estático, condiciones sociales, disponibilidad de agua, uso de suelo, etc. Las zonas son, Santa María Magdalena, Villa Corregidora, oriente de aeropuerto viejo, Tlacote norte y norte del monumento Conín. Los bordos identificados son, Bordo Refugio y Bolaños, Bordo Cuesta China, Bordo Tángano y Bordo Argentina. Para definir qué área es la más favorable se propone la obtención de datos a través de la exploración geofísica y procesar dichos datos bi y tridimensionalmente.

Algunas de las actividades propuestas para desarrollar este proyecto son: mantener actualizada la disponibilidad del agua, controlar la calidad del agua, distribución del recurso, reaprovechamiento del agua, tener un control del acuífero, elaborar un modelo con los datos obtenidos que muestre el comportamiento del acuífero, capacitar al personal encargado del monitoreo y mantenimiento, redefinir las actividades de los COTAS y la documentación y difusión del conocimiento.

Es importante destacar que el precio de este tipo de proyectos es elevado, pero tomando en cuenta que se está entrando a una etapa en la que el agua comienza a verse restringida y cada vez son más los días que se hacen cortes en el suministro de agua. Así que se tiene que ver como un tipo de inversión a futuro, se trata de un proyecto de mediano a largo plazo, la explotación de este acuífero se ha dado por años, por lo que también se requiere tiempo para ver resultados.

Palabras clave: Infiltración, zonas favorables para llevar el proceso de infiltración y recarga del acuífero del Valle de Querétaro, evaluación geohidrológica del AVQ.

1 Introducción

La disponibilidad del recurso agua en el estado de Querétaro, en calidad y cantidad, se ve afectada por el crecimiento desordenado de la población y por la cantidad de plantas productivas, que demandan caudales adicionales para sustentar su desarrollo, así como también, por una falta de cultura por parte de los usuarios del agua para aprovecharla racionalmente.

Esta situación se presenta en la parte que corresponde al acuífero del valle de Querétaro (AVQ), en donde se observa un deterioro en la calidad del agua y del entorno ecológico, al manifestarse cada año niveles estáticos más profundos, incremento en las concentraciones de elementos minerales que contiene el agua subterránea, reducción de las zonas de recarga y movimientos diferenciales del terreno que ya afectan la infraestructura civil en algunas áreas, entre otras. De acuerdo a estimaciones realizadas con base en los modelos matemáticos de flujo hidráulico subterráneo, la vida útil de las instalaciones hidráulicas se limita a un horizonte, favorable, de al menos 10 años, situación por la cual se pone en riesgo la sustentabilidad de este acuífero.

Si bien, los estudios y conocimiento de este acuífero se han encaminado a su cuantificación y a la ubicación de zonas para realizar nuevas perforaciones, pocas acciones se han hecho para tratar de aprovechar el agua superficial y residual, ya sea a través de intercambios o bien, a través de buscar sitios donde se pueda infiltrar o inyectar al subsuelo, a pesar de que existe el Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del estado de Querétaro, en el que se proponen una serie de acciones para el corto y mediano plazo para recuperar el AVQ. La Comisión Estatal de Agua de Querétaro (CEA) es la encargada del uso, administración y manejo del agua. Esta institución cuenta con buena información sobre el agua superficial y subterránea. La información sobre los sectores agrícola e industrial la tiene la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Este trabajo se enfoca a proponer, con base en la información disponible, la ubicación de sitios que permitan restituir parte de los volúmenes extraídos del acuífero, tomando en cuenta las condiciones hidrogeológicas que se presentan en estos momentos, considerando las restricciones tecnológicas y la normatividad vigente.

Para el desarrollo de la propuesta fue necesario contar con información, lo más actualizada posible, de la situación y evolución que guarda el acuífero, del crecimiento poblacional y de las condiciones climatológicas de la zona, que permitieron tener el contexto, así como conocer la normatividad que se tiene en cuanto a la recarga e infiltración.

2 Marco hidrológico, geológico, hidrogeológico y geotécnico del acuífero

2.1. Situación global del recurso hídrico en el estado de Querétaro

En México, el estado de Querétaro fue el pionero, que con recursos propios, evaluó la situación del agua en su territorio, marcando una línea a nivel federal, al plantear la metodología que debía llevarse a cabo para administrar el recurso, sobreponiéndose en su momento a la instancia rectora. Históricamente ha jugado un papel muy importante y trascendente en la toma de decisiones para México.

El AVQ inició su monitoreo, a través de la extinta Gerencia de Zonas Áridas de la Secretaría de Recursos Hidráulicos en la década de los 60; se hizo más intensivo de 1970 a 1980. En 1988, el gobierno del estado de Querétaro a través de la instancia que administraba el recurso en el municipio de Querétaro, inició la adquisición de datos e información de la situación que guardaba el agua. En 1990 se enfocó a evaluar el AVQ, proponiendo acciones que permitirían sustentar el desarrollo socioeconómico de la capital del estado y plantear escenarios sobre el manejo integral del recurso; se llegó a realizar un modelo de optimización y decisión económica, donde se plantearon diferentes escenarios con base en las necesidades de la ciudad. Uno de los escenarios, el más desfavorable, planteó que en el año 2003 la infraestructura hidráulica para el abastecimiento de agua se colapsaría; escenario que se cumplió y se tuvo la necesidad de realizar nuevas perforaciones a mayor profundidad, reubicar pozos y buscar fuentes externas para el abastecimiento de agua para la ciudad como la importación de agua del río Extoraz o bien de la zona de El Batán en el municipio de San Juan del Río. Además, en 1993 se planteó un programa de uso eficiente de consumo de agua para riego, que en su primera etapa tuvo el éxito esperado, reducir un 40% la extracción de agua en el valle de Chichimequillas y Pedro Escobedo y aprovechar parte para conducirla a la ciudad de Querétaro, pero por la falta de cultura, el utilizar el agua para otros fines o ampliar la superficie de riego, el proyecto se canceló y continuó la explotación intensiva de los acuíferos.

La ubicación estratégica de la ciudad capital al estar cerca de la ciudad de México, así como la visión de planeadores, sin el conocimiento integral que guarda el acuífero, ha favorecido un crecimiento poblacional desordenado, al hallarse industrias importantes, que generan recursos económicos para el estado en el hoy llamado corredor industrial San Juan del Río – Querétaro, así como la creación de nuevos desarrollos habitacionales en las zonas consideradas en su momento como de recarga, los cuales consumen y demandan agua en cantidades crecientes, así como la infraestructura adicional para transportarla a las zonas altas del valle, situación que provoca, entre otras, la reducción de las zonas de infiltración natural e incremento del escurrimiento, lo que se traduce en un reducción de la recarga al acuífero.

Si bien, en la década de los 80 y 90 la actividad principal en el territorio del AVQ era la agricultura, que también consumía el mayor volumen tanto de agua superficial como subterránea, al operar los pozos del orden de los 180 a 270 días por año. Hoy en día,

muchos de estos pozos operan los 365 días del año para abastecer tanto a las industrias como a los complejos habitacionales que se han tenido que construir para dar cabida a las nuevas fuentes de trabajo que se han generado. Esto ha ocasionado una aceleración en el abatimiento del acuífero, que desde el punto de vista económico tiene un espesor cuantificado, tanto por la perforación de los pozos como por estudios geológicos y geofísicos. Asimismo, la tecnología actual para la extracción de agua del subsuelo se limita a los 400 m de profundidad.

El conocimiento hidrogeológico que se tiene del AVQ en la zona saturada es:

- La profundidad económicamente explotable del acuífero; con base en los estudios geofísicos realizados, se tiene identificado que es del orden de los 400 a 500 m.
- La velocidad de abatimiento de los niveles de agua subterránea que oscila entre 3 y 10 m por año.
- El origen de las rocas que almacenan el agua es volcánico, aunque en algunas zonas muy puntuales se han encontrado rocas sedimentarias (norte del poblado del Nabo), con una productividad nula.
- Los gastos de los pozos oscilan entre los 5 y 30 lps; se tienen identificadas las zonas de mayor y menor productividad.
- Por estudios geofísicos y perforaciones superiores a los 500 m se ha identificado una unidad asociada a material granular, sin clasificación e identificación petrográfica, subyaciendo a las rocas volcánicas de tipo basalto, andesita y tobas ignimbríticas; en algunos sitios producen caudales de medios a bajos (<15 lps) y en otros manifiestan termalismo, situación que puede presentar presencia de contaminantes naturales, como flúor.
- Se identifican las zonas vulnerables a la contaminación del agua subterránea, producto de la inducción de agua superficial al subsuelo a través de fallas activas que se han generado producto de efectos asociados a la explotación intensiva, compactación de suelos y activación de fallas geológicas.
- Se tienen identificados los intervalos de roca que aportan agua.
- Se cuenta con dos modelos matemáticos de flujo hidráulico subterráneo desarrollados con el *software Visual Modflow*, uno para la CEA y otro para CONAGUA.
- Se tienen definidas las zonas alternas para el abastecimiento de agua para la ciudad de Querétaro, como es el agua superficial proveniente del río Extoraz o bien la zona de El Batán.
- Se cuenta con infraestructura hidráulica de conducción para satisfacer a la población.
- Se tienen localizados los sitios que presentan problemas de inundación ante eventos climatológicos extraordinarios.

Para el planteamiento de este trabajo es necesario dar un tratamiento a la información que se tiene, enfocado a la zona drenada, para definir si tiene la capacidad para almacenar o transmitir el agua superficial o residual, si se ha compactado, ubicar las zonas donde actualmente se concentra el agua de lluvia y conocer la situación que se presenta en las zonas de cambio de pendiente topográfica.

2.2. Evolución de la administración del agua en el estado de Querétaro

Hasta el año 1992, la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos era la responsable de la administración del agua; hoy la CONAGUA es la responsable de normar el uso y manejo del agua.

De 1990 a 1996 el organismo operador de agua en el estado de Querétaro, inicia una serie de estudios encaminados a evaluar el recurso y tratar de llegar a su manejo integral, realiza estudios en el valle de Querétaro y con base en los resultados de la evaluación hidrogeológica se fue extendiendo la adquisición de datos y conocimiento hacia los valles de San Juan del Río – Pedro Escobedo, ciudad de San Juan del Río, Tequisquiapan – Ezequiel Montes, Chichimequillas, Huimilpan – El Milagro y Amealco. En todos estos acuíferos a excepción de Huimilpan y Amealco cuentan con al menos un modelo matemático de flujo hidráulico subterráneo.

De 1996 a la fecha la misma Comisión Estatal de Aguas de Querétaro continúa con un monitoreo mínimo de los acuíferos, sólo de los pozos que administra, y realiza perforaciones de pozos tanto en la capital del estado como en las comunidades que requieren del agua, para recuperar o incrementar volúmenes.

En 1999 la Comisión Nacional del Agua, realizó un estudio de integración y modelación del AVQ, así como del acuífero de San Juan del Río que fue la base para definir la disponibilidad del recurso hidráulico subterráneo, publicada en el Diario Oficial de la Federación en el año 2003.

De 1999 a la fecha diferentes empresas como inmobiliarias han realizado estudios de factibilidad hidrogeológica y perforando pozos para satisfacer sus demandas. Asimismo, algunos agricultores han tenido que profundizar sus pozos ante el abatimiento de los niveles del agua subterránea y reducción de caudales. Toda la información está dispersa.

En el año 2009 la CONAGUA publica en el Diario Oficial de la Federación la actualización de la disponibilidad del agua con base en el REPDA y estudios contratados.

Todos estos estudios han sido realizados por diferentes empresas y consultoras de agua sin una normatividad que homologue la información, en lo referente a: la definición de sitios favorables para la perforación de pozos y a la perforación, aunque existe la norma NOM-003-CONAGUA-1996, la información de los resultados dichas perforaciones, no está disponible o bien no se generó. Aunado a esto no se indica dentro de la normatividad la necesidad de documentar la perforación. Esta situación ha ocasionado que se desconozca la descripción litológica detallada del subsuelo de la zona drenada y acuífero.

En cuanto a la disponibilidad también existe la norma NOM-011-CONAGUA-2000, la cual es la base para la cuantificación de los acuíferos.

Existen dos normas asociadas a la infiltración, la NOM-014-CONAGUA-2007 que plantea los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada y está orientada a regular el uso del agua residual, considerando al suelo y subsuelo como planta de tratamiento natural, que puede ser aprovechada con una combinación adecuada de retratamiento-tratamiento natural-pos tratamiento, compatible con el método de recarga y con el uso que se le pretenda dar al agua recuperada, estableciendo los requisitos que se deben cumplir en cuanto a la calidad, operación y monitoreo.

En cuanto a la segunda norma, NOM-015-CNA-2007, se orienta a la protección de la calidad del agua de los acuíferos y al aprovechamiento del agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial.

Integrando estas dos normas se tienen los elementos normativos para darle el tratamiento y generar acciones tanto de las aguas producto del escurrimiento, como de las aguas residuales, específicamente de los sectores público-urbano e industrial.

En la **Figura 2.1** se expresan las vertientes que ha tenido la administración del agua en el estado de Querétaro, intentando a partir de 1990 llegar a su manejo integral; sin embargo, no existe una instancia que tome la responsabilidad, a pesar de existir los Consejos Técnicos de Aguas Subterráneas (COTAS), grupo de trabajo dedicado a llevar el monitoreo y seguimiento de las acciones que se realizan en el territorio del acuífero, mas no de toma de decisiones. Al existir una instancia concentradora de información y de toma de decisiones y un cuerpo de gobierno que lleve su seguimiento, se esperarían mejores resultados. Para ello es también necesario replantear las acciones y responsabilidades que deben realizar y cumplir. Sin embargo, en todo lo realizado a la fecha, se mencionan acciones que se deberían realizar sobre la recarga y no se hace una propuesta concreta.

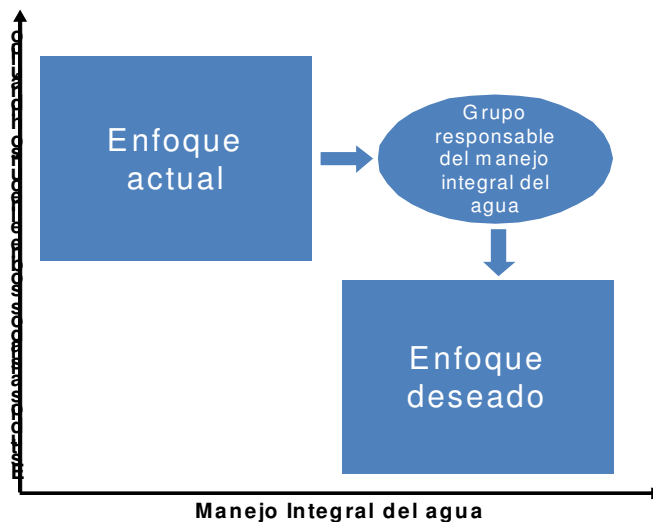


Figura 2.1. Enfoque orientado a la administración del recurso hidráulico en el estado de Querétaro

También es necesario recalcar el esfuerzo que ha hecho el estado de Querétaro al decretar el Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del estado de Querétaro en abril de 2009, en el que una parte importante se enfoca a la recuperación y equilibrio del AVQ.

2.3. Acciones encaminadas a la recarga del acuífero del valle de Querétaro

Acciones

- Identificar un volumen de roca que tenga la capacidad para transmitir, conducir y en su momento almacenar el agua proveniente de la superficie.
- Conocer el volumen de agua superficial o residual susceptible para ser incorporado al subsuelo.
- Conocer la calidad del agua a infiltrar.
- Proponer acciones para el reaprovechamiento del agua.
- Monitorear las acciones y evolución de las áreas donde se lleve a cabo la infiltración o inyección de agua.
- Controlar:
 - El impacto que se presente por la explotación intensiva (movimientos diferenciales del terreno, infiltración de aguas residuales, entre otros).
 - La rehabilitación de zonas contaminadas.
 - Fuentes potenciales de contaminación.
- Proteger
 - Fuentes de abastecimiento.
 - Zonas de recarga (cauces de ríos, barrancas, zonas con rocas fracturadas, zonas con cambios de pendiente)
- Mantener actualizada la información que se genere.
- Documentar las acciones realizadas así como la información obtenida.
- Innovar metodologías para incorporar agua al subsuelo.
- Promover tecnologías para hacer uso eficiente del recurso.
- Llevar un seguimiento de los daños ocasionados a la infraestructura urbana producidos por el agua.
- Tratar las aguas residuales.

2.4. Marco geográfico del acuífero del valle de Querétaro

2.4.1. Localización

El AVQ se localiza en la parte suroccidental del estado de Querétaro, abarca el municipio de Querétaro y parte de Corregidora y El Marqués, cubriendo una extensión de 484 km². En este acuífero se asienta el 62% de la población del estado.

En la **tabla 2.1** se presentan las coordenadas de los límites territoriales y en la **Figura 2.2** se observa su localización.

Tabla 2.1. Vértices de la poligonal del AVQ (Tomado del Diario Oficial de la Federación, publicado el 6 de julio de 1998)

Vértice	Longitud	Latitud	Referencia
1	-100.2764 °	20.6083 °	Cerro Las Trojitas
2	-100.3625 °	20.5242 °	Cerro El Cimatario
3	-100.4625 °	20.4889 °	La Purísima
4	-100.5064 °	20.5312 °	Límite estatal/carretera federal 45
5	-100.5732 °	20.7309 °	Límite Querétaro-Guanajuato (Las Tetillas)
6	-100.4486 °	20.7389 °	Santa Rosa de Jáuregui
7	-100.3439 °	20.6689 °	Cerro Encinalito
1	-100.2764 °	20.6083 °	Cerro Las Trojitas



Figura 2.2. Localización y límites del AVQ (Google Earth, 2009)

2.4.2. Vías de comunicación

El territorio que cubre el acuífero se encuentra bien comunicado tanto con la capital del país como con las ciudades que se encuentran al norte y occidente, cuenta con autopistas, caminos pavimentados y de terracería, línea de ferrocarril, así como con un aeropuerto internacional, situación que le permite mantener una buena comunicación por tierra y por aire; además, cuenta con sistemas de comunicación virtual y con todos los servicios de energía eléctrica y teléfono. **Figura 2.3.**

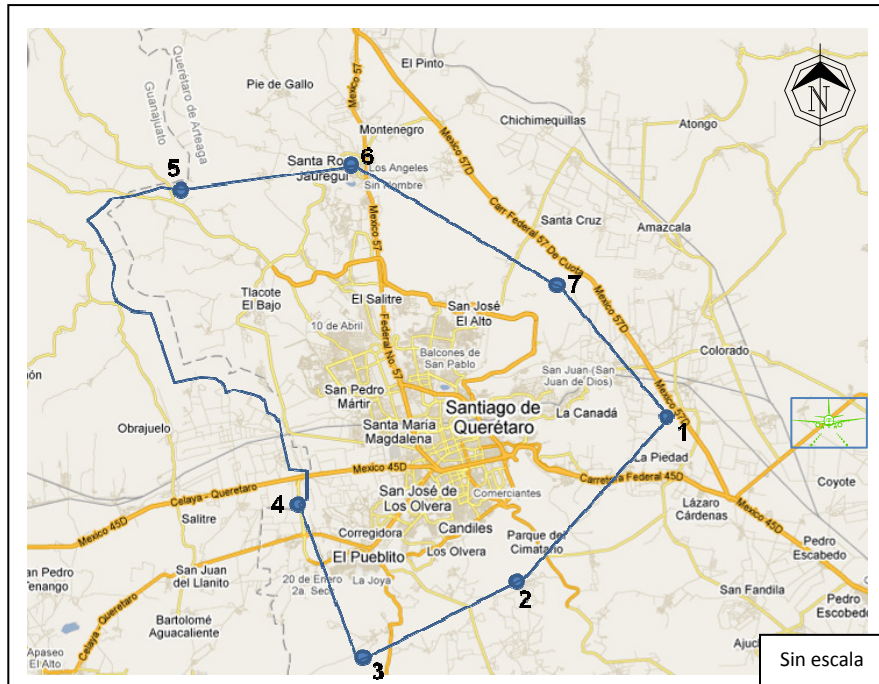


Figura 2.3. Vías de comunicación (Google Earth, 2009)

2.4.3. Aspectos socioeconómicos del acuífero del valle de Querétaro

Con base en el Censo de Población de 2005 realizado por INEGI, en ese año en la superficie del acuífero había 918,000 habitantes, el área de riego por bombeo de pozos era de 3,830 Ha, y alrededor de 100 industrias.¹

Haciendo una proyección al 2010, considerando un incremento poblacional e índice de crecimiento del orden del 4%, la población estimada para 2010 es del orden de los 1,117,000 habitantes, los cuales, se estima consumen en promedio 200 litros por habitante/día. La superficie de riego por bombeo, con base en el censo de 2008 se reduce y para estos momentos se estima en 3,430 Ha con una columna de riego de un metro en promedio (por el tipo de cultivo que se lleva a cabo alfalfa y sorgo principalmente). Por lo que se refiere a la planta industrial, ésta se ha mantenido estable, su crecimiento se ha dado hacia los acuíferos de San Juan del Río y Chichimequillas.

En la **Tabla 2.2** se presentan los consumos de agua subterránea estimados para 2010.

¹ (<http://www.piq.com.mx/administracion/archivos/08DirPIQAgt09Prov.pdf>)

Tabla 2.2. Consumo estimado de agua subterránea en el AVQ (*)

		Consumo estimado de agua anual (Mm ³)
Población	1,117,000 habitantes	81.542
Superficie de riego con agua de pozos	3,430 hectáreas	34.300
Industria		24.918
Total		140.760

(*) Valores estimados con base en información de INEGI, considerando un consumo diario medio de 200 litros por habitante y una columna de riego de un metro por año

Estos datos habrá que correlacionarlos con la información del Registro Público de Derechos de Agua, así como con la superficie de riego real.

2.5. Marco geológico

2.5.1. Fisiografía

El AVQ está en la provincia del Eje Neovolcánico en la subprovincia de las Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo, en la parte de zonas de llanuras. Ver **Figura 2.4**. Dentro de ésta se definen tres sistemas de topoformas, pequeño llano aislado, sierras y laderas tendidas con lomeríos y lomeríos con colinas.



Figura 2.4. Fisiografía del estado de Querétaro, sin escala (INEGI, 2010)

2.5.2. Geomorfología

El AVQ corresponde a un valle de forma alargada con dirección norte sur, relleno de sedimentos aluviales, flujos de lava y depósitos vulcanoclásticos lacustres de unos ± 100 m de espesor para cada uno, según el área. Este valle es el resultado del hundimiento producido por un sistema de fallas escalonadas producto de esfuerzos distensivos dirigidos hacia el poniente y al oriente respectivamente, con fallas ordenadas casi simétricamente y notoriamente equidistantes con orientación NW-SE. Se identifican también fallas transcurrentes secundarias con orientación NE-SW formando un tren estructural transversal al graben de Querétaro, como un proceso extensivo.

Al tratarse de un valle, las elevaciones son muy escasas y de poca magnitud. Las pocas elevaciones que se pueden encontrar son pequeños conos cineríticos. La curva de elevación más baja presente en el área de estudio es la de 1800 msnm y se encuentran en la zona central del valle, la curva más alta es la de 2300 msnm, la cual se encuentra formando el cerro del Cimatarío, éste se localiza en la parte suroriental.

A nivel regional los cambios de pendiente más significativos están dados por las fallas principales como son la Falla de Querétaro, la Falla Obrajuelo, la Falla El Tlacote y La Falla La Cañada. Estos cambios de pendientes no son muy significativos ya que la variación no es mayor a un par de decenas de metros. Este sistema de fallas corresponde al comportamiento tectónico de la zona de estudio, de fosas y pilares (horst y graben).

GUYSA (1997), realiza la caracterización geomorfológica del AVQ, la cual es una parte importante para la definición de los sitios favorables para infiltrar el agua, iniciando por la descripción de las unidades geomorfológicas de acuerdo a factores como estructura, procesos y edad. La localización de dichas unidades se observan en el mapa geomorfológico. **Figura 2.5**

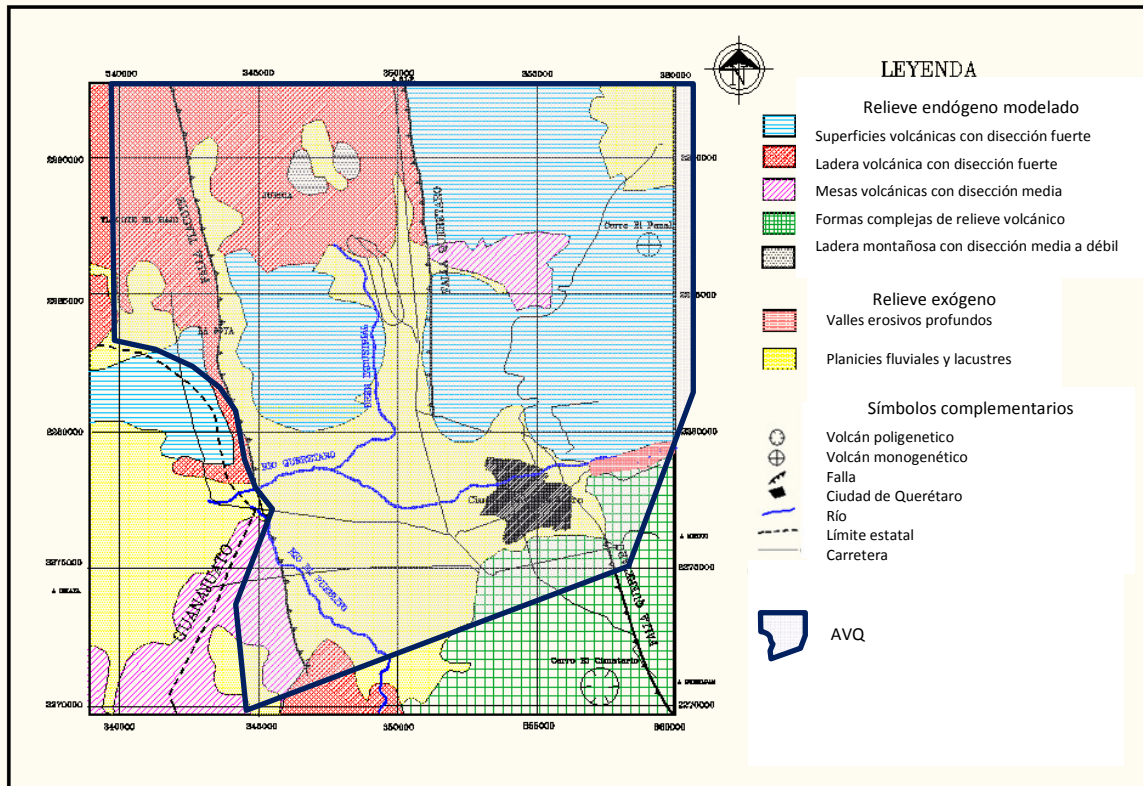


Figura 2.5. Geomorfología del AVQ (Adaptado del estudio de GUYSA, 1997)

Relieve volcánico-denudatorio. Esta clase corresponde a formas muy afectadas por la erosión y la antigüedad y puede presentarse de las siguientes formas:

- Superficies volcánicas (mesas, coladas de lava), con fuerte disección. Estas son características de eventos volcánicos intermedios, presentan estructuras tabulares, basculadas y fracturadas por la tectónica pliocuaternaria y muy erosionadas. Esto propicia que la precipitación existente se integre al sistema de agua subterránea de la zona. Se localizan en San Pedrito El Alto y Peñuelas.
- Laderas volcánicas con fuerte disección. El volcanismo ácido oligo-miocénico es representativo de este tipo de estructuras, presentan topografías muy escarpadas y una capacidad de infiltración alta, se identifican al norte en Santa Rosa de Jáuregui.
- Mesas volcánicas con disección media. Se caracterizan como derrames basálticos, localizados entre los poblados Castillo y San Miguelito, generalmente de fisura, bastante extendidos. Presentan una típica fisonomía de mesas de material básico, en sus bordes con proceso de erosión regresiva, estas características indican que se tiene una gran infiltración en estas unidades. Algunas están asociadas a fallas regionales, características de la tectónica plio-cuaternaria.
- Formas complejas de relieve volcánico-denudatorio (antigua) y volcánico-acumulativo (joven) no diferenciado. Son basaltos que se presentan en formas de mesas, en tanto que los aparatos volcánicos poligenéticos andesíticos como el cerro El Cimatario. También existen, pero en menor proporción, conos monogenéticos basálticos como el cerro El Penal.

- Relieve estructural. Esta clase corresponde a las formas originadas por una actividad endógena del tipo de los plegamientos, intrusiones y metamorfismo. Se encuentran cubiertas o flanqueadas, por los vulcanismos del Terciario y Cuaternario.
- Ladera montañosa plegada con disección de media a débil. Comprende las pequeñas zonas de caliza-lutita que se encuentran en Juriquilla. La disección media es producto del grado de fracturamiento y sus características litológicas.

Relieve exógeno. Esta clase corresponde a formas de tipo relieve denudatorio o relieve acumulativo:

- Valles erosivos profundos. Corresponden al relieve denudatorio y se caracteriza por presentar zonas de altos valores de profundidad de la disección y a densidades de medias a altas lo cual le da una capacidad de infiltración. Los factores que los controlan son: el grado de fractura de las rocas; la litología y el tiempo de exposición a los agentes exógenos, se encuentran sobre las estructuras montañosas más antiguas, especialmente en las mesas y laderas de disección fuerte, típicas del vulcanismo cenozoico temprano, y sobre las zonas de relieve volcánico complejo. Asimismo, estos barrancos se vinculan con los aparatos volcánicos muy destruidos, y con zonas de pendientes medias a fuertes, se localiza en la zona de la Cañada.
- Planicie y terrazas fluviales y lacustres. Se caracterizan por presentar relieves acumulativos. En el AVQ corresponden a la planicie regional, consiste de diversos materiales fluviales de granulometría fina (arenas, limos, arcillas) y materiales piroclásticos depositados en facies lacustres. Representan los depósitos de los antiguos lagos del cuaternario, que posteriormente fueron afectados por emanaciones volcánicas, cambios climáticos, y lentamente fueron desecándose y drenando hacia el oeste. Las características morfológicas hacen de esta área propicia para el almacenamiento del agua que circula desde las zonas montañosas.

Asimismo, se presenta la caracterización de las unidades hidrogeomorfológicas que es útil para los fines de este estudio.

a) Unidad de sierra. Zona montañosa que caracteriza al área de estudio y la constituyen las unidades litoestratigráficas: andesita, andesita alterada, basalto, ignimbrita, calizas y riolita. Es la zona con mayor pendiente de más de 30° y se presenta la más alta precipitación. La infiltración que se genera en esta unidad es significativa; sin embargo, otra parte significativa también escurre hacia la planicie, prueba de ello es que existe un gran número de corrientes que disectan densamente al relieve, muchas de las cuales cortan fracturas en su desarrollo.

b) Unidad de ladera. Esta unidad representa el conjunto de lomas y mesetas con una elevación 1,800 a 2,000 m.s.n.m., está representada por las unidades litológicas como el basalto y la brecha volcánica, esta unidad hidrogeomorfológica se encuentra fracturada, con una pendiente de 15° en las mesas que la conforman y 20° en las laderas de las mismas, los valores de densidad son de 0.5 a 1.5 y de profundidad son de 10-40, en conjunto estos parámetros definen una unidad en donde se presenta una capacidad de infiltración menor que la anterior y por tanto el escurrimiento es mayor que en la unidad de sierras, donde la cantidad del

volumen de agua precipitada en esta unidad hidrogeomorfológica llega a formar parte del sistema de flujo del agua subterránea.

c) Unidad de planicie acumulativa. Esta unidad es la de mayor extensión dentro del área de estudio, aflora en las partes topográficas más bajas del valle; está constituida por depósitos vulcanosedimentarios de materiales no consolidados, aluvión y/o suelo residual. Como se dijo anteriormente esta unidad es producto de la acción de factores exógenos niveladores del relieve. Actualmente esta unidad ha sido urbanizada en una gran superficie pero, contiene el mayor número de aprovechamientos del agua subterránea y áreas de cultivo, en consecuencia también capta el mayor volumen de agua de riego proveniente del acuífero.

2.5.3. Geología regional

La geología regional del AVQ está compuesta por rocas marinas del Cretácico Superior llamada Formación Soyatal en la base de la secuencia, afloran en la parte norte de la zona de estudio, cerca de Juriquilla. Dicha unidad está cubierta por una secuencia continental del Terciario, debido a un fenómeno tectónico (Orogenia Laramide) que ocasionó que el nivel de los mares disminuyera radicalmente; está conformada por rocas volcánicas, ácidas, intermedias y básicas que fueron eruptadas en el Oligoceno y Mioceno, en donde se originaron una serie de fosas y pilares con orientación NW-SE que formaron la estructura graben Querétaro, limitado por las fallas Querétaro y Tlacote. Coronando al Terciario se presentan algunos eventos volcánicos del Cuaternario y una capa de aluvión y suelo residual. El material sedimentario que rellenó el graben consiste de una secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas, normalmente graduada; dentro de esta unidad se encuentran horizontes delgados de rocas piroclásticas de composición silícica. El material arcilloso funciona hidrogeológicamente como una capa confinante a las secuencias de gravas y conglomerados de la parte inferior **Figura 2.6**.



Figura 2.6. Geología regional del estado de Querétaro (INEGI, 2010)

2.5.4. Estratigrafía

Las unidades identificadas en el área de estudio se describen con nombres informales debido a que carecen de una nomenclatura formal, sólo la unidad de rocas carbonatadas y lutíticas de ambiente de sedimentario marino es la que encuentra definida formalmente por Wilson 1955 como Formación Soyatal.

A continuación se describen cada una de las unidades desde la más antigua a la más joven, con algunas de sus características hidrogeológicas.

- **Calizas y lutitas (Kss) (Formación Soyatal)**

La secuencia litológica regional tiene como base a la Formación Soyatal, se trata de un depósito de ambiente marino, conformado por lutitas calcáreas de color pardo a gris que intemperizan a pardo amarillento. Se encuentran sumamente plegadas, presentan interestratificación de capas de caliza grises, sus espesores van de 0.30 a 0.05 m.

En la zona de El Nabo se realizaron varias perforaciones de las cuales se sabe que por lo menos dos tienen más de 900 m de profundidad. De la que se tiene referencia (*Pacheco, Tesis Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales, 2007*), el corte del pozo **Figura 2.7**, indica que de los 20 a los 900 m corresponde a una caliza; sin embargo, con base en la información del Servicio Geológico Mexicano, Hoja F14-10 y los estudios realizados por GUYSA (1991, 1992, 1997) indican la presencia de lutitas en la región.

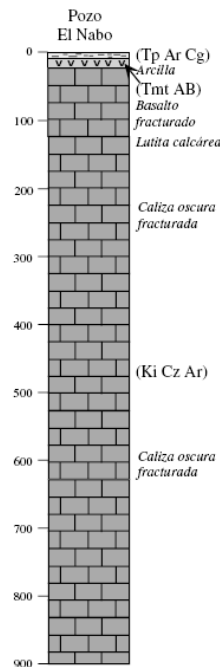
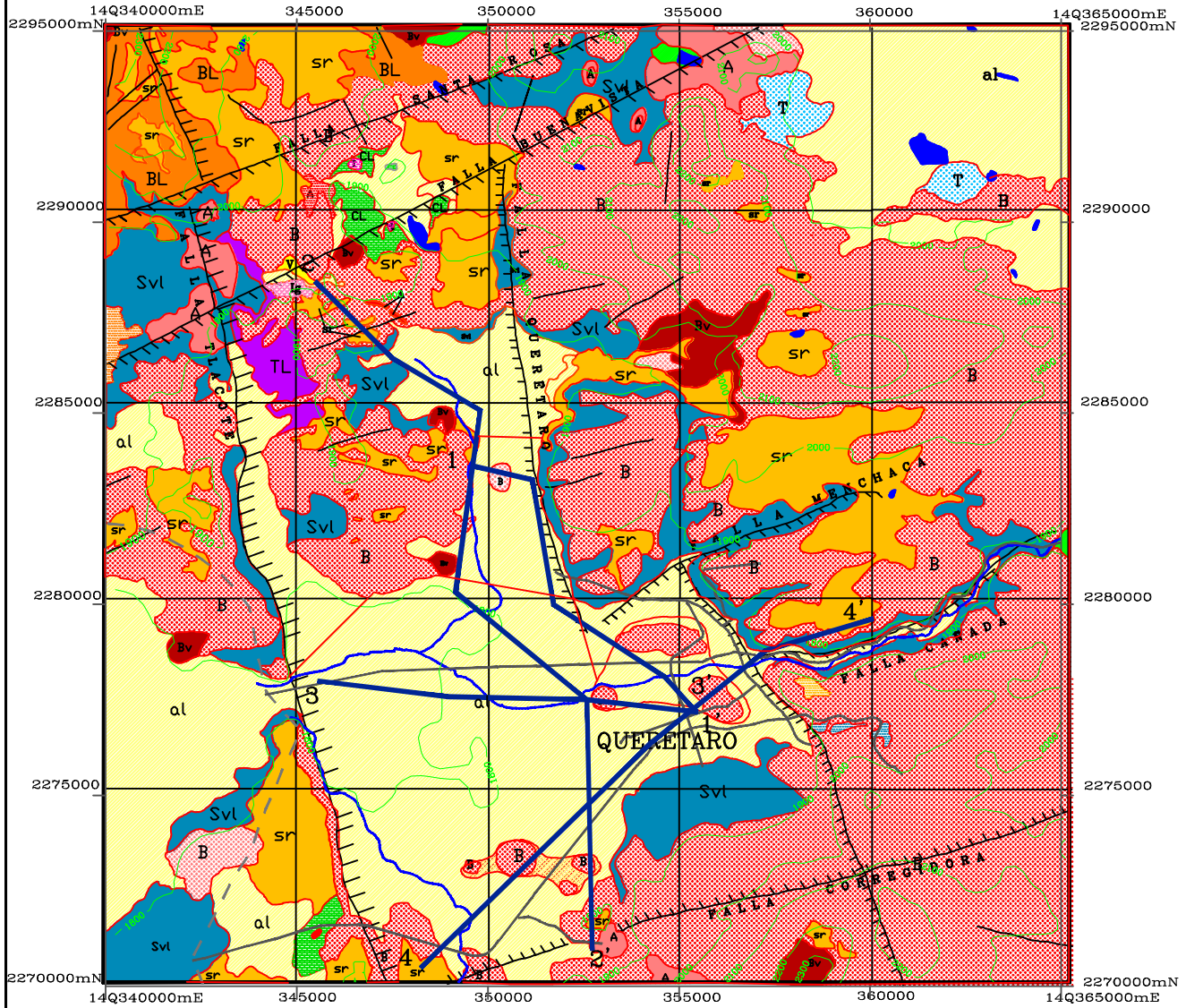


Figura 2.7. Corte litológico del pozo el Nabo

(Jesús Pacheco Martínez, Tesis Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales, ANEXO E litología de pozos usados en la modelación de datos gravimétricos, 2007).

En la **figura 2.8** se muestra la distribución de las unidades litológicas que conforman la geología de la región.



SIGNOS TOPOHIDROGRÁFICOS

- CARRETERA PAVIMENTADA
- TERRACERÍA
- BORDO
- LÍMITE ESTATAL
- CURVA DE NIVEL TOPOGRÁFICA
- RIOS Y ARROYOS
- CARRETERA PAVIMENTADA

SÍMBOLOS GEOLÓGICOS

- CONTACTO GEOLÓGICO
- FALLA NORMAL, BLOQUE HUNDIDO
- FALLA INFERIDA O SEPULTADA
- LINEAMIENTOS
- FRACTURAS
- LOCALIDAD CON MUESTRA DE ROCA
- SECCIÓN GEOLÓGICA

**COLUMNA GEOLÓGICA
ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS**

- SUELO RESIDUAL
- DEPÓSITOS ALUVIALES
- BRECHA VOLCÁNICA DE COMPOSICIÓN BASÁLTICA
- BASALTO EL TAMBOR
- TOBAS
- SEDIMENTOS VULCANOCLÁSTICOS LACUSTRES
- BASALTO LAJEADO NEGRO
- IGNIMBRITA
- ANDESITA
- CALIZAS Y LUTITAS

ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS

- DACITA DE HORNBLENDA
- TOBAS LÍTICAS
- VITRÓFIDO DE COMPOSICIÓN ANDESÍTICA

Escala Gráfica 1:111000

Mapa geológico	
Arturo M. Morales Behar	
Mapa geológico mejorado del estudio Guya-CONAGUA 1996	
Agosto 2011	Figura 2.8

Esta formación subyace a cualquier depósito volcánico. Debido al origen de los sedimentos posteriores forma un contacto discordante y se encuentra cortado por rocas ígneas intrusivas. Esta formación fue depositada en el Cretácico Superior (Turoniano).

Aflora en la parte norte del área de estudio, entre los poblados de Juriquilla y El Nabo. Generalmente se encuentra cubierta por depósitos aluviales recientes.

- **Rocas Ígneas Intrusivas**

La región se identifica como una zona volcánica pero también se encuentran eventos intrusivos.

Se cree que las rocas cretácicas fueron levantadas por eventos intrusivos. Se han encontrado procesos metamórficos de contacto entre la dacita y las calizas lutíticas levantadas. Así como algunos xenolitos de composición andesítica, levantados conjuntamente con la dacita en la periferia.

Se han encontrado diversos diques, que podrían corresponder a diques satélites silicificados, estos se pueden encontrar aflorando en la localidad de Mompaní, uno de ellos alcanza una extensión de 200 a 400 m y 10 m de ancho.

Las evidencias de alteración hidrotermal y metasomática han originado que se establezca una relación con el proceso intrusivo de Juriquilla. Los fenómenos de hidrotermalismo han reducido la porosidad de las unidades litológicas localizadas en los poblados de Mompaní, la Solana, San Pedrito El Alto y Cerrito Colorado.

- **Andesitas (A)**

Esta unidad presenta una constitución mineralógica muy variable, desde andesitas puras hasta una andesita con cuarzo y una traquiandesita, su textura es porfídica de matriz microcristalina. Presenta coloraciones rojizas a rosadas. Se encuentra muy fracturada en todas direcciones y fuertemente alterada por procesos de tipo supergénico y por procesos hidrotermales. Existen zonas donde la andesita se encuentra muy alterada (Mompani y La Solana), donde ha perdido la textura original, y se le clasifica de diferentes maneras andesita, andesita basáltica de pigeonita y basalto, dependiendo de la composición de sus plagioclasas, presenta una textura afanítica poco porfídica.

Se observa alteración de muy bajo grado debido a la presencia de clorita, sericita y epidota. En el poblado de San José El Alto se identifica esta unidad como una arcilla verde, en un pozo a una profundidad de 200 m.

Esta unidad presenta pequeños afloramientos, los más representativos se encuentran en la parte norte en el cual se manifiesta la falla Buenavista. En la parte noroeste se encuentra otro afloramiento y en el cual se manifiestan la Falla Tlacote y la falla Buenavista, otro afloramiento de esta unidad se encuentra en la zona sur. Se puede encontrar en el camino que va del poblado del Nabo hacia la Hacienda San Miguelito, otro afloramiento se encuentra al sureste, conformando el cerro La Gallina y el poblado de Mompaní. En la parte central se puede apreciar en el poblado de Los Olvera y en el cerro El Picacho.

Estratigráficamente sobreyace a la Formación Soyatal, su edad va del Oligoceno al Mioceno. Su espesor promedio es mayor a 200 m.

- **Ignimbritas (Ig)**

Esta unidad está formada por emisiones ignimbriticas. Se trata de cuerpos piroclásticos de tobas con fragmentos de cuarzo en una matriz criptocristalina o vítrea. Presenta una textura brechoide y tobácea, se observan líneas de fluidez bien definidas, presenta una coloración rosada, se pueden encontrar afloramientos de pómez color gris.

Estratigráficamente se encuentra subyaciendo discordantemente a unidades basálticas, tobas líticas y sedimentos vulcanosedimentarios.

Esta unidad se observa en algunas localidades como son, El Nabo, el arroyo Mompani y en la Cañada, (fuera del área de estudio su edad fue determinada del Oligoceno-Mioceno). (Guysa, 1997).

En el pozo EL Nabo se cortaron 350 m de este material (CONAGUA, 2009). Esta situación requiere de realizar un análisis más a detalle de las condiciones geológicas de la zona, por lo expresado también en la descripción de la unidad Soyatal.

- **Basalto lajeado (BI)**

Roca de color negro con textura afanítica, pilotaxítica, porfídica, microlítica, con planos de fracturamiento limpio y abierto, horizontales y verticales. Recibe el nombre de basalto lajeado por un fracturamiento secundario ocasionado por efectos de descompresión tensional que produjo un lajeamiento en diferentes direcciones hasta llegar a ser curvo. Debido al intenso fracturamiento que presenta la roca, se le considera una buena zona para llevar a cabo la infiltración de la recarga. Sus espesores son muy variables, en algunos cortes se observan espesores de 10 a 20 m sin encontrar su base expuesta.

Esta unidad aflora en diferentes lugares y en diversas dimensiones por toda el área de estudio. De norte a sur, se presentan en la Tinaja de la Estancia, en San Miguelito y al poniente de Santa Rosa de Jáuregui, en San Isidro el Viejo, al norte de Mompaní y el Nabo y al sur de Tlacote El Bajo.

Sobreyace discordantemente a las andesitas y en algunos afloramientos se encuentra subyaciendo e interdigitado con tobas líticas y sedimentos vulcanosedimentarios. Su edad es del Terciario (Plioceno). (CONAGUA, 2009)

- **Tobas Brechoides**

Esta unidad presenta espesores de 2 a 5 m, está constituida por fragmentos angulosos de basalto color gris claro en una matriz tobácea arenosa color pardo.

Se encuentra aflorando en la parte sur a partir del arroyo El Pueblito o El Batán y al sur del cerro el Pelón, forman pequeñas exposiciones circulares, algunas se explotan como canteras de roca ornamental.

- **Tobas Vitrocristalinas**

Se trata de una roca de color gris, rosado, su textura es tobácea y piroclástica, presenta distintos grados de densidad dependiendo del contenido vítreo. Esta unidad es producto de un vulcanismo peleano, proveniente posiblemente de la Caldera Amealco. Su depósito es similar al de la unidad de tobas brechoides, no fue depositada en la zona norte o ha sido erosionada. Presenta un espesor entre 1 y 5 m.

Su exposición se puede observar en una parte de Menchaca, y sobre el río Querétaro aunque en este lugar tienden a ser ignimbritas.

- **Tobas Limo Arenosas**

Unidad compuesta por depósitos tobáceos limo-arenosos color pardo claro a oscuro, presenta mayor potencia en la parte oriental, sus espesores varían de 1 a 3 m.

- **Tobas Vítreas**

Caracterizadas por su fisiografía que consiste en “*tierras malas*” muy erosionadas. Constituida por tobas vítreas fuertemente alteradas, se transforman fácilmente en minerales arcillosos. Se comportan de manera impermeable.

- **Sedimentos vulcanolacustres (Svl)**

Es una serie de materiales no consolidados de textura piroclástica-epiclástica. Su granulometría es muy variable desde detritos inmaduros a maduros, de clastos gruesos a limos y arcillas, presenta coloraciones rojizas, color crema y verdosas.

Entre los sedimentos que se pueden encontrar hay arenas que van de muy finas a muy gruesas de color blanco pardo parcialmente consolidadas.

Presenta una disposición horizontal en su mayor parte aunque también se pueden encontrar con una leve pendiente o con estratificación cruzada. Se presenta poco consolidada o deleznable, lo que se puede interpretar como una roca que tiene buena porosidad y alta permeabilidad. Estos materiales son los que forman el acuífero granular AVQ.

Se encuentran en toda la región, ya que son los depósitos que rellenan el graben, siendo el proceso exógeno más extenso. Se encuentran interdigitados con coladas de lavas andesíticas y/o basálticas, de espesor variable.

Sus espesores son muy variables van de pocos metros hasta algunos cientos de metros, entre los espesores identificados fueron 340 m en el pozo 1978 (Censo de pozos 1997) y probablemente más de 500 m en la parte central del AVQ (Pozo Santa María Magdalena del censo de pozos de 1997).

Estratigráficamente se encuentra subyaciendo a las coladas basálticas. Tienen una edad del Plioceno al Reciente.

- **Basalto (B)**

Basalto de olivino negro con una textura afanítica holocristalina, microlítica, intergranular y muy denso. Recibe el nombre de Basalto Tambor debido a que existe un cerro formado de este material con ese nombre.

Es una de las unidades que presentan mayor área de afloramiento junto con los depósitos aluviales. Se presenta como mesetas coronadas por coladas lávicas, conformando espesores de 1 a 3 m. presentan planos de fracturamiento en sistemas horizontal y vertical muy abiertos y limpios, lo que da origen a grandes bloques cúbicos de hasta un metro por lado. Pertenecen a un vulcanismo básico alcalino.

Presenta una morfología muy característica que forma grandes bloques cúbicos. Gracias a ella se puede inferir que las coladas son de material que escapó a través de las fisuras en zonas de distensión que se pueden observar en el centro del AVQ en los cerros La Cruz, Las Campanas, cerro Gordo y el Tambor.

Se encuentra en contacto con la mayor parte de las unidades descritas anteriormente, en la parte noroccidental y central y en contacto discordante con los depósitos vulcanoclásticos lacustres, en la parte norte con contacto con el basalto lajeado, al oriente se encuentra sobre las tobas limoarenosas y las ignimbritas y finalmente al sur sobre las tobas vitrocrystalinas.

Las coladas de lava se encuentran intercaladas con los depósitos aluviales del AVQ. Se considera que es el último evento de vulcanismo básico alcalino del Pleistoceno y Holoceno.

- **Brecha Volcánica (Bv)**

Se trata de una toba brechoide de material volcánico color gris oscuro a rojizo, presenta una textura brechoide causada por alteración en los minerales férricos de la matriz. Se observan oquedades dentro de la brecha, algunas son de tamaños considerables, dando como resultado una topografía muy abrupta.

Dentro de estas brechas se ha identificado la acumulación de sílice cristalino y lechoso con superficies botroidales rellenas de carbonatos, los carbonatos han relleno también cavidades y fracturas.

Se sitúa sobre los frentes de corrientes lávicas, conos cineríticos y escoráceos o estrato-volcanes. Esta unidad se correlaciona con eventos volcánicos recientes.

Esta unidad se observa en el cerro Cimatarío, cerro El Nabo, sobre las márgenes del río Querétaro, cerro de Las Campanas. Es la de mayor área de afloramiento en la región.

Su edad va del Pleistoceno-Holoceno.

- **Aluvión y/o suelo residual (Al/Sr)**

Está constituido por gravas y boleos en matriz arcillosa, limosa y arenosa. Alcanza espesores de 70 hasta 80 m en la parte central del valle. Esta unidad constituye propiamente al AVQ.

El suelo residual se encuentra principalmente sobre rocas basálticas, este suelo se utiliza para el cultivo, permite la infiltración de agua a los estratos inferiores, hasta que se satura.

En las regiones donde estos depósitos alcancen espesores considerables y se cumpla que la capa que subyace a esta unidad sea impermeable, se convierte potencialmente en una zona de interés.

2.5.5. Historia geológica

En la **Figura 2.9** se muestra la columna geológica con la posición de las unidades líticas en función a su relación estratigráfica, como parte importante para la definición de las rocas que actualmente contienen agua y como parte importante para definir las características de la zona drenada.

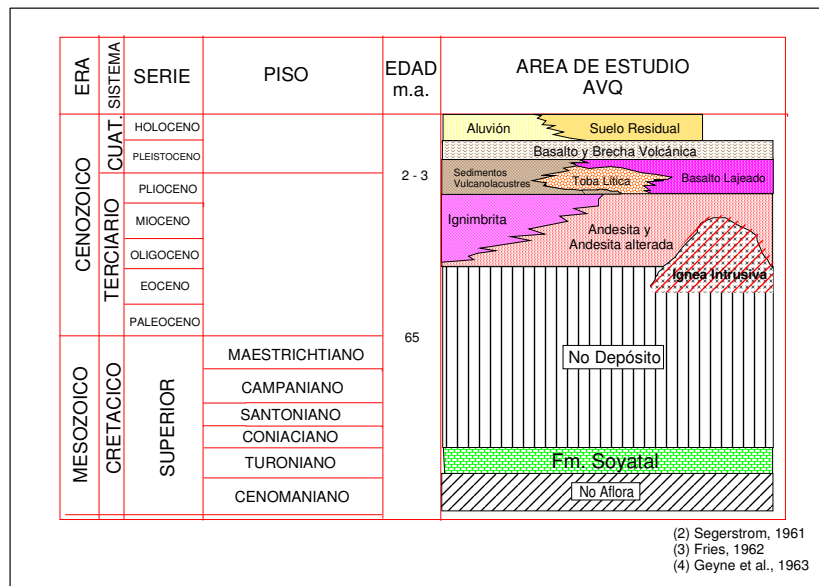


Figura 2.9 Historia geológica (modificado de GUYSA, 1997)

2.5.6. Geología estructural

El AVQ se ubica en la intersección de dos sistemas de fallas regionales, cada uno con varias centenas de kilómetros de largo. Uno tiene una orientación norte-noroeste (NNW) y es conocido como Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA), **Figura 2.10**

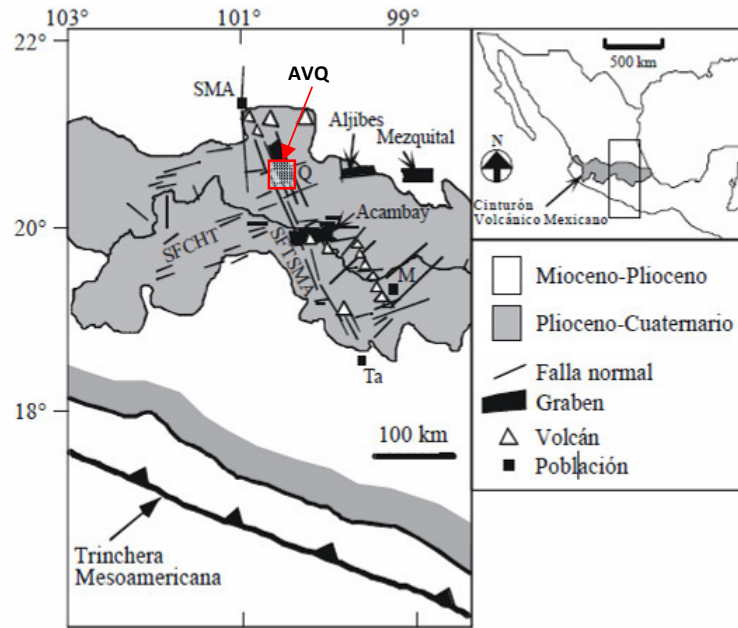


Figura 2.10. Sistemas de fallas regionales en el Eje Neovolcánico
(Aguirre Díaz, 2005)

El otro sistema tiene una orientación este-noreste y se le conoce como Sistema de Fallas Chapala-Tula (SFCHT). Ambos sistemas se intersectan en una amplia franja que abarca al menos desde Huimilpan hasta Santa Rosa Jáuregui y desde Apaseo El Alto, hasta Amazcala, **Figura 2.11**. Esta intersección de sistemas produjo un arreglo ortogonal de fallas normales que forman un mosaico de horsts, grabens y semigrabens, que culminan con el graben de Querétaro. En la figura se aprecian las fallas principales que se identifican en el AVQ (Aguirre Díaz, 2005).

La sucesión volcánica de Querétaro se acumuló sobre un paleorelieve constituido por rocas sedimentarias del Mesozoico, las cuales fueron plegadas durante la orogenia Laramide y son correlativas con las que afloran en la Sierra Madre Oriental. (CONAGUA, 2009).

Durante la actividad volcánica presente en la región se cerraron algunas cuencas, mismas que fueron azolvadas con aportes vulcanoclásticos. Estas rocas volcánicas presentan cierta estratificación.

Posteriormente, se presentaron esfuerzos distensivos los cuales ocasionaron una sistema de fallas normales asociadas fosas y pilares (horst y graben); esto se ve reflejado a nivel superficial por el patrón que sigue el drenaje.

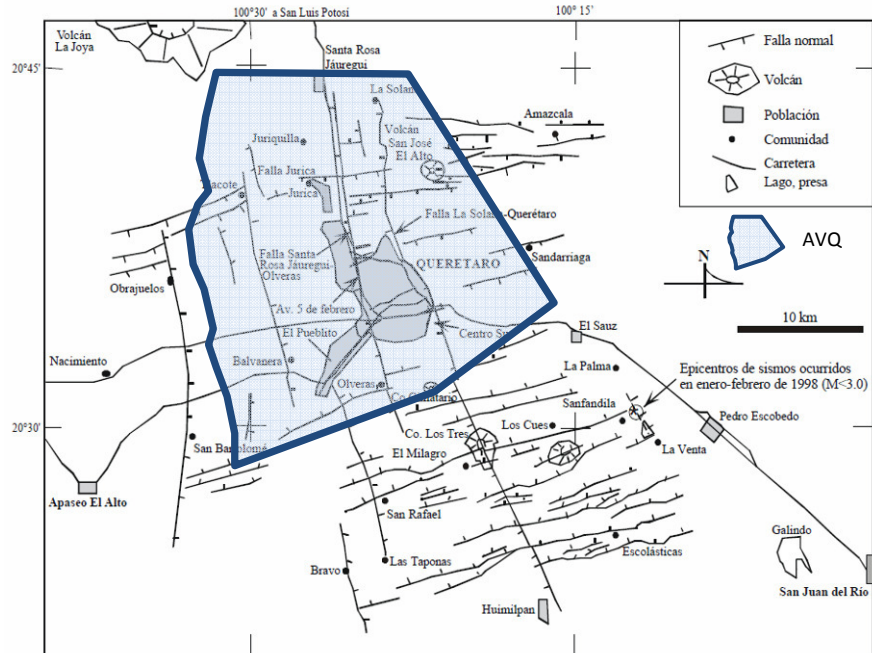


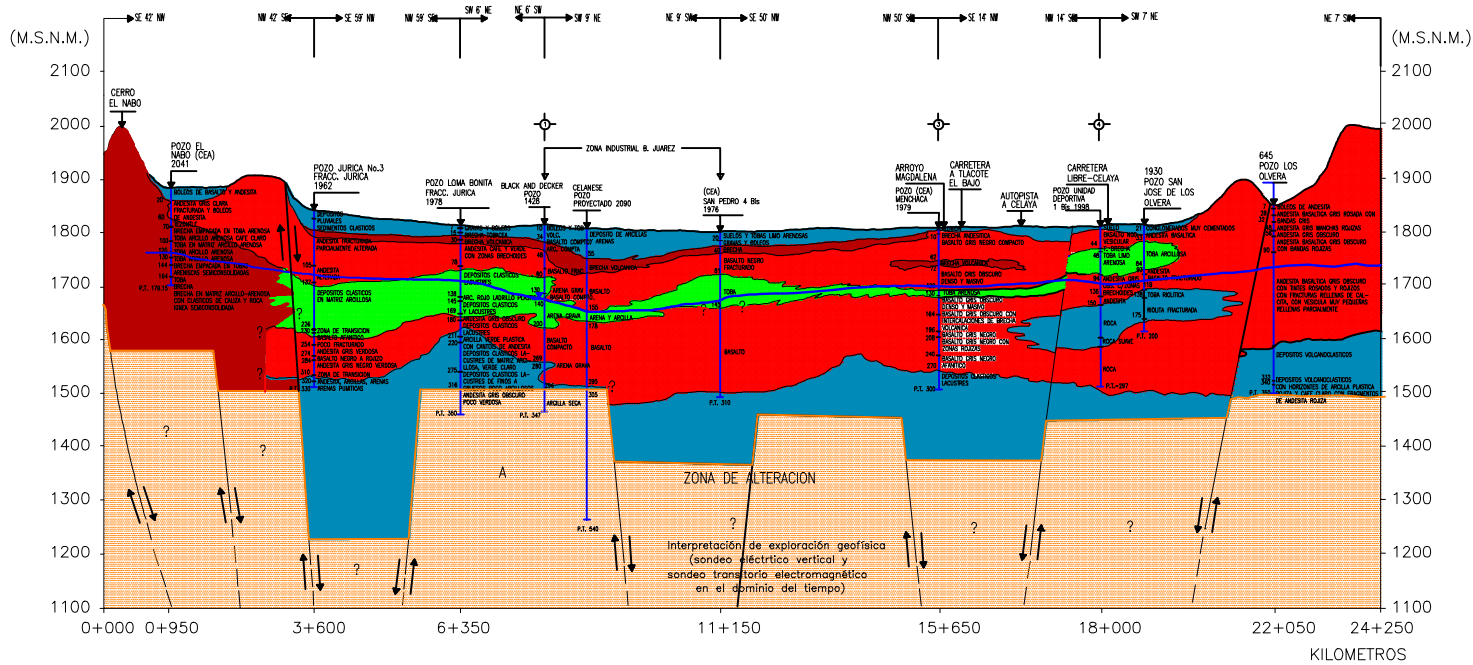
Figura 2.11. Geología estructural del AVQ
(Aguirre Díaz, 2005, adaptada)

2.5.7. Geología del subsuelo

En las figuras 2.12, 2.13, 2.14 y 2.15 se muestran las secciones geológicas indicadas en el mapa, con las cuales se puede interpretar de mejor manera la geología del subsuelo. En la figura 2.12, sección geológica 1-1' se observa un fuerte cono de abatimiento, el cual está ocasionado por la gran concentración de pozos de abastecimiento y a las condiciones geológicas y estructurales presentes en la zona. Al este de la sección se localiza la intersección de la falla Querétaro con la falla Menchaca.



SECCIÓN GEOLÓGICA 2-2'



SIMBOLOGÍA

- (M.S.N.M.) METROS SOBRE NIVEL DEL MAR
P.T. = 270 m PROFUNDIDAD TOTAL (ACOTADA EN METROS)
- NW'W → S5'E
- RUMBO DE LA SECCIÓN
FALLA GEOLÓGICA
1 - 1' SECCIÓN GEOLÓGICA (VER PLANO GEOLÓGICO PARA SU UBICACIÓN EN PLANTA)
- CONTACTO INFERIDO
- CRUCE CON SECCIÓN GEOLÓGICA
CADENAMIENTO O KILOMETRAJE
- BASALTO
- SEDIMENTOS VULCANOCLÁSTICOS
- BRECHA VOLCÁNICA
- TOBA
- CALIZA Y LUTITA
- NIVEL ESTÁTICO 1996 (GUYSA)

NOTA :
LAS DESCRIPCIONES DE LOS CORTES LITOLÓGICOS FUERON TRANSCRITAS RESPETANDO EL ORIGINAL, EN LOS CORTES DE LA ZONA PLANA, LOS REPORTES DE ANDENITA SE INTERPRETARON COMO BASALTO PARA GUARDAR CONGRUENCIA CON EL MARCO GEOLÓGICO CONCEPTUALIZADO.

Sección geológica 2

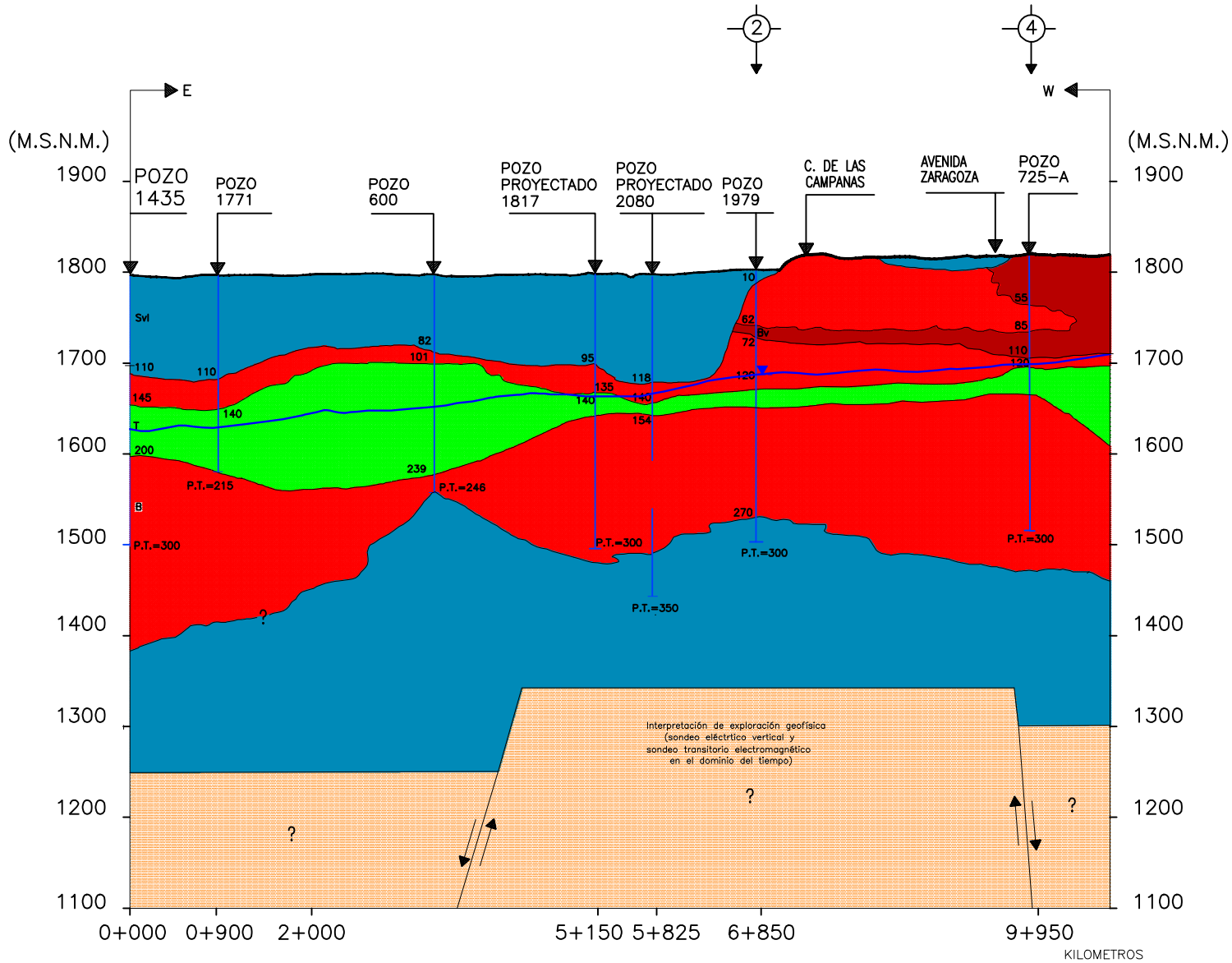
Arturo M. Morales Behar

Sección geológica mejorada del estudio
Guysa-CONAGUA 1996

Agosto 2011

Figura 2.13

SECCIÓN GEOLÓGICA 3-3'



SIMBOLOGÍA

- (M.S.N.M.) METROS SOBRE NIVEL DEL MAR
- P.T. = 270 m PROFUNDIDAD TOTAL (ACOTADA EN METROS)
- NEW ← S5°E RUMBO DE LA SECCIÓN
- 1 - 1' FALLA GEOLÓGICA
- 1 - 1' SECCIÓN GEOLÓGICA (VER PLANO GEOLÓGICO PARA SU UBICACIÓN EN PLANTA)
- CONTACTO INFERIDO
- CRUCE CON SECCIÓN GEOLÓGICA
- 2+600 CADENAMIENTO O KILOMETRAJE
- BASALTO
- SEDIMENTOS VULCANOCLÁSTICOS
- BRECHA VOLCÁNICA
- TOBA
- CALIZA Y LUTITA
- NIVEL ESTÁTICO 1996 (GUYSA)

NOTA :
LAS DESCRIPCIONES DE LOS CORTES LITOLÓGICOS FUERON TRANSCRITAS RESPETANDO EL ORIGINAL, EN LOS CORTES DE LA ZONA PLANA, LOS REPORTES DE ANDESITA SE INTERPRETARON COMO BASALTO PARA GUARDAR CONGRUENCIA CON EL MARCO GEOLÓGICO CONCEPTUALIZADO.

Sección geológica 3

Arturo M. Morales Behar

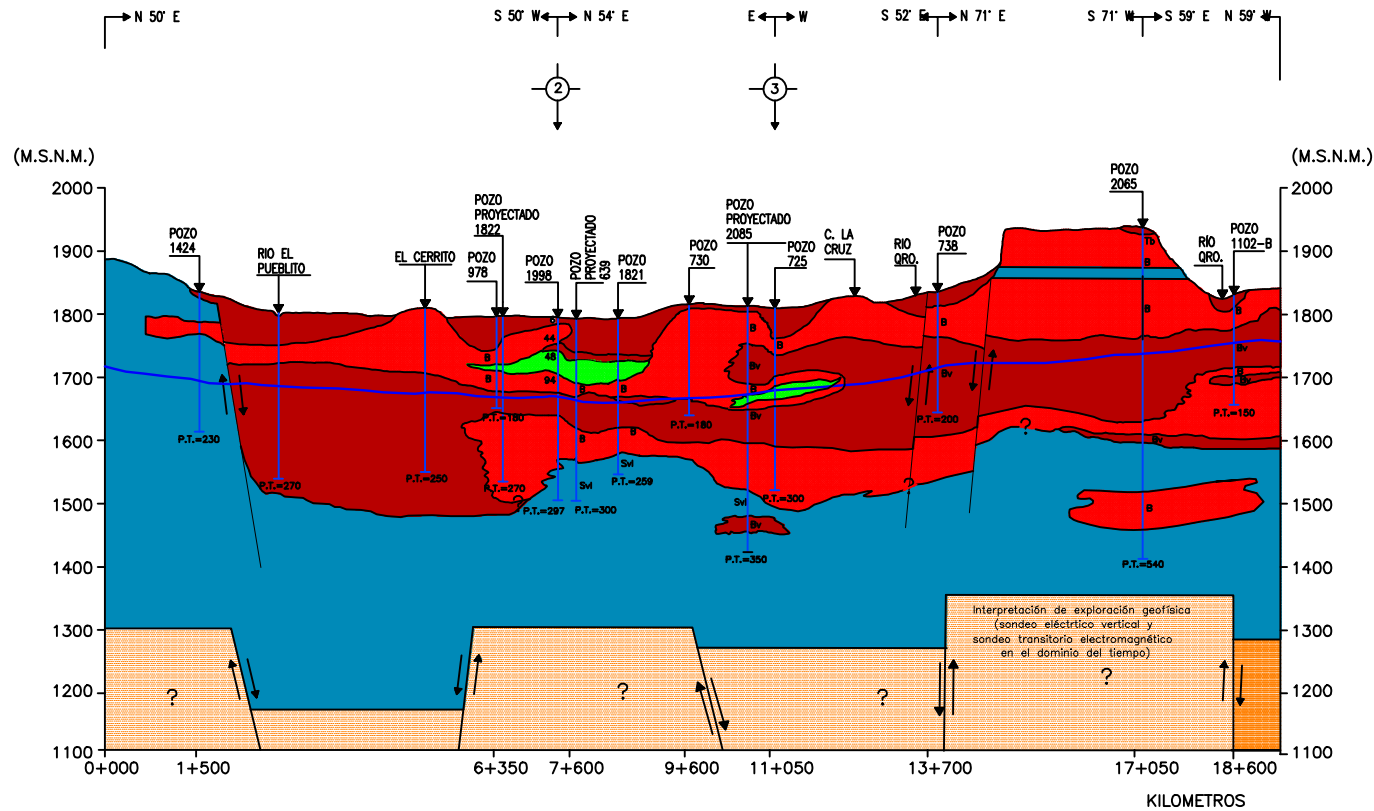
Sección geológica mejorada del estudio
Guysa-CONAGUA 1996

Agosto 2011

Figura 2.14



SECCIÓN GEOLÓGICA 4 - 4'



SIMBOLOGÍA

- (M.S.N.M.) METROS SOBRE NIVEL DEL MAR
P.T. = 270 m PROFUNDIDAD TOTAL (ACOTADA EN METROS)
- ← N 50° E S 50° W → N 54° E E ← W S 52° E → N 71° E S 71° W → S 59° E N 59° W
- 1 - 1' SECCIÓN GEOLÓGICA (VER PLANO GEOLÓGICO PARA SU UBICACIÓN EN PLANTA)
- CONTACTO INFERIDO
- CRUCE CON SECCIÓN GEOLÓGICA
- CADENAMIENTO O KILOMETRAJE
- BASALTO
 - SEDIMENTOS VULCANOCLÁSTICOS
 - BRECHA VOLCÁNICA
 - TOBA
 - CALIZA Y LUTITA
 - NIVEL ESTÁTICO 1996 (GUYSA)

NOTA :
LAS DESCRIPCIONES DE LOS CORTES LITOLÓGICOS FUERON TRANSCRITAS RESPETANDO EL ORIGINAL, EN LOS CORTES DE LA ZONA PLANA, LOS REPORTES DE ANDESITA SE INTERPRETARON COMO BASALTO PARA GUARDAR CONGRUENCIA CON EL MARCO GEOLÓGICO CONCEPTUALIZADO.

Sección geológica 4

Arturo M. Morales Behar

Sección geológica mejorada del estudio
Guysa-CONAGUA 1996

Agosto 2011

Figura 2.15

2.6. Marco hidrogeológico

2.6.1. Región hidrológica

El AVQ pertenece a la Región Hidrológica No. 12, cuenca del río Lerma-Santiago, en la subcuenca río la Laja. **Figura 2.16.**



Figura 2.16. Región hidrológica (INEGI, 2010)

La corriente superficial principal es el río Querétaro. Este cauce lo forma el tributario principal conocido como río Chichimequillas, que recoge volúmenes de la cuenca situada al noreste del AVQ. Fluye en dirección E-W, desde la Cañada hasta Santa María Magdalena donde se intercepta con el río El Pueblito. Existen numerosas escorrentías que descienden del cerro El Penal, hasta llegar a las partes más bajas del AVQ. El río El Pueblito es el colector público de aguas residuales e industriales de las poblaciones Villa Corregidora, El Pueblito, de la ciudad de Querétaro y zona Industrial Benito Juárez.

En la sierra del sur se generan los escurrimientos del río El Pueblito, que con dirección S-N llega y cruza el poblado de Villa Corregidora, donde tuerce al NW y atraviesa la llanura hasta Las Adjuntas para unirse al río Querétaro.

En la porción norte del área en estudio se localiza el Arroyo San Isidro, que fluye con dirección general N-S, cruza la población de Santa Rosa Jáuregui, así como el arroyo Juríca que drena con una dirección semejante.

El drenaje superficial de las partes altas es denso, del tipo subparalelo y arborescente, cuya disección en las rocas es profunda y de fuerte pendiente; en la zona de lomeríos predomina el tipo radial, menos denso y con poca disección en las rocas. En la zona plana del valle el drenaje es escaso, subdendrítico y paralelo, con cauces de poca

disección debido a la poca pendiente y a la reducida capacidad de infiltración, lo que genera graves problemas de inundación sobre todo en la zona urbana.

2.6.2. Clima, precipitación y temperatura

El clima en el AVQ está condicionado a los accidentes del relieve topográfico y a factores geográficos definidos por las diferentes altitudes de la Sierra Madre Oriental, que funciona como barrera orográfica, limitando el paso de los vientos marítimos procedentes del Golfo de México. **Figura 2.17.**



Figura 2.17. Clima (INEGI, 2010)

El clima representativo del AVQ con base en los datos obtenidos de la carta estatal de climas (según Köppen, modificado por E. García), escala 1:500,000; se presenta un sólo tipo de clima, Semiseco Bs₁ el cual a su vez se subdivide en dos subtipos los cuales son:

a) Bs₁hw (w) Clima semiseco semicálido. Este subtipo abarca toda la parte central del AVQ. La temperatura media anual es de 17.4° C, el registro anual de la temperatura muestra que la más elevada se da en el mes de mayo (22.6° C) y la temperatura mínima se registra durante el mes de enero (14.2° C), **Figura 2.18**. La precipitación media anual en la zona es de 533.87 mm, la cual varía de 650 mm en la porción norte, hasta más de 850 mm en la porción sur, presentándose el período de lluvias entre los meses de mayo a octubre y el periodo de estiaje de noviembre a abril observándose el mínimo de precipitación en febrero con 4.85 mm, y el de mayor incidencia en julio con 120 mm, **Figura 2.19**. La evaporación potencial media anual de 1689.43 mm, media mensual de 151 mm y la máxima mensual de 205.03 mm en mayo; todo ello con base en los registros de las estaciones climatológicas de Juriquilla y El Pueblito correspondientes al período de (1979-91) y (1960-91).

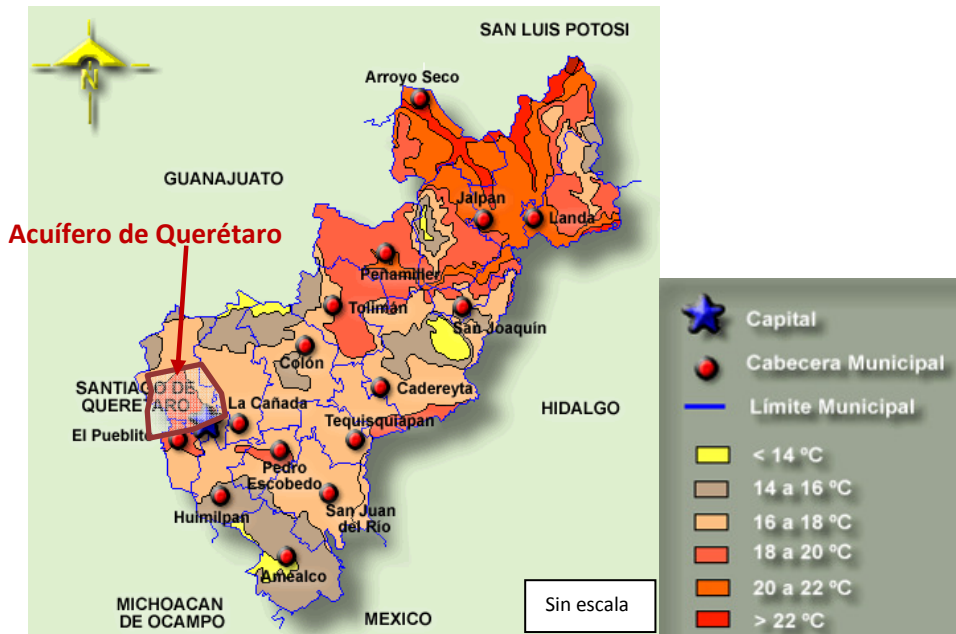


Figura 2.18. Temperatura media anual (INEGI, 2010)



Figura 2.19 Precipitación media anual

(INEGI, 2010)

b) Bs₁kw (w) Clima semiseco templado con verano cálido. Se manifiesta en las partes topográficamente más altas en el este y norte del AVQ. La temperatura media anual es de 17.2° C, la media mensual máxima se presenta en el mes de mayo con 20.4° C y la mínima en enero con 12.8° C. La precipitación media anual oscila entre 600 y 700 mm, presentándose el período de lluvias se presenta entre los meses de mayo a octubre y el periodo de estiaje de noviembre a abril registrándose el mínimo de precipitación en febrero con 4.1 mm, y el de mayor incidencia en julio con 133.1 mm. La evaporación potencial media anual de 2040.98 mm, media mensual de 123.9 mm y la máxima mensual

de 229.5 mm en abril; todo ello con base en los registros de la estación climatológica de La Palma correspondiente al período de (1949-93).

En la **Tabla 2.3** se muestra información actualizada de la estación que se localiza en la zona central del AVQ,

Tabla: 2.3. Historial de temperatura y precipitación de la estación climatológica 76625 (MMQT)
(<http://clima.meteored.com/clima-en-queretaro-766250.html>)

	1997	1999	2003	2006	2007	2008	2009
Temperatura media anual (° C):	19.4	19.0	19.4	18.9	19.0	18.3	18.9
Temperatura máxima media anual (° C):	26.0	24.5	26.2	26.3	26.5	26.4	27.5
Temperatura mínima media anual (° C):	11.6	11.5	11.7	10.1	10.1	9.5	10.2
Precipitación media anual (mm)	334.29				530.83	502.4	357.91

2.6.3. Censo de aprovechamientos

Con base en la información del REPDA y en el estudio de “Determinación de la disponibilidad del AVQ” (CONAGUA, 2009), existen 239 aprovechamientos activos, de los cuales 75 corresponden, al uso agrícola y abrevadero, 113 pozos se utilizan para uso público-urbano y recreativo y 51 para uso industrial, se puede ver su distribución en la **Figura 2.20**.

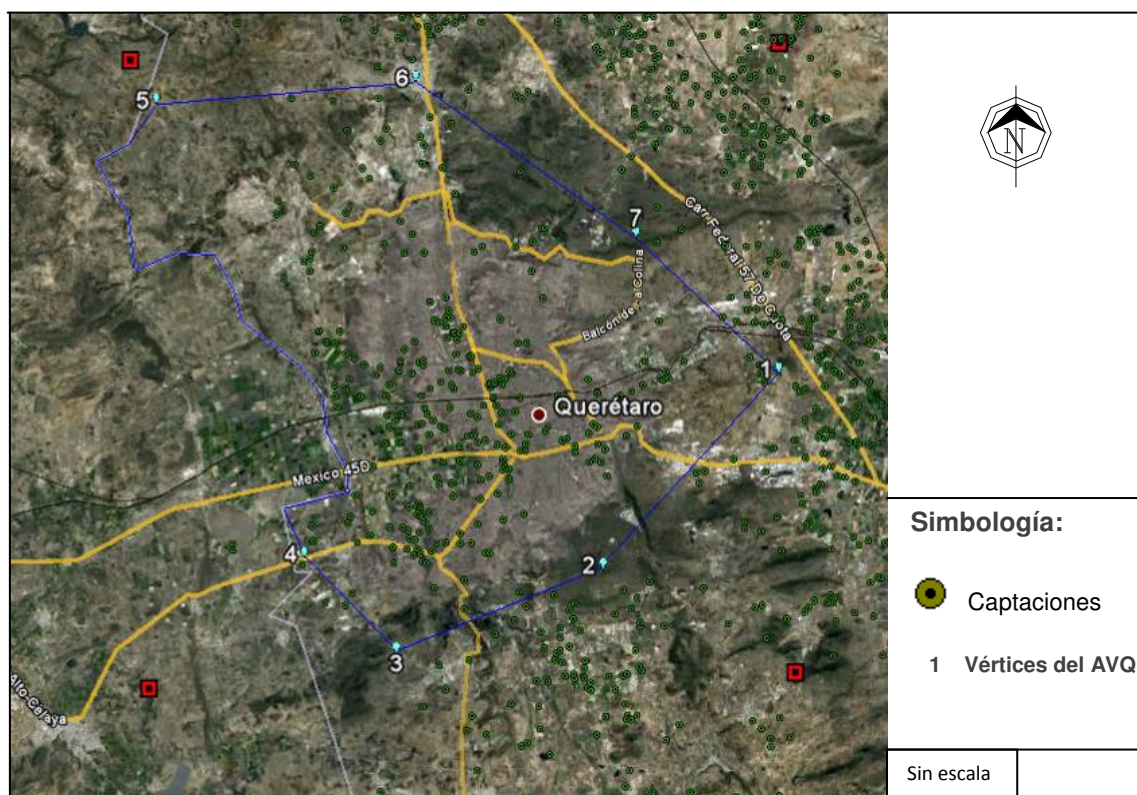


Figura 2.20 Localización de las captaciones de acuerdo al REPDA,
(<http://siga.conagua.gob.mx/REPDA/menu/frameKMZ.htm> y Google Earth, 2009)

2.6.4. Piezometría

Como parte de las actividades de monitoreo que desarrolla la CEA, se tiene que a partir de 1994 realiza dos mediciones al año de la posición de los niveles del agua subterránea. Para el año 2009, la posición del agua al nivel estático en la zona plana del AVQ se encuentra entre los 100 y 110 m, y particularmente en las zonas de El Romeral, San Pedro Mártir y, El Estadio en promedio a los 130 m, y la zona Industrial Benito Juárez hasta los 160 m, mientras que en la zona de la Cañada entre los 50 y 70 y en el Salitre y San Pedrito el Alto de 30 a 50 m.

La evolución del nivel estático es en promedio de 3.5 m por año

2.6.5. Hidrometría

Con base en la información histórica de extracción, se consideran para este trabajo los volúmenes de extracción de 1996, mismo que se tomaron en cuenta para realizar el balance de aguas subterráneas y para cuantificar la disponibilidad del acuífero. **Tabla 2.4**

Tabla 2.4 Volúmenes de extracción para 1996 (tomado de DOF, 28 de agosto de 2009)

Uso	Volumen (Mm ³)
Agrícola	28.0
Industrial	8.0
Potable	67.0
Total	103.0

Sin embargo, de acuerdo a los volúmenes de agua concesionado por el REPDA se reporta un volumen de extracción para abril de 2002 de 142.316 Mm³/año.

2.6.6. Propiedades hidrodinámicas

En el estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de la Red de Observación de los Acuíferos de Aguascalientes y Querétaro (CONAGUA, 1997), se realizó la reinterpretación de 18 pruebas de bombeo, obteniéndose valores de conductividad hidráulica horizontal. Los valores de la conductividad hidráulica se tomaron de Guysa 1997, en el cual las pruebas de bombeo fueron interpretadas por el método de Neuman y Theis para el caso en que las pruebas indicaban la existencia de acuíferos libres, y para el caso de acuíferos semiconfinados fueron analizadas por el método de Hantush. **Tabla 2.5**, y en la **figura 2.21** la distribución de valores.

Como se puede apreciar, los valores mayores se localizan en la parte plana del AVQ y hacia la zona de Tlacote; mientras que en la zona de Juriquilla los valores son muy bajos.

Tabla 2.5. Valores de conductividad hidráulica horizontal obtenida a partir de la interpretación de las pruebas de bombeo (Datos tomados de GUYSA, 1997)

Pozo	X	Y	Kh (m/día)	Litología
596	352378.50	2277234.45	13	Basalto
0615-A	344001.13	2281913.19	40	Basalto
752	358234.78	2278528.43	20	Basalto
982	344823.34	2278283.85	10	Basalto
987	356080.19	2278086.66	0.9	Basalto
2037	358299.99	2274492.67	6	Basalto
2079	349409.68	2279182.13	1.7	Basalto
2085	355743.71	2275929.90	3.2	Basalto
743	354814.09	2278025.92	0.097	Basalto
953	352644.95	2278899.61	0.08	Basalto
2082	347697.06	2279395.10	10	Basalto
1707	348851.88	2283152.82	0.1	Basalto
627	350614.75	2274379.35	40	Basalto
663	348778.00	2272284.00	20	SVL
1232-A	350394.82	2285410.02	0.3	SVL
1291	345413.42	2272418.40	0.55	SVL
1950	361592.00	2279127.00	1	SVL
1746-A	349621.29	2272343.73	0.205	SVL
743	354814.09	2278025.92	0.015	SVL
953	352644.95	2278899.61	0.98	SVL
2082	347697.06	2279395.10	10	SVL
1707	348851.88	2283152.82	0.8	SVL
627	350614.75	2274379.35	10	SVL

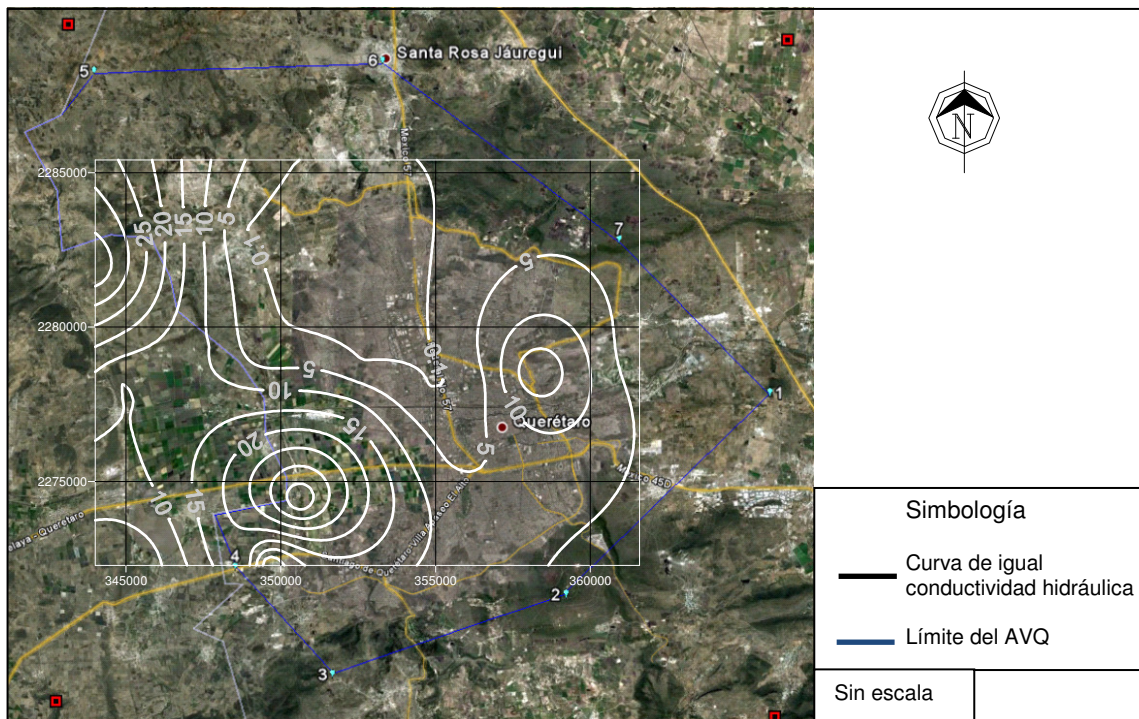


Figura 2.21 Distribución de los valores de conductividad hidráulica en el AVQ

2.6.7. Unidades hidroestratigráficas

El monitoreo de las cargas hidráulicas es el indicador más contundente en la delimitación de las zonas de recarga y descarga, y obviamente el punto apoyo para caracterizar a los sistemas de flujo. Toth (1963) definió los sistemas de flujo con base en las áreas de recarga y descarga y su relación con la topografía y marco geológico.

En el caso del AVQ, para el año 1997 se manifestaba un flujo local que ocurría en una franja que bordea un tramo corto del río Querétaro en la planicie y en medios porosos. El flujo intermedio se manifestaba levemente en la porción oriental del valle, tanto en medios fracturados y porosos. En el resto del valle, la explotación intensiva ha deformado el esquema de flujo y por ende las trayectorias del agua en el subsuelo.

GUYSA (1997), describe los medios geológicos por los que circula el agua subterránea caracterizándolos en medio poroso y medio fracturado de la siguiente manera:

- **Medio poroso**

Está compuesto por depósitos aluviales, tobas arenosas y los sedimentos vulcanosedimentarios, los cuales se encuentran rellenando el graben de Querétaro, desde las inmediaciones de Juríca hasta la porción sur, en la zona que comprende del Cimatarío a Corregidora. En la parte oriental se localiza en los estrechos denominados La Cañada, Cuesta China y Menchaca. Al poniente por la definición de la falla Tlacote.

El espesor de este medio se ha identificado, con base en exploraciones geofísicas (sondeos eléctricos verticales y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo), del orden de los 600 m.

Las características hidrogeológicas indican que los valores de conductividad hidráulica dependen de la granulometría; los depósitos aluviales y vulcanolacustres presentan los valores más altos de conductividad hidráulica, aunque dentro de estos se localizan horizontes arcillosos. Los valores de conductividad obtenidos a partir de la interpretación de pruebas de bombeo (GUYSA, 1997), están en un intervalo de 0.032 a 1 m/día, encontrándose que en la zona de El Tlacote los valores son superiores a los 10 m/día. Ver figura 2.21. En el trabajo mencionado se presenta una caracterización detallada del medio poroso.

La transmisividad promedio de este medio es de $0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (0.7 m²/día). El coeficiente de almacenamiento estimado es del orden del 0.07, sin embargo, por el comportamiento del abatimiento de los niveles es de esperarse que sea mayor (GUYSA, 1997).

Medio fracturado

Está compuesto por rocas de tipo andesita, andesita alterada, ignimbritas, riolitas, basaltos, brechas volcánicas y tobas líticas y vítreas.

En el subsuelo se encuentra intercalado e interdigitado con depósitos lacustres, con un espesor del orden de los 300 m. Se identifica en la parte norte del AVQ en la zona de El Salitre, Mompaní, Juriquilla y San José el Alto, corresponde a las zonas con topografía más alta. En la porción sur se identifica en la zona de los Oliveras.

Los valores de conductividad hidráulica horizontal oscilan entre los 0.08 a 40 m/día. Los menores se localizan entre Juríca y Zona industrial Benito Juárez. La transmisividad

promedio es de $0.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($2.9 \text{ m}^2/\text{día}$), mientras que el coeficiente de almacenamiento es del orden de 0.07 (GUYSA, 1997).

2.6.8. Acuífero del área

Con base en la información analizada se concluye que el AVQ es de tipo libre y en algunas localidades es semiconfinado. Está constituido por varios tipos de rocas que presentan variaciones litológicas tanto lateral como vertical.

El sistema de flujo tanto local como intermedio se presenta en el medio poroso y en el fracturado.

En el año 1997 se identificaban dos sistemas de flujo: local e intermedio, que representaban tanto al medio fracturado como poroso, lo que originaba la presencia de dos niveles piezométricos.

El nivel somero era de bajo rendimiento, de poco espesor y se localizaba en el centro de la zona urbana y a la largo del río Querétaro. Hoy en día este nivel es de esperarse que ya no exista; sin embargo, es de interés para definir las zonas donde se pretende favorecer la filtración al acuífero e incrementar la recarga. La base de este acuífero es un basalto semicompacto.

Debajo del basalto antes mencionado, se ubica el acuífero principal, caracterizado por un sistema de flujo intermedio libre. Está caracterizado por medio granular permeable (sedimentos vulcanosedimentarios), el cual funciona como recarga directa al acuífero y por depósitos granulares.

2.6.9. Disponibilidad de agua superficial

Por la situación geográfica y ubicación hidrológica **Figura 2.22**, el volumen de escurrimiento anual de la cuenca del río Querétaro es de 128.9 Hm³: **Tabla 2.6**

Tabla 2.6 Volumen de escurrimiento de la cuenca del río Querétaro

Cuenca	Superficie km ²	Escurrecimiento natural medio anual (hm ³)	Coefficiente de escurrimiento	Precipitación media anual (mm)
Río Querétaro	2,255	128.9	0.08	714.52

Diario Oficial de la Federación (24 de julio de 2006)

Por lo que respecta a los volúmenes por uso consuntivo en la superficie del acuífero en estudio se tiene la siguiente información **Tabla 2.7**

Tabla 2.7. Uso consuntivo en la cuenca del río Querétaro

Cuenca	Volúmenes en hm ³							
	Agrícola		Pecuario	Público urbano	Industrial	Subtotal	Pérdidas Vasos	Total
	Distritos de Riego	P.I.						
G Ameche	0.0	82.3	14.1			96.4	9.6	106.0

(Tomado de DOF, 24 de julio de 2006)

En la figura 2.22 se puede observar la la cuenca del río Lerma-Chapala, así mismo, a los estados que abarca y las principales presas de almacenamiento que pertenecen a esta cuenca.



Figura 2.22. Cuenca del río Lerma-Chapala (tomado de DOF, 24 de julio de 2006)

Con base en la normatividad, la disponibilidad media anual de agua superficial de una cuenca hidrológica, en su salida, se estima por:

$$\text{Disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca (D)} = \text{Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo (Ab)} - \text{Volumen anual actual comprometido aguas abajo (Rxy)}$$

Mientras que el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas debajo de su salida se estima por:

$$\begin{aligned} \text{Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo (Ab)} &= \text{Volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba (Ar)} + \text{Volumen medio anual de escurrimiento natural (Cp)} \\ &+ \text{Volumen anual de retornos (R)} + \text{Volumen anual de importaciones (Im)} \\ &- \text{Volumen anual de exportaciones (Ex)} - \text{Volumen anual de extracción de agua superficial (Uc)} \end{aligned}$$

Con base en esta ecuación la parte correspondiente a la cuenca del río Querétaro se tiene: **Tabla 2.8.**

Tabla 2.8. Elementos que integran la ecuación de balance de agua superficial

Cuenca	Cp	Ar	Uc*	Uc**	R	Im	Ex	Ab
--------	----	----	-----	------	---	----	----	----

G	Río Querétaro	128.9	0.0	53.8	106.0	0.0	0.0	0.0	22.9
---	---------------	-------	-----	------	-------	-----	-----	-----	------

Donde:

Cp.- E scorrimiento natural o “virgen” por cuenca propia

Ar.- E scorrimiento aguas arriba

Uc*.- Usos consecutivos, REPDA al 30 de abril de 2002

Uc**.- Usos consecutivos (demanda utilizada y pérdidas en vasos de almacenamiento)

R.- Retornos

Im.- Importaciones

Ex.- Exportaciones

Ab.- E scorrimientos aguas abajo

Por otro lado, el remanente (Ab) de los recursos propios de la **cuenca X** (Cp y R); además, de los recursos que le son aportados por otras cuencas (Ar e Im), una vez satisfechas las demandas (Uc, Ex), representan los es scorrimientos hacia agua abajo (Ab) de esta cuenca. Resulta evidente que este es scorrimiento se convierte en el término Ar de la **cuenca Y** y que dependiendo de su propia oferta, parte o toda esta aportación (Rxy) será necesaria para satisfacer sus propias demandas. De esta manera, la disponibilidad no comprometida (D) de **la cuenca X** estaría dada por:

$$D = Ab - Rxy$$

Es evidente que si Ab es menor que los compromisos aguas abajo (Rxy), matemáticamente D sería negativo, pero en términos reales se puede decir que no existe disponibilidad hacia aguas debajo de la cuenca en estudio. Así, en la zona del AVQ se tiene: **Tabla 2.9.**

Tabla 2.9 Cálculo de la disponibilidad de agua superficial en la cuenca del río Querétaro

	Cuenca	Ab	Rxy	Ab -Rxy	D
G	Río Querétaro	22.9	23.6	-0.7	0

Dónde: D = Ab- Rxy
 Ab = E scorrimiento aguas arriba
 Rxy = Volumen comprometido aguas abajo
 D = Disponibilidad

Con base en la publicación del Diario Oficial de la Federación de fecha 15 de octubre de 2003 en el que se publica el “ACUERDO por el que se dan a conocer las denominaciones y la ubicación geográfica de las diecinueve cuencas localizadas en la zona hidrológica denominada río Lerma-Chapala, así como la disponibilidad media anual de las aguas superficiales”, el río Querétaro no cuenta con un volumen disponible a su salida; presenta un déficit.

2.6.10. Disponibilidad de agua subterránea

En el Diario Oficial de la Federación del 24 de julio de 2006, la CONAGUA publica la disponibilidad de agua subterránea de los acuíferos de la cuenca del Lerma, en la que se encuentra el AVQ, se menciona que los acuíferos no son independientes y se encuentran interconectados por secciones permeables, compuestos por material aluvial en los primeras decenas de metros, los cuales reciben una alimentación o recarga natural generada por la infiltración de la lluvia y de los escurrimientos superficiales que tiene lugar en los macizos montañosos donde afloran rocas fracturadas y a lo largo de los cauces de las corrientes principales.

A esta componente natural se agrega la recarga generada por las actividades humanas, que en su conjunto han modificado el ciclo hidrológico de la zona en forma significativa. Las modificaciones mayores fueron producidas por el desarrollo agrícola: el riego con agua derivada de los ríos generó una recarga incidental derivada de las pérdidas por conducción o distribución y de la infiltración de excedentes de riego. Por otra parte, el bombeo de pozos en las inmediaciones de los cauces, provocó el abatimiento de los niveles freáticos y con ello propició una recarga inducida desde los cauces, que originalmente recibían parte de la descarga natural de los acuíferos: a menor escala, la urbanización ha impermeabilizado la superficie del terreno, con la consiguiente disminución de la recarga natural local; a cambio, las pérdidas en las redes hidráulicas han generado una recarga incidental de magnitud creciente.

Debido a la extracción de agua subterránea, los niveles freáticos se ha ido abatiendo y la descarga natural decrece en forma gradual hasta ser casi suprimida; ahora la descarga dominante, con mucho, es la artificial. Con base a los estudios disponibles, realizados el curso de los últimos 25 años, se estima que la recarga media anual de los acuíferos de la zona es del orden de 3,986 Hm³.

El balance que se presenta para 2006 es, **Tabla 2.10**

Tabla 2.10 Cálculo de la disponibilidad de agua subterránea en la cuenca del río Querétaro

Clave sigmas	Acuífero	Recarga media anual	Volumen de extracción de acuerdo a estudios técnicos	Descarga natural comprometida	Volumen concesionado e inscrito en el REPDA (30 de abril de 2002)	Disponibilidad media anual
		Millones de metros cúbicos anuales (Mm ³ /año)				
2201	Valle de Querétaro	70	107	4	142	-76

(Tomado de DOF 24 de julio de 2006)

Por otra parte en el año 2009 la CONAGUA publica la actualización de la disponibilidad de agua para el AVQ, **Tabla 2.11**.

Tabla 2.11. Disponibilidad del AVQ para el año 2009

Clave sigmas	Acuífero	R	DNCO M	VCAS	VEXTE T	DAS	DÉFICIT
		Cifras en millones de metros cúbicos anuales (Mm ³ /año)					
Estado de Querétaro							
2201	Valle de Querétaro	70	4.0	140.760629	109.7	0	-74.76063

(Tomado de DOF de 28 de agosto de 2009)

Como puede observarse el déficit ha disminuido en 1.2 Mm³; sin embargo, el descenso continua, la extracción debe ser mayor porque el crecimiento de la población va en aumento.

2.6.11. Situación administrativa del acuífero

Actualmente se tienen vedas para el aprovechamiento de agua del subsuelo desde el año de 1949 mediante Decreto oficial publicado en el Diario Oficial de la Federación: de fecha 13 de noviembre de 1957, 17 de marzo de 1964, 24 de septiembre de 1964 y 30 de diciembre de 1957 que señalan que por causa de interés público y para protección de los mantos acuíferos se establece veda por tiempo indefinido, dentro de los municipios de Querétaro, Corregidora y El Marqués.

Respecto a los decretos de reserva o reglamento no existe antecedente de alguna publicación en el Diario Oficial de la Federación, existiendo únicamente a nivel de propuesta y mediante el Comité Técnico de Agua Subterránea (COTAS) del AVQ. Con relación a las zonas de disponibilidad de acuerdo a la Ley Federal de Derechos, los municipios que abarca el acuífero, son: Querétaro, Corregidora y El Marqués, que se ubican en las zonas de disponibilidad 2, y 3 respectivamente.

2.7. Marco geotécnico

El comportamiento geológico estructural, la explotación intensiva del acuífero y la construcción de nuevos asentamientos (industrias y fraccionamientos), ha generado agrietamientos en el terreno y subsidencia del suelo a lo largo de una traza casi paralela a la avenida 5 de Febrero, la cual ha ocasionado grietas, subsidencia, deformación de vías de comunicación y daños a construcciones. **Figura 2.23.**

Aguirre-Díaz, et al, (2005), en lo referente a la falla de la avenida 5 de Febrero, indica que la deformación del terreno en este sector de la ciudad sigue una traza NNW-SSE, y coincide con la ubicación de la falla Santa Rosa Jáuregui-Olveras (Ver figura 2.11). Sin embargo, aunque es evidente la continua subsidencia y deformación del terreno a lo largo de esta traza, no se ha registrado sismicidad para poder afirmar movimiento a lo largo de la falla mencionada, aunque tampoco se ha verificado por microsismicidad. Son varios los factores que posiblemente intervienen para la formación de las grietas y el hundimiento del terreno. Destacan:



Figura 2.23. Evolución del agrietamiento y fallamiento en el AVQ

(fotos de GUYSA y Jesús Pacheco Martínez)

- 1) La presencia de una falla normal, en este caso, orientada SSE
- 2) Sedimentos acumulados sobre la falla
- 3) La compactación diferencial de estos sedimentos a uno y otro lado de la falla debida a la explotación intensiva de agua subterránea.

Esta última causa supone una mayor acumulación de sedimentos sobre el bloque caído de la falla con respecto a los sedimentos acumulados en el bloque levantado, situación que ocasionará una mayor compactación.

Como conclusión del trabajo mencionado, Aguirre y Daz et al (2005) indican que. *“Aún falta realizar estudios geológicos y geofísicos en la Ciudad de Querétaro que permitan cuantificar el riesgo para la población y para la infraestructura urbana debido a las fallas de este lugar, y la influencia de éstas en el acuífero que abastece esta ciudad. Algunos de estos estudios han comenzado o están por comenzar. Sin embargo, es importante señalar que la cartografía geológica de las fallas y el levantamiento estratigráfico de la zona, documentado con fechamientos isotópicos, es el estudio base para los demás”.*

También indican que *“No se descarta la posibilidad de que alguna de las fallas del graben de Querétaro y su periferia puedan reactivarse en cualquier momento, como fue el caso de la falla Sanfandila, lo que implica un riesgo para la población e infraestructura urbana de la Ciudad de Querétaro y comunidades cercanas”.*

En el trabajo de tesis doctoral de Jesús Pacheco Martínez (2007), se genera un modelo de subsidencia del valle de Querétaro y se hace una predicción sobre el agrietamiento superficial.

El modelo matemático que propone sobre el hundimiento, plantea los mecanismos de generación de grietas y fallamientos asociados a la explotación intensiva del AVQ, aplica métodos geofísicos como gravimetría, magnetometría y refracción sísmica, y caracteriza las fallas del artículo de Aguirre Díaz et al. (2005). En la **Figura 2.24** se muestran las las

zonas susceptibles a experimentar subsidencia y agrietamiento por extracción de agua del subsuelo a nivel estatal.

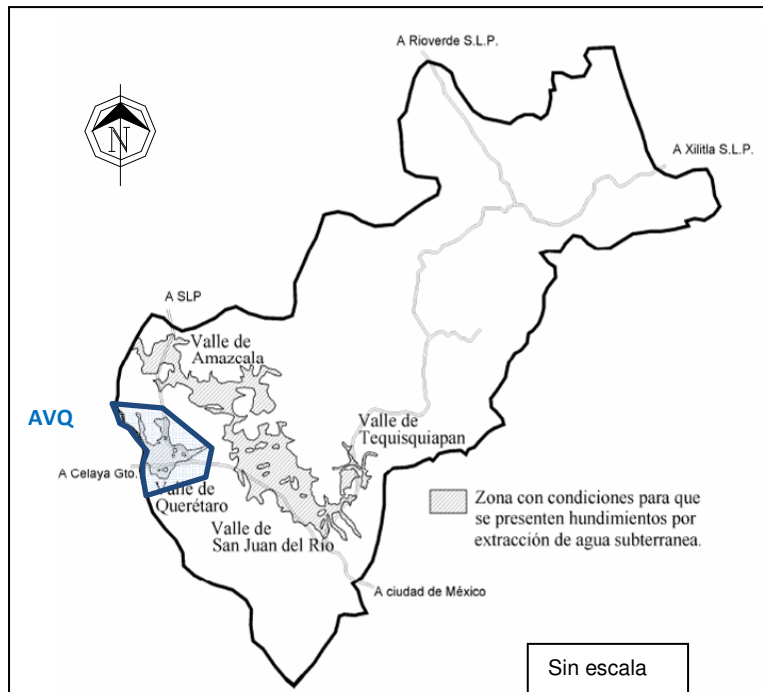


Figura 2.24, Localización de zonas susceptibles de sufrir subsidencia y agrietamiento
(Tomada de tesis doctoral de Pacheco Martínez, 2008)

En cuanto al AVQ en la tesis de Pacheco Martínez identifica las zonas con fallas y agrietamientos, **Figura 2.25**

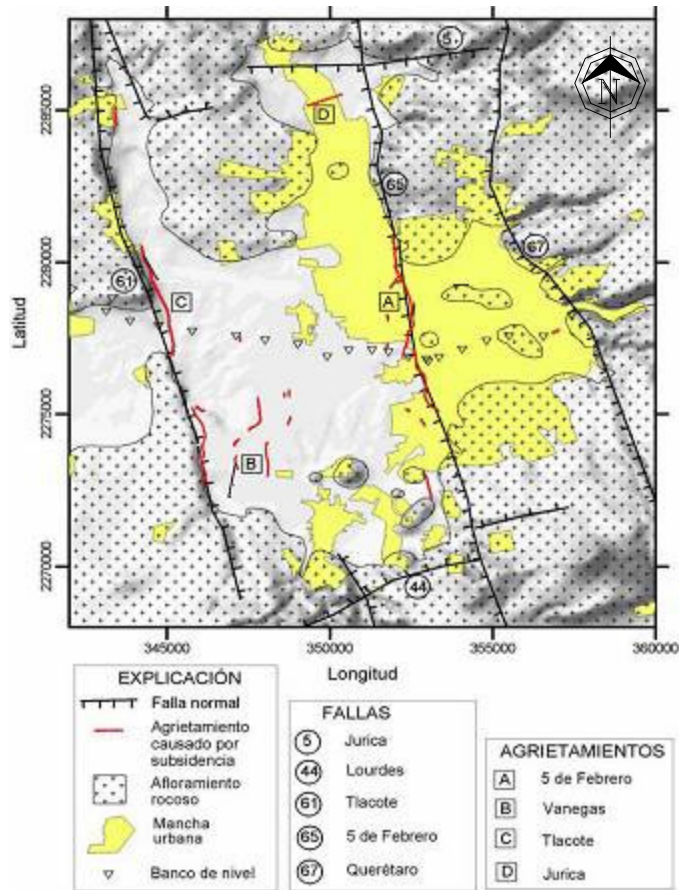


Figura 2.25. Fallas y agrietamientos identificados en el AVQ (Tomado de Pacheco Martínez, 2008)

En la Figura 2.26 se presenta en forma esquemática una sección W-E del comportamiento del subsuelo en el AVQ

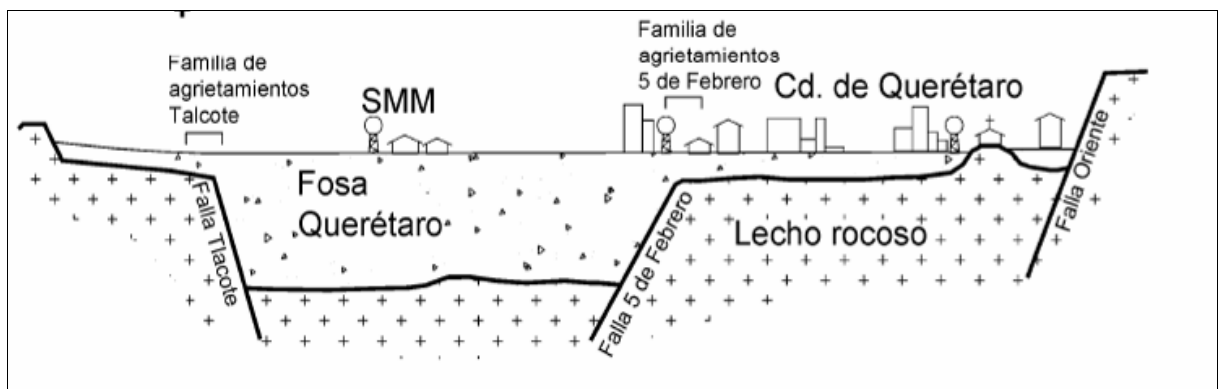


Figura 2.26 Sección esquemática W-E del AVQ identificando las zonas con mayor agrietamiento (Tomado de Pacheco Martínez, 2008)

Los resultados del trabajo de tesis indican que el AVQ, específicamente en la parte central –ciudad–, presenta un hundimiento del terreno originado principalmente por la extracción del agua, Figura 2.27.

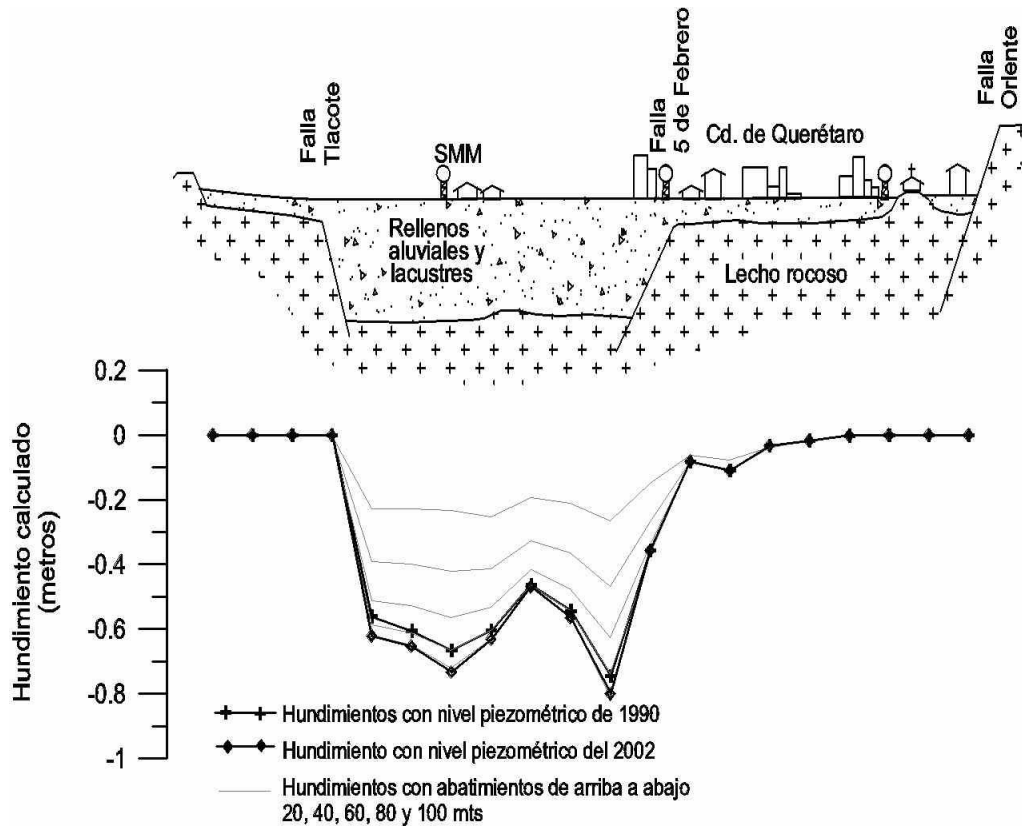


Figura 2.27 Hundimiento del terreno asociado a la extracción

(Tomado de Pacheco Martínez, 2008)

Lo expuesto en este inciso indica que toda la infraestructura urbana está en riesgo de sufrir algún colapso, algunos visibles como movimientos diferenciales del terreno, daños a estructuras civiles y otros no visibles como la rotura de tuberías de agua, gasolina o gas, los cuales son eventos que se pueden presentar en cualquier momento si no se tiene monitoreado su comportamiento.

Con base en información de CENAPRED los riesgos que se presentan en el AVQ están relacionados a los fenómenos geológicos como los deslizamientos de tierra por las tendidas pendientes que dan forma a los taludes de su valle y limitan sus flancos". Las zonas que pueden presentar esta situación son en colonias: San Pablo, Arboledas, Villa del Marqués, Villa Cayetano Rubio, Loma Dorada, Vista Hermosa, Álamos y Huertas La Joya.

Otro problema es el hundimiento de la tierra, provocado por la explotación intensiva de mantos freáticos y el cambio de humedad en los suelos.

En cuestión de degradación de suelos, hay 151 km² de superficie del municipio de Querétaro que presenta altos grados de degradación; esto representa el 22 % del total de la superficie. Con degradación moderada se presentan 538 km², que significan el 78% de la superficie municipal. En ambos casos, los factores que provocan este fenómeno son hídricos y físicos.

2.8. Calidad del agua

El estado de Querétaro genera anualmente 94.1 Mm³/año de aguas residuales. De ellos, 67.9 Mm³/año son tipo doméstico, 20.7 Mm³/año son de tipo industrial, 5.1 Mm³/año provienen del sector servicios y el restante 0.4 Mm³/año del sector pecuario. La contaminación de agua proveniente de la ciudad de Santiago de Querétaro está compuesta principalmente de materia orgánica, detergentes y basura inorgánica, mientras que las descargas industriales tienen materiales minerales y orgánicos, sustancias corrosivas, explosivas, tóxicas, inflamables y biológico infecciosas.

En total, el estado cuenta con 282 plantas de tratamiento, de las cuales 52 son municipales, 140 industriales, 43 de servicios y 47 pecuarios. Desafortunadamente, esta infraestructura es insuficiente, pues únicamente el 39% del total de aguas residuales generadas recibe tratamiento. Del volumen total tratado, equivalente a 36.6 Mm³/año, 17.5 Mm³/año son de tipo doméstico y 17.8 Mm³/año de industrial. El porcentaje de tratamiento de aguas residuales en los municipios que cubre el territorio del AVQ es de por municipio varía de la siguiente forma, **Tabla 2.12**

Tabla 2.12. Volumen de aguas residuales tratadas en los municipios que cubre el AVQ

Municipio	Volumen total de aguas residuales generadas Mm ³ /año	Volumen total tratado Mm ³ /año
Querétaro	38.4	15.4
Corregidora	3.2	0.31
El Marqués	1.7	0.14

(Tomado de la Sombra de Arteaga, 2009)

Por lo que respecta al sistema de tratamiento de agua residual de la CEA se tiene **Tabla 2.13**.

Tabla 2.13. Infraestructura para el tratamiento de aguas residuales público urbanas

Municipio	Número de plantas de tratamiento	Capacidad instalada (lps)	Caudal medio anual tratado (lps)	Cuerpo receptor
Querétaro	3	162	104.1	Río Querétaro, riego agrícola, áreas verdes, industria, sanitarios, Presa Dolores
Corregidora	2	360	243	Río Querétaro, riego agrícola, sanitarios, áreas verdes

De acuerdo a información publicada en el Diario Oficial de la Federación del 24 de julio de 2006 sobre la calidad el agua en el AVQ, se observa que está contaminada en un intervalo altamente contaminado, esta categoría se basa en el monitoreo sistemático de la calidad del agua en los principales cuerpos superficiales y subterráneos a través de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Agua.

En cuanto al agua subterránea la CONAGUA manifiesta que en general la calidad natural del agua de los acuíferos es apta para todos los usos, pero en las últimas décadas las diversas actividades humanas han deteriorado en alguna medida la calidad del agua subterránea. Probablemente, el deterioro mayor se haya generado en las zonas agrícolas por la aplicación de plaguicidas y fertilizantes. Sin embargo, los estudios realizados revelan que hay una atenuación importante de la mayoría de los contaminantes, gracias a la existencia de potentes zonas saturadas entre la superficie del terreno y los niveles freáticos. El problema mayor consiste en un incremento gradual de la salinidad de los terrenos.

Las zonas urbano-industriales también tienen un impacto negativo sobre la calidad del agua subterránea. La ciudad de Querétaro presenta algunos problemas de contaminación biológica, provocados por el fracturamiento del terreno y el deterioro o las deficiencias constructivas de las captaciones que le suministran.

En el medio rural es común la contaminación biológica de acuíferos “colgados” someros, la cual se asocia con la falta de saneamiento básico y zonas de recarga o captaciones rústicas sin protección sanitaria, cuando éstas se ubican en las inmediaciones de instalaciones sanitarias mal construidas o sin una operación.

2.9. Medio ambiente

2.9.1. Suelo

En el AVQ se presenta tres tipos de suelo. Los Vertisoles, suelos muy fértiles, se encuentran distribuidos alrededor de la zona urbana de Querétaro y los Feozem que se ubican en una pequeña porción al oriente de la ciudad; ambos tipos asociados a los Litosoles, y la parte impermeable producto del crecimiento poblacional e industrial, caracterizado por asfalto y concreto.

2.9.2. Vegetación

La vegetación existente y su distribución en el AVQ obedecen a las diferencias de altitud, clima y tipo de suelo. El tipo de vegetación xerófitica es la más importante, sabiendo que su mayoría son nopales, garambullo y huizache. En función de la fuente de agua que consumen se han dividido en tres grupos.

a) xerófitas: plantas que toman el agua que necesitan de la infiltración. Se forma por el matorrales Este tipo de vegetación se encuentra distribuida en forma de manchones que se localizan principalmente al sureste del AVQ, en la zona de Nuevo Torreón.

b) Freatofitas: comunidades vegetales que toman el agua a partir del nivel freático. Se localizan en la parte baja del valle

c) Cultivos que necesitan de la irrigación principalmente del agua subterránea. Cabe mencionar que esta parte ha sido reducida por el crecimiento poblacional, localizándose en la parte centro occidental del AVQ. Los cultivos son de riego y de temporal.

En la figura 2.28 se identifica la distribución de la vegetación.

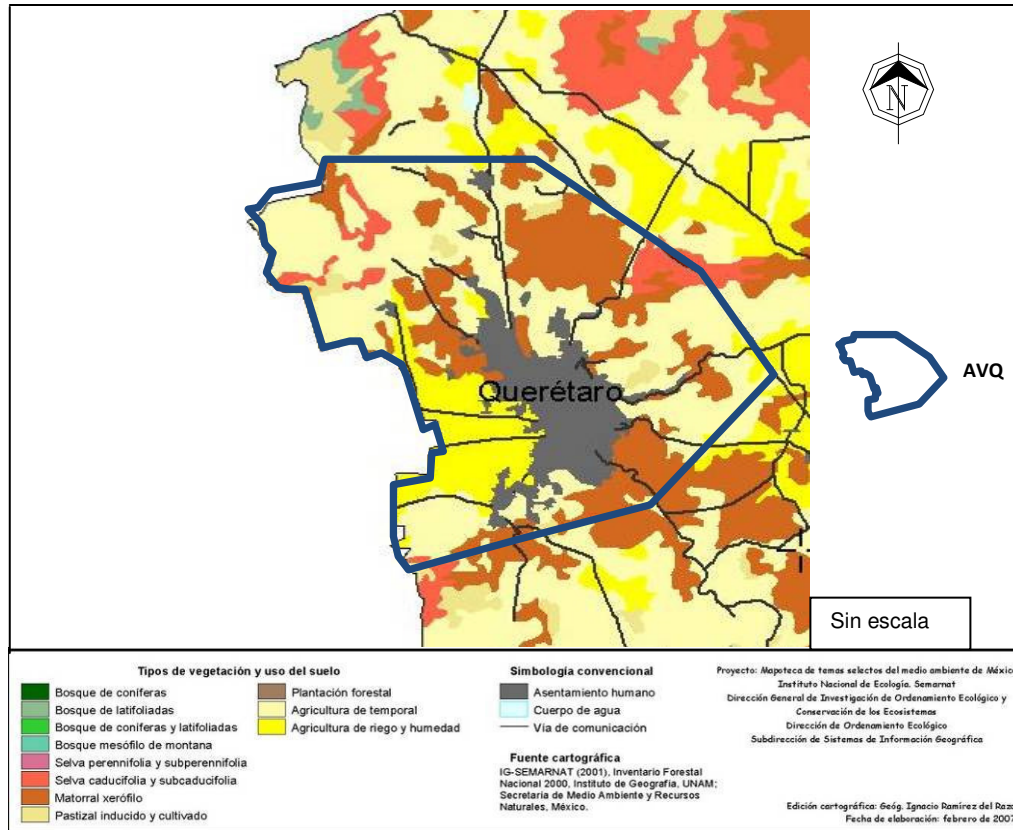


Figura 2.28 Tipo de suelo en el AVQ

(Tomado de INE, 2000, vegetación y uso del suelo 2000, estado de Querétaro)

2.9.3. Uso del suelo

Una parte importante para el desarrollo de este trabajo es la identificación del uso de suelo y sobre todo conocer el avance de la mancha urbana en el AVQ, ya que ésta dará la pauta para el cálculo de los escurrimientos, identificación de zonas de inundación y ubicación de sitios favorables para aprovechar el agua superficial producto del escurrimiento.

El análisis del relieve en función de la morfología, **Figura 2.29**. El AVQ se caracteriza por un relieve eminentemente volcánico; sin embargo, en la parte del valle correspondiente a la zona urbana y agrícola está representado por llanuras lacustres y eólicas. También se identifican sistemas fluviales, los cuales son de consideración para la ubicación de zonas para favorecer la recarga al acuífero.

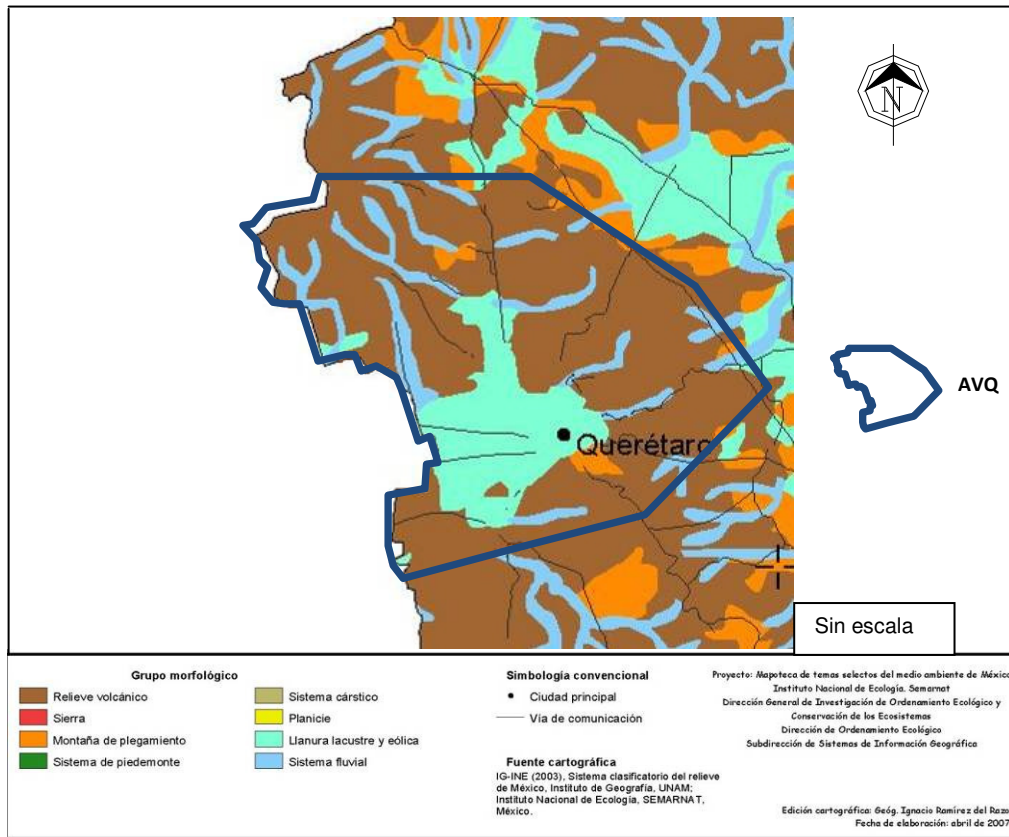


Figura 2.29 Clasificación del relieve en función del grupo morfológico. (Tomado de INE, 2000, vegetación y uso del suelo 2000, estado de Querétaro)

El análisis del relieve indica un porcentaje alto de superficie representada por colinas con disección mediana de 20 a 30 m/km², prácticamente rodeando el AVQ. En la zona urbana se presentan colinas con disección ligera de 15 a 20 m/km² y en la parte agrícola llanuras planas de 0 a 2.5. Hacia la zona norponiente se identifican montañas con disección ligera de 100 a 250 m/km² y cerros con disección fuerte 80 a 100 m/km² y ligera 40 a 60 m/km², específicamente al poniente de Santa Rosa de Jáuregui. **Figura 2.30**

En la parte sur del AVQ se presentan cerros con disección fuerte de 80 a 100 m/km² y en la zona del Cimatarío se identifica como colinas con disección fuerte de 30 a 40 m/km², así como en el cerro El Penal.

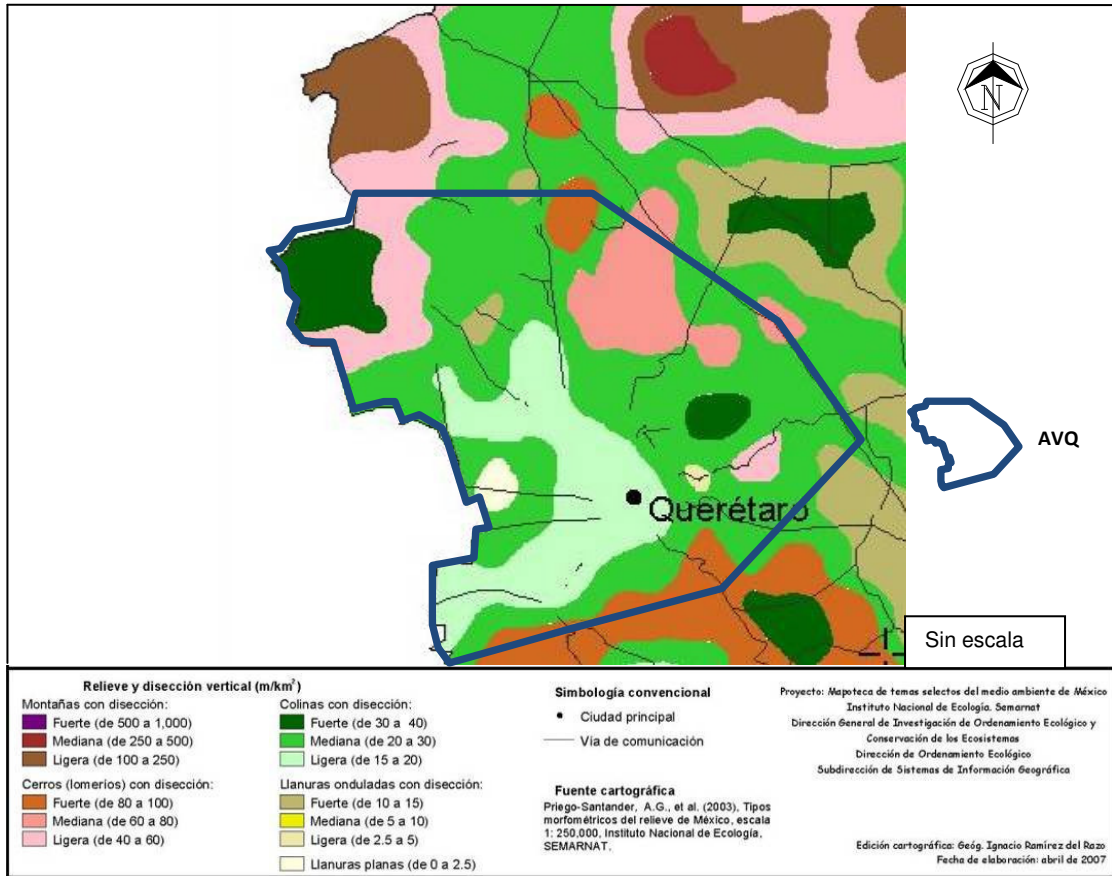


Figura 2.30 Tipo de relieve presente en el AVQ.

(Tomado de INE, 2000, Vegetación y uso del suelo 2000, estado de Querétaro)

En cuanto al crecimiento de la ciudad se observa que éste ha sido muy explosivo, en la **Figura 2.31** se observa una secuencia del crecimiento del límite de la mancha urbana de la ciudad para diferentes años.

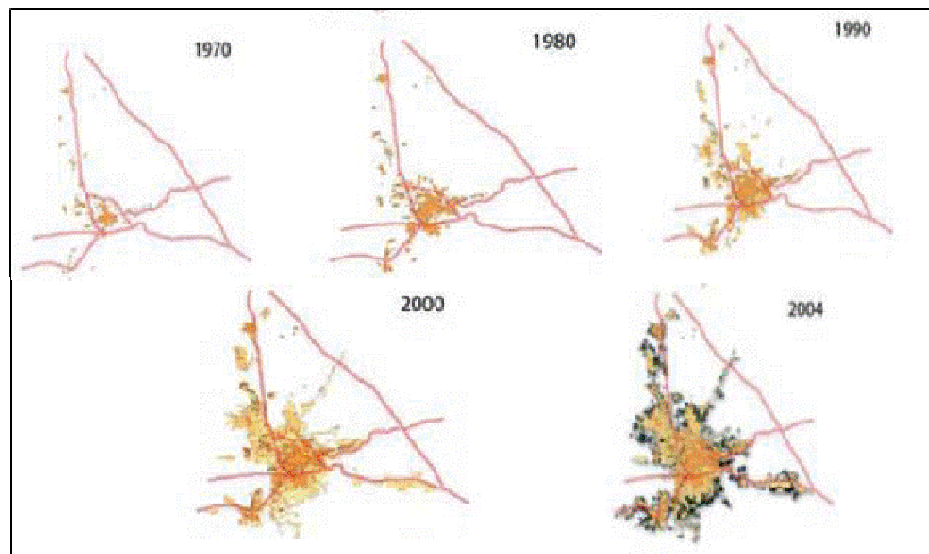


Figura 2.31. Evolución del crecimiento de la mancha urbana de la ciudad de Querétaro de 1970 a 2004 (tomado de http://www.conorevi.org.mx/pdf/queretaro/04_Panel1_4.pdf, 2010)

Con base en la imagen de satélite de *Google Earth, 2009* se realizó el cálculo de la distribución de los usos del suelo actuales, **Figura 2.32**, caracterizándose en tres zonas: urbana, agrícola y la correspondiente a las zonas altas, **Tabla 2.14**

Tabla 2.14 Uso del suelo en el AVQ para 2010.

Área	Superficie (km ²)
Zona agrícola	130.9
Zona urbana	166.9
Zonas altas	186.2
Total	484.0

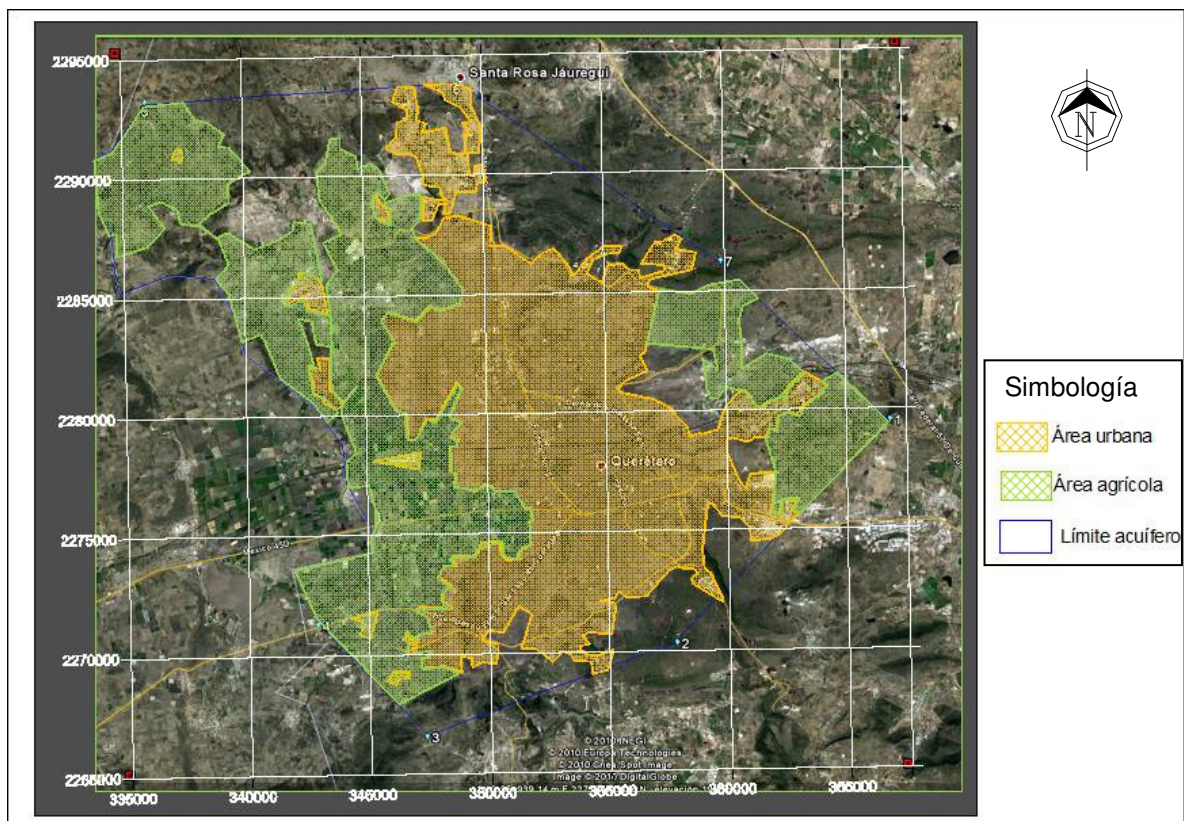


Figura 2.32 Uso del suelo en el AVQ en 2010

2.9.4. Áreas naturales protegidas

En el AVQ se identifican ocho áreas con miras a proteger el patrimonio natural y cultural del estado, y atenuar el impacto que originan las diferentes actividades económicas. Una de las prioridades de la Administración anterior a 2010 fue el decreto de áreas naturales protegidas como instrumento de política ecológica, con fines de conservación en busca de un desarrollo sustentable. Con fecha 17 de abril de 2009, el Gobierno del estado de Querétaro publicó en el Periódico Oficial del Gobierno del estado de Querétaro el Decreto del Programa de Ordenamiento Ecológico Regional del estado de Querétaro. Lo que corresponde al AVQ es:

- **Parque Nacional “El Cimatario”**, decreto del 21 de julio de 1982, con una superficie de 2,447 has. Ubicada en parte de los municipios de Querétaro y Huimilpan. La mayor proporción de la tierra de esta reserva es propiedad privada con un 86.33%, el 13.67% es ejidal. Cuenta con una belleza natural y escénica, coadyuva a la conservación del medio ambiente mejorando el hábitat de los asentamientos humanos del lugar. Actúa como refugio de la fauna silvestre.
- **Parque Nacional “cerro de Las Campanas”**, decreto del 7 de julio de 1937, con una superficie actual de 3.8 has. en el municipio de Querétaro. Se decreta como Parque Nacional por su valor histórico, así como por constituir un importante atractivo turístico. El área fomenta el esparcimiento, proyección cultural e impulsa el equilibrio entre la naturaleza y la zona urbana de la ciudad de Santiago de Querétaro.
- **Reserva Estatal “Mario Molina-Pasquel, El Pinalito”**, decreto del 7 de Febrero de 2003, con una superficie de 1,592.5 has. ubicada al norte del municipio de El Marqués. El área se enclava en la provincia fisiográfica de la Mesa Central, al norte del municipio de El Marqués, donde destaca el cerro El Pinalito, con 2,980 msnm; su diversidad varía de ecosistemas boscosos en la parte alta, pasando por matorrales hasta los pastizales en la zona baja. La Comisión Nacional de la biodiversidad define al área como una zona identificada como centro de anidación del Halcón Peregrino.
- **Zona Sujeta a Conservación Ecológica “El Tángano”**, decreto del 22 de marzo de 2005, con una superficie de 855.27 has. ubicada en los límites de los municipios de Querétaro, Huimilpan y El Marques. Área donde se desarrolla vegetación de bosque tropical caducifolio y matorral xerófilo Crasicaule en buen estado de conservación, por su alto valor paisajístico está sujeta a fuertes presiones por los cambios de uso para el desarrollo urbano. La vegetación evita la erosión del suelo y el azolvamiento de los bordos reguladores que se ubican aguas abajo. Recientemente se encontraron en el área vestigios arqueológicos consistentes en fragmentos de cerámica que corresponden al Periodo Epiclásico (600 – 900 años D. C.), cuyo estudio puede proveer de información histórica sobre el área y sus pobladores. Se localiza entre los municipios de Querétaro, Huimilpan y El Marqués
- **Zona Sujeta a Conservación Ecológica “Zona Occidental de Microcuencas”**, decreto del 22 de septiembre de 2005, ubicada en el municipio de Querétaro y con una superficie de 12, 234 has. Su superficie se distribuye en el volcán extinto de La Joya y una serie de cañadas. La vegetación es diversa, con matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio y pastizales; la fauna registrada consta de 120 especies. Además, posee 16 zonas con restos arqueológicos. La tenencia de la tierra es en su mayoría ejidal, se delimita por la subcuenca del río Querétaro y constituye las tierras altas de 7 microcuencas, 10 arroyos y 4 presas importantes.
- **Parque Intraurbano Bordo Benito Juárez.** Es un sitio de refugio y descanso para aves acuáticas residentes y migratorias de la parte central de México, alberga cerca del 25% de las especies migratorias en el país, es posible observar más de 1,200 aves en una sola temporada. En el bordo se tienen aproximadamente 46 especies de aves acuáticas y terrestres. Además, de dotar a la ciudadanía de áreas para la recreación y el esparcimiento, proteger a la ciudad en su función como bordo regulador para el control de avenidas pluviales, así como promover el fortalecimiento de la educación ambiental.

- **Zona de Preservación Ecológica de Centro de Población (subcategoría de Parque Intraurbano) “Juríca Poniente”**, decreto del 25 de septiembre de 2006, con una superficie de 224.11 has, y localizada en la porción centro-poniente del municipio de Querétaro, en la microcuenca El Nabo. Su escurrimiento principal es el arroyo Juríca y es una zona de vital importancia para la recarga del acuífero y para prevenir el azolvamiento de los bordos reguladores para el control de avenidas pluviales que se localizan aguas abajo. Aunque predominantemente es una zona de agricultura de temporal, se tiene vegetación riparia y una porción de matorral Crasicaule.
- **Zona conurbada de Querétaro.** Son polígonos seleccionados por su valor ecológico que se localizan en los municipios conurbados a la ciudad de Santiago de Querétaro, como son: municipio de Querétaro, El Marqués, Corregidora y Huimilpan, la vegetación principal está conformada por matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio y bosque de encino. Estos polígonos tiene como finalidad preservar el equilibrio entre las zonas urbanas y los elementos de la naturaleza, para dotar a la población con áreas para su esparcimiento, recreación y fortalecimiento de su educación ambiental sobre el valor e importancia de los recursos naturales a la par de mantener los beneficios ambientales que estos proporcionan y su aprovechamiento sustentable, además de regular y ordenar el crecimiento de la mancha urbana de la ciudad.

A pesar de estos decretos la mancha urbana sigue en acelerado crecimiento, lo que pone en riesgo estas áreas protegidas.

Asimismo, el Gobierno del estado de Querétaro dentro de su programa de Ordenamiento Ecológico presenta una serie de lineamientos o metas ambientales a lograr, entre las que destacan para el AVQ: **Tabla 2.15**

Tabla 2.15. Lineamientos planteados para el ordenamiento ecológico del AVQ (Tomado de la Sombra de Arteaga, 2009)

No. Lineamiento	Lineamiento	tiempo límite para cumplir el lineamiento	Ro. Acción	Acción	Responsable	Institución del sector de la sociedad que debe ser involucrar	Criterio de regulación ecológica
L01	Disminuir en al menos 50%, el abatimiento anual del acuífero.	Cinco años.	A001	Se aplicará en programa para la captación de agua de lluvia, en un lapso no mayor de cuatro años. Con especial atención a nuevos fraccionamientos.	SEDESU, CONAGUA, CEA, SEDEA, JAPAM, Autoridad Municipal, COTAS, IMTA, SDUOP.	Propietarios, usuarios.	Reglamento General de Construcciones del estado de Querétaro (Feb, 2007), Reglamento de Construcción del Reglamento de Construcción del municipio de Querétaro (11 Mayo 2004).
L01	Disminuir en al menos un 50%, abatimiento anual del acuífero.	Cinco años.	A002	Se regularizará el uso y destino del recurso agua entre concesionarios, en un plazo máximo de tres años.	SEDESU, CONAGUA, CEA, JAPAM, Autoridad Municipal, COTAS, IMTA, SDUOP y Autoridades Competentes.	Propietarios, usuarios.	Ley de Aguas Nacionales (01 Diciembre 1992).
L01	Disminuir en al menos un 50%, abatimiento anual del acuífero.	Cinco años.	A003	Se aplicarán programas para la tecnificación del riego agrícola, incrementando la eficiencia física en al menos un 80% en un plazo máximo de 5 años.	SEDESU, CONAGUA, CEA, JAPAM, Autoridad Municipal, COTAS, IMTA, SDUOP, SAGARPA.	Propietarios, usuarios.	Ley de Aguas Nacionales (01 Diciembre 1992), Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (11 octubre 2001), Ley de Desarrollo Rural Sustentable (07 Diciembre 2001).
L02	Emplear aguas residuales tratadas en riego agrícola.	Cinco años.	A004	Se sustituirá en un 70% en uso de agua residual crudas en la agricultura de acuerdo al tipo de cultivo, remplazándolas por aguas residuales tratadas, en un plazo máximo de 4 años. Con especial atención al corredor de Querétaro a San Juan del Río y de Querétaro a Ezequiel Montes.	SEDESU, CONAGUA, CEA, JAPAM, Autoridad Municipal, COTAS, IMTA, ICA.	Propietarios, usuarios.	Ley de Aguas Nacionales (01 Diciembre 1992).
L03	Controlar el flujo de aguas residuales descargadas en aguas, bienes nacionales y en los sistemas de alcantarillado para que no rebasen los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a las NOMs.	Cinco años.	A005	Se aumentará al 90% la cobertura de alcantarillado en zonas urbanas y en 75% en zonas suburbanas y rurales, en un lapso no mayor de 5 años. Con especial atención aquellas localidades con una población mayor a 2500 habitantes.	SEDESU, CEA, CONAGUA, JAPAM, Autoridad Municipal.	Propietarios, usuarios.	NOM-002-SEMARNAT-1996 (03 JUNIO 1998), NOM-001-SEMARNAT-1996 (24 DICIEMBRE 1996).
L03	Controlar el flujo de aguas residuales descargadas en aguas, bienes nacionales y en los sistemas de alcantarillado para que no rebasen los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a las NOMs.	Cinco años.	A006	Se constituirán, rehabilitarán y operarán plantas de tratamiento de agua para tratar al menos un 70% de las aguas residuales, en un lapso no mayor a cuatro años.	SEDESU, CEA, CONAGUA, JAPAM, Autoridad Municipal.	Propietarios, usuarios.	NOM-002-SEMARNAT-1996 (03 JUNIO 1998), NOM-001-SEMARNAT-1996 (24 DICIEMBRE 1996).

Propuesta de identificación de sitios para la infiltración de agua al acuífero de Querétaro

No. Lineamiento	Lineamiento	Tiempo límite para cumplir el lineamiento	Ro. Acción	Acción	Responsable	Institución del sector de la sociedad que debe	Criterio de regulación ecológica
L03	Controlar el flujo de aguas residuales descargadas en aguas, bienes nacionales y en los sistemas de alcantarillado para que no rebasen los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a las NOMs.	Cinco años.	A007	El área de comercios o establecimientos alrededor de presas deberá cumplir con los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a la normatividad aplicable a la calidad de agua. No se permite la contaminación de la Presa Santa Catarina con cualquier tipo de residuo líquido o sólido, incluyendo las generadas en viviendas.	SEDESU, CEA, CONAGUA, SEDEA, Autoridad municipal, SEMARNAT, PROFEPA.	Propietarios usuarios, habitantes de la UGA, CEACA, CIDETEQ, IMTA.	Ley de Aguas Nacionales (01 Diciembre 1992), Reglamento para el Control de las Descargas residuales a los Sistemas de Alcantarillado del estado de Querétaro (04 Abril 1996) Ley de Salud para el estado de Querétaro. (11 Agosto 2006).
L03	Controlar el flujo de aguas residuales descargadas en aguas, bienes nacionales y en los sistemas de alcantarillado para que no rebasen los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a las NOMs.	Cinco años.	A008	Se instrumentará un programa dirigido a la limpieza y desasolve de los ríos, así como la mejora de la calidad del agua, en un lapso no mayor de tres años. Con especial atención a los ríos El Marqués y El Pueblito, incluyendo a las UGAs que abarcan el río Querétaro.	CEA, CONAGUA, Autoridad municipal.	Habitantes de la UGA	NOM-002-SEMARNAT-1996 (03 JUNIO 1998), NOM-001-SEMARNAT-1996 (24 DICIEMBRE 1996).
L03	Controlar el flujo de aguas residuales descargadas en aguas, bienes nacionales y en los sistemas de alcantarillado para que no rebasen los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a las NOMs.	Cinco años.	A010	Se colocarán trampas de sólidos para reducir la carga que entra a la red de alcantarillado en un período no mayor a siete años, con al menos 7 vistas de mantenimiento por año.	SEDESU, CEA, CONAGUA, JAPAM, Autoridad municipal.	Propietarios y usuarios.	NOM-002-SEMARNAT-1996 (03 JUNIO 1998), NOM-001-SEMARNAT-1996 (24 DICIEMBRE 1996).
L03	Controlar el flujo de aguas residuales descargadas en aguas, bienes nacionales y en los sistemas de alcantarillado para que no rebasen los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a las NOMs.	Cinco años.	A011	Se aplicará la normatividad vigente en cuanto al uso y manejo adecuado de agroquímicos en la agricultura aledaña a presas o al río, fomentando el uso de prácticas alternas tales como: técnicas de rotación de cultivos, abonos verdes, uso de fertilizantes orgánicos o cualquier otro, en un lapso no mayor a dos años.	SEDESU, SAGARPA, SEDENA, INIFAP, CESAVEQ, SEMARNAT, CONAGUA	Productores, propietarios, usuarios.	Ley de Aguas Nacionales (01 Diciembre 1992), NOM-002-SEMARNAT-1996 (03 Junio 1998), NOM-001-SEMARNAT-1996 (24 DICIEMBRE 1996), Ley de Salud para el estado de Querétaro (11 Agosto 2006).
L03	Controlar el flujo de aguas residuales descargadas en aguas, bienes nacionales y en los sistemas de alcantarillado para que no rebasen los límites permisibles de contaminantes de acuerdo a las NOMs.	Cinco años.	A012	Se aplicará la normatividad vigente en la cual se regulan y sancionan aquellas actividades que afecten la calidad del agua en presas, bordos o corrientes de agua, en un lapso no mayor a un año.	SEDESU, Autoridad municipal, CONAGUA, PROFEPA	Productores, propietarios, usuarios.	Los municipios podrán solicitar asesoría legal a la Secretaría de Desarrollo Sustentable, para la revisión y corrección de su reglamento. Ley de Salud para el estado de Querétaro (11 Agosto 2006).

Propuesta de identificación de sitios para la infiltración de agua al acuífero de Querétaro

No. Lineamiento	Lineamiento	Tiempo límite para cumplir el lineamiento	Ro. Acción	Acción	Responsable	del sector de la sociedad que debe ser	Criterio de regulación ecológica
L05	Eliminar la contaminación en cuerpos de agua.	Cinco años.	A015	Se aplicará un programa dirigido al uso y tratamiento adecuado de los desechos generados en todos los ranchos ganaderos, de modo que no se contaminen agua, suelo y aire, en un lapso máximo de cinco años. Con especial atención a los municipios de El Marqués, Colón, Ezequiel Montes, Pedro Escobedo, Amealco, Querétaro y Tequisquiapan.	SEDESU, SAGARPA, SEDEA, INIFAP, SEMARNAT, CONAGUA, CEA, Autoridad municipal	Propietarios, usuarios, Unión Ganadera del estado de Querétaro Centros de Investigación Faunística.	Ley de Aguas Nacionales (01 Diciembre 1992), Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del estado de Querétaro (20 Febrero 2004) y su Reglamento. Ley de Fomento y Desarrollo Pecuario del estado de Querétaro. (04 Febrero 2005) Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (28 Enero 2988). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (08 octubre 2003).
L05	Eliminar la contaminación en cuerpos de agua.	Cinco años.	A016	Se constituirá una planta de tratamiento de aguas residuales para tratar el 100% de las producidas por el rastro municipal de Corregidora y se elabora composta con los restos de animales para evitar la contaminación de agua y suelo en un lapso máximo de dos años.	SEDESU, CEA, CONAGUA, SAGARPA, SESEQ, SEDEA, Autoridad municipal.	Propietarios y usuarios.	NOM-002-SEMARNAT-1996 (03 JUNIO 1998), NOM-001-SEMARNAT-1996 (24 DICIEMBRE 1996).
L05	Eliminar la contaminación en cuerpos de agua.	Cinco años.	A017	Se prohíbe arrojar desechos como estiércol, basura, animales muertos o cualquier otro a cuerpos de agua. El municipio elaborará un reglamento de ecología y sistema de sanciones para quien efectúe estas acciones dentro de un lapso no mayor de un año.	SEDESU, Autoridad municipal, SEMARNAT, CONAGUA, SAGARPA, CEA, SEDEA.	Propietarios usuarios, Unión Ganadera del estado de Querétaro, sociedad en general.	NOM-002-SEMARNAT-1996 (03 JUNIO 1998), NOM-001-SEMARNAT-1996 (24 DICIEMBRE 1996), Reglamento de Bando de Policía y buen Gobierno (30 Junio 2005), Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos del estado de Querétaro (20 Febrero 2004), Ley de Salud para el estado de Querétaro (11 Agosto 2006), Ley de Fomento y Desarrollo Pecuario del estado de Querétaro. (04 Febrero 2005).

3 Normatividad

El presente trabajo no puede lograrse si no se toma en cuenta la normatividad vigente en cuanto a la cantidad y calidad del agua que se pretende infiltrar.

La CONAGUA y otras instancias han generado una serie de normas encaminadas a hacer un uso racional del agua y en específico para la recarga de acuíferos, ya sea con agua de lluvia o bien con agua residual.

Las normas que aplican para este trabajo son:

NOM-011-CONAGUA-2000. Conservación del recurso agua

NOM-014-CONAGUA-2007. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.

NOM-015-CONAGUA-2007. Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua.

A su vez cada una de estas requiere del apoyo de otras relacionadas, en la **Tabla 3.1** se muestran las normas asociadas a cada una de estas tres normas.

Tabla 3.1. Normas relacionadas

Normas relacionadas	Descripción
NOM-011-CONAGUA-2000	Conservación del recurso agua. Establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales
NOM-014-CONAGUA-2003	Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
NOM-127-SSA1-1994	Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización
NOM-003-CONAGUA-1996	Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.
NOM-004-CONAGUA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general.
NOM-015-CONAGUA-2007	
NOM-003-CONAGUA-1996	Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos
NOM-004-CONAGUA-1996	Requisitos para la protección de acuíferos durante el mantenimiento y rehabilitación de pozos de extracción de agua y para el cierre de pozos en general
NOM-008-SCFI-2002	Sistema General de Unidades de Medida
NOM-052-SEMARNAT-2005	Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos
NMX-AA-003-1980	Aguas residuales
NMX-AA-004-SCFI-2000	Análisis de agua - Determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba
NMX-AA-005-SCFI-2000	Análisis de agua-Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba
NMX-AA-005-SCFI-2000	Análisis de agua-Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba
NMX-AA-006-SCFI-2000	Análisis de agua-Determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas-Método de prueba
NMX-AA-026-SCFI-2001	Análisis de agua-Determinación de nitrógeno total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba
NMX-AA-029-SCFI-2001	Análisis de aguas-Determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba
NMX-AA-034-SCFI-2001	Análisis de agua-Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba.
NMX-AA-42-1987	Calidad del agua determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y <i>escherichia coli</i> presuntiva
ISO/CD 5667-11-2006	Calidad del Agua.- Muestreo.- Parte 11.- Guía para el muestreo de aguas subterráneas, la que la sustituya o la Norma Mexicana correspondiente

Existen otras que también deben ser consideradas. **Tabla 3.2**

Tabla 3.2 Normas aplicables al acuífero del valle de Querétaro

Norma	Descripción	Aplicabilidad
NOM-001-CONAGUA-1995	Sistemas de alcantarillado sanitario - Especificaciones de hermeticidad.	Esta norma se orienta al tipo de tubería para la red de alcantarillado que se debe utilizar, con el propósito de evitar la contaminación de los acuíferos
NOM-002-CONAGUA-1995	Toma domiciliaria para abastecimiento de agua potable - Especificaciones y métodos de prueba	Se orienta a tratar de evitar fugas de agua en las tomas domiciliarias, por lo que estable especificaciones y métodos de prueba que deben cumplir éstas, tanto para los responsables de la fabricación de los elementos que la integran, así como la instalación de los elementos que la componen
NOM-013-CONAGUA-2000	Redes de distribución de agua potable- Especificaciones de hermeticidad y métodos de prueba.	Orientada la reducción de fugas en las redes considerando: <ul style="list-style-type: none"> • La obra de ingeniería civil se realice bajo un proyecto ejecutivo aprobado. • Se cuente con personal competente en el proceso de instalación. • Se supervise y dirija la obra con personal calificado. • La operación y mantenimiento de la red de distribución se realice acorde a las características y necesidades del sistema.

Estas normas deben cumplir una serie de requisitos y acciones orientadas a la cantidad y calidad del agua o los daños colaterales que se puedan ocasionar al no aplicarlas.

A manera de explicar las normas que se tienen sobre infiltración NOM-014-CONAGUA-2007 y NOM-015-CONAGUA-2007, se presentan en forma gráfica en las **figuras 3.1 y 3.2**.

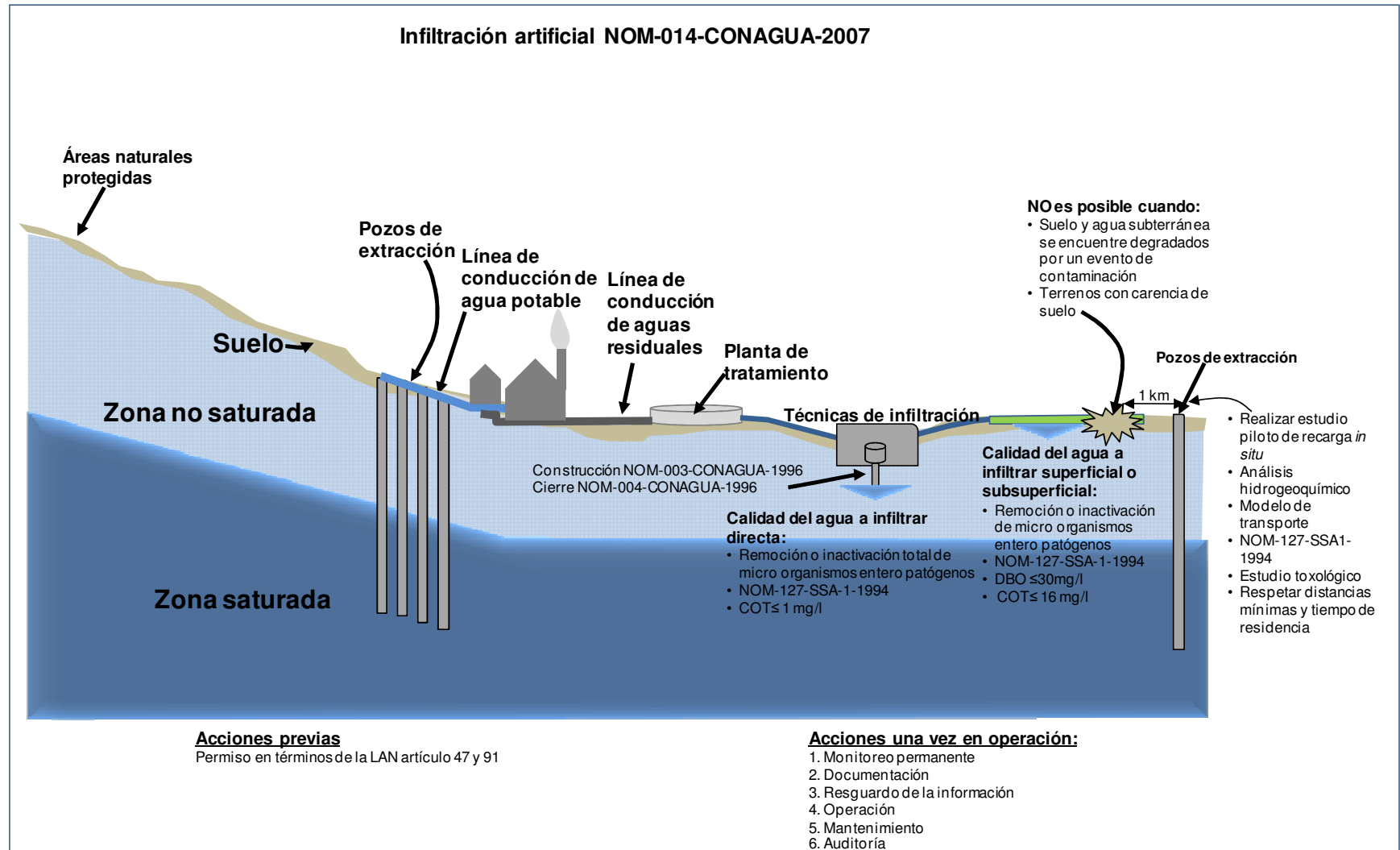


Figura 3.1. Consideración para la NOM-014-CONAGUA-2007

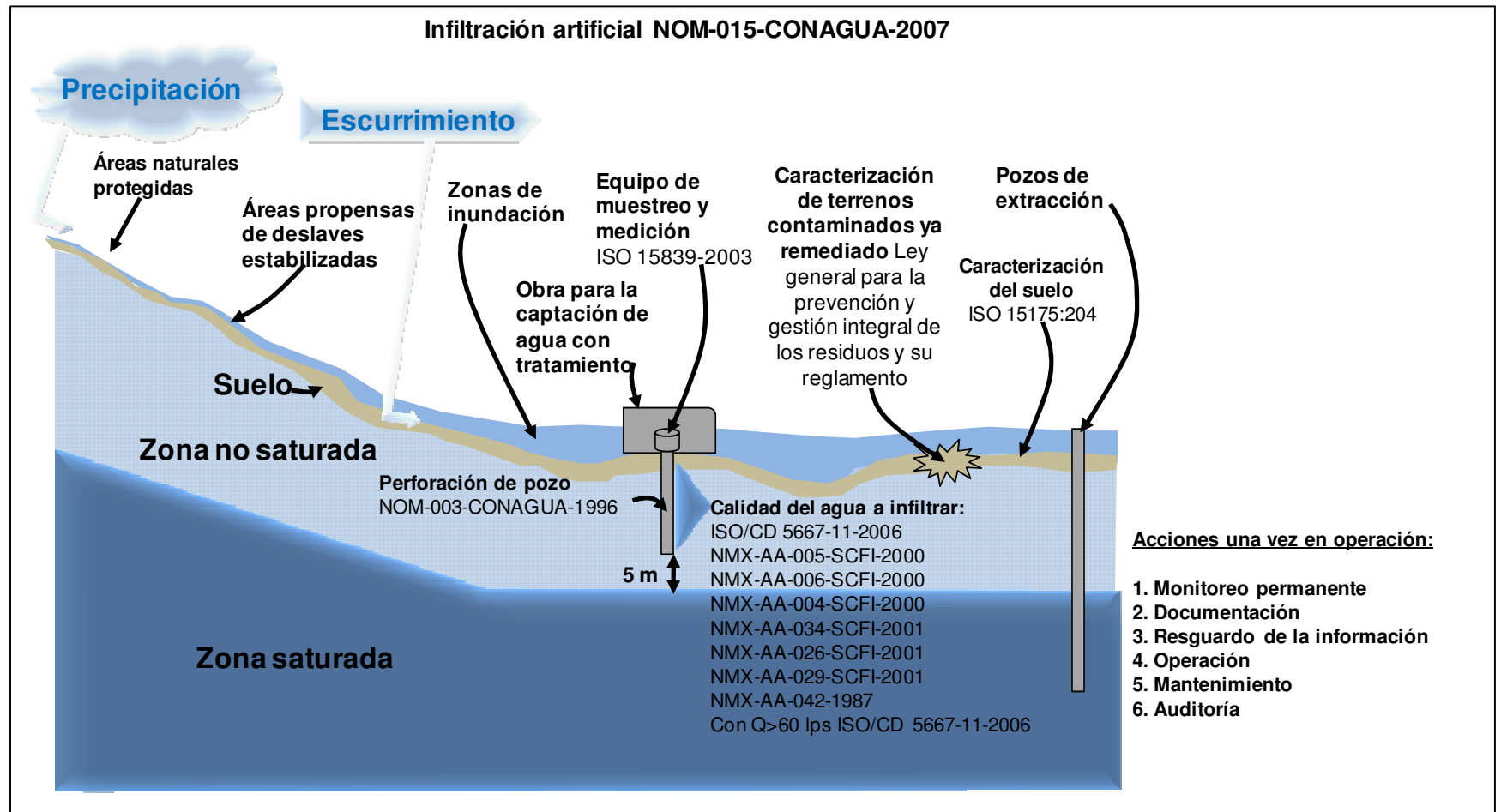


Figura 3.2. Consideración para la NOM-015-CONAGUA-2007

4 Proceso de infiltración de agua al subsuelo

4.1. Interacción entre el agua superficial y el agua subterránea

Para tener un buen aprovechamiento del agua debe entenderse el ciclo hidrológico, las partes que lo integran y los procesos que se llevan a cabo en cada uno de ellos. En la **Figura 4.1** se explica en forma gráfica.

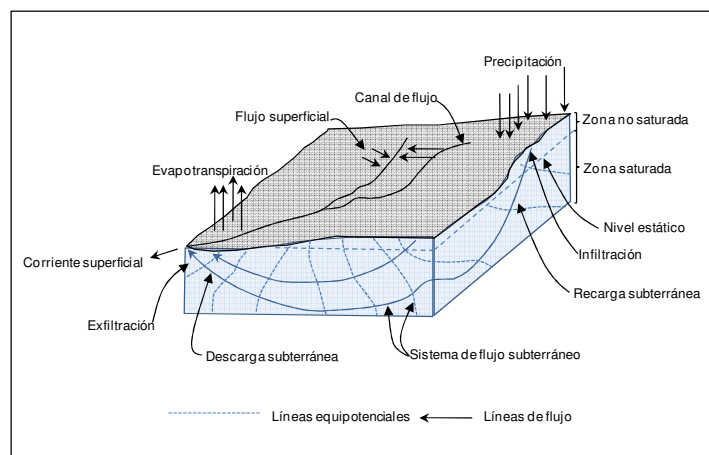


Figura 4.1. Ciclo del agua (modificado de Freeze R. Allan, Cherry John A., (1974) Groundwater, Chapter 1 Introduction pag. 3 Figure 1.1)

Una diferencia entre las aguas superficiales y subterráneas es el tiempo de estancia en un sitio, mientras que las aguas superficiales escurren y transitan rápidamente a través de la superficie del terreno a zonas o cuencas topográficamente más bajas, las aguas subterráneas son más lentas, su velocidad depende del medio por el que transitan, tipo de roca y permeabilidad.

El agua subterránea se divide en dos zonas: la cercana a la superficie denominada como zona drenada o vadosa y la zona saturada o freática. Los límites entre ellas es el nivel estático, el cual se define como la superficie en la cual la presión del poro saturado con agua es igual a la presión atmosférica. En la **figura 4.2** se muestra la posición de cada una de estas zonas.

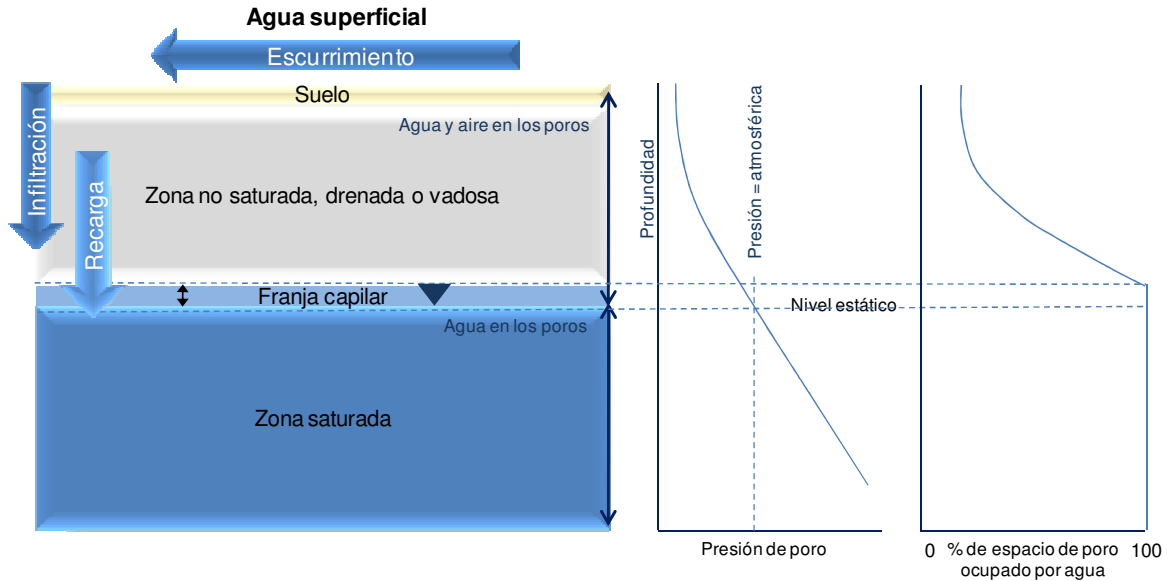


Figura 4.2. Sección que muestra los términos usados para describir el agua subterránea
(modificado de Fitts Charles R., (2002) Groundwater Science)

La zona vadosa o drenada se localiza arriba del nivel estático, en ésta la presión de poro es menor a la presión atmosférica. Se caracteriza porque el espacio poroso contiene agua y aire, provocando que las fuerzas capilares atraigan el agua hacia la roca. El término agua vadosa se aplica a toda el agua que se ubica en la zona no saturada. Asimismo, los términos agua de suelo –*soil water*- o humedad de suelo –*soil moisture*-, también se aplican para la zona no saturada, es la parte donde se encuentran las raíces de las plantas.

Debajo del nivel estático se localiza la zona saturada, donde la presión del agua es mayor a la atmosférica y donde los poros están saturados con agua.

Se identifica una zona de transición entre la no saturada y la saturada denominada como franja capilar, es una zona saturada con agua que se localiza arriba del nivel estático, tiene un espesor que varía de acuerdo al tamaño del poro; en medios arcillosos puede llegar a tener hasta un metro de espesor, mientras que en gravas sólo llega a tener algunos milímetros.

En cuanto al agua superficial, el suelo es el medio que favorece que se infiltre o no al subsuelo, depende de su granulometría (sedimentos) o estructura (roca). En algunas ocasiones funciona como filtro, quedando en la superficie los sedimentos y el agua se mueve a la zona no saturada hasta llegar a la zona saturada, dependiendo de la permeabilidad.

En la **Figura 4.3** se muestran los flujos que afectan el agua subterránea y en la **Figura 4.4** los diferentes tipos de interacción que se presentan entre las aguas superficiales y subterráneas.

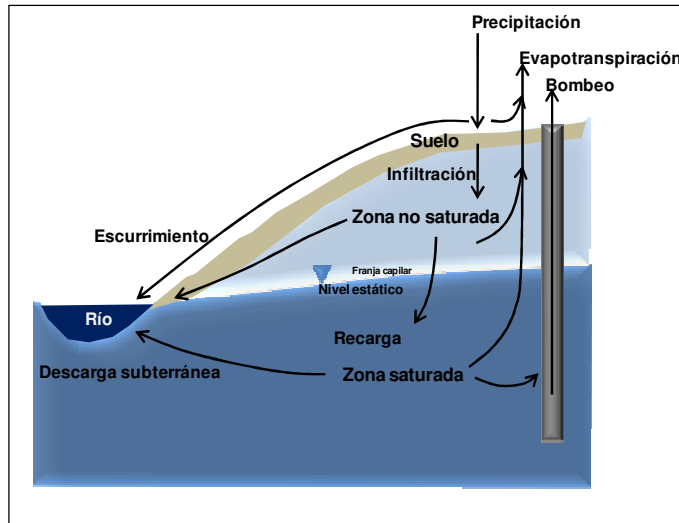


Figura 4.3. Flujos que afectan al agua subterránea (modificado de Fitts Charles R., (2002) Groundwater Science)

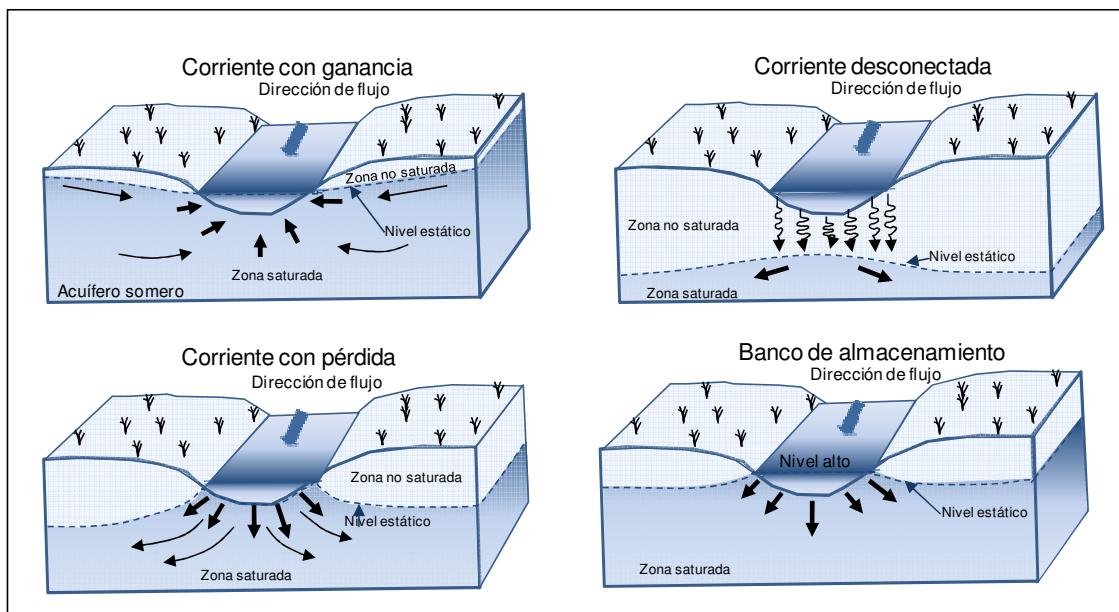


Figura 4.4. Tipos de interacción entre las aguas superficiales y subterráneas

4.2. Aprovechamiento del agua

La gestión del agua involucra el aprovechamiento de todas las fuentes de agua existentes. Como se presentó en el Capítulo 2, el conocimiento que se tiene del agua en el territorio del AVQ, está disperso, por un lado se conocen las condiciones hidrogeológicas que guarda el acuífero, también, se conoce el volumen de agua superficial que transita en él; en cuanto a su custodia, la mayor información la tiene la CEA, otra parte la CONAGUA y además, desarrolladores urbanos e industrias que han tenido que realizar estudios de factibilidad y perforación de pozos para contar con el vital

líquido. Cabe aclarar que en estos momentos la información que se cuenta no está actualizada, sin embargo, es suficiente para plantear la propuesta del presente trabajo.

La bibliografía sobre recarga de acuíferos menciona los procedimientos y actividades que se deben realizar para el proceso de infiltración. Esto es, se tiene la fuente, el agua que se acumula en la superficie, ya sea de lluvia o residual y el punto final, el acuífero. Sin embargo, en ningún estudio o bibliografía consultada se habla de la zona de transición entre la superficie y la zona saturada, en cuanto a la medición de la conductividad hidráulica o permeabilidad. Si bien, la normatividad mexicana relacionada con el caso que nos ocupa, indica una serie de acciones y requisitos que se deben cumplir para realizar la infiltración, todas ellas se enfocan al tipo y calidad de agua a infiltrar, NOM-014-CONAGUA-2003 y NOM-015-CONAGUA-2007; en ninguna de ellas se habla de la zona no saturada.

Una fuente de información importante de los acuíferos es la que se obtuvo en el momento de la construcción de los pozos, por mediciones periódicas de la profundidad del agua y por la obtención de propiedades hidrodinámicas en los afloros o pruebas de bombeo, los balances de agua subterránea y los cálculos de la disponibilidad.

En cuanto al agua superficial, las estaciones meteorológicas son la fuente de información principal para realizar los cálculos de avenidas y disponibilidad de agua superficial, así como los afloros de las corrientes superficiales. Toda esta información como ya se mencionó está dispersa en diferentes instancias de gobierno, no tiene una periodicidad en la adquisición de datos que alimenten el conocimiento. La información sobre los cortes litológicos de los pozos generalmente es la descripción del perforador y no de un ingeniero geólogo. Se desconoce si el nivel freático se obtuvo en pozo con un cierto tiempo de reposo, inmediatamente después de apagar el equipo de bombeo, o bien aún funcionando, por lo que se tiene que tomar esa información con cierta reserva. En cuanto a las estaciones hidrometeorológicas, generalmente la obtención de la información no tiene continuidad. ¿Y el banco de resguardo de los datos e información? ¡No existe!

Lo anterior induce a tomar la información con reserva y se comprueba lo expuesto en el capítulo 2, en donde se menciona que no existe una instancia responsable que proporcione los procesos métodos para obtener los datos, que defina la periodicidad del monitoreo que permita tener el control del acuífero y sobre todo resguardarla.

En la **figura 4.5** se presentan en forma esquemática los datos que se deben mantener actualizados para tener el conocimiento integral del manejo del agua; en el capítulo 5 se detallan.

En lo referente al AVQ, al ser la extracción mayor que la recarga, no hay oportunidad de que el agua superficial llegue de manera inmediata al acuífero; existe un espesor de la zona drenada de más de 100 m, lo que genera compactación del terreno y cambio en los valores de las propiedades hidrodinámicas. En estos momentos es importante determinar si el proceso de recarga vertical aún se lleva a cabo, ya que cada año el nivel estático es más profundo, tiene una velocidad de abatimiento en promedio superior a los 3 m.

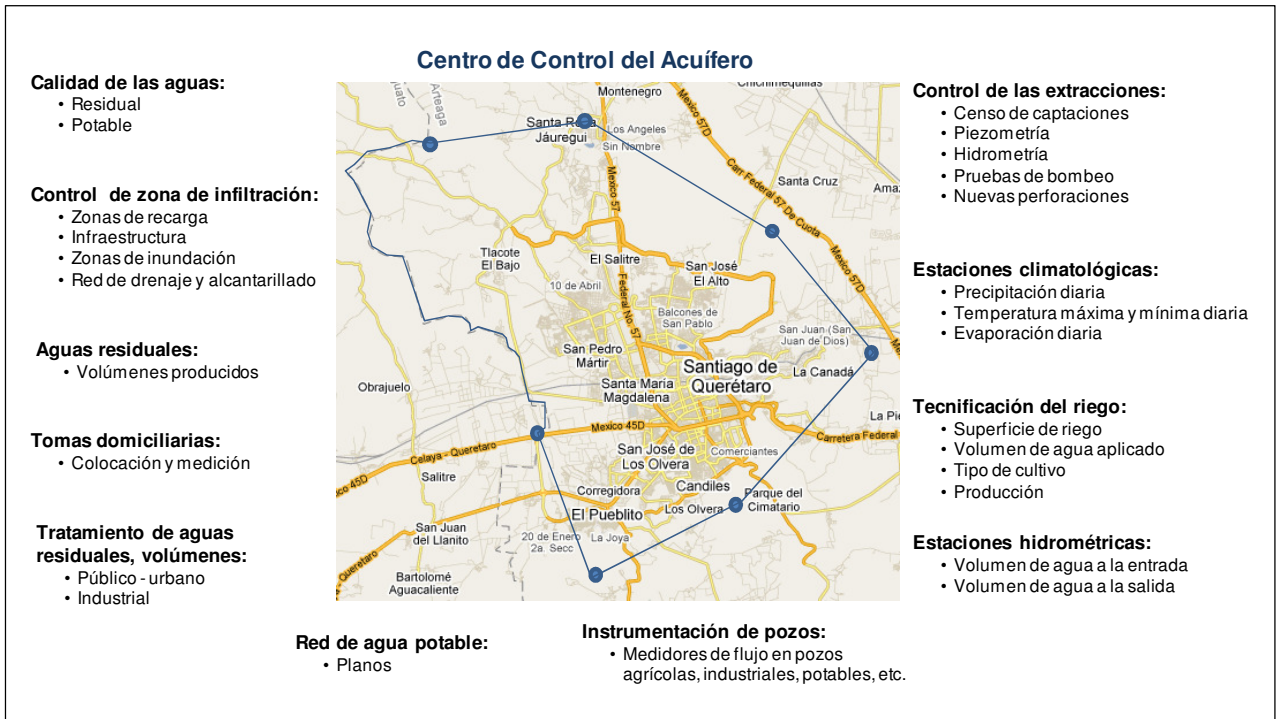


Figura 4.5. Información necesaria para el control del agua y base para el proyecto de infiltración

En lo relacionado con el agua superficial es una situación similar, no hay información continua y un responsable de mantenerla actualizada y que tome decisiones. El suelo juega un papel muy importante ya que es el medio y filtro principal para conducir el agua al subsuelo; sin embargo, en la mayoría de los casos al saturarse se vuelve un medio impermeable lo que incrementa el escurrimiento y el traslado de partes sólidas a posiciones topográficas más bajas. Esto ocasiona deterioro de la calidad del suelo al transportar una gran cantidad de materia orgánica y sedimentos, incremento de la salinidad, afectación a la infraestructura civil (obstrucción del drenaje) e inundaciones al no poder desaguar las tuberías, así como la afectación al medio ambiente.

El manejo ordenado del agua superficial pluvial permite reducir las pérdidas por evapotranspiración, control de avenidas, incrementar las reservas del agua subterránea. La utilidad del agua de lluvia, además del abastecimiento para la agricultura, se utiliza para la generación de energía y para consumo humano, situación que no se presenta en el AVQ, pero, puede utilizarse para incrementar el volumen de recarga del acuífero.

La recarga artificial de acuíferos es una técnica que permite aprovechar el agua superficial en beneficio de éstos, para ser utilizada como un bien para el ser humano. A pesar de considerarse como de reciente innovación, se tienen evidencias que en Grecia y en India filtraban el agua mediante cribas o filtros rudimentarios de grava y arena. En el año 1670 se identifica que en el agua habitan microorganismos, responsables de su contaminación y la filtración empieza a ser un proceso rutinario. Se sabe que en el año de 1804 se diseñó la primera planta de tratamiento en Escocia, consistente en un filtro lento de arena. En 1854 se empieza a añadir cloro al agua. En 1906 se empieza a utilizar el ozono. Muchos de estos procesos se aplicaron para retornar el agua a los acuíferos.

No es hasta la década de 1970, cuando empiezan a aflorar nuevos contaminantes producto del desarrollo e innovación en la actividad industrial y agrícola. Se utilizan técnicas de aireación, floculación y adsorción mediante carbón activado, más adelante se ocupan los procesos de membrana. Hoy en día la filtración de algunos contaminantes se encuentra controlada, pero todavía queda mucho por avanzar en aspectos como la eliminación de subproductos de desinfección, productos derivados de medicamentos, grasas, aceites y elementos radiactivos, entre otros.

Si bien hasta ahora se ha mencionado que el agua de lluvia es la más viable para infiltrarla, no hay que dejar de tomar en consideración las restricciones que se tienen en cuanto a la normatividad NOM-CNA-11-2001 sobre la disponibilidad y en donde se debe considerar el libre tránsito de agua tanto superficial como subterránea hacia las cuencas aguas abajo.

4.3. Aspectos hidrogeológicos

La recarga natural es una parte del proceso del ciclo del agua que se genera como consecuencia de la diferencia existente entre las entradas de agua al suelo (precipitación, infiltración, entradas subterráneas) y las salidas (evapotranspiración, bombeo, salidas subterráneas y escurrimiento).

En el AVQ se tiene un volumen de recarga estimado de $70 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (entradas subterráneas, $27 \text{ Mm}^3/\text{año}$ + retorno por riego, $4 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y recarga vertical, $39 \text{ Mm}^3/\text{año}$). Para el caso que nos ocupa el retorno por riego y recarga vertical son los que interesan. Cabe mencionar que estos valores fueron calculados con base en el balance de aguas realizado en el año 1997 (GUYSA, 1997). Dado que la mancha urbana ha crecido es de esperarse que este valor se haya reducido de manera considerable.

Por otra parte, se ha caracterizado el acuífero con base en unidades hidrogeológicas, en donde se cuentan con valores de conductividad eléctrica, conductividad hidráulica y transmisividad, que son parámetros indispensables para conocer la movilidad del agua en el subsuelo. Asimismo, se ha cuantificado un valor del coeficiente de almacenamiento que es acorde al tipo de rocas que se encuentran en el subsuelo. Para la zona drenada, no se tienen valores actualizados, se tiene una idea de cómo se puede transmitir el fluido de acuerdo a la información histórica de algunos cortes y resultados de pruebas de bombeo cuando la zona estaba saturada.

En el aspecto de recarga inducida, ésta se puede llevar a cabo mediante la construcción de pozos y por obras de ingeniería civil que permitan reducir la velocidad de escurrimiento y captar mayores volúmenes de agua para conducirlos al subsuelo.

La recarga incidental se da por motivos de la actividad humana que no están encaminados a la recarga del agua subterránea, sin embargo, la favorecen. La depuración de aguas residuales mediante fosas sépticas, el drenaje de los campos irrigados o la recarga debida a la urbanización constituyen algunos ejemplos. La urbanización produce un mayor escurrimiento y elimina la evapotranspiración debido a la impermeabilización del suelo.

Otra forma de recarga, es la captación de agua que se puede obtener de los techos de las casas habitación, centros comerciales e industrias y canalizarla a depósitos para

realizarles un tratamiento e infiltrarla al subsuelo. Esta manera de captar el agua y conducirla al acuífero no requiere de tratamientos especiales para eliminar contaminantes y si apoyaría en la reducción de volúmenes de escurrimiento y evitar, entre otras, inundaciones en las partes con topografía baja, además, reduce considerablemente la erosión de suelos. (Bhattacharya&Rane, 1999).

La recarga artificial, según Custodio (1986) es *"la ciencia y el conjunto de técnicas que permiten aumentar la disponibilidad de agua subterránea, con la calidad apropiada a los usos a la que se destina, mediante una intervención consciente, directa o indirecta, en el ciclo natural del agua"*. Se puede llevar a cabo partiendo de diferentes fuentes de agua como: ríos, presas, acuíferos, acueductos, alcantarillado, zonas de cultivo, plantas de tratamiento de agua potable, plantas de tratamiento de aguas residuales, captación de aguas de los techos de las construcciones, entre otras. Los objetivos que se pretenden con la recarga artificial son:

- Incrementar y almacenar la cantidad de agua subterránea disponible para favorecer una mayor extracción.
- Reducir o eliminar el descenso del nivel del agua subterránea y, en su caso, elevar los niveles para reducir el costo de extracción y/o mantener los caudales de explotación.
- Conservar y/o eliminar agua de escurrimiento contribuyendo al control de avenidas de agua extraordinarias.
- Compensar la pérdida de recarga natural al acuífero, que se puede producir a causa de actividades humanas, tales como encauzamientos, derivaciones de agua, urbanización, construcción de obras civiles y otras formas de modificación del uso del terreno.
- Mejorar las condiciones para el uso integral de aguas superficiales y aguas subterráneas.
- Evitar que aguas de inferior calidad existentes en el acuífero o que se producen por contaminación, se desplacen hacia las captaciones de agua de buena calidad, o bien, tratar de desplazar esas aguas indeseables hacia otras partes.
- Acelerar el lavado de ciertas sales y productos, aumentando el flujo en el acuífero, para así, reducir el tiempo de residencia del agua y de las sustancias indeseables en el medio.
- Efectuar un tratamiento físico, químico y biológico del agua en el propio terreno.
- Recuperar aguas residuales, en general, después de un tratamiento previo suficiente, almacenándolas y completando el tratamiento depurador en el terreno.
- Reducir, aminorar o eliminar fenómenos de subsidencia a causa de la explotación intensiva de las aguas subterráneas.
- Compensar los efectos negativos que puedan producir obras hidráulicas de superficie y obras civiles sobre los acuíferos.

Para el caso del AVQ, una parte de la recarga artificial está orientada a aprovechar el agua de lluvia para almacenarla y evitar perderla por evaporación, inundación o escurrimiento.

4.4. Formas de recarga

La recarga de un acuífero se encuentra condicionada por diversos factores de carácter geológico, climático, de ocupación del terreno, morfológico, topográfico, de calidad del agua disponible, del costo del agua, administrativos y legales, entre otros.

Tal es la cantidad de factores que influyen y en grado tan diverso que es necesario aplicar varias modalidades de recarga para tener el control y aprovecharla eficientemente. Para este trabajo se considera un criterio, el propuesto por Custodio (1986), sobre los tipos de recarga que se pueden presentar ya sea superficiales o subterráneos.

4.4.1. Superficiales

La característica principal para esta forma de recarga es la creación de una lámina de agua libre. Es en esta zona donde se produce una columna de agua necesaria y con la presión suficiente para que esta se infiltre; puede ser a través de cualquiera de los siguientes medios:

- **Embalses o lagunas:** Son obras generalmente alargadas, aunque no siempre, poco profundas y de gran superficie, con o sin fondo artificial de grava o arena. La infiltración se realiza predominantemente por el fondo. Pueden estar tanto dentro como fuera de los cauces de ríos. A veces no hay salida de agua, infiltrándose todo lo que llega. Normalmente se disponen dos presas; en la primera se produce la sedimentación de las partículas en suspensión, de manera que se reduzca la sedimentación en la segunda.
- **Canales, zanjas y surcos:** Suelen construirse siguiendo la topografía del terreno, en general, con agua circulante hasta que se infiltra totalmente o hasta que sale la porción residual no recargada. Suelen ser poco profundos, la infiltración se produce por el fondo y también por los lados, con importancia variable dependiendo de su ancho. A veces pueden ser zanjas que contienen un tubo perforado que conduce el agua y un relleno de grava. Son recomendables en terrenos inclinados.
- **Fosas: En estas obras,** la superficie lateral es importante en relación con la del fondo, de manera que domina la infiltración por los flancos.
- **Áreas de extensión de agua:** El agua se puede extender bien por inundación directa o en forma de riego con elevadas dotaciones superficiales. En ocasiones, en zonas áridas van unidas a obras extensas de recolección de aguas de escorrentía, a veces con cuencas de muchas decenas de km² o a sistemas de control de la erosión de torrentes. A veces se aprovecha el lecho de un río, opción especialmente aconsejable en zonas de alta capacidad de transporte de sedimentos asociado a avenidas esporádicas.
- **Infraestructura civil sobre lechos de ríos:** Se realizan para aumentar o mantener la capacidad de infiltración, extendiendo la superficie mojada, aumentando la rugosidad del lecho (mediante gaviones); en general, dejando suficiente velocidad al agua para que arrastre la materia en suspensión hacia aguas abajo.

4.4.2. Subterráneos

Las obras en profundidad disponen de mucha menor superficie para la recarga. En esta situación el área se limita, tiene que ser más puntual, lo que involucra tener un conocimiento más a detalle de las condiciones del subsuelo, entre otras cosas se consideran:

- Pozos de inyección, llegan al nivel de saturación.
- Pozos de absorción, no llegan al nivel de saturación.
- Drenes y galerías, se construyen en el fondo de un canal por el que se introduce el agua. En general están por debajo o en el límite del nivel freático.
- Zanjas, se excavan de ser posible hasta el nivel freático y se rellenan con gravas.

4.4.3. Ventajas y desventajas

Las obras superficiales presentan características distintas a las subterráneas, situaciones que las hacen más aptas para unos fines y menos para otras, entre las que destacan:

- Los métodos superficiales no pueden emplearse eficazmente cuando el terreno superficial es poco permeable, o entre la superficie del suelo y el acuífero existen niveles poco permeables. En estos casos son recomendables los pozos, aunque no pueden descartarse las fosas que penetran lo suficiente para atravesar esos terrenos poco permeables.
- Los métodos superficiales no se adaptan adecuadamente a terrenos accidentados.
- Los métodos subterráneos evitan problemas de pérdida de agua y aumento de salinidad por evaporación.
- Los métodos superficiales, si no son operados de forma adecuada, pueden presentar problemas estéticos y ambientales, tales como proliferación de insectos y roedores; pueden ser causa de enfermedades. En esta situación, se requiere de obras adicionales de ingeniería para aislar el sitio y evitar el contacto con la gente.
- Los métodos subterráneos requieren agua de buena calidad, muy limpia y/o sistemas muy efectivos de limpieza (debido a problemas de colmatación), con un costo de mantenimiento a veces importante.
- El precio y la disponibilidad del terreno juegan un notable papel en la selección del método. Terrenos baratos favorecen la recarga en superficie, si es viable, y terrenos caros favorecen la utilización de pozos.
- El grado de depuración conseguido en el agua recargada suele ser mayor en los métodos superficiales que en los métodos subterráneos, debido en parte al encharcamiento (que favorece la degradación en condiciones aeróbicas con tiempos de residencia del orden de un día) y los riesgos de contaminación del acuífero son menores. El paso por el medio no saturado y la formación de un filtro natural son decisivos para conseguir una buena eliminación de contaminantes.
- Las obras superficiales suelen requerir acondicionamientos previos del terreno para nivelarlo, retirar coberturas poco permeables o arcillosas, retirar o cambiar la

vegetación, construir diques resistentes, estables y no erosionables, etc. Además, de estructuras para el manejo y movimiento del agua.

- En circunstancias similares y para igual caudal de recarga, los pozos requieren menos superficie que las fosas, y éstas menos que las embalses, siendo la extensión y el sobre riego los métodos que ocupan más terreno.

4.5. Técnicas y diseños de recarga artificial

Existe un amplio espectro de técnicas que se aplican para la recarga, cada una tiene un objetivo y aplicación, para el caso del AVQ es necesario identificar cuál aplica de acuerdo a la situación que se presente. Las técnicas se clasifican como:

4.5.1. Técnicas directas de superficie

- **Inundaciones**

Las inundaciones son un problema para las ciudades ya que afectan la infraestructura urbana y ocasionan grandes erogaciones económicas para el pago de indemnizaciones. Una forma de aminorar esta situación es la identificación de los sitios donde se acumula el agua superficial, estudios para definir las micro cuencas, tanto en la zona urbana como agrícola, y realizar obras de infraestructura para evitar que el agua llegue a estos sitios o bien realizar obras de infiltración. **Figura 4.6.**

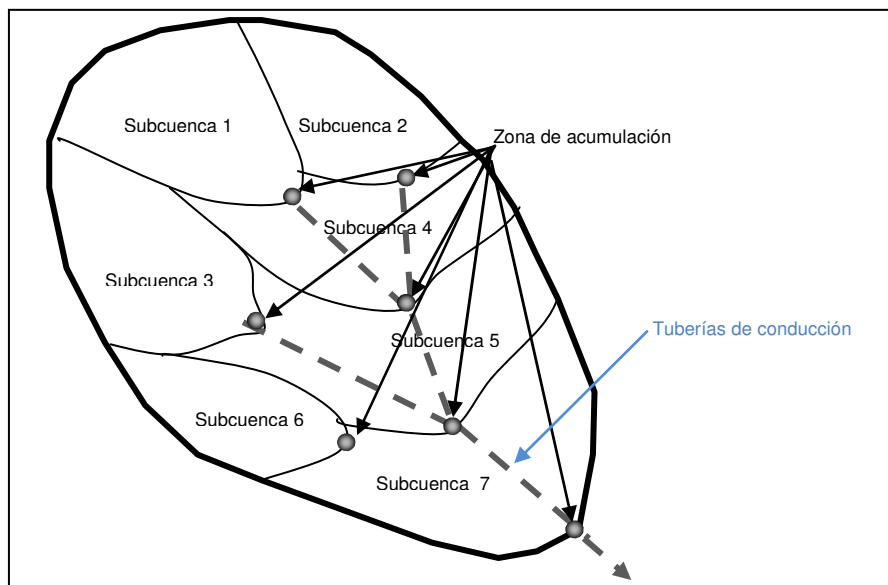


Figura 4.6. Definición de subcuencas y tuberías de desfogue

- **Bordos y drenes**

Hasta 1980 en el AVQ se aprovechaba el agua superficial a través de la construcción de bordos, los cuales constituían una fuente importante para la recarga al acuífero. En la actualidad existen 12 bordos, **Figura 4.7.** Asimismo se cuenta con un sistema de 17 drenes, **Figura 4.8,** que cubren prácticamente a todo el acuífero. El problema que se

tiene con ellos es que favorecen más la evaporación y se pierde mucho volumen por esta condición, al tener un espesor de agua reducido y construirse en sitios con suelo impermeable.

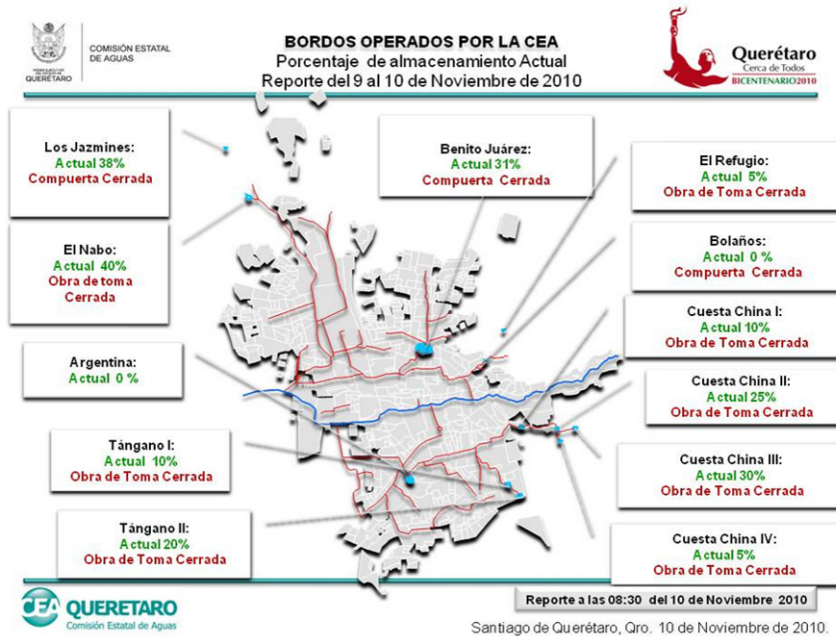


Figura 4.7. Bordos localizados en el AVQ (Imagen tomada del portal de la CEA)

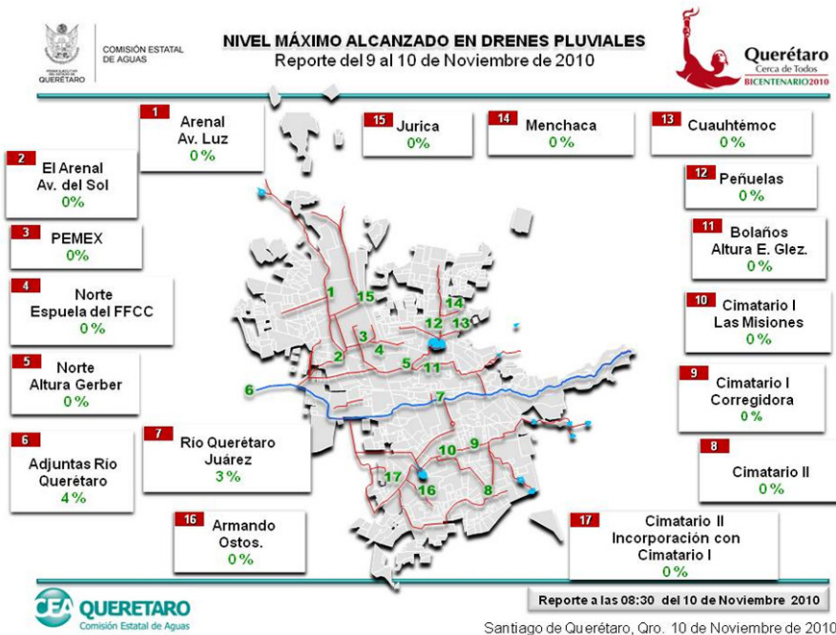


Figura 4.8. Drenes pluviales localizados en el AVQ (Imagen tomada del portal de la CEA)

- **Presas**

Este tipo de construcciones se efectúan para retener el agua y apoyar a los cultivos aguas abajo. Se construyen en suelos impermeables y se favorece la evaporación. En el AVQ existen dos presas la de Juriquilla, hoy en día con uso recreativo y menormente para riego de las pocas hectáreas que quedan aguas abajo de ésta. Y la presa El

Batán que funciona como control de avenidas y para el riego de algunas hectáreas en la zona agrícola del municipio de Corregidora. **Figura 4.9.**



Figura 4.9. Fotografías de los dos almacenamientos superficiales que se encuentran en el AVQ (Presa Juriquilla y El Batán)

- **Zanjas y sistemas de surco**

Se construyen en áreas con topografía irregular, zanjas bajas, planas profundizadas y situados juntos o surcos que proporcionan el contacto máximo de agua con el área. En la **Figura 4.10** se muestra una forma de cómo distribuir las zanjas o surcos para aprovechar más el agua. Los tipos de zanjas pueden tener un patrón paralelo, dendrítico o de contorno.

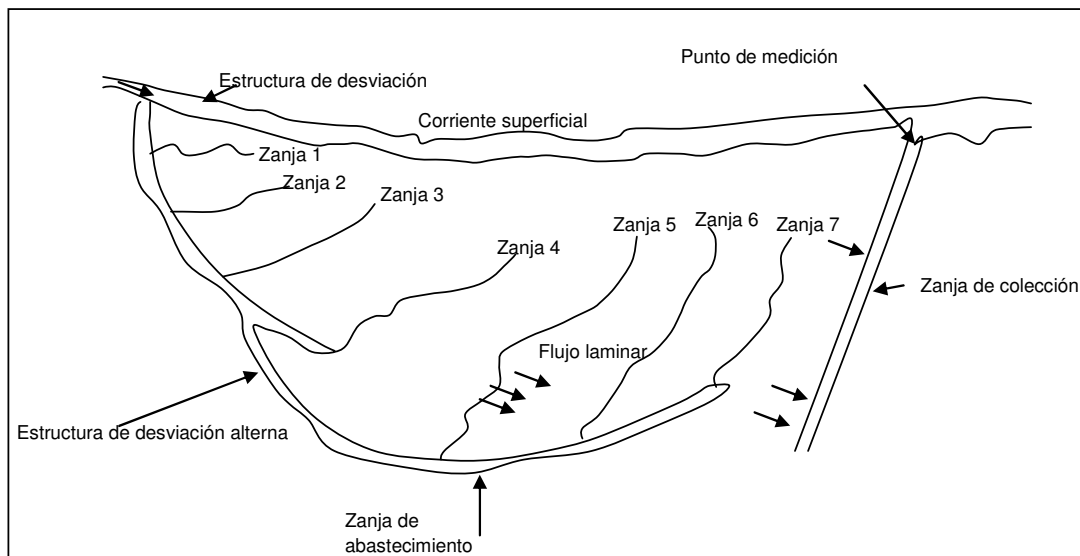


Figura 4.10. Esquema para retener agua y favorecer la infiltración a través de zanjas y surcos

- (i) Aunque este método se adapta a terrenos irregulares, el contacto del agua con la superficie del terreno raras veces excede el 10% ciento del total del área de recarga.
- (ii) Las zanjas deben tener una pendiente para mantener la velocidad de flujo y un depósito de sedimentos mínima.

La zona donde se puede utilizar este tipo de infraestructura es al sur de la ciudad, en la parte correspondiente al cerro Cimatarío, siempre y cuando se identifiquen las corrientes superficiales que transitan por esa zona.

- **Sobre irrigación y fugas de agua**

Este problema se presenta cuando se riegan de más los campos de cultivo o bien los jardines de las casas en la zona urbana, esto genera un consumo adicional del agua, que la mayoría de las veces, además de evaporarse en las zonas de cultivo, se incrementa la salinidad del suelo, no favorece mucho a la infiltración. En cuanto a las fugas de agua, éstas pueden ser de agua potable y se generan por la ruptura de la tubería, o bien de agua residual, también por la ruptura de la red de drenaje. En el primero caso se pierden grandes volúmenes de agua, si son visibles, el agua se contamina y produce deslaves de suelos, si no son visibles se van directo a la zona drenada, pero puede afectar al subsuelo. Esta situación se presenta en el AVQ donde se han generado fallas inducidas asociadas a la explotación intensiva.

- **Gaviones**

Esto implica construir pequeñas estructuras en forma de 'L' en una corriente superficial, con el propósito de disminuir la velocidad del agua y favorecer la infiltración; sin embargo, si el agua trae mucho sedimento, también favorece el depósito de éste, lo que reduce la capacidad de infiltración. En la **Figura 4.11** se muestra un esquema. Requiere de mantenimiento permanente para quitar el azolve del cauce de la corriente.

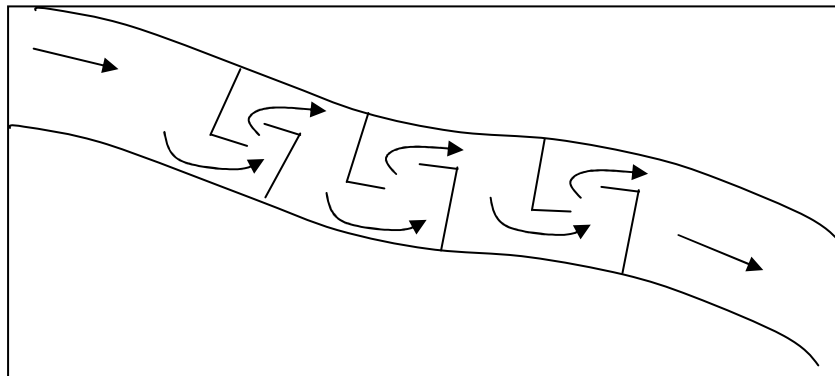


Figura 4.11. Esquema de una estructura tipo gavión

También se pueden construir obras más sencillas como sería la utilización de malla de acero, en forma de bloques rectangulares colocadas en la corriente. **Figura 4.12.**

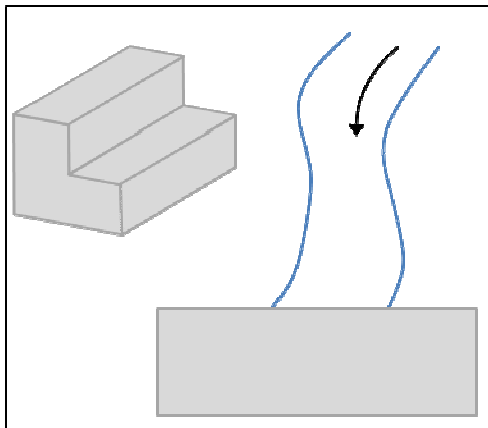


Figura 4.12. Otro esquema de una estructura tipo gavión más sencilla

Este tipo de estructura no es ya posible aplicarla en el AVQ ya que los ríos y arroyos que transitan por el área tienen un cauce muy reducido o bien ya no existen. El escurrimiento más grande que existe es el río Querétaro que funciona más bien como descarga de las aguas residuales de la ciudad.

4.5.2. Técnicas directas en el subsuelo

Si bien el aprovechamiento del agua superficial, en el AVQ, a través de la construcción de obras como las mencionadas en el apartado anterior se ve restringido, es necesario identificar otras opciones como sería la parte de la zona drenada, aunque se reitera la poca información que existe. Sin embargo, se plantean algunas obras que se puede utilizar.

- **Pozos de inyección o pozos de recarga**

Los pozos de recarga vertical pueden ser con o sin inyección en el fondo.

Agujero de infiltración

- Adecuado para niveles de agua no muy profundos (10 a 20 m).
- Cuando hay presencia de un estrato de arcilla de por lo menos cinco metros.
- Efectivo en áreas con recarga vertical reducida.
- Aprovecha grandes cantidades de agua para recarga.
- Es efectiva con aguas que contienen limo (es necesario utilizar filtros de arena, grava y cantos rodados).
- La relación de la recarga depende del material del acuífero y del contenido de limo en el agua.
- Las características de este tipo de pozo se muestra en la **Figura 4.13**.

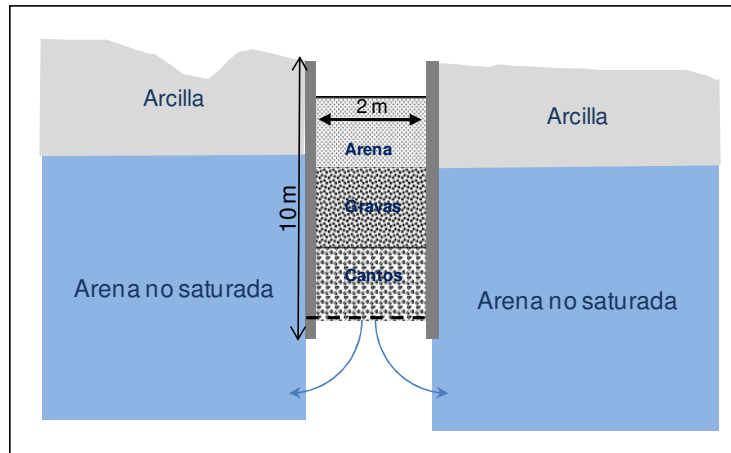


Figura 4.13. Esquema de un pozo de recarga

- **Agujero con pozo**

Consiste en construir un pozo de inyección con un diámetro determinado en el fondo de un agujero de diámetro mayor. En la **Figura 4.14** se muestra el esquema de este tipo de estructura.

- Adecuado para niveles de agua profundos, encima de 15 m del nivel estático y de preferencia que la última capa de este pozo llegue a un horizonte arcilloso.
- Cuando hay presencia de un estrato de arcilla de por lo menos 15 m antes de llegar al nivel estático.
- Puede colocarse sobre o debajo del nivel estático, en el segundo caso aplicando las normas que marca la CONAGUA.
- Su eficiencia es alta, siempre y cuando no se inyecte agua con sedimentos.
- Aprovecha grandes cantidades de agua para recarga.

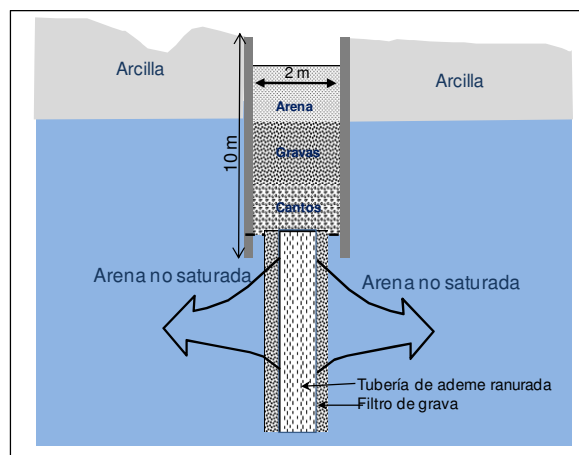


Figura 4.14. Esquema de un pozo de recarga con pozo de inyección

- **Pozos de recarga lateral**

Consiste de una trinchera de cuatro a ocho metros de largo por dos metros de ancho y de dos a tres metros de profundidad. Es semejante al agujero de infiltración, sólo cambian las dimensiones.

- Son adecuados cuando existen áreas permeables con horizontes arenosos debajo de los tres metros de profundidad.
- Si es factible construir pozos de inyección el esquema se presenta en la **Figura 4.15**.
- Existen volúmenes importantes de agua superficial.

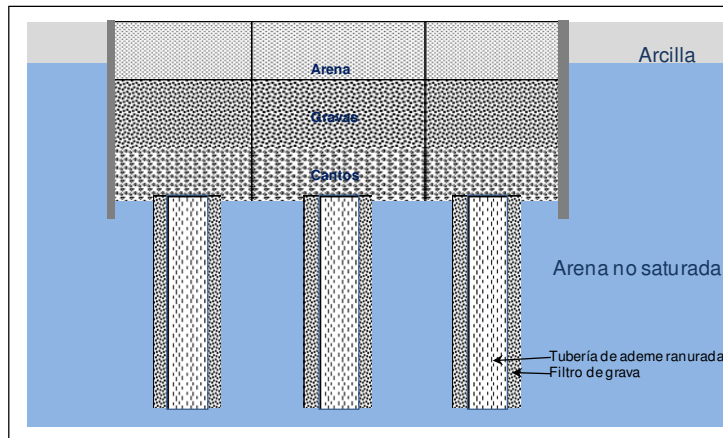


Figura 4.15. Esquema de un pozo de recarga con varios pozos

Para este tipo de casos, el agua proveniente de los techos de las casas, industrias y centros comerciales serían la fuente de abastecimiento principal, previo un tratamiento de las aguas para eliminar contaminantes.

- **Recarga artificial a través de pozos de inyección**

Los pozos de inyección son estructuras de diámetro pequeño (12" a 22" de diámetro) a través de los cuales se inyecta agua a presión para desplazarse en el acuífero. **Figura 4.16**.

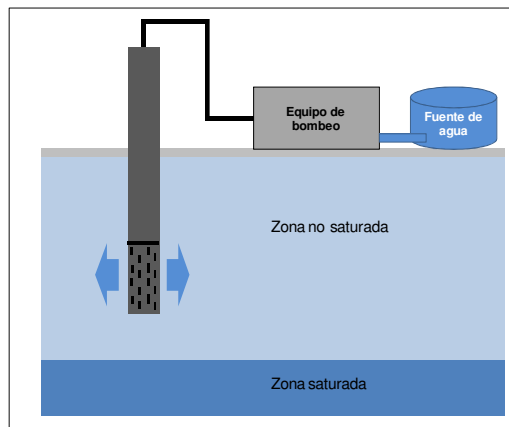


Figura 4.16. Esquema de un pozo de inyección

A través de esta técnica el agua se conduce de manera directa al acuífero evitando pérdidas por evaporación. Es muy efectiva en rocas fracturadas o rocas kársticas, sin embargo, es necesario asegurar la calidad del agua para evitar por un lado la obstrucción del pozo por bacterias, precipitación química o depósito de limos. La selección del sitio requiere de un conocimiento hidrogeológico a detalle.

La efectividad de la inducción del agua hacia el acuífero está condicionada por el bombeo, la permeabilidad, la distancia a la corriente superficial, el gradiente hidráulico y tipo de pozo. Requiere de mantenimiento periódico.

- **Recarga inducida**

Es un método indirecto que involucra bombeo desde un acuífero, hidráulicamente conectado con el agua de la superficie, para inducir una recarga a un lugar en particular. Cuando un cono de abatimiento intercepta una frontera de recarga de un río, por ejemplo, una conexión hidráulica se establece con la fuente superficial, la cual inicia proveyendo parte de la producción del bombeo. En este tipo de método no existe una construcción artificial. En la **figura 4.17** se muestra una de las tantas formas que se presentan. Para el caso del AVQ las dos corrientes de agua superficial quedan, hoy en día, a cuando menos 80 m de distancia de la zona saturada, lo cual implica que éstas deberían de funcionar como aportadoras de agua al acuífero. Hay que mencionar que el agua que transita por estas corrientes, es agua residual con un tratamiento mínimo, situación que debe contemplarse con un monitoreo sobre la calidad del agua en las captaciones cercanas para conocer si hay contaminación o no del acuífero; además, de identificar si existe un cuerpo arcilloso que funcione como filtro de estas aguas previo a su llegada a la zona saturada.

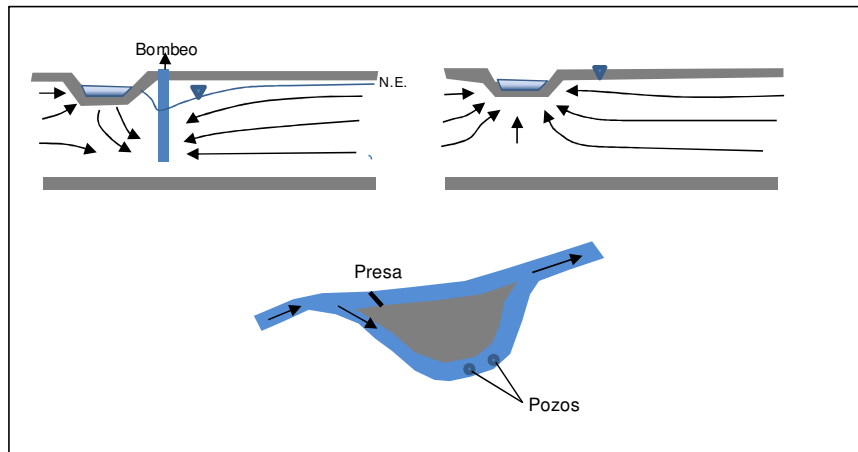


Figura 4.17. Recarga inducida

4.5.3. Dificultades y retos en la estimación de la recarga

La cuantificación de la relación recarga natural – recarga inducida es un prerequisite necesario para la eficiente administración del recurso agua. Para zonas como el AVQ es indispensable conocerla, ya que es la llave para sustentar el desarrollo económico de la zona.

Hasta este momento se han presentado algunas formas en que se puede inducir el agua al subsuelo, no se ha hablado de un método que permita estimar la recarga, la realidad es

que cada zona en particular tiene que tratarse de acuerdo a las necesidades, disponibilidad y calidad de la información.

Los métodos para cuantificar la recarga son de tipo no lineal orientado a la recarga en función del tiempo, en la distribución areal, en la escasez de datos hidrogeológicos y en las complejidades que se planteen en la ecuación de balance.

Por estas consideraciones la propuesta de diseño de un programa de infiltración debe diseñarse con flexibilidad para no hacer cambios radicales al momento de ejecutar las obras, específicamente en el cálculo de los volúmenes disponibles para llevar a cabo este proceso.

4.6. Métodos para estimar la recarga

La estimación de la recarga debe tratarse como un proceso permanente en el cual se estén adquiriendo datos relacionados con la disponibilidad y consumo del agua, para ello se requiere de varias técnicas de adquisición y cálculo. En el inciso 4.2 se habló de la necesidad de contar con información, así como el tipo de información mínima necesaria para llevar el control del acuífero y poder realizar los cálculos para determinarla. Asimismo, se requiere tener una buena conceptualización de los diferentes mecanismos de recarga y su importancia en el área de estudio.

Para identificar los probables mecanismos de flujo en un lugar específico, se requiere examinar las evidencias de campo detalladamente.

Una vez que el mecanismo de recarga se define, se deben realizar varias pruebas que permitan tener una idea más acertada del valor obtenido y tomar en consideración los siguientes cuestionamientos:

- ¿Cuánta recarga el acuífero puede aceptar? Un acuífero con disponibilidad y poca zona drenada no puede acumular más agua y buscará la forma de eliminar el volumen excedente.
- ¿Cuánta agua puede transmitir la zona drenada? Relaciones de alto potencial de recarga no pueden transmitir agua en estratos de baja conductividad hidráulica.
- ¿Qué otros factores se pueden considerar para incrementar la recarga?
- ¿Cuál es el potencial de recarga de la región?
- ¿Cuál es la recarga actual? Este punto considera el balance hídrico y los destinos del agua disponible.
- ¿Se hace comparación con otras estimaciones?

La llave para contar con un valor lo más acertado posible depende de la cantidad, calidad de los datos e información disponible. Esto significa la necesidad de realizar investigaciones múltiples organizadas y orientadas al objetivo principal, la recarga del acuífero.

Aunque no es el objetivo de este trabajo, es necesario plantear las técnicas que se utilizan para estimar el valor de la recarga, haciendo hincapié que por el tipo de estudios e información actualmente disponible en el AVQ, el método de balance integral de aguas subterráneas y superficiales es el valor que da una idea de la situación que guarda este acuífero en cuanto a la recarga.

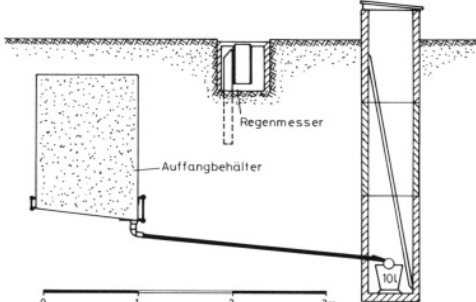
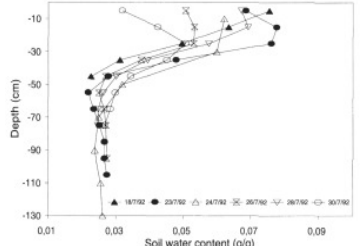
Debe realizarse de manera anual, ya que el crecimiento poblacional, el incremento de la mancha urbana y la disminución de la “probable” recarga, se requiere para hacer replanteamientos en cuanto a la planeación que se tiene para el desarrollo sostenido de la región a nivel federal, estatal y municipal.

Los métodos de estimación de la recarga se dividen en:

- Mediciones directas.
- Balance de aguas.
- Métodos darcianos. Estiman el flujo a través de la carga y conductividad hidráulica.
- Métodos de trazadores Se aplican tanto en la zona saturada como en la no saturada, pueden rastrear movimientos de agua sobre largos lapsos de tiempo.
- Métodos geofísicos.

En la **tabla 4.1** de detallan sus características y ventajas y desventajas.

Tabla 4.1. Métodos para estimar la recarga

Tipo	Formas de medición	Características:	
<p>Mediciones directas</p>	<p>Lisímetros</p>	<p>Es un instrumento que se usa para medir y monitorear el movimiento del agua y los compuestos químicos que se filtran en los suelos.</p> <p>Se utiliza para medir el contenido de agua de los suelos.</p>	<p>Medición: $EVR = P - Q \pm VR$. Estimación del valor de la Recarga = Precipitación – Caudal/drenaje +/- Variación Reserva de agua.</p> <p>Ventajas: Mide directamente la infiltración Es un buen estimador a profundidades superiores a 2 m. Caracteriza y evalúa la relación “agua - suelo - planta”. Calcula las necesidades de agua de cultivos bajo riego o no.</p> <p>Desventajas: Los valores se afectan si el relleno es distinto a suelo natural, por textura, estructura, uso, compactación, porosidad, etc. Imposibilidad del movimiento horizontal del agua. Método laborioso y costoso. La medición de EVR es puntual.</p> 
	<p>Balance de humedad del suelo a través de sondas de neutrones o reflectometría en el dominio del tiempo</p>	<p>Método para determinar el contenido de agua en el suelo.</p>	<p>Ventajas: Monitoreo de desarrollo temporal del contenido de agua en el suelo.</p> <p>Desventajas: Se aplica sobre pequeñas muestras, alto costo.</p> 

Tipo	Formas de medición	Características:	
	Manantiales o curvas de flujo de ríos	En este método se aplica término del paso de una corriente extraordinaria o de lluvia, los valores se grafican en un papel y tiene un comportamiento exponencial.	<p>Ventaja: Es un método integrador. Se pueden utilizar cargas hidráulicas.</p> <p>Desventaja: El método es sólo aplicable cuando hay manantiales o corrientes perennes, así como conocer la porosidad o coeficiente de almacenamiento.</p>
	Relación lluvia-recarga	Es una práctica común expresar la recarga como un porcentaje de lluvia. Sin embargo, no es claro identificar de dónde proviene esta consideración.	<p>Ventaja: Es un método muy sencillo.</p> <p>Desventaja: Para establecer esta relación se requiere de un método fidedigno para determinar la recarga.</p>
Métodos darcyanos	Ley de Darcy en la zona no saturada		<p>Ventaja: Todas las incógnitas de la ecuación de Darcy son medibles.</p> <p>Desventaja: La conductividad hidráulica del suelo no se conoce con exactitud debido a las heterogeneidades y varía con el grado de saturación.</p>
	Ley de Darcy en la zona saturada basada en pruebas de bombeo y medición de cargas hidráulicas		<p>Ventaja: Todas las incógnitas de la ecuación de Darcy son medibles. La conductividad hidráulica es constante en un tiempo en el medio saturado.</p> <p>Desventaja: La conductividad hidráulica no se conoce con exactitud debido a las heterogeneidades de la zona saturada.</p>
	Modelo de flujo		<p>Ventaja: Utiliza mucha información y puede combinarse con un modelo de transporte de contaminantes.</p> <p>Desventaja: Se requiere de la calibración del modelo. La calibración con cargas hidráulicas puede ser no única. Se pueden aplicar muchas combinaciones de relaciones de recarga y transmisividades.</p>
Métodos de trazadores	Método de cloro	<p>Se basa en el hecho de que el agua de lluvia contiene cloro. Durante la evaporación la concentración se incrementa.</p> <p>Es un buen medidor de flujo.</p>	<p>Ventaja: El cloro es un trazador que indica evaporación.</p> <p>Desventaja: Hay situaciones en que el método falla, específicamente cuando hay fuentes de cloro en el suelo.</p>
	Método de tritio		<p>Ventaja: Es un marcador de tiempo debido a su decaimiento radiactivo. Se mueve con la molécula de agua y por tanto se utiliza para determinar edad.</p> <p>Desventaja: La vida del tritio es de 13.2 años. Se requiere de conocer o tener una estimación de la porosidad. Es relativamente sencillo de aplicar en medios granulares y difícil en fracturados.</p>
Otros métodos	Tritio-Helio	Se basa en la composición isotópica del agua de	Ventaja: Es posible verificar la infiltración lateral a partir de

	Carbono 14 Cloro 36 Bromuro CFC SF6 Sensores remotos	<p>lluvia así como del agua infiltrada. Conforme el agua se va evaporando la concentración de isótopos aumenta. Son concentraciones tan bajas que solo se pueden medir gracias a la radioactividad de los mismos.</p> <p>Proporcionan información sobre el tiempo de tránsito o de renovación del agua.</p>	<p>ríos, lagos ó infiltración vertical de agua estancada.</p> <p>Desventaja: Registra cualquier variación climática durante el tiempo de recarga</p>
--	---	---	---

- **Métodos geofísicos**

Este método se tratará de manera independiente a lo ya expuesto, consiste en obtener una imagen eléctrica del subsuelo en cuatro dimensiones, esto es, considera el cuerpo o la zona donde se pretende evaluar la infiltración y el tiempo de ejecución, el cual considera realizar medidas en determinados horizontes de tiempo para ver el comportamiento de la resistividad de una zona cuando se le inyecta agua o una solución salina.

Esta técnica se aplica para delimitar plumas de contaminación, sin embargo, puede utilizarse para conocer el movimiento del agua subterránea hacia el subsuelo. En la **Figura 4.18** se muestra un bloque donde se observan diferentes colores, asociados a valores de resistividad. Si las mediciones se realizan a diferentes intervalos de tiempo, se puede ver el comportamiento de la resistividad y asociarlo a la movilidad del fluido. Es un buen estimador para definir la conductividad hidráulica, Su única limitante es la profundidad de investigación, no más de 100 m, los cuales son suficientes para conocer el comportamiento de la zona drenada del AVQ.

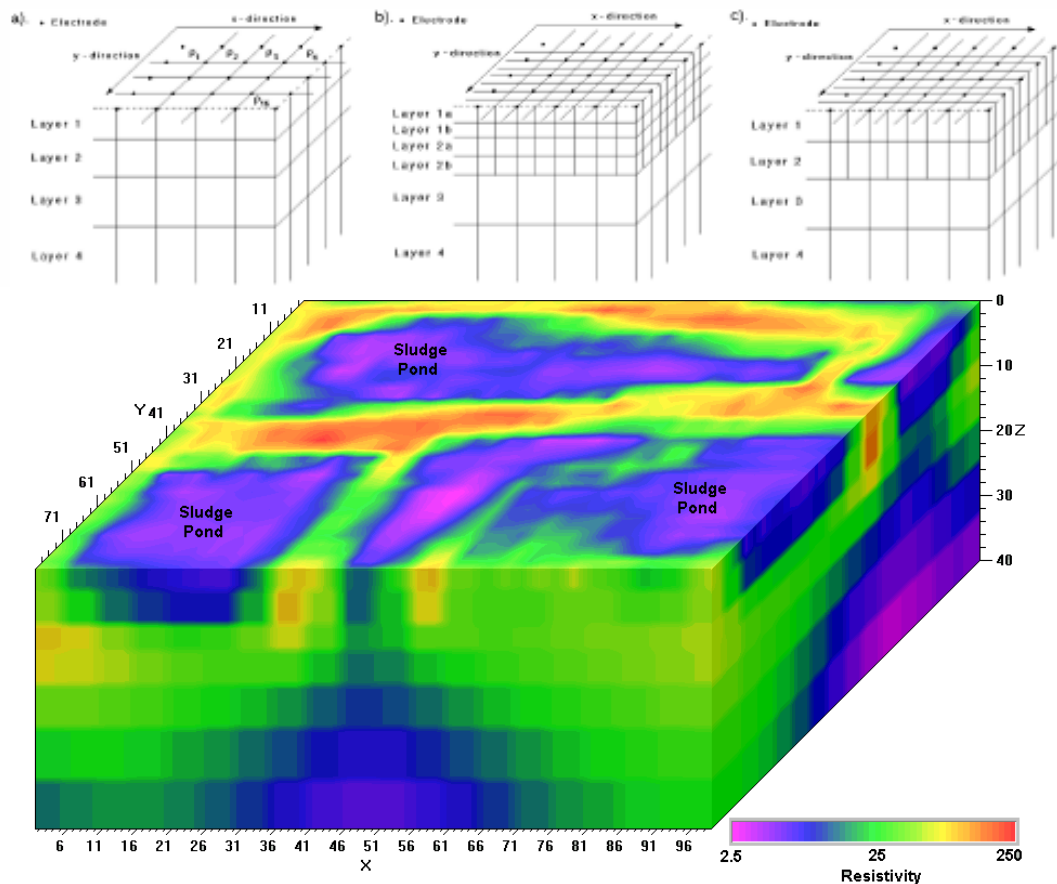


Figura 4.18. Aplicación del método eléctrico para conocer las características de la zona drenada.

Es preciso tener en mente que en el AVQ su zona drenada es de más de 100 m, integrada principalmente por material vulcanosedimentario y coladas de basalto e

ignimbrita. De acuerdo a la información de los estudios realizados la unidad hidrogeológica tiene un valor de transmisividad de $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ y conductividades hidráulicas de 0.32 a 1.0 m por día. Esto indica que una gota que se introduzca al acuífero a partir de la zona libre de evapotranspiración tardará en llegar al acuífero entre 80 y 250 días, lo cual no se refleja en el comportamiento del nivel estático con una recuperación.

4.7. Proceso de infiltración del agua para el acuífero del valle de Querétaro

El balance integral de las aguas superficiales y subterráneas involucra los conceptos que se muestran en la **Figura 4.19**. Se propone tomando en consideración la NOM-011-CONAGUA-2000.

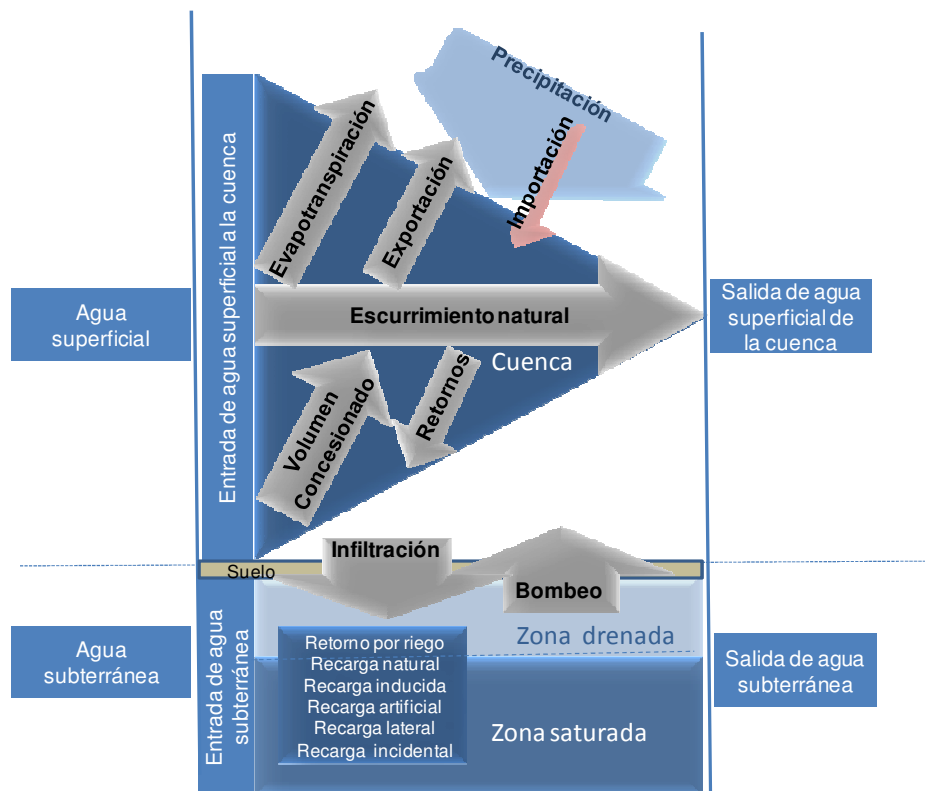


Figura 4.19. Modelo del balance integral de aguas para el AVQ

Si bien la normatividad indica algunos procedimientos para el cálculo individual de los balances superficiales y subterráneos para llegar al cálculo de la disponibilidad, en este trabajo se orientará a definir el proceso para infiltrar el agua y los mecanismos que deben realizarse para llevarlo a efecto.

Para este trabajo se entenderá por proceso al conjunto de actividades o tareas, mutuamente relacionadas entre sí, que admite elementos de entrada durante su desarrollo ya sea al inicio o a lo largo del mismo, los cuales se administran, regulan o auto

regulan bajo modelos de gestión particulares para obtener elementos de salida o resultados esperados.

Dentro del proceso, hay un tratamiento de entradas de diversos tipos en cada actividad o tarea agregándoles valor, de tal manera que se cumplan los requerimientos o necesidades que se proponen. En la **Figura 4.20** se plantea la propuesta del modelo de proceso para incrementar la infiltración en el AVQ, donde se presentan diez subprocesos los cuales deben ser administrados por una instancia (COTAS, organismo operador de agua u otro) por definir en el modelo de gobierno y además, estar respaldada con una cultura de cambio orientada en valores de sustentabilidad, compromiso, aprovechamiento del agua, monitoreo, participación y ecología.

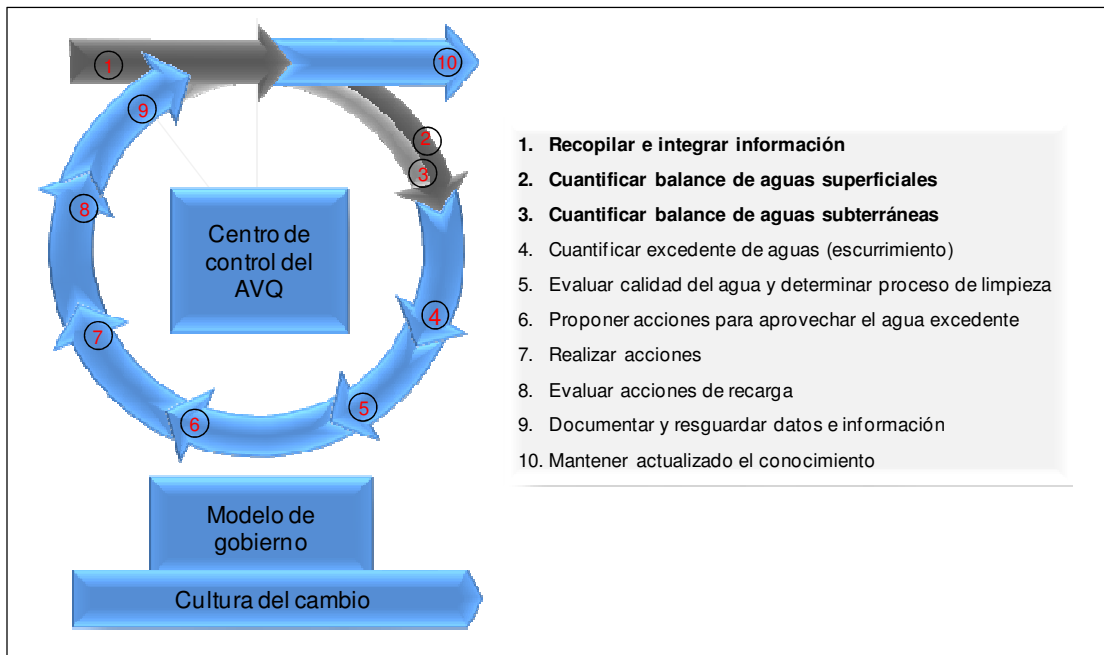


Figura 4.20. Propuesta de modelo del proceso para la infiltración de agua en el AVQ

En la **Tabla 4.2** se describen los objetivos y la visión actual que se tiene sobre cada uno de los subprocesos propuestos.

Tabla 4.2. Propuesta de proceso con objetivos y situación actual

Proceso / subprocesso	Objetivo	Situación actual
Infiltración de agua en el AVQ	Aprovechar el agua excedente de la precipitación que transita en la cuenca del AVQ, así como el agua residual proveniente del acuífero que ha sido utilizada con fines público-urbano e industrial, para reincorporarla al subsuelo, a través de diferentes mecanismos, con el propósito de mantener o aminorar la explotación intensiva del acuífero y sustentar el desarrollo socioeconómico al acuífero.	A pesar de la normatividad no se tiene un conocimiento integral de la situación que guarda el AVQ ni existen acciones para sustentar la actividad socioeconómica que se realizan en él.
1. Recopilar e integrar información.	Conocer la situación actual que guarda el agua con base en la información disponible que sea de apoyo para proponer las acciones de mejora o correctivas que permitan la sustentabilidad del acuífero.	Mucha información dispersa.
2. Cuantificar balance de aguas superficiales.	Conocer la magnitud de la disponibilidad de agua superficial.	Se tiene un valor de la disponibilidad, sin embargo, los valores no son confiables por la falta de información actualizada.
3. Cuantificar balance de aguas subterráneas.	Conocer la disponibilidad de agua subterránea.	Se tiene un valor de la disponibilidad, sin embargo, los valores no son confiables por la falta de información actualizada.
4. Cuantificar el excedente de aguas (escurrimiento).	Conocer el volumen de agua de escurrimiento que se puede aprovechar en el AVQ.	Se cuenta con valores estimados.
5. Evaluar calidad del agua y determinar proceso de limpieza.	Conocer la calidad de aguas que se van a aprovechar para definir el tipo de tratamiento que se les puede aplicar.	Se cuenta con pocos valores e información dispersa.
6. Proponer acciones para aprovechar el agua de escurrimiento excedente.	Definir actividades técnicas, legales, sociales y obras de construcción.	Existen propuestas aisladas que en lugar de beneficiar perjudican al acuífero (recarga de acuíferos sin un sustento técnico del conocimiento integral de la situación).
7. Realizar acciones.	Construir obras de ingeniería y desarrollar una cultura de cambio para aprovechar el agua.	Existen obras aisladas, plantas de tratamiento que vuelven a verter el agua a los cuerpos de agua superficial. Hay muy pocas obras para captar el agua superficial en las cuales la mayoría no cumple con la NOM-015-CONAGUA-2007. No hay cultura para el aprovechamiento del agua residual.
8. Cuantificar volumen de recarga.	Evaluar las acciones desarrolladas y proponer acciones de mejora al proceso.	El único valor "confiable" es la cuantificación de la recarga con base en el balance de aguas subterráneas, sin embargo, no está actualizado.
9. Documentar y resguardar datos e información.	Administrar el conocimiento del AVQ.	Se tiene información en computadoras personales y en la cabeza de los técnicos, no está disponible.
10. Mantener actualizado el conocimiento.	Sustentar las actividades socioeconómicas del AVQ.	Si no se toman medidas inmediatas la sustentabilidad del acuífero está en riesgo.
11. Desarrollar un modelo tridimensional	Tener una visión clara de la situación actual del acuífero. Plantear diferentes escenarios y predecir cuál será su comportamiento.	No se cuenta con un modelo bien desarrollado, para la gestión del acuífero.

5 Propuesta de proyecto para infiltración de agua al acuífero del valle de Querétaro

Hasta ahora se ha integrado la información disponible tanto de estudios que se encuentran específicamente en la biblioteca de la CONAGUA, de las normatividades e información que se encuentra en hojas web.

5.1. Situación del acuífero del valle de Querétaro

El manejo del AVQ ha tenido importantes transformaciones derivadas de la necesidad de contar con el vital líquido; como se mencionó en capítulos anteriores el inicio del conocimiento de este acuífero data de 1970, y a través de los años se han presentado diferentes etapas, desde la obtención de datos, la generación de información, el conocimiento de las condiciones tanto superficiales como subterráneas de manera individual y en estos momentos, a partir del decreto estatal sobre el Ordenamiento Ecológico del estado de Querétaro, en el que se dictan una serie de lineamientos, que buscan el conocimiento y ordenamiento del entorno ecológico. **Figura 5.1.**

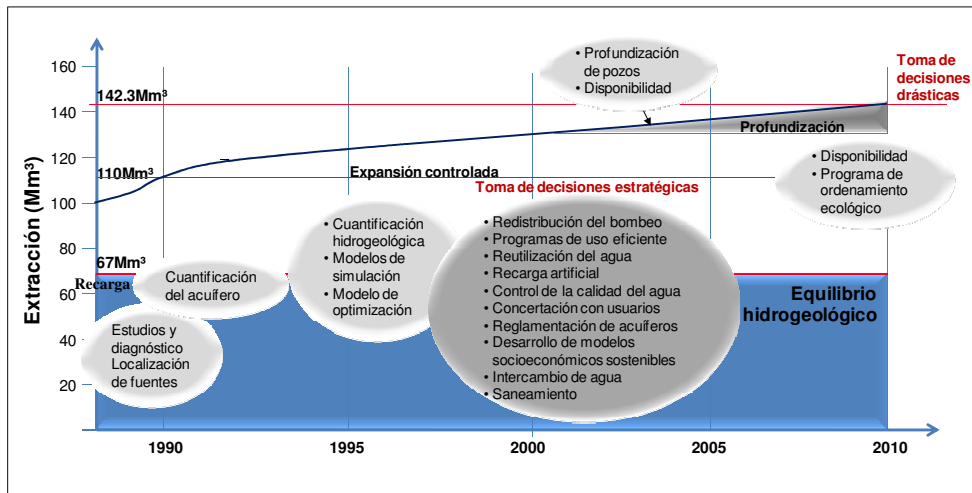


Figura 5.1. Evolución del AVQ en materia de información y toma de decisiones

Sin embargo, la situación del AVQ no implica sólo la generación de lineamientos sino definir y realizar acciones que permitan la sustentabilidad del acuífero. De no tomarse decisiones drásticas la vida de este acuífero pondrá en riesgo el equilibrio ecológico y su sustentabilidad, no solo de la parte de su territorio, sino de los acuíferos aledaños.

Una situación que se observa es la falta de recursos económicos y humanos que enfrenten el reto. Por lo que respecta al factor económico, muchas son las restricciones a nivel federal y estatal, dado que existe una gran variedad de necesidades que cubrir con un presupuesto muy limitado. Por otra parte, la CEA y algunas instancias de gobierno federal y estatal cuentan con personal para enfrentar el reto, es notorio ver la que el personal que ha estado en contacto directo con la evolución del acuífero es la misma, no hay gente nueva que se esté capacitando,

además, el conocimiento generado está más bien en la cabeza de cada uno de los técnicos o enterrada en sus computadoras personales.

Esta situación es recurrente no sólo para el caso actual, sino más bien es de cultura a nivel nacional. No se tiene la capacidad de generar bases de datos integradas, con una taxonomía que permitan identificar y localizar la información en el momento preciso. Lo anterior ocasiona que se tengan que rehacer estudios, retrabajo. Por ejemplo; en el AVQ se han generado por lo menos cuatro modelos de flujo matemático (dos de la CEA, uno de la CONAGUA y otro más de la Universidad Autónoma de Querétaro), de los cuales no se aprovecha su potencial.

Si bien el Ordenamiento Ecológico Estatal es medio para iniciar las acciones, deben considerarse ciertos factores adicionales para que este ordenamiento se lleve a cabo:

- **Conocimiento integral del AVQ.** La evolución acelerada del acuífero así como del crecimiento poblacional, limitan a las instancias de gobierno a plantear programas de sustentabilidad. Por lo anterior es necesario mantener la información del AVQ actualizada y contar con modelos de predicción que permitan plantear escenarios sobre su comportamiento, específicamente sobre:
 - **Agua superficial.** Si bien, con base en la información recopilada no existe disponibilidad de agua superficial; sin embargo, año con año se presentan inundaciones, existe una red de drenaje superficial de drenes y bordos con el propósito de atenuar la problemática. Mucha de esta agua se evapora o bien se conduce hacia la corriente principal para perderse en la cuenca aguas abajo. Sobre este punto, el agua superficial –excedentes- es el recurso viable que permite aminorar la futura escasez del recurso. El volumen medio de escurrimiento natural anual que tiene el AVQ es de 128.9 Mm³. Considerando que de este valor, únicamente el 20% equivale al área urbana, se estima que se cuenta con un volumen del orden de 26 Mm³ que podrían utilizarse para infiltración.
 - **Agua subterránea.** El acelerado abatimiento de los niveles de agua subterránea en el AVQ han ocasionado daños a la infraestructura civil, modificaciones a las estructuras geológicas, contaminación y sobre todo, una pérdida de la capacidad de almacenamiento de agua para sustentar la vida en este acuífero. Se cuenta con una zona drenada y potencial de aprovecharse de más de 50 m de espesor. Con base en la información disponible en el AVQ se genera un volumen medio anual de aguas residuales de 43.3 Mm³. Mismo volumen que con el tratamiento adecuado se podría estar utilizando para la infiltración.
 - **Calidad del agua.** En la medida que los niveles se profundicen los efectos la calidad del agua serán más acentuados, teniendo que invertir –si existe agua a mayor profundidad- en sistemas de tratamiento de agua muy costosos, que en estos momentos no son viables de implantar. Es un parámetro que debe llevar un seguimiento continuo ya que de él depende la salud de la población, la producción agrícola y la industrial. Los contaminantes que potencialmente se pueden encontrar en el AVQ son minerales pesados y compuestos orgánicos, sustancias corrosivas, explosivas, tóxicas, inflamables y biológicas infecciosas, así como fertilizantes y plaguicidas.
 - **Monitoreo continuo de los movimientos diferenciales del terreno y de fallas activas.** Esta situación es de importancia para prevenir riesgos tanto de pérdida de vidas humanas como deterioro de la infraestructura civil urbana.

- **Cultura del agua.** A pesar de que existe, a través de la CEA, un programa de cultura sobre el uso del agua, ésta no ha permeado en los habitantes y en los planeadores de la ciudad. Con base en la información disponible, el equilibrio del acuífero indica que existe un déficit de 74 Mm³/año. Para que exista equilibrio deben recuperarse al menos 36 Mm³/año, que convertido a personas indica que el AVQ en condiciones de equilibrio ecológico sólo tiene la capacidad de albergar a una población de 500,000 habitantes. Ante la situación actual es necesario plantear una cultura del agua más agresiva.
- **Planeación.** Con base en el punto anterior, es necesario que las autoridades federales y locales marquen un lineamiento sobre el crecimiento que debe llevarse en el territorio del AVQ, y sobre todo proteger las áreas que actualmente no están construidas. A pesar de que existen ocho áreas ecológicas “protegidas”, éstas no se respetan. Lo anterior implica tomar decisiones severas sobre cuál es la perspectiva de sustentabilidad (crecimiento poblacional e industrial) para mantener un equilibrio.
- **Naturaleza.** Los cambios climáticos que se presentan actualmente generan mucha incertidumbre sobre el comportamiento de la naturaleza, si bien la temperatura se está incrementando, el comportamiento del agua es incierto, las condiciones climáticas son variables, lo que sí es una realidad es que al actual crecimiento que tiene el AVQ no habrá disponibilidad de agua a mediano plazo.
- **Costo del agua.** En la medida de que el agua sea más escasa (por encontrarse a mayor profundidad o bien por falta de precipitación) el costo será mayor. Se tiene planeado acarrear el agua de otras áreas (Extoraz y El Batán), la experiencia que se tiene con la capital del país es un ejemplo de lo que no debe hacerse, ya que por tratar de mitigar una situación local se ocasionan daños más graves a los entornos externos. Es necesario replantear un equilibrio interno sobre el manejo del recurso y sobre todo darle el valor real al recurso.
- **Preparación de personal técnico.** Las personas son las que generan el conocimiento, para el caso del agua, se requiere contar con personal capacitado para que maneje el recurso y tome las decisiones adecuadas. Es necesario llevar programas de actualización permanente del personal que enfrente hoy la problemática y sobre todo, formar nuevas generaciones de técnicos para que enfrenten el reto con los conocimientos adecuados.
- **Marco legal.** Es necesario tomar medidas de carácter legal en cuanto al uso del suelo: limitar el crecimiento urbano y mantener la actual área agrícola.

Bajo esta perspectiva, es necesario buscar alternativas que permitan sostener el crecimiento poblacional e industrial y sobre todo mantener la producción agrícola, específicamente las zonas de cultivo

Con base en el proceso planteado en el capítulo 4 sección 4.8, en la información disponible -capítulo 2-, en la interpretación y aplicación de la normatividad -capítulo 3-, en este capítulo se procede a realizar la propuesta para infiltrar agua en el AVQ. Sin embargo, primero es necesario plantear la estrategia sobre el manejo integral del agua.

La propuesta se basa en el planteamiento de actividades y obtención de datos e información que se requiere, de la cual se adolece de bastante, sin embargo, con fines de favorecer el proceso de infiltración y recarga al acuífero, se plantean algunas acciones y obras de ingeniería.

Se retoman los factores que deben considerarse dentro del proceso, (clima, geología, superficie, tenencia y uso de la tierra, morfología, topografía, calidad del agua, costo, administración y jurisprudencia), los cuales son vitales y están enfocados al aprovechamiento óptimo del agua de escurrimiento excedente, producto tanto de las aguas de lluvias como de las aguas provenientes de los pozos profundos. Como

beneficios adicionales están: el reuso, la recarga al acuífero, la reducción de la evaporación y evitar la pérdida de suelos.

En la **Figura 5.2** se describen los cambios que debe promoverse en el AVQ para que sea sustentable.

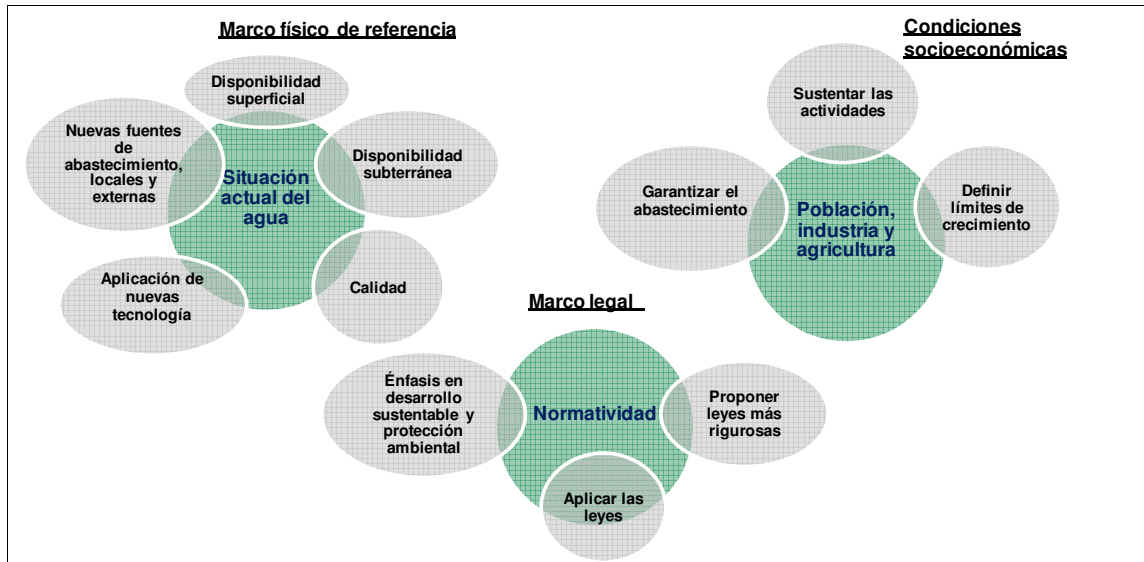


Figura 5.2. Elementos del entorno que inciden en el AVQ

Una de las primeras conclusiones que se pueden inferir de la figura es la mayor complejidad de los proyectos por realizar en el futuro, lo que implica que su costo se irá incrementando de acuerdo a la complejidad que se presente.

Es un hecho que se requerirá poner mayor atención en los temas de uso eficiente del recurso, lo que implica la necesidad de invertir en capacitación del personal que enfrente el reto del cambio climático, así como en materia de relaciones con la comunidad para hacer concertaciones que garanticen una afinidad entre las instancias responsables del agua y la sociedad.

Asimismo, se deberán fortalecer los esquemas de supervisión de la evolución del AVQ, así como generar un programa de comunicación más agresivo sobre el uso y manejo del agua.

5.2. Ciclo de vida del acuífero del valle de Querétaro

El ciclo de vida de un acuífero inicia en la etapa de exploración, pasa a desarrollo (perforación) y producción (abastecimiento); en la medida que pasa el tiempo y se incrementan las actividades socioeconómicas aumenta la necesidad de contar con mayor cantidad de agua. Se llega a un punto de desequilibrio donde la extracción supera en demasía la recarga, situación que requiere de perforar a mayor profundidad –si las condiciones son favorables- para mantener o incrementar la producción y se llega al límite técnico donde la tecnología no es suficiente o bien el acuífero llegó al basamento. Para el caso del AVQ se estima se encuentra en estos momentos en etapa de profundización muy cerca de llegar al límite técnico. **Figura 5.3**

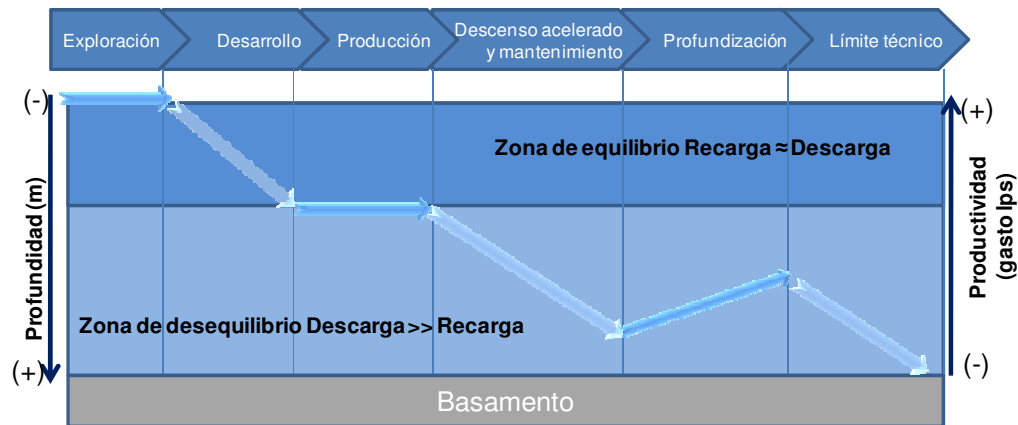


Figura 5.3. Ciclo de vida de un acuífero

5.3. Estrategia para el rescate del acuífero del valle de Querétaro

La historia ha mostrado que a pesar de haber realizado una infinidad de estudios de factibilidad hidrogeológica, estudios de exploración geológica y geofísica, perforaciones de pozos, estudios de calidad del agua, identificación de zonas vulnerables y de riesgo, no se cuenta con el conocimiento integral del comportamiento del AVQ, lo anterior reduce la oportunidad de:

- Planear las necesidades en el corto, mediano y largo plazo del recurso.
- Ordenar el crecimiento de las ciudades.
- Dar continuidad a proyectos.
- Prevenir riesgos.
- Tomar decisiones oportunas sobre el uso, manejo y distribución del recurso.

Por otra parte, en la **Tabla 5.1** se plantean algunas de las situaciones que no permiten el logro de los objetivos en materia del recurso agua.

La estrategia para el rescate del AVQ se enfoca en el establecimiento de una sola directriz, **el manejo ordenado del recurso agua**, haciendo énfasis en la información generada a la fecha, que es la base para conformar el contexto hidrogeológico, el cambio de cultura sobre el uso del agua y la identificación de necesidades actuales y futuras de agua. **Figura 5.4.**

El manejo integral requiere de una serie de acciones concretas que permitan mantener el conocimiento de la situación que guarda el agua en el AVQ, por lo que también es necesario contar con el apoyo de la población, de técnicos especialistas, de tecnología actualizada y de procesos. Además, se requiere de establecer un programa de comunicación que concientice a la gente, así como el desarrollo de políticas sobre su uso y gobernabilidad para que el agua sea sustentable. Todo lo anterior debe estar integrado en una plataforma informática que permita visualizar la información y sea la herramienta donde se documenten las acciones y sustente la toma de decisiones.

Tabla 5.1 Nuevo enfoque sobre la estrategia del manejo del AVQ

Situación actual	Enfoque propuesto
Proliferación de estudios de factibilidad que sirven sólo para cubrir el requisito para la perforación de pozos.	➔ Contar un proceso que permita la toma de decisiones sobre perforar o no pozos, así como garantizar un caudal mínimo esperado.
Perforaciones de pozos sin control de las actividades que se realizan y con información limitada de su construcción.	➔ Documentar la perforación con base en un proceso donde se incluya el corte litológico del pozo con análisis petrográfico, registro de pozo de cuando menos nueve curvas, procesado e interpretado. Reforzar o replantear la norma NOM-003-CONAGUA-1996.
Falta de un proceso para el manejo integral del agua en el estado de Querétaro.	➔ Formalizar el plan para el manejo integral propuesto, basado en la disponibilidad del recurso.
Personal con conocimientos hidrogeológicos que no ha tenido la actualización requerida.	➔ Establecer planes de seguimiento y capacitación del personal actual y preparar a nuevos técnicos.
No hay una instancia responsable de la toma de decisiones en materia de agua.	➔ Reasignar responsabilidades a los COTAS y establecer un cuerpo de gobierno independiente a las decisiones de tipo político.
No hay continuidad en los proyectos ni recursos económicos suficientes.	➔ Contar con un Centro de Control del AVQ donde se concentren los datos, información y conocimiento y se generen los proyectos.
No se documentan las acciones que se realizan sobre el agua.	➔ Contar con un proceso de administración del conocimiento que permita identificar, seleccionar, capturar, resguardar, aprovechar y evaluar el conocimiento que se genere sobre el uso y manejo del agua.

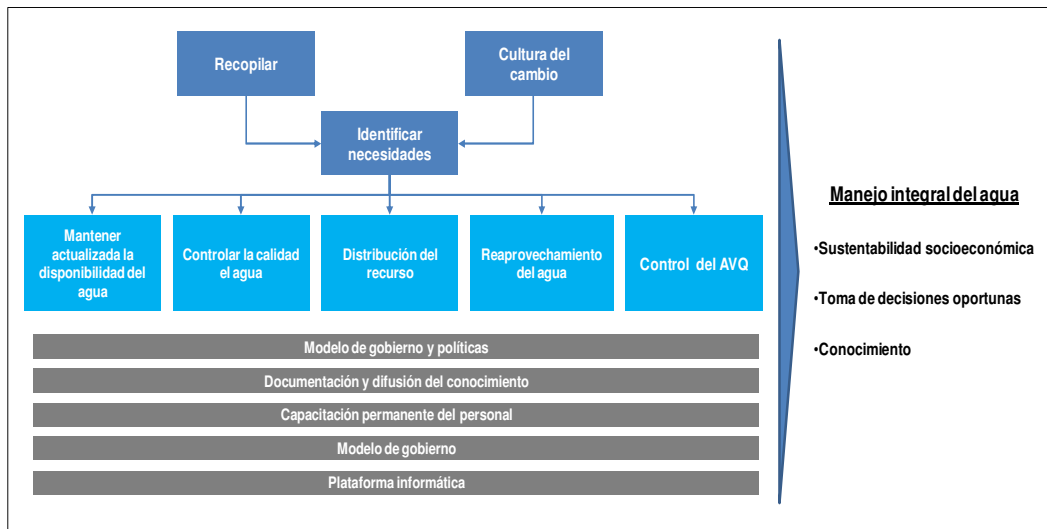
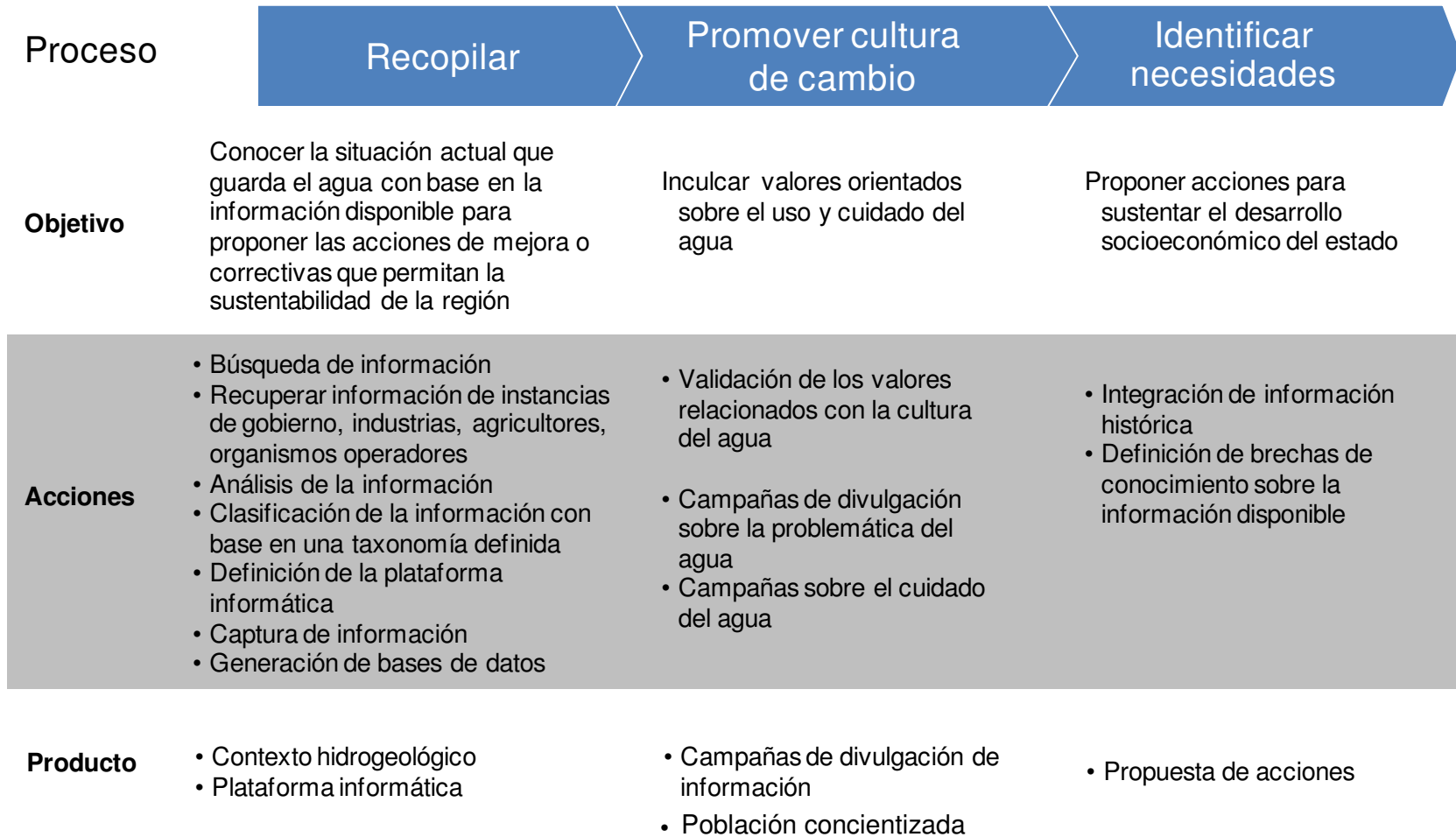


Figura 5.4. Modelo de manejo integral del agua para AVQ

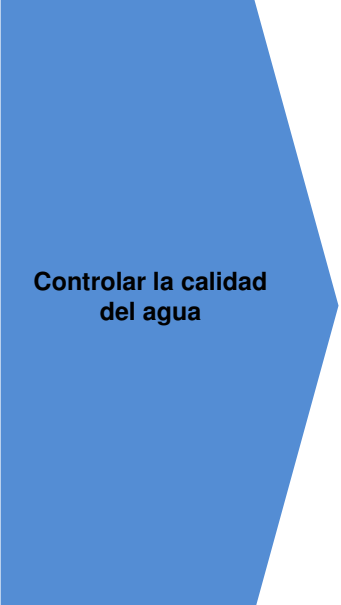
Para aterrizar la estrategia es necesario atacar sobre varios frentes, a continuación se propone el proceso.

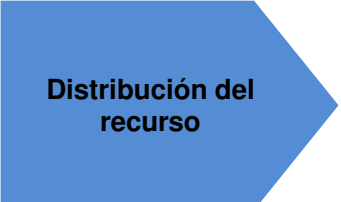
5.4.2. Proceso para definir el modelo de manejo del agua en el acuífero del valle de Querétaro




5.4.2. Acciones e implicaciones para desarrollar el modelo de manejo del agua

Subproceso	Acción	Implicaciones
<p>Mantener actualizada la disponibilidad del agua</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Sustentar el desarrollo económico del AVQ con base en la disponibilidad del agua, haciendo hincapié en los acuíferos de Querétaro y San Juan del Río – Pedro Escobedo, que por su ubicación geográfica y por la importancia que tienen en estos momentos en el entorno socioeconómico demandan más agua. • Proponer acciones inmediatas, a mediano y largo plazo que permitan un manejo ordenado del recurso. • Actualizar: <ul style="list-style-type: none"> ○ Censo de captaciones para conocer la situación de obra de las captaciones. ○ Configuración piezométrica para conocer la posición del nivel del agua. ○ Hidrometría para conocer los volúmenes de extracción • Calibrar la geometría del acuífero con base en la información geofísica de estudios de factibilidad hidrogeológica y con cortes litológicos de los pozos perforados. • Actualizar los balances tanto de agua subterránea así como superficial, donde además de la información anterior se requiere de información: <ul style="list-style-type: none"> ○ Climatológica (precipitación, escurrimiento, temperatura y evaporación). ○ Determinar el valor del volumen de evapotranspiración. ○ Calibrar el valor de infiltración. • Definir y proteger las áreas definidas como zonas de recarga. • Identificar nuevas fuentes de abastecimiento, ya sea en áreas diferentes o bien investigando a mayor profundidad. • Conocer los planes de desarrollo a nivel federal, estatal y municipal. • Mantener actualizado el modelo matemático de flujo hidráulico subterráneo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios geológicos y geofísicos de detalle, con base en el desconocimiento del área por estudiar (de acuerdo a las necesidades). • Realizar estudios de actualización de censo (anual). • Realizar campañas de medición de niveles y pruebas de bombeo (anual). • Realizar campañas hidrométricas (anual). • Conocer los planes de desarrollo. • Conocer las necesidades de agua de los usuarios (población, industria, agricultura, servicios). • Contar con información estadística de crecimiento poblacional (anual). • Crear o replantear los modelos de flujo hidráulico de los acuíferos (único). • Actualizar los modelos de flujo hidráulico de los acuíferos (anual). • Capturar la información en la plataforma informática definida o desarrollada (permanente). • Contar con información veraz de estaciones climatológicas (permanente). • Ubicar estaciones climatológicas o hidrométricas donde se adolezca de información (de acuerdo a las necesidades). • Construir infraestructura para estaciones hidrométricas (única). • Investigar, probar y validar la aplicación de nuevas tecnologías y metodologías (permanente). • Capacitación de personal.

Subproceso	Acción	Implicaciones
 <p>Controlar la calidad del agua</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar los contaminantes potenciales naturales o inducidos que pueda tener el agua subterránea o superficial • Desarrollar o actualizar el modelo matemático de transporte de contaminantes para conocer su dispersión. • Analizar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas mediante análisis de laboratorio específicos. • Proteger las fuentes de abastecimiento. • Conocer la salinidad del suelo de la zona agrícola. 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios convencionales y específicos en laboratorios sobre la calidad del agua. (anual) • Identificar los contaminantes que incidan en la salud o producción agrícola e industrial (único). • Crear modelos de transporte de contaminantes. • En las zonas agrícolas para determinar la presencia de pesticidas, fungicidas y fertilizantes (anual). • Desarrollar campañas de concientización a la población sobre la protección de fuentes. • Desarrollar infraestructura para la protección de fuentes. • Realizar estudios geológicos y geofísicos para identificar la geometría de plumas de contaminación. • Realizar estudios directos e indirectos para definir las condiciones del suelo. • Realizar estudios geotécnicos y de medio ambiente.

Subproceso	Acción	Implicaciones
 <p>Distribución del recurso</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener actualizados los planos de las redes. • Identificar los sitios donde se presentan fallas en la red de distribución. • Identificar zonas donde no llega el recurso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Planos de redes de distribución de agua superficial y subterránea actualizados (permanente). • Estudios para identificar fugas en redes de agua potable (cuando se presenten caídas de presión en las redes).

Subproceso	Acción	Implicaciones
<p>Reaprovechamiento del agua</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cuantificar los volúmenes de agua residual de origen urbano e industrial. • Conocer la calidad de las aguas residuales. • Identificar usuarios de aguas residuales (industrias o agricultores). • Identificar zonas de inundación • Proponer intercambios de agua potable por agua residual. • Ubicar plantas de tratamiento en sitios estratégicos, cercanos a sitios donde se aprovechará o infiltrará. • Conducir el agua residual a sitios donde sea útil (pozos de infiltración, riego o industrias). • Diseñar los pozos de infiltración. • Realizar estudios para definir zonas favorables para la infiltración y realizar pruebas directas e indirectas de infiltración. • Proponer la metodología, con base en la normatividad, para la infiltración de las aguas residuales o de lluvia. • Cuantificar los volúmenes de lluvia que se pueden aprovechar de los techos de casa, edificios e industrias. • Proponer el diseño de construcción de nuevos conjuntos habitacionales donde se consideren de drenaje (pluvial y de desechos público-urbano). • Cuantificar los volúmenes de aguas de lluvia y definir qué aprovechamiento se les puede dar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudios de cuantificación de volúmenes de agua residual (permanente). • Realizar estudios fisicoquímicos de las aguas residuales (anual). • Realizar estudio para identificar a los usuarios potenciales de aguas residuales (único). • Construir la infraestructura para la conducción de aguas residuales a los sitios (con base en las necesidades). • Realizar estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos para conocer la factibilidad de infiltrar agua residual o de lluvia (único). • Construir la infraestructura para la infiltración (pozos, presas, gaviones, canales, etc.)(con base en la disponibilidad). • Realizar estudios para cuantificar el agua de lluvia aprovechable de la infraestructura civil (permanente). • Campaña de difusión sobre el reaprovechamiento del agua (permanente). • Proponer la normatividad para la construcción de inmuebles para aprovechar las aguas de lluvia (con base en el crecimiento). • Definir las características de la zona drenada y conocer la capacidad de transmisión del agua al acuífero (único).

Subproceso	Acción	Implicaciones
	<ul style="list-style-type: none"> • Redefinir la red de pozos piloto. • Instrumentar: <ul style="list-style-type: none"> ○ Tomas de agua para uso potable, agrícola e industrial. ○ Pozos para conocer los volúmenes de extracción y calcular los volúmenes. ○ Construir la red de pozos piloto para conocer la posición de los niveles estático y dinámico ○ Estaciones climatológicas. ○ Aforos de los cauces principales de las corrientes superficiales para cuantificar el escurrimiento. ○ Medición de los volúmenes de las presas y bordos. • Definir el tipo de monitoreo que se llevará en cada uno de los acuíferos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudio para definir los sitios donde se carece de información piezométrica (único). • Estudio para definir el estado de los medidores. • Adquirir de medidores de flujo para empresas y agricultores (único). • Reemplazar de medidores (de acuerdo a la vida útil y estado físico). • Adquirir estaciones climatológicas (único). • Crear la infraestructura civil para la colocación de las estaciones (única). • Realizar estudio para aforar corrientes superficiales (anual). • Construir pozos piloto (con base en el comportamiento de los niveles del agua subterránea).

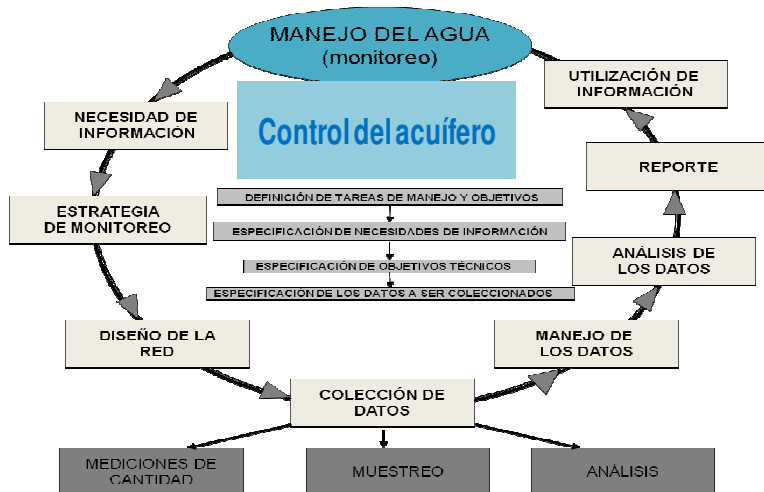


Figura 5.5. Proceso para llevar el monitoreo del agua subterránea del AVQ

Subproceso	Acción	Implicaciones
<p>Capacitación de personal</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Actualizar en el conocimiento del agua al personal que actualmente tiene la responsabilidad. • Preparar gente para que adquiriera competencias sobre el manejo del agua. • Medir las competencias del personal que actualmente está a cargo del manejo del agua. • Crear el plan de carrera. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pagar cursos de actualización (permanente). • Pagar estudios de posgrado (permanente). • Estudio para definir competencias (único). • Estudio para proponer plan de carrera y reemplazo (único).
Subproceso	Acción	Implicaciones
<p>Redefinir actividades de los COTAS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar brechas y áreas de oportunidad para los responsables de los COTAS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Planteamiento de responsabilidades.
Subproceso	Acción	Implicaciones
<p>Documentación y difusión del conocimiento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Clasificar y resguardar el conocimiento. • Desarrollar el medio para consultar y transferir el conocimiento. • Medir el impacto del conocimiento. • Elaborar los manuales de procedimientos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Crear taxonomía del conocimiento. • Desarrollar plataforma informática. • Crear motor de búsqueda de información.

Para aplicar este modelo también es necesario considerar la efectividad organizacional orientada a la mejora de procesos, implantación de sistemas de soporte, fortalecimiento de la cultura organizacional, revisión de la estructura organizacional (CONAGUA, SAGAR, CONAFOR CEA, instancias de gobierno, desarrolladores, industria), así como la comunicación integral.

Igualmente, es importante fortalecer y consolidar los sistemas y tecnologías existentes que hayan probado su efectividad, promoviendo los cambios y mejoras que resulten necesarios, así como plantear el desarrollo e introducción de nuevos sistemas que estén plenamente justificados.

Del modelo de la estrategia se derivan entregables que permitirán atender las necesidades y retos.

5.4.2. Productos de la estrategia

Del modelo de la estrategia se derivan una serie de proyectos y acciones que permitirán atender las necesidades y retos, entre los que destacan, **Tabla 5.2.**

Tabla 5.2. Productos de la estrategia para el AVQ.

Acciones estratégicas	Productos	Acciones propuestas en el Ordenamiento Ecológico del estado de Querétaro
1. Mantener actualizada la disponibilidad del agua	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios de cuantificación de agua superficial y subterránea. • Balance integral de aguas. • Modelo de flujo y de transporte actualizado. • Disponibilidad publicada en el Diario Oficial de la Federación. 	
2. Controlar la calidad del agua	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios de calidad del agua. • Definición de zonas por contaminación antropogénica o natural. • Programa de mitigación de la contaminación. • Protección de fuentes. • Modelo de flujo y de transporte actualizado. 	<ul style="list-style-type: none"> • A007, A008, A010, A011, A012, A015, A016, A017
3. Reaprovechamiento del agua	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios de cuantificación de aguas residuales. • Estudios para definir a usuarios potenciales del agua residual. • Identificar zonas de inundación. • Identificar zonas de riesgo por conducción de agua torrencial. • Estudio para recargar al acuífero. • Diseño de la infraestructura para infiltrar agua. • Estudio para identificar fugas en redes de agua potable y alcantarillado. • Construcción de obras de ingeniería para el abastecimiento y recolección de aguas. 	<ul style="list-style-type: none"> • A001, A002, A004, A005, A006, A008

Acciones estratégicas	Productos	Acciones propuestas en el Ordenamiento Ecológico del Estado de Querétaro
4. Control del acuífero	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios de monitoreo del acuífero. • Construir piezómetros o pozos de observación. • Mantener actualizada la red de pozos piloto. • Instrumentar o incrementar la red de pozos piloto. • Colocar medidores de flujo. • Instrumentar un sistema de medición periódica de volúmenes de extracción. • Programas de uso eficiente 	<ul style="list-style-type: none"> • A003
5. Capacitación del personal	<ul style="list-style-type: none"> • Cursos de capacitación (diplomados). • Cursos de maestría. • Cursos de doctorado. • Estudio para definir las competencias del personal actual que realiza actividades relacionadas con el AVQ. 	
6. Redefinir actividades de los COTAS	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio para plantear más atribuciones y responsabilidades a los COTAS para el resguardo de la información y toma de decisiones. • Definir al responsable del manejo del AVQ. 	
7. Documentación y difusión del conocimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Instrumentar el proceso del administración del conocimiento. • Sistema de información geográfico 	

5.4.2. Factores críticos de éxito para el logro de la estrategia

Los factores críticos de éxito para impulsar el replanteamiento de la estrategia incluyen como mínimo lo siguiente:

- Patrocinio de la CONAGUA, SAGAR, CONAFOR, Gobierno del Estado, Municipios de Querétaro, Villa Corregidora y El Marqués, industriales, inmobiliarias y agricultores.
- Simplificación de las normas que dificultan el cumplimiento de las acciones estratégicas del manejo del agua.
- Coordinación de actividades entre los entes participantes.
- Asignación de recursos financieros para el desarrollo de los proyectos.
- Forma de contratación de los servicios.
- La Ley de Obra Pública.

- El proyecto requiere de la participación de varias empresas y una coordinadora de las actividades mientras se instrumenta el modelo.

5.4.2. Políticas

Para lograr los objetivos es necesario contar con políticas que establezcan los límites de actuación de los diferentes participantes, por lo que se hace necesario plantear, proponer y autorizar políticas orientadas a:

- Gobernabilidad del manejo del recurso.
- Responsabilidades de los participantes.
- Uso del agua.
- Manejo del agua.

5.4. Información necesaria para aplicar el proceso de infiltración en el acuífero del valle de Querétaro

Muchos trabajos se han desarrollado para realizar actividades y acciones para recarga de acuíferos de manera particular, dependiendo de necesidades individuales. En este trabajo se conceptualiza la situación tratando de dar una solución global a la problemática de recarga del AVQ.

De acuerdo al planteamiento hecho en el capítulo 4 sobre el proceso de infiltración, **Figura 5.6**, el cual va acorde a la estrategia, se procede a proponer algunos proyectos.

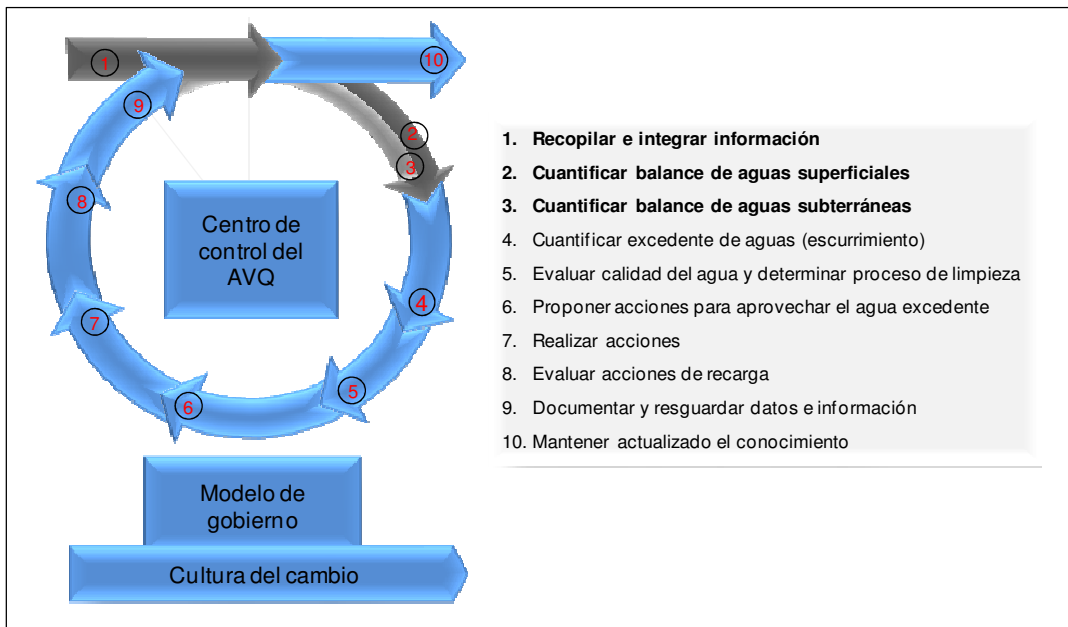


Figura 5.6. Modelo para infiltrar agua

En el **Anexo 1** se lista la relación mínima de información que debe considerarse para evaluar la recarga y hacer la propuesta de infiltración en las zonas favorables. Se utiliza un criterio para clasificar la cantidad de información disponible en cuanto a su cantidad. Se consideran cinco valores de 0 a 4: No hay (0), Escasa (1), Razonable (2), Necesaria (3) y Suficiente (4), así como las acciones para contar con ella en el mediano plazo.

Una vez planteada la información necesaria y con base en la información disponible se hace una propuesta de actividades paralelas adicionales, para favorecer la recarga del acuífero.

Una situación que se presenta específicamente en la parte de correspondiente al suelo, es que una vez que se satura se vuelve impermeable y se facilita su transporte hacia zonas de baja topografía, ocasionando problemas como los ya mencionados en los capítulos anteriores y sobre todo favorece la evapotranspiración.

Para este trabajo se intenta realizar las acciones y obras debajo de esta capa, con el propósito de acelerar el traslado del agua al subsuelo y reducir la evapotranspiración y escurrimiento.

Es un hecho que no es posible, en estos momentos conocer los volúmenes excedentes de agua superficial, producto de la precipitación y agua residual; sin embargo se estima un valor con base en la superficie que se ha vuelto impermeable y con base en el volumen de agua residual que se genera por la extracción de agua de pozos, los cuales se consideran como parte del sistema del acuífero. En la **Figura 5.7** se presenta un esquema idealizado sobre cómo aprovechar el agua de lluvia y residual en el AVQ.

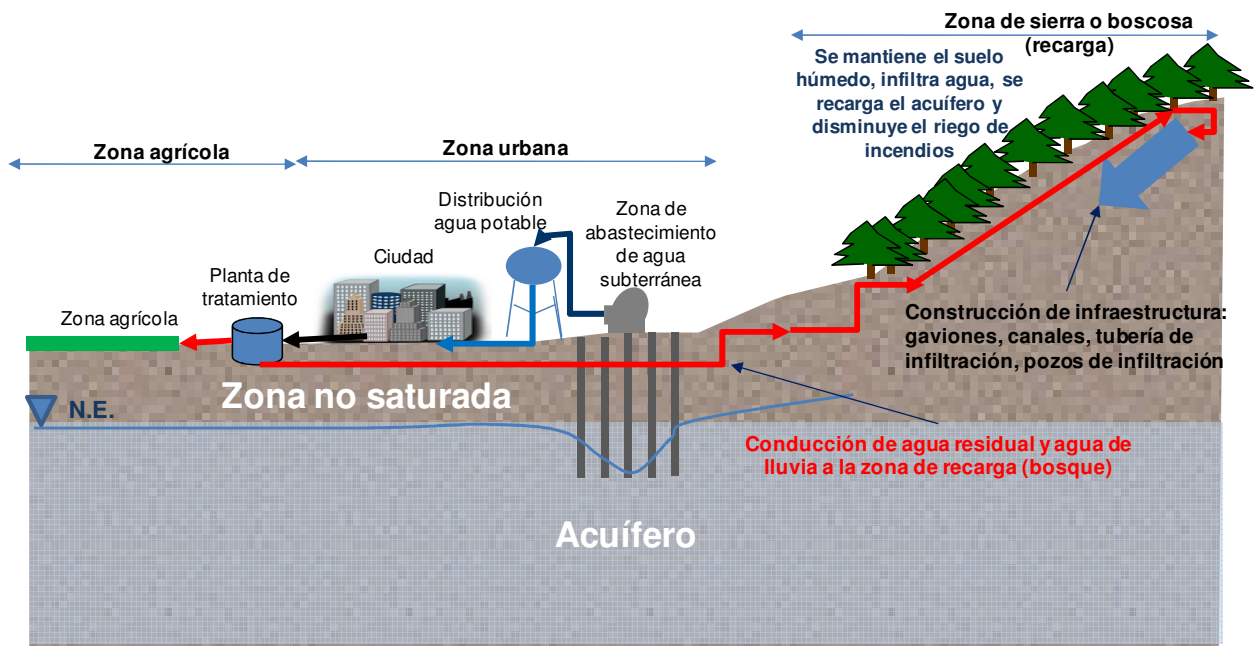


Figura 5.7 Esquema idealizado para aprovechar el agua de lluvia y residual en el AVQ

Con la información que se cuenta se plantean 7 proyectos que cubren la superficie del AVQ:

- El primero se localizan zonas favorables para llevar a cabo proceso de infiltración, lo cual consistió en identificar la profundidad del nivel estático, zonas bajas topográficamente donde se acumule el agua, se identificaron algunas zonas agrícolas y en donde se propone realizar estudios de evaluación (zona agrícola).
- El segundo se ubica los principales bordos donde se acumulan volúmenes importantes de agua. Al localizarse la mayoría de los bordos en zona federal, facilita el desarrollo de obras civiles para dicho proyecto. Se van a respetar cualquier tipo de reserva.
- El tercero se orienta a la zona urbana, donde se plantea implementar un sistema de captación para el escurrimiento del agua pluvial de los techos de las casas y de las calles, aprovechar el agua de pluvial para llevar a cabo el proceso de infiltración.
- El cuarto es una investigación a través de la aplicación de métodos indirectos (geofísica) para conocer el movimiento del agua en el subsuelo así como estimar las características hidráulicas más reales posibles.
- El quinto se orienta a las zonas altas donde se propone disminuir la velocidad del agua para evitar la conducción de sólidos a las zonas bajas y evitar problemas de azolve de la red de drenaje, esto también ocasionaría que el suelo sea susceptible a erosionarse mas rápidamente.

5.4.1. Proyecto caracterización de la zona drenada

Este proyecto consiste en localizar zonas fuertemente abatidas en donde el nivel estático tenga un espesor de 100 metros o más para llevar a cabo el proceso de infiltración, se hizo un análisis geomorfológico para identificar los principales escurrimientos así como las zonas de inundación en la superficie del área del acuífero, contar con una sección geológica en donde se muestren las unidades que van a intervenir en el proceso de infiltración, para evitar alguna unidad impermeable, verificar el espesor de la unidad receptora y conocer sus características hidrogeológicas. También es importante tomar en cuenta el uso de suelo, por lo que se consideró que las zonas se localizaran en zonas especialmente agrícolas o en su defecto conjuntos habitacionales en desarrollo.

Con base en la información geológica e hidrogeológica en el AVQ la zona drenada va de los 30m en la zona del Tlacote, a los 130m en zona agrícola y 160m en la zona industrial Benito Juárez.

Las condiciones geológicas indican la presencia de sedimentos vulcanolacustres con intercalaciones de basalto. En la zona a lo largo del río Querétaro, específicamente en Santa María Magdalena hay un acuífero colgado que se alimenta con los escurrimientos superficiales que transitan por el río. Es el área donde la pendiente es mínima del orden del 3%.

Los sedimentos vulcanolacustres en condiciones de saturación presentan una conductividad hidráulica horizontal de 0.032 a 1 m por día, se estima que la conductividad vertical sea del orden de una o dos magnitudes menores a la horizontal. Sin embargo, la presencia de basalto fracturado acelera el movimiento del agua al subsuelo y de no conocer su distribución el agua producto del escurrimiento puede llegar directamente al acuífero.

Una forma para evaluar las condiciones del medio geohidrológico es a través del conocimiento de las propiedades hidráulicas, a través de pruebas de bombeo o pruebas *Slug*. Esta consideración involucra que el medio se encuentre saturado. Los problemas que se visualizan son que el resultado es en forma puntual o local, no permitiendo conocer las variaciones laterales y a profundidad y que la zona a evaluar es la zona no saturada (2002 Fitts).

Una alternativa para conocer el comportamiento de la zona drenada es a través de una exploración geofísica aplicando la técnica de imagen eléctrica bi, tridimensional y en cuatro dimensiones (tiempo), con la cual se puede monitorear el movimiento del agua en el medio no saturado.

Para el caso que nos ocupa, el nivel estático del AVQ se encuentra debajo de los 100 m, la aplicación del método geofísico sería para conocer las condiciones de los primeros 50 m, como complemento de la información disponible.

- **Objetivos**

- Definir el comportamiento eléctrico de la zona drenada y asociarlo a los eventos geológicos
- Identificar zonas con permeabilidad e impermeabilidad.
- Conocer el espesor del horizonte donde se lleva a cabo el proceso de evapotranspiración

- **Alcances**

Los resultados del estudio permitirán ubicar las zonas más favorables para realizar la infiltración y detallar las obras de ingeniería civil que deberán realizarse, así como la identificación de zonas de reserva ecológica para inyectar el agua al subsuelo.

Con base en la superficie estudiada, el espesor drenado, la conductividad hidráulica vertical, disminuir el abatimiento anual del acuífero, dimensionar la capacidad de almacenamiento de agua en las áreas por estudiar.

- **Áreas de estudio**

En la **Figura 5.8** se definen las áreas

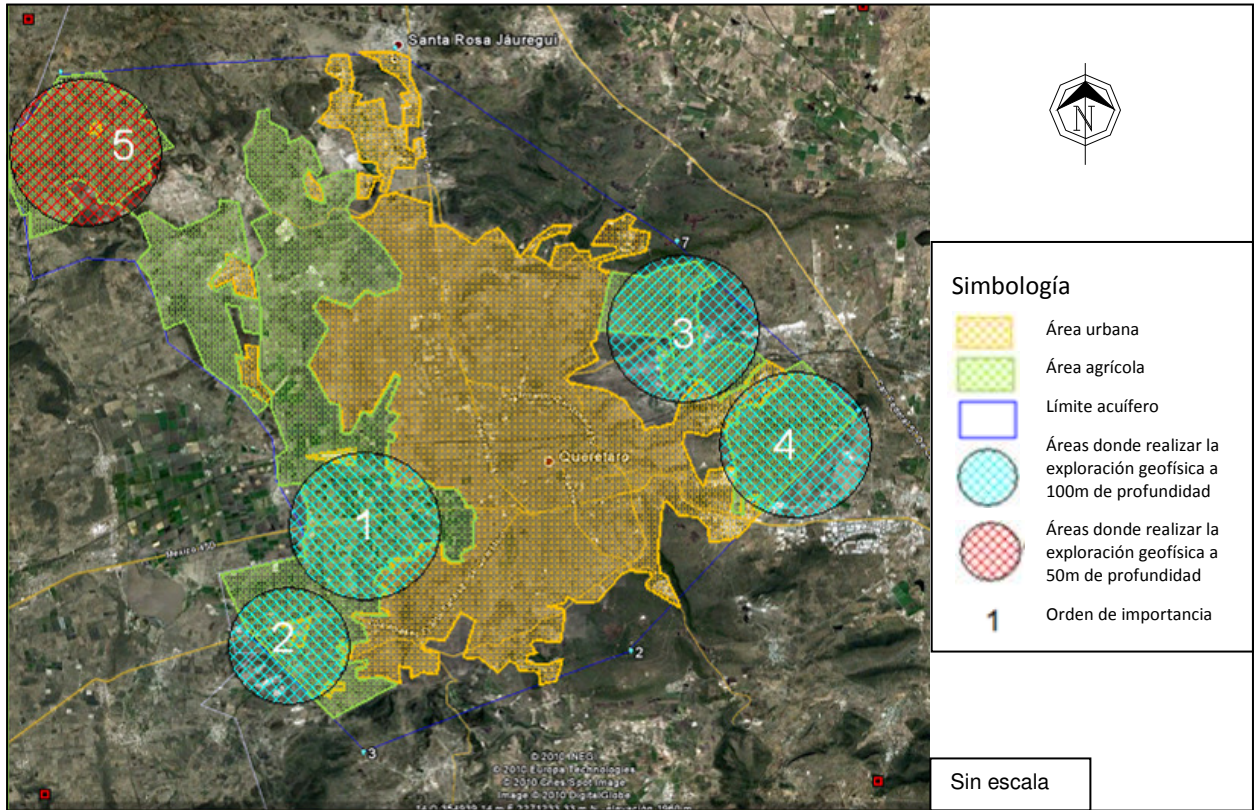


Figura 5.8 Áreas para realizar imagen eléctrica (Google Earth, 2009)

Área 1 Santa María Magdalena

La primera área propuesta se localiza en una zona agrícola, en la cual se puede realizar la infiltración, por las condiciones geológicas, topográficas, ambientales y de uso de suelo. Se encuentra a una elevación de 1800 msnm. Basado en el mapa geológico y la figura 2.13, sección geológica 2 se infiere que a nivel superficial encontramos depósitos aluviales, seguidos por depósitos vulcanoclásticos que llegan hasta los 30 m de profundidad; de los 30 a los 40 m se identificó una brecha volcánica; de los 40 a los 80 m basalto fracturado; de los 80 a los 145 m tobas y de los 145 hasta los 300 m nuevamente basalto.

La precipitación promedio anual en esta zona es de 550 mm anualmente. Según el REPDA, en esta zona existen numerosos pozos de abastecimiento de agua. **Figura 2.20.**

El nivel freático en esta zona se encuentra a los 140 metros por lo que la recarga se llevaría a cabo en las tobas las cuales, en condiciones de saturación, presentan una conductividad hidráulica entre 0.032 hasta 10 m/día, una transmisividad de 0.7 m²/día y un coeficiente de almacenamiento del 0.07. Sobreyaciendo a esta unidad se encuentra una unidad de basalto fracturado, que presenta una conductividad hidráulica entre 0.08 hasta los 40 m/día en condiciones de saturación.

En esta área se hará un cubrimiento de una superficie de 70,000 m² a través de veinte líneas de 3,500m separadas cada 100 m, con separación de electrodos en las líneas cada 10 m **Figura 5.9.**

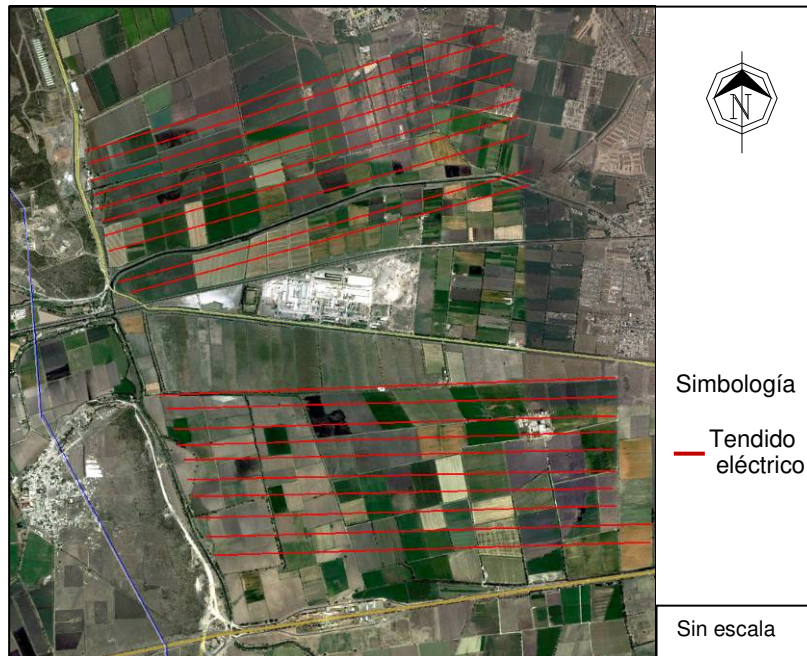


Figura 5.9 Distribución de las líneas de imagen eléctrica área 1 (Google Earth, 2009)

Área 2 Villa Corregidora.

Esta área se localiza en una zona agrícola, a una elevación de 1800 msnm. Basado en el mapa geológico y la figura 2.14, la sección geológica 3 se infiere que a nivel superficial encontramos depósitos aluviales, seguidos por depósitos vulcanoclásticos que llegan hasta los 110 m de profundidad; de los 110 a los 150 m se identificó una unidad de basalto fracturado; de los 150 a los 200 m tobas; de los 200 a los 300 m basalto fracturado. Es importante tomar en cuenta que esta zona se localiza sobre la falla el Tlacote ligeramente hacia el noreste.

La precipitación promedio anual en esta zona es de 550mm anualmente. Según el REPDA en esta zona existen numerosos pozos de abastecimiento **figura 2.20.**

El nivel freático en esta área se encuentra a los 160 metros por lo que la recarga se llevaría a cabo en la unidad basáltica la cual presenta una conductividad hidráulica entre 0.08 hasta 40 m/día, una transmisividad de 2.9 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.07, estos valores son estimados en condiciones de saturación.

En esta área se hará un cubrimiento de una superficie de 10.5 km² a través de trece líneas de 3,500 m separadas cada 100 m, con separación de electrodos en las líneas cada 10 m **Figura 5.10**.



Figura 5.10 Distribución de las líneas de imagen eléctrica área 2 (Google Earth, 2009)

Área 3 Aeropuerto viejo

Esta área se localiza en una zona residencial, a una elevación de 2000 msnm. Basado en el mapa geológico y proyectando la información de la sección 1-1' se infiere que en esta zona aflora una unidad de basalto alcanzando cerca de los 40 m de profundidad; seguida por depósitos vulcanoclásticos que llegan hasta los 90 m; de los 90 a los 120 m se identificó nuevamente una unidad de basalto fracturado; de los 120 a los 130 m tobas; de los 130 a los 260 m nuevamente basalto fracturado. Esta zona se localiza cerca de las fallas de Querétaro y Menchaca.

La precipitación promedio anual en esta zona es de 550 mm anualmente. Según el REPDA en esta zona existen numerosos pozos de abastecimiento aunque en menor cantidad a las áreas 1 y 2 **figura 2.20**.

El nivel freático en esta área se encuentra a los 100 metros por lo que la recarga se llevaría a cabo en la unidad basáltica la cual presenta una conductividad hidráulica entre 0.08 hasta 40 m/día, una transmisividad de 2.9 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.07, en condiciones de saturación. Sobre yaciendo a esta unidad se encuentra una unidad de sedimentos vulcanoclásticos, que presenta una conductividad hidráulica entre los 0.032 y 10 m/día, en condiciones de saturación.

En esta zona se están construyendo gran cantidad de conjuntos habitacionales y son precisamente estos conjuntos de donde se pretende tomar el agua para la recarga, desarrollar la infraestructura para captar el agua pluvial, así como implementar plantas de tratamiento para el agua residual.

En esta área se hará un cubrimiento de una superficie de 4.0 km² a través de once líneas de 4,000 m separadas cada 100 m, con separación de electrodos en las líneas cada 10 m **Figura 5.11.**



Figura 5.11 Distribución de las líneas de imagen eléctrica área 5 (Google Earth, 2009)

Área 4. Conín

Esta área se localiza en una zona residencial, a una elevación de 1950 msnm. Con base en el mapa geológico y proyectando la información de la sección 4-4' se infiere que en esta zona aflora una unidad de basalto alcanzando cerca de los 120 m de profundidad con intercalaciones de sedimentos vulcanoclásticos; seguida por una brecha volcánica que llega hasta los 300 m de profundidad, esta unidad presenta intercalaciones de basalto fracturado; de los 300 a los 350m se identificó una unidad de depósitos vulcanoclásticos. Es importante destacar que esta zona es una zona muy fracturada ya que se encuentra entre las fallas Querétaro, Menchaca y Cañada.

La precipitación promedio anual en esta zona es de 550mm anualmente. Según el REPDA en esta zona existen numerosos pozos de abastecimiento aunque en menor cantidad a las áreas 1 y 2 **figura 2.22.**

El nivel freático en esta área se encuentra a los 150 metros por lo que la recarga se llevaría a cabo en la unidad de brecha volcánica la cual se considera un medio fracturado y presenta una conductividad hidráulica entre 0.08 hasta 40 m/día, una transmisividad de 2.9 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.07, en condiciones de saturación.

Sobre yaciendo a esta unidad se encuentra una unidad de basalto fracturado, que presenta una conductividad hidráulica similar.

En esta zona se están construyendo gran cantidad de conjuntos habitacionales y son precisamente estos conjuntos de donde se pretende tomar el agua para la recarga, desarrollar la infraestructura para captar el agua pluvial, así como implementar plantas de tratamiento para el agua residual.

En esta área se hará un cubrimiento de una superficie de 4.0 km² a través de once líneas de 4,000 m separadas cada 100 m, con separación de electrodos en las líneas cada 10 m **Figura 5.12.**

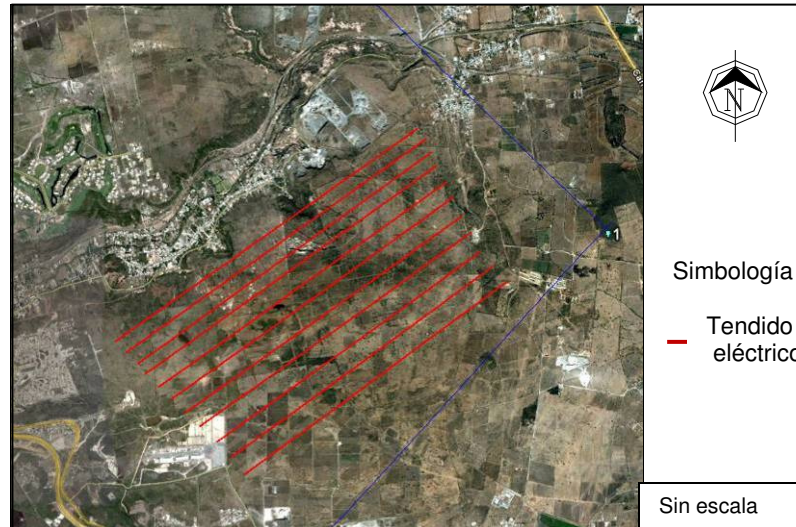


Figura 5.12 Distribución de las líneas de imagen eléctrica área 4 (Google Earth, 2009)

Área 5 Tlacote norte.

Esta área se localiza en una zona agrícola, a una elevación de 1950 msnm. Con base en el mapa geológico y proyectando la información de la sección 2-2' se infiere que en esta zona afloran las siguientes unidades, sedimentos vulcanoclásticos, basalto, andesitas y tobas líticas y depósitos aluviales. En sección se observan a nivel superficial sedimentos vulcanoclásticos, brecha volcánica y basalto fracturado, siendo este último el que se extiende a profundidad. Esta zona se encuentra entre las fallas Tlacote, Santa Rosa y Buenavista.

La precipitación promedio anual en esta zona es de 550mm anualmente. Según el REPDA en esta zona existen numerosos pozos de abastecimiento aunque en menor cantidad a las áreas 1 y 2 zonas anteriores **figura 2.20.**

El nivel freático en esta área se encuentra a los 120 metros por lo que la recarga se llevaría a cabo en la unidad basáltica la cual presenta una conductividad hidráulica entre 0.08 hasta 40 m/día, una transmisividad de 2.9 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.07, en condiciones de saturación.

En esta área se hará un cubrimiento de una superficie de 2.5 km² a través de siete líneas de 2,000 a 3,000 m separadas cada 100 m, con separación de electrodos en las líneas cada 10 m **Figura 5.13**.

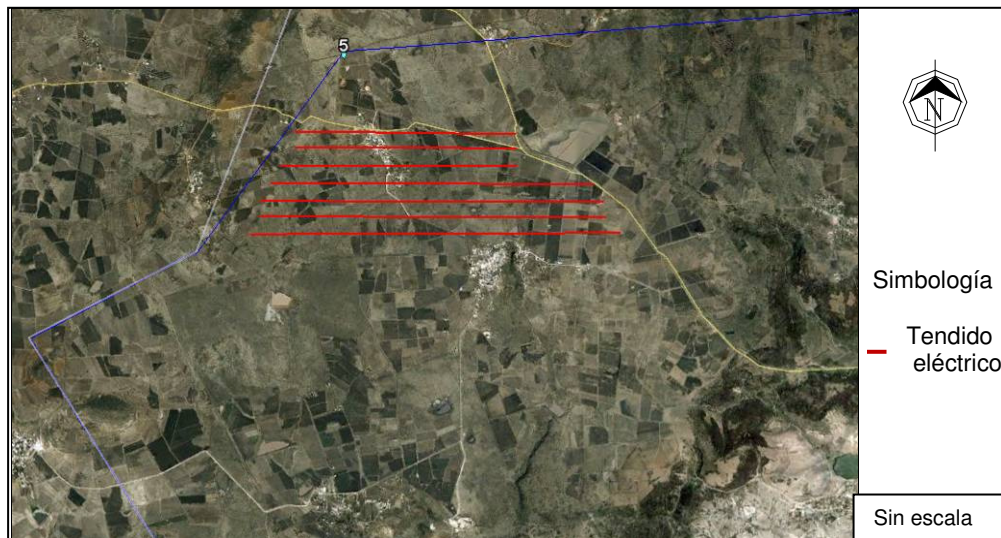


Figura 5.13 Distribución de las líneas de imagen eléctrica área 3 (Google Earth, 2009)

Actividades

- Trazo topográfico para definir las líneas y ubicar los electrodos.
- Obtención de datos a través de exploración geoelectrica (corriente-voltaje).
- Procesado bi y tridimensional de los datos
- Obtención de imágenes eléctricas bidimensional y con base en la distribución de las líneas una imagen tridimensional.
- Análisis de información.
- Definición de zonas permeables, impermeables y espesor de suelo saturado.
- Llevar a cabo una prueba piloto para corroborar la factibilidad del proyecto.

En la **Figura 5.14** se presenta en forma gráfica el proceso de adquisición de datos, adquisición, procesado, análisis y resultados.

Factores críticos para realizar el proyecto

Costo. Es una nueva cultura en el área hidrogeológica. Hasta ahora se ha venido trabajando en la zona saturada a través de estudios puntuales de exploración geofísica. La situación que presenta el AVQ requiere de estudios más sofisticados.

Concertación con el sector agrícola. El estudio se plantea realizar en la zona agrícola, única zona disponible en la actualidad para realizar el proceso de

infiltración. Para ejecutar el trabajo es necesario cubrir zonas de cultivo situación que puede incomodar a los agricultores al perder una superficie de cultivo. Sin embargo, los beneficios son mayores ya que como parte del rescate del AVQ es necesario disponer de una superficie verde; además, en esa área se propone realizar la infiltración del agua de lluvia, lo que trae por beneficio recuperar niveles del agua subterránea y de en esa zona se concentre al agua de precipitación y estar siempre húmeda.

En la **tabla 5.3** se muestra un resumen de las zonas de interés para llevar a cabo el proceso de infiltración.

Propuesta de identificación de sitios para la infiltración de agua al acuífero de Querétaro

Área en orden de importancia	Geología Superficial	Profundidad del Nivel Estático (m)	Elevación del suelo (msnm)	Unidad donde se encuentra el n.e.	Transmisividad (m ² /día)	Conductividad Hidráulica	Coefficiente de Almacenamiento	Uso de Suelo	Precipitación anual (mm)	Volumen de agua disponible	Ventajas	Riesgos Potenciales
Santa Ma. Magdalena	AI, SVL, Bv, B y TI	140	1750	TI	0.7	0.032 - 10	0.07	Agrícola	550	Agua de la ciudad, es la zona con topografía más baja. Realizar estudio hidrológico	Zona más baja topográficamente, por lo tanto mayor volumen de agua.	Contaminación por basura e infiltración de sustancias al acuífero
Villa Corregidora	AI, SVL, B, TI, B	160	1800	B	2.9	0.08 - 40	0.07	Agrícola	550	Agua que llega de la cuenca del río Pueblito, desde la presa el Batán. Realizar estudio hidrológico	Zona baja topográficamente, zona con nivel estático más profundo, por lo tanto mayor columna de agua a infiltrar	Contaminación por basura e infiltración de sustancias al acuífero
Aeropuerto viejo	AI, SVL, B, TI, B	100	2000	B	2.9	0.08 - 40	0.07	Agrícola	550	Volumen que escurre del Cerro el Penal. Realizar estudio hidrológico	Zona con un área de infiltración considerable	Contaminación por basura e infiltración de sustancias al acuífero
Conín	B, SVL, Bv, B, SVL	150	1950	Bv	2.9	0.08 - 40	0.07	Residencial	550	Volumen que escurre de la parte alta de la falla Querétaro. Realizar estudio hidrológico	Aprovechamiento de escurrimiento de casas y calles, posibilidad de implementar una planta de tratamiento de aguas residuales	Contaminación por basura e infiltración de sustancias al acuífero
Tlacote Norte	SVL, B, A, TI	120	1950	B	2.9	0.08 - 40	0.07	Agrícola	550	Volumen que escurre de la sierra localizada al norte de Tlacote. Realizar estudio hidrológico	Zona con un área de infiltración considerable.	Contaminación por basura e infiltración de sustancias al acuífero

Tabla 5.3 Resumen de las áreas a infiltrar

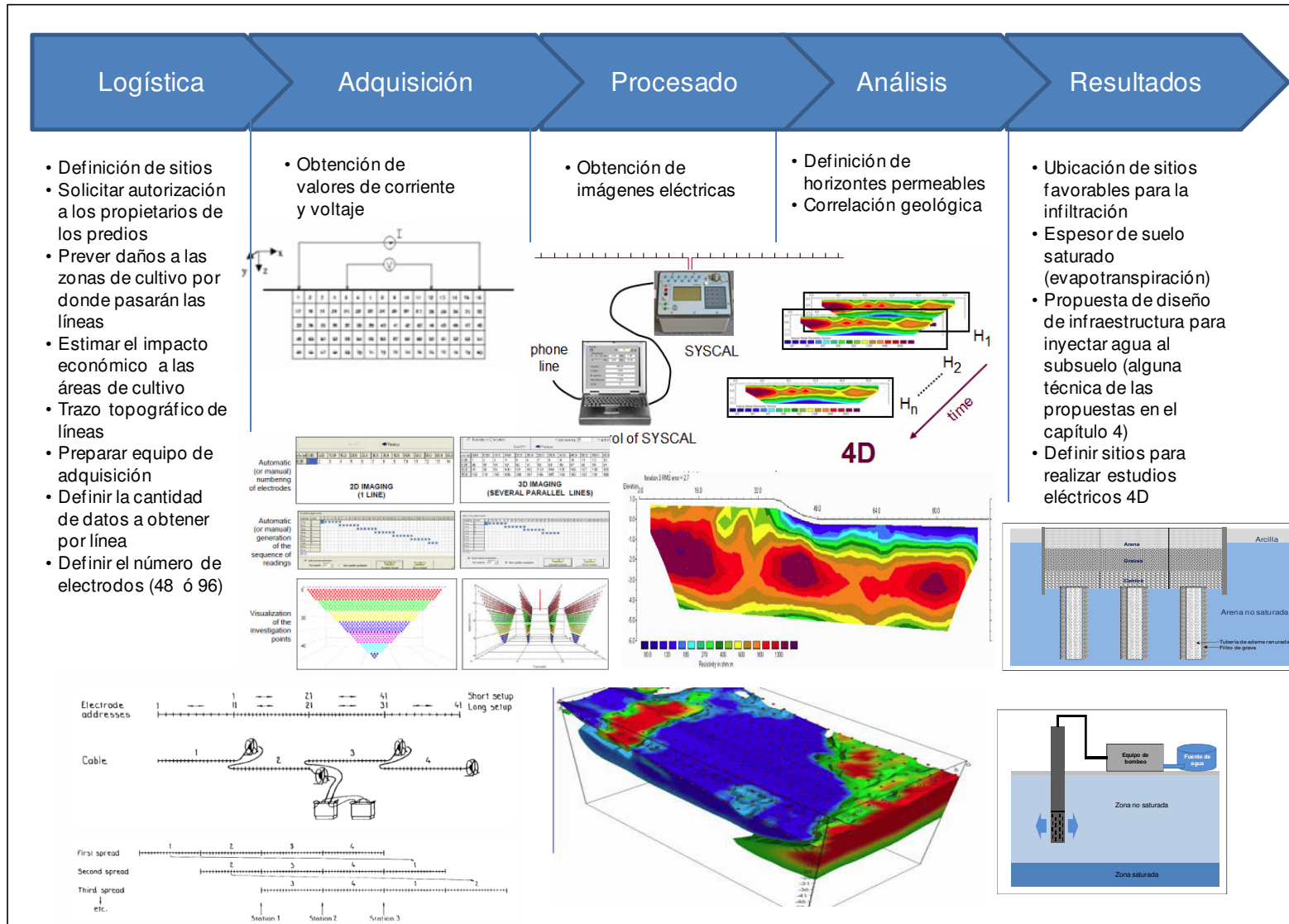


Figura 5.14. Proceso propuesto para caracterizar la zona drenada

5.4.2. Aprovechamiento del agua de los bordos

En el AVQ existe un sistema de bordos que funcionan como control de avenidas. Con base en lo expuesto, las condiciones del suelo donde se acumula el agua es de impermeabilidad, lo que favorece que la mayor cantidad de agua se evapore. Si bien el microclima genera una mayor humedad en el ambiente, el agua estancada no se aprovecha.

La ubicación de los bordos se presenta en la **Figura 5.15**, cada uno de ellos presenta diferentes condiciones geológicas, presencia de intercalaciones de sedimentos vulcanoclásticos con derrames de basalto, algunos se encuentran en zonas de falla o fracturamiento y las profundidades del agua varían de acuerdo a su ubicación en el AVQ.

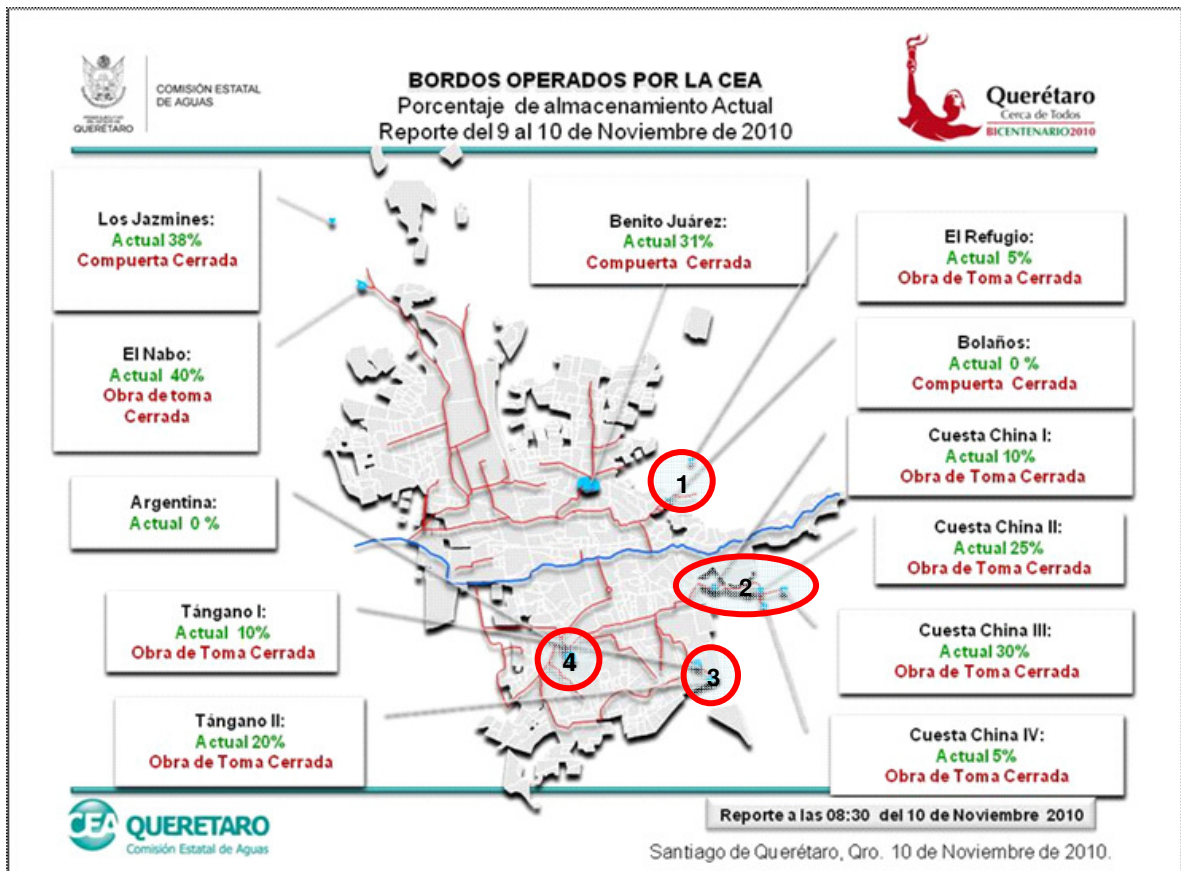


Figura 5.15. Sitios donde realizar acciones para aprovechar el agua de los bordos en el AVQ (Imagen tomada del portal de la CEA)

Con base en lo expuesto y con el propósito de recuperar niveles de agua, lo más recomendable para estos sitios es caracterizarlos y proponer pozos de infiltración o de inyección para que el agua se traslade al subsuelo y no se pierda por evaporación. Cabe mencionar que uno de los bordos está catalogado como zona de reserva, Bordo Benito Juárez, en el cual no se propone realizar el proceso de infiltración.

- **Objetivos**

- Caracterizar la zona no saturada de los sitios donde se ubican los bordos.
- Definir la posición del nivel del agua subterránea.
- Definir el volumen de agua que se infiltrará (sobre este punto la CEA lleva un seguimiento permanente del comportamiento de los bordos).
- Definir el tipo de tratamiento que aplicará al agua superficial para darle la calidad para evitar contaminación en el subsuelo.
- Proponer obras de ingeniería para acelerar el proceso de infiltración (pozos de inyección o canales subterráneos).

- **Alcances**

Con la información disponible se propondrá la infraestructura para infiltrar agua al subsuelo.

- **Áreas de estudio**

Bordos Refugio y Bolaños

El Bordo Refugio y Bolaños se encuentra en una zona donde afloran una unidad de basalto bajo una capa de suelo residual. La columna estratigráfica de esta zona se compone de la siguiente manera, en la parte más reciente una unidad de basalto la cual alcanza los 60 metros de profundidad, de los 60 a los 125 metros encontramos depósitos vulcanolacustres, posteriormente de los 125 a los 200 metros otra unidad de basalto fracturado, bajo el basalto se encuentra depositada una capa de 10 metros de brecha volcánica, finalmente de los 210 metros hasta los 300 hay una serie de depósitos vulcanolacustres.

El nivel estático en la zona se encuentra a una profundidad de 75m el cual se localiza en la unidad de sedimentos vulcanolacustres, que corresponde a las características del medio poroso, por lo tanto presenta una conductividad hidráulica de 0.032 a 10 m/día, una transmisividad de 0.7 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.07, en condiciones de saturación.

Esta zona se localiza a una altura promedio de 2000 msnm, presenta una temperatura media anual de 18 a 20°C, la precipitación promedio anual de la región es de 550 mm.

El Bordo Refugio Bolaños se encuentra en zona federal..

En las **Figura 5.16** se define la ubicación de estos bordos, se encuentran en la zona de las áreas propuestas.

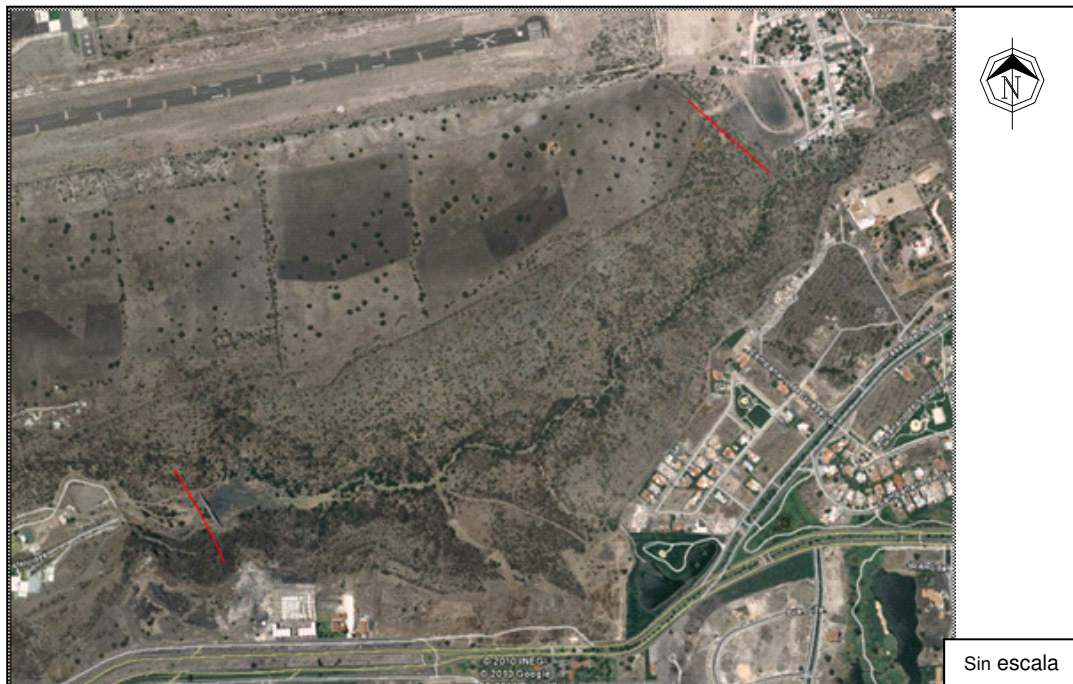


Figura 5.16. Sitios para infiltrar agua al subsuelo Refugio y Bolaños (Google Earth, 2009)

Bordos Cuesta China

En la región del Bordo Cuesta China se encuentra en una zona aflora una unidad de basalto fracturado bajo una capa de suelo residual, el basalto alcanza los 150 metros de profundidad con algunas intercalaciones de sedimentos vulcanoclásticos, de los 150 a los 350 metros de profundidad se presenta una unidad de brecha volcánica. Se encuentra entre las fallas, falla La Cañada y la falla Querétaro.

El nivel freático en esta zona se encuentra aproximadamente a una profundidad de 150 metros, lo que corresponde a la unidad de basalto. La cual presenta una conductividad hidráulica entre 0.08 y 40 m/día, una transmisividad de 2.9 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.07, valores obtenidos en condiciones de saturación.

Este bordo se encuentra a una elevación de 1900 msnm, presenta una temperatura media anual de 18 a 20°C, la precipitación promedio anual de la región es de 550 mm.

El Bordo Cuesta China se encuentra en zona federal.

En las **Figura 5.17** se define la ubicación de estos bordos, se encuentran en la zona de las áreas propuestas.



Figura 5.17. Sitios para infiltrar agua al subsuelo Cuesta China (Google Earth, 2009)

Bordos Tángano

En la región de Bordo Tángano aflora una unidad de basalto fracturado, sobre la cual se encuentra una capa de suelo residual, la columna estratigráfica de esta zona está constituida por una intercalación de basalto fracturado y brecha volcánica hasta más de los 300 metros de profundidad. Las condiciones hidrogeológicas son similares, ambas presentan una conductividad hidráulica entre 0.08 a 40 m/día, una transmisividad de 2.9 m²/día y un coeficiente de almacenamiento de 0.07, valores obtenidos en condiciones de saturación.

El nivel freático en esta zona alcanza los 150 metros de profundidad, el cual corresponde a la unidad de basalto fracturado.

Este bordo se encuentra a una elevación de 1900 msnm, presenta una temperatura media anual de 18 a 20°C, la precipitación promedio anual de la región es de 550 mm.

El Bordo Tángano se encuentra en una zona de baja topografía en zona federal en zona comercial.

En las **Figura 5.18** se define la ubicación de estos bordos, se encuentran en la zona de las áreas propuestas.



Figura 5.18. Sitios para infiltrar agua al subsuelo Tángano (Google Earth, 2009)

Bordo Argentina

En la región del Bordo Argentina aflora una unidad de sedimentos vulcanolacustres, bajo una capa de suelo residual, dicha unidad alcanza los 240 metros de profundidad, entre los 100 y 110 metros de profundidad encontramos una pequeña unidad de basalto fracturado.

El nivel freático en esta zona se encuentra a 150 metros de profundidad, lo cual corresponde a la unidad de sedimentos vulcanolacustres, la cual presenta una conductividad hidráulica de 0.032 a 10 m/día.

Este bordo se encuentra a una elevación de 1800 msnm, presenta una temperatura media anual de 18 a 20°C, la precipitación promedio anual de la región es de 550 mm.

El Bordo Argentina se encuentra en una zona urbana residencial, un desborde puede afectar a la infraestructura civil y ocasionar accidentes.

En las **Figura 5.19** se define la ubicación de estos bordos, se encuentran en la zona de las áreas propuestas.



Figura 5.19. Sitios para infiltrar agua al subsuelo A (Google Earth, 2009)

Actividades

- Obtención de datos a través de exploración de imagen eléctrica
 - Bordos Refugio y Bolaños: dos perfiles con longitud de 200 m, para conocer las condiciones eléctricas a una profundidad del orden de los 30 m.
 - Cuesta China: tres perfiles de 400 m y uno de 200 m, para conocer las condiciones eléctricas del subsuelo a una profundidad del orden de los 50 m.
 - Tánganos: dos perfiles de 500 m cada uno, para conocer las condiciones eléctricas del subsuelo a una profundidad del orden de los 50 m.
 - Argentina: un perfil de 400 m, para conocer las condiciones eléctricas del subsuelo a una profundidad del orden de los 30 m.
- Procesado bidimensional de los datos
- Obtención de imágenes eléctricas bidimensionales.
- Análisis de información.
- Definición de zonas permeables, impermeables y espesor de suelo saturado.
- Llevar a cabo una prueba piloto para corroborar la factibilidad del proyecto.
- Propuesta de diseño de infraestructura para infiltrar agua.

En la **tabla 5.4** se muestra un resumen de los bordos para la recolección y almacenamiento de agua y llevar a cabo el proceso de infiltración.

Bordo	Geología Superficial	Profundidad del Nivel Estático (m)	Elevación del suelo (msnm)	Unidad donde se encuentra el n.e.	Transmisividad (m ² /día)	Conductividad Hidráulica	Coefficiente de Almacenamiento	Uso de Suelo	Precipitación anual (mm)	Volumen de agua disponible	Riesgos Potenciales
Refugio y Bolaños	B, SVL, B, Bv, SVL	75	2000	SVL	0.7	0.032 - 10	0.07	Federal	550	Validar estudio hidrológico	Contaminación por basura.
Cuesta China	B, SVL, Bv	150	1900	B	2.9	0.08 - 40	0.07	Federal	550	Validar estudio hidrológico	Contaminación por basura.
Tángano	B, Bv	150	1900	B	2.9	0.08 - 40	0.07	Residencial	550	Validar estudio hidrológico	Desbordamiento que afecte la zona residencial, contaminación por basura.
Argentina	SVL, B	150	1800	SVL	0.7	0.032 - 10	0.07	Residencial y Federal	550	Validar estudio hidrológico	Desbordamiento que afecte la zona residencial, contaminación por basura.

Tabla 5.4 Resumen de bordos para recolección y almacenamiento de agua

En la **Figura 5.20** se presenta en forma gráfica el proceso de adquisición de datos, procesado, análisis y resultados.

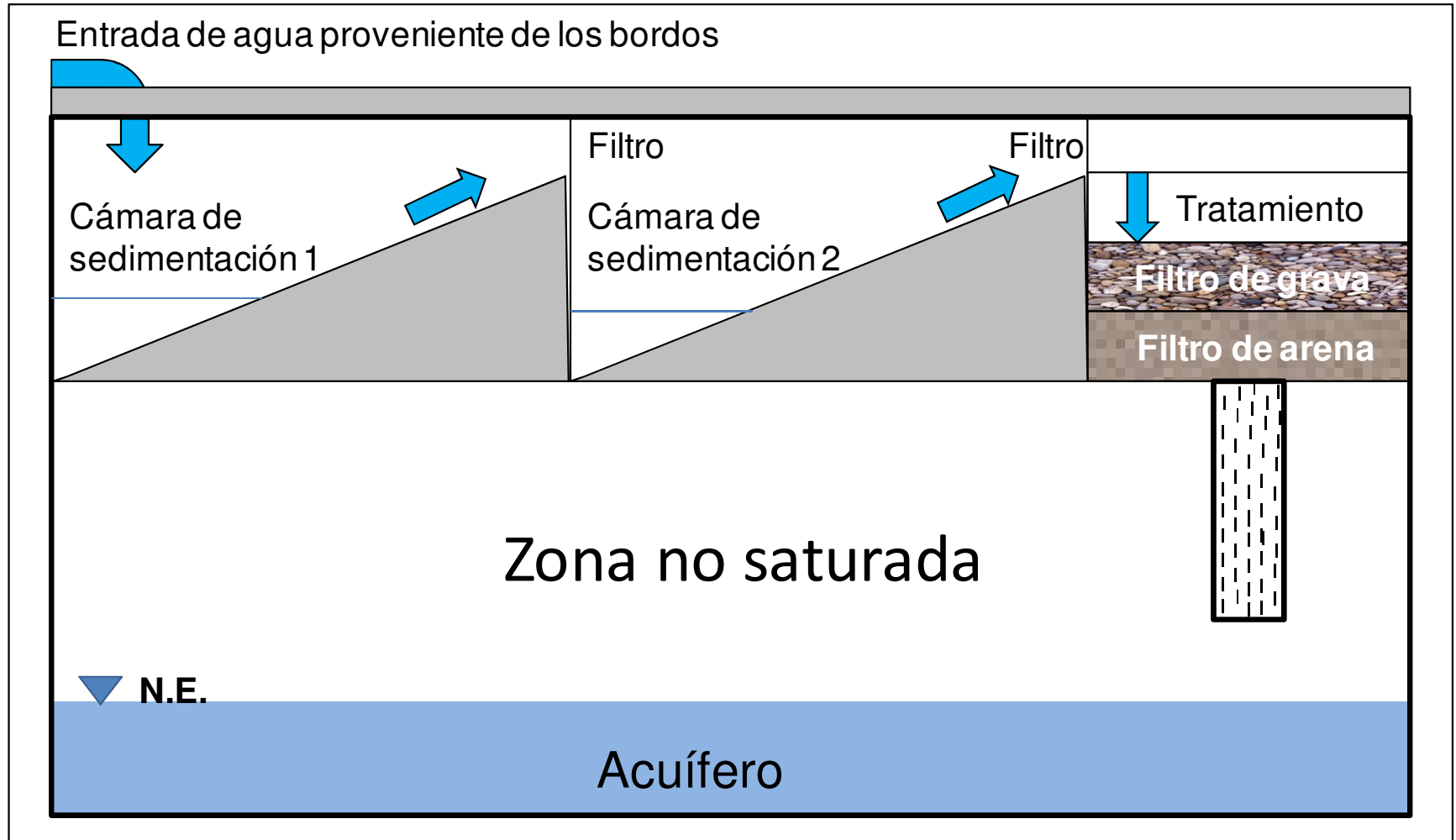


Figura 5.20. Esquema idealizado del proceso para infiltrar agua aprovechando el agua de los bordos

Factores críticos para realizar el proyecto

- **Costo.** Perforación de un pozo de hasta 50 m de profundidad, obra de ingeniería civil, tratamiento del agua a través de carbón activado.
- **Autorización de la CONAGUA del proyecto y obra.**
- **Responsable del mantenimiento.**
- **Costo de mantenimiento**

5.4.3. Captación de agua de lluvia de los techos de las obras civiles (casa habitación, centros comerciales, industrias)

Con el propósito de aprovechar al máximo el agua pluvial es conveniente captar el agua que cae sobre los techos de las obras civiles y crear microacuíferos. Para el caso del AVQ donde el espesor de la zona no saturada, en la zona urbana, es mayor a los 50 m, y dada la presencia de horizontes de arena y arcilla de la unidad geológica sedimentos vulcanosedimentarios, es menos riesgoso un problema de contaminación; sin embargo; es necesario crear una cultura sobre el cuidado del agua. En la **Figura 5.21** se presenta un esquema idealizado de la forma de aprovechar el agua.



Figura 5.21 Esquema idealizado para aprovechar el agua de lluvia que se capta en los techos de las obras civiles

- **Objetivos**

- Captar e infiltrar el agua que cae en los techos de las obras civiles al subsuelo.
- Cuantificar el volumen de agua lluvia potencial que cae en los techos de las obras civiles

- **Alcances**

El aprovechamiento del agua superficial proveniente de los techos de las obras civiles e infiltrado al subsuelo permitirá recargar al AVQ.

- **Área de estudio**

Zona urbana del AVQ

Actividades

- Establecer las superficies de techos que pueden utilizarse para captar agua.
- Cuantificar el volumen de agua que se puede infiltrar.
- Diseñar la infraestructura para captar el agua.
- Construir la infraestructura.
- Realizar campañas de concientización sobre el aprovechamiento del agua de los techos
- Crear la cultura para llevar a cabo el proyecto en el que incluya los cuidados, tratamientos que debe aplicarse al agua de lluvia proveniente de los techos.
- Concertar con la sociedad sobre el beneficio de captar agua de lluvia y apoyo económico para que realicen las obras de ingeniería necesarias para aprovechar el agua.
- Hacer propuesta para reglamentar el aprovechamiento de las aguas provenientes de los techos

En la **Figura 5.22** se presenta en forma gráfica el proceso de adquisición de datos, procesado, análisis y resultados.

Factores críticos para realizar el proyecto

- **Costo económico de generación de la infraestructura.** Se sugiere iniciar con los nuevos desarrollos habitacionales, comerciales o empresas.
- **Costo social.**
- **Cultura.** La población no está educada para mantener limpios los techos de sus casas, será necesario promover una cultura para concientizar a la población a aprovechar el agua de sus techos.
- **Definir la instancia que llevará a cabo el proyecto.**
- **Autorización de CONAGUA.**
- **Documentación del proyecto.**
- **Definir responsables del mantenimiento de la infraestructura que se desarrolle.**

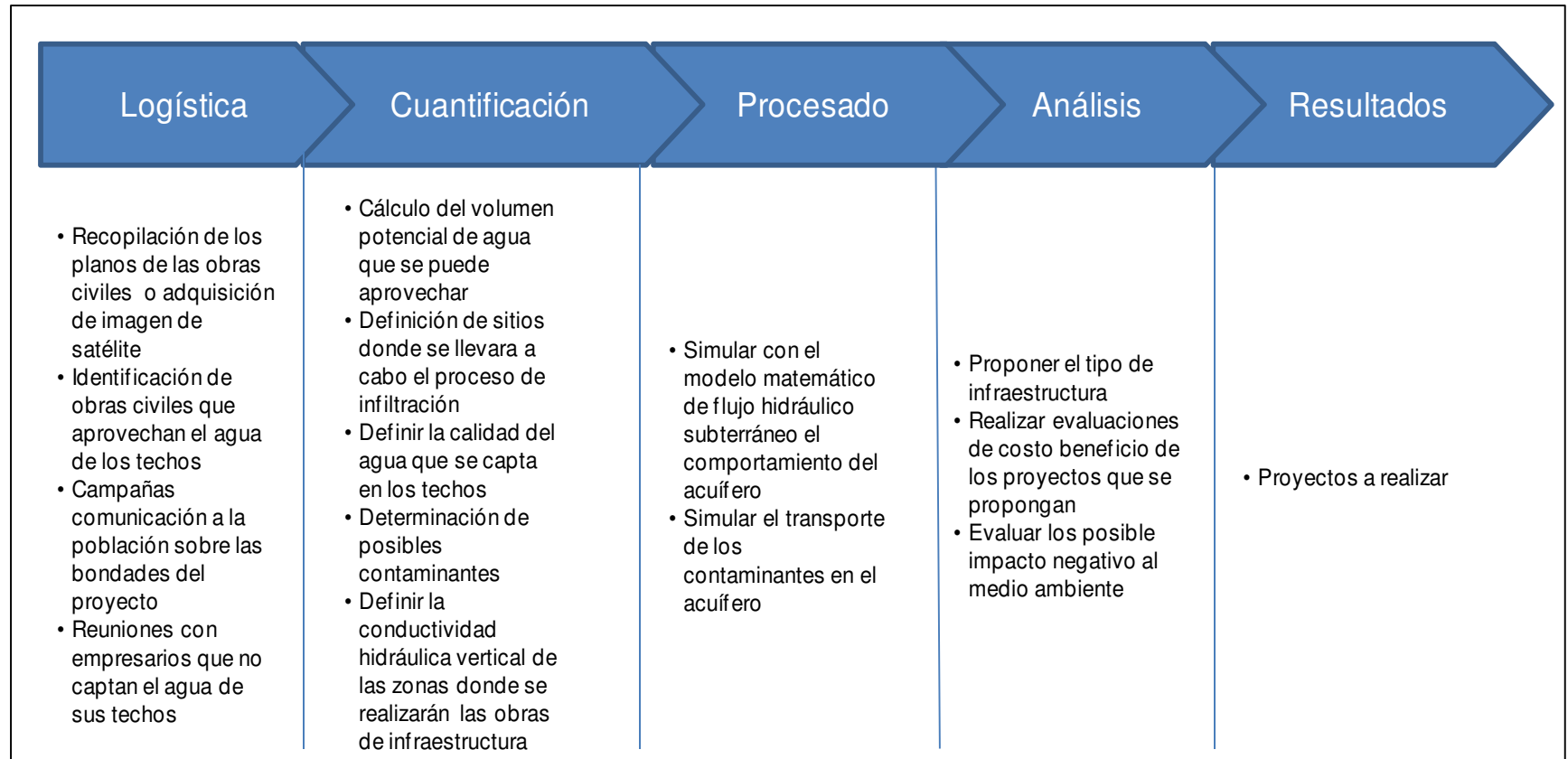


Figura 5.22. Proceso para infiltrar agua aprovechando el agua de los techos de las obras de ingeniería civil

5.4.4. Estimación de la conductividad hidráulica en la zona no saturada

A la fecha no se conoce el valor de la conductividad hidráulica de la zona no saturada. Se tiene conocimiento en algunos sitios con información de pruebas de bombeo realizadas en pozos o bien a través de la interpretación de los aforos de los pozos al término de la perforación. El valor que se conoce es de un intervalo de roca en situación de saturación. En la actualidad las condiciones de la zona no saturada han variado por compactación, movimientos diferenciales del terreno, lo que se traduce que los valores de conductividad son diferentes.

El proyecto que se propone está enfocado a obtener un valor estimado con base en un estudio de imagen eléctrica 4D.

- **Objetivos**

- Conocer el comportamiento eléctrico tridimensional en el tiempo de un volumen de roca al aplicarle un trazador.
- Estimar la conductividad hidráulica.

- **Alcances**

El conocimiento del valor estimado de conductividad hidráulica permitirá conocer la velocidad con que se mueve el agua en el subsuelo y corroborar la hipótesis si en las condiciones actuales que guarda el acuífero el volumen de agua de infiltración recarga al acuífero.

- **Área de estudio**

Se definirá un área con una superficie de 500 x 500 m en la zona de la salida del río Querétaro, con base en el resultado de la exploración geofísica bidimensional propuesta en el proyecto Caracterización de la zona drenada, inciso 5.5.1

Actividades

- Definir el área.
- Hacer una malla de 100 x 100 m con separación de 10 m entre sondeos.
- Definir un trazador (de preferencia cloruro de sodio).
- Realizar una perforación en el centro del arreglo geométrico definido cuando menos de 5 m de profundidad para evitar la evaporación y saturación del suelo.
- Cuantificar el volumen de agua necesario para saturar la zona de estudio.
- Realizar las mediciones para obtener valores de corriente-voltaje a diferentes tiempos, por ejemplo 48 horas con mediciones cada hora.
- Procesar los datos de cada imagen (48 imágenes tridimensionales)
- Estimar la velocidad de flujo del agua.
- Definir la dirección preferencial de la trayectoria del agua infiltrada.
- Estimar la conductividad hidráulica de la zona estudiada.

En la **Figura 5.23** se presenta en forma gráfica el proceso de adquisición de datos, procesado, análisis y resultados.

Factores críticos para realizar el proyecto

- Muy costoso.
- Disponibilidad de un sitio y permiso del dueño para realizar el estudio.
- Autorización de CONAGUA
- Definir la instancia que llevará a cabo el proyecto.
- Documentación del proyecto.

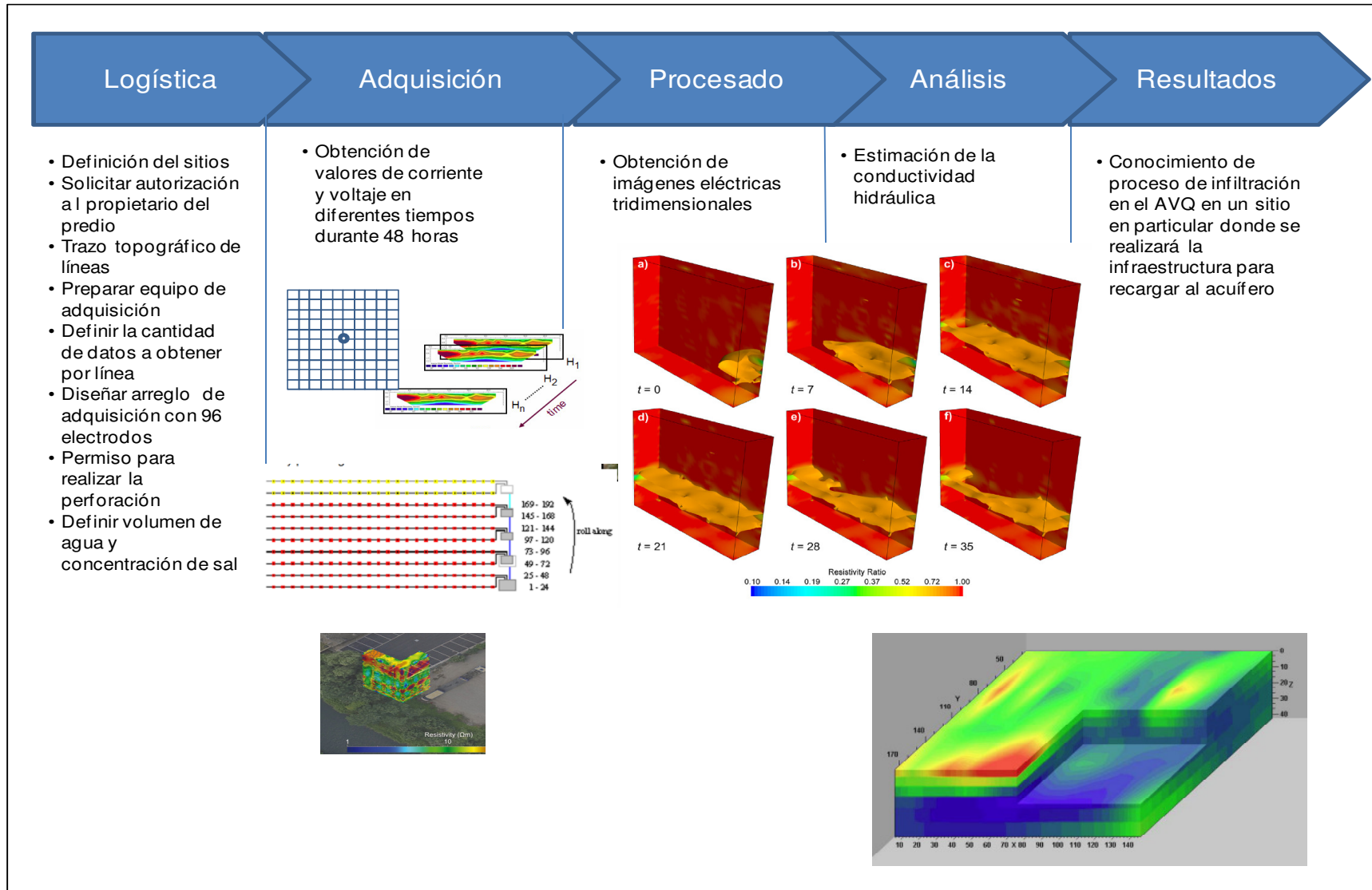


Figura 5.23. Proceso para estimar el valor de la conductividad hidráulica de la zona no saturada

5.4.5. Resguardar las áreas naturales protegidas

En el AVQ se tiene consideradas ocho áreas naturales protegidas, para los fines del proyecto de recarga sobresalen: el parque nacional “El Cimatario”, reserva estatal “Mario Molina-Pasquel, El Pinalito” y la Zona sujeta a conservación ecológica “El Tángano”,

Son áreas donde la pendiente es superior a los 20° y donde es escurrimiento del agua de lluvia es muy alto provocando, cuando no existe vegetación, el traslado de suelo hacia las partes bajas).

Para este proyecto se propone crear la infraestructura natural que reduzca la velocidad del agua.

- **Objetivos**
 - Preservar las áreas naturales protegidas.
 - Reducir la velocidad del agua de lluvia para evitar la erosión del suelo.
- **Alcances**

Conservar el entorno ecológico del AVQ.

- **Área de estudio**

Áreas con topografía alta (cerro Cimatario, El Pinalito y áreas vírgenes)

Actividades

- Identificar las corrientes superficiales.
- Estimar los volúmenes que transitan por esas corrientes.
- Definir la infraestructura que permita que el agua tenga más estancia en la zona. (algunas de las técnicas propuestas en el capítulo 4).

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Primera

El AVQ presenta condiciones favorables para llevar a cabo un proyecto de infiltración de agua para recargar el acuífero y mantener los niveles de agua subterránea, por las siguientes razones:

- a. La zona no saturada presenta un espesor superior a los 100 m.
- b. Por las condiciones socioeconómicas se demanda cada día mayores volúmenes de agua, por lo que hay que proponer alternativas para captar agua superficial y recuperar o mantener los niveles del agua subterránea.
- c. Se encuentra en una zona semidesértica donde el agua subterránea en estos momentos es la única fuente de abastecimiento sustentable; sin embargo, por predicciones realizadas a través de modelos de simulación de agua subterránea no es un recurso sustentable.
- d. La explotación intensiva está ocasionando la reactivación y generación de fallas que ponen en riesgo la infraestructura urbana y vidas humanas, así como la contaminación del agua subterránea. Al aminorar o contrarrestar dicha explotación a través de la infiltración, los efectos negativos se reducen.
- e. La columna estratigráfica de la zona no saturada está compuesta por, material aluvial, sedimentos volcanoclásticos y basaltos, los cuales presentan diferentes valores de permeabilidad. Sin embargo, se identifica que la información litológica de los pozos perforados no es congruente con la columna geológica del área. Es necesario homologar los términos y descripciones geológicas para tener un conocimiento más detallado. Lo anterior se sustenta porque en la representación de algunos elementos en las secciones geológicas no es consistente con la posición real en campo, por ejemplo las fallas presentan una posición diferente a la posición que tienen en realidad.
- f. Por la importancia que tiene el desarrollo socioeconómico del AVQ es necesario plantear y contar con los recursos económicos necesarios para llevar el seguimiento continuo de su evolución.
- g. Las propiedades hidrodinámicas de las rocas de la zona drenada no están evaluadas.. La zona drenada se caracteriza por dos medios, uno poroso y otro fracturado; ambos son favorables para llevar a cabo un proyecto de infiltración, presentan una transmisividad y conductividad media, valores obtenidos en condiciones hidrodinámicas de saturación; las condiciones actuales deben haber cambiado. Es necesario aplicar técnicas indirectas que permitan tener una idea del valor de infiltración.

Segunda

La propuesta del modelo de infiltración plantea un proceso en el que se proponen diversas actividades ordenadas, en las cuales se considera la disponibilidad del agua superficial y subterránea, la calidad, la normatividad, el diseño, construcción, mantenimiento y documentación del proyecto. Para cada una de las partes del proceso se plantean los objetivos que deben cubrirse. Se recomienda presentarla a la SEMARNAT a través de la CONAGUA para que valide el proceso.

Tercera

Existe una gran cantidad de información hidrológica, hidrogeológica, geológica, geofísica, geográfica y aunque no se encuentra actualizada, permite tener el contexto y hacer el planteamiento para llevar a cabo un proyecto de infiltración. Es necesario crear la cultura para documentar y guardar las actividades y acciones que se desarrollasen sobre este tema para que sean de apoyo para la toma oportuna de decisiones y como parte del conocimiento del AVQ.

Cuarta

Con el propósito de obtener información de la zona no saturada, a mayor área, se proponer la aplicación del método geoeléctrico a través de la obtención de imágenes eléctricas 4D, en las cuales se puede monitorear el avance de los fluidos en el espacio y tiempo. Se puede considerar como un indicador de la conductividad hidráulica.

Quinta

La recarga artificial es una opción factible para mantener o recuperar el nivel estático del acuífero del Valle de Querétaro. La región presenta una precipitación anual considerable lo que se traduce en buenos volúmenes de agua para infiltrar y las unidades a infiltrar, al tratarse de medios porosos o fracturados presentan una conductividad hidráulica y una transmisividad media, lo que promete buenos resultados a mediano y largo plazo.

Sexta

Es necesario que todas las instancias de gobierno a los tres niveles, población, agricultores e industrias conozcan la situación del AVQ y estén consientes de que el proceso de infiltración puede alargar la vida del acuífero y volverlo sustentable.

Séptima

Del análisis de la información se identifica que se pueden desarrollar siete tipos de proyectos relacionados con la infiltración

- a. Caracterización de la zona drenada para: Definir el comportamiento eléctrico de la zona drenada y asociarlo a los eventos geológicos. Identificar zonas con permeabilidad e impermeabilidad. Conocer el espesor del horizonte donde se lleva a cabo el proceso de evapotranspiración. Para este caso se identifican cinco zonas con potencial para llevar a cabo estudios, siendo en la zona de Santa María Magdalena, en estos momentos la más apropiada para evaluarla.
- b. Aprovechamiento del agua de los bordos para: Caracterizar la zona no saturada de los sitios donde se ubican los bordos. Definir la posición del nivel del agua subterránea. Definir el volumen de agua que se infiltrará (sobre este punto la CEA

lleva un seguimiento permanente del comportamiento de los bordos). Definir el tipo de tratamiento que aplicará al agua superficial para darle la calidad para evitar contaminación en el subsuelo. Proponer obras de ingeniería para acelerar el proceso de infiltración (pozos de inyección o canales subterráneos) Se tienen identificados cuatro bordos que por la información que existe captan volúmenes importantes de agua y se pueden infiltrar.

- c. Captación de agua de lluvia de los techos de las obras civiles (casa habitación, centros comerciales, industrias) para: Captar e infiltrar el agua que cae en los techos de las obras civiles al subsuelo. Cuantificar el volumen de agua lluvia potencial que cae en los techos de las obras civiles. Sobre este tema es necesario generar una cultura de cambio en la población en la que se cree conciencia de la necesidad de aprovechar de manera óptima el agua, siendo un punto importante la captación de agua superficial.
- d. Estimación de la conductividad hidráulica en la zona no saturada. Conocer el comportamiento eléctrico tridimensional en el tiempo de un volumen de roca al aplicarle un trazador. Estimar la conductividad hidráulica. Para este caso es necesario aplicar un método indirecto, imagen eléctrica 4D.
- e. Resguardar las áreas naturales protegidas. Es una parte importante para el proceso de infiltración ya que en ellas por su posición topográfica es necesario reducir la velocidad del agua de escurrimiento y preservar las áreas boscosas y altas.
- f. Evolución de la salinidad del suelo agrícola. Sobre este punto en la medida que el suelo es más salado se reduce la infiltración del agua, es necesario llevar un monitoreo de su evolución para tomar las medidas correctivas adecuadas.
- g. Aprovechamiento del agua residual, Sobre este punto, si bien el AVQ presenta condiciones ideales, por el espesor de la zona no saturada, es necesario primero caracterizar bien las áreas donde se pueda infiltrar y cumplir con la normatividad.

Octava

El costo del proyecto no fue valorado en este trabajo, sin embargo se considera que el costo es proporcional a los beneficios que acarrearía este proyecto. El AVQ tiene una fuerte producción agrícola e industrial y con este proyecto se aseguraría la vida de la misma por más tiempo.

Novena

El riego con agua que proviene de mayores profundidades puede acarrear consigo mayor cantidad de minerales, aunado al proceso de infiltración y evapotranspiración, puede incrementar la salinidad del suelo agrícola lo que podría perjudicar su productividad.

Décima

Gracias a las condiciones hidrogeológicas en las que se encuentra el acuífero del Valle de Querétaro, se puede llevar a cabo un proyecto piloto para infiltrar el agua residual de la ciudad, después de pasarla por un proceso de tratamiento. Existe información de la presencia de un acuífero colgado cerca del río Querétaro, y a pesar de que el acuífero colgado capta agua contaminada, el acuífero inferior no se ve perjudicado por dicha situación.

6.2. Recomendaciones

Primera

Proponer el proyecto a la Comisión Nacional del Agua, a la Comisión Estatal del Agua, a Protección Civil, a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales o cualquier otra institución interesada con el fin de buscar el patrocinio para llevarlo a cabo.

Segunda

Hacer la evaluación económica del proyecto, determinar la relación costo beneficio.

Tercera

Realizar un modelo geoelectrico de 4 dimensiones del AVQ para tener una idea mas precisa del comportamiento del mismo antes, durante y después de la recarga.

Cuarta

La información acerca del AVQ se encuentra dispersa. Es necesario generar un banco de información donde se concentre la información de manera organizada.

Quinta

Validar los estudios hidrológicos que existan de la zona, así como realizar nuevos estudios hidrológicos.

Sexta

Realizar un monitoreo periódico de la salinidad del suelo agrícola y tomar las medidas necesarias para cuidar y mantener su productividad.

Bibliografía

Aguirre Díaz, Gerardo de Jesús/Zúñiga-Dávila Madrid, F. Ramón/ Pacheco-Alvarado, Francisco Javier/ Guzmán-Spaziale, Marco/ Nieto-Obregón, Jorge. *El graben de Querétaro, México. Observación de fallamiento activo*. Geos, 2005, Vol. 20 No. 1, p.2-7.

Carreon Freyre, Dora/ Cerca, Mariano/Luna González, Laura/ Gámez, Francisco J. *Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del valle de Querétaro*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 22, número 001, Universidad Nacional Autónoma de México, Querétaro, México, año 2005, p. 1-18

Central Ground Water Board Ministry of Water Resources. *Guide on artificial recharge to ground water*. New Delhi, May 2000.

Chadha. D.K. *Rain water harvesting and artificial recharge to groundwater*. Central Groundwater Broad Ministry of Water Resources. September 2000.

Chemetall Mexicana S.A. de C.V. Planta Querétaro. MIA Incluye Actividad Altamente Riesgosa, 2005, Pag. 26-47.

Clima en Querétaro. <http://clima.meteored.com/clima-en-queretaro-766250.html>

Comisión Estatal del Agua, CEA. <http://www.ceaqueretaro.gob.mx>.

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero valle de Querétaro, estado de Querétaro*. CONAGUA, México, D.F., 30 de abril de 2000.

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales*. CONAGUA, Diario Oficial. México, D.F., 17 de abril de 2000.

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. *Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua*. CONAGUA, Diario Oficial. México, D.F., 18 de agosto de 2009.

Custodio, E. Llamas, M. Ramón. *Hidrología Subterránea*. Omega, 1983.

Doerge, T. Kitchen, N.R. Lund E.D. *Mapeo de Conductividad Eléctrica del Suelo*. Guía para el Manejo del Suelo Adecualo a cada Sitio- SSMG.

Duggal, V.K. *Water Harvesting and Artificial Recharge*. Rajiv Ganghi National Drinking Water Mission. Department of Drinking Water Supply. Ministry of Rural Development. Government of India. December 2004.

Fetter, C. W. *Applied Hydrogeology*, Prentice-Hall, 4ª ed. 2001

Fitts, Charles. R. *Groundwater Science*. Elsevier, 2002.

Freeze, R. Allan. Cherry, John A. *Groundwater*, Prentice-Hall, 1979.

Geofísica de exploraciones guysa, S.A. de C.V., *Estudio Geohidrológico integral del valle de Querétaro y sus alrededores para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos*, Informe inédito. Comisión Estatal del Agua de Querétaro, 1991.

Geofísica de exploraciones guysa, S.A. de C.V., *Seguimiento del estudio Geohidrológico integral del valle de Querétaro y sus alrededores para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos*, Informe inédito. Comisión Estatal del Agua de Querétaro, 1992.

Geofísica de exploraciones guysa, S.A. de C.V., *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de la red de observación de los acuíferos de Aguascalientes y Querétaro*. Informe inédito. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, 1997.

Instituto Nacional de Ecología. www.ine.gob.mx.

Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. *Enciclopedia de los Municipios de México, Querétaro*.

<http://www.elocal.gob.mx/work/templates/enciclo/queretaro/>.

International Association of Hydrologists, *Groundwater Recharge – A guide to Understanding and Estimating Natural Recharge*- E. Groba, M. R. Llamas, J. Margat, J. E. Moore, I. Simmers, Vol. 8, 1990, Pag. 101-109.

IWMI-Tata Water Policy Program. *Inovations in Groundwater Recharge. Issue 1, Water Policy Briefing*, January 2002.

Karnataka State Council for Science and Technology. *Ground water recharge*. KSCSTRWH-groundwaterrecharge.mht, 2006.

Martínez Hernández, Juana Eulalia. *Identificación de la recarga natural e inducida en la cuenca de San Luis Potosí*. Dirigida por Dr. Antonio Cardona Benavides. Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P., 2008.

Montes León, María Alejandra L./Domínguez Cortazar, Miguel Ángel/ Ventura Ramos, Eusebio. Metodología para la estimación del riesgo de erosión hídrica en cuencas hidrográficas utilizando un SIG. Facultad de Ingeniería-División del Posgrado, Universidad Autónoma de Querétaro.

Pacheco Martínez, Jesús/ Arzate Flores, Jorge Arturo. Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.24, núm. 3, año 2007, p. 389-402.

Pacheco Martínez, Jesús. *Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. Dirigida por Dr. Jorge Arturo Arzate Flores. Tesis. Centro de Geociencias, UNAM campus Juriquilla, Querétaro, Agosto del 2007, México.

Registro Público de Derechos de Agua, Comisión Nacional del Agua, abril, 2011.

Roscoe Moss Company, *Handbook of Ground Water Development*, Wiley Interscience, 1990.

Scanlon, Bridget R/Healy, Richard W./ Cook, Peter G. *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. Hydrogeology Journal. 2002.

Servicio Geológico Mexicano, SGM. Carta geológico-minera. Primera Edición 1999. Boulevard Felipe Ángeles km 93.50-4, col. Venta Prieta, C.P. 42080 Pachuca, Hgo.

Simmers, I. *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. Reidel Publishing Company. March 1987.

Sophocleous, M. *Groundwater recharge*. University of Kansas, Lawrence, United States. Encyclopedia of Life Support System (EOLSS), 2004.

Spandre R. *Artificial Groundwater Recharge*. <http://www.unl.org/unldoc/EOLSS/E2-09-06-06-TXT.aspx#1>. Introduction. Universidad de Pisa Italia.

Sukia Irastorza, Jon. *Recarga de acuíferos mediante agua de lluvia*. Maarten Willem Saaltink y Jesús Carrera Ramírez. 2009, Ingeniería Marítima, Ingeniería Hidráulica, Ingeniería Civil i el seu entorn.

USGS Groundwater Information. <http://water.usgs.gov/ogw/gwrp/>. USGS Groundwater Resources Program.

Wolfe, Donald L. Hydrogeology Manual. Water Resources Division, January 2006. Los Angeles County Department of Public Works.

Xu, Y. van Tonder, G.J. Estimation of recharge using a revised CRD method. Department of Water Affairs and Forestry, Pretoria, Institute for Groundwater Studies.2001. Water S.A. Vol.27. University of the Free State, Bloemfontein

Yangbo, Chen. *An urban flooding treatment model based on GIS techniques*. Informe inédito. Sun Yat-Sen University, Guandzhou. Department of Water Resources and Environmnet. 2004, British Hydrologic Society.

Anexos

Anexo. Información necesaria para los subprocesos de cuantificación de agua superficial y subterránea

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
Superficie del acuífero		Km ²	484						
Topografía									
	Superficie con topografía de 0 a 3%	km ²							Cuantificar
	Superficie con topografía de 4 a 6%	km ²							Cuantificar
	Superficie con topografía de 7 a 10%	km ²							Cuantificar
	Superficie con topografía de 11 a 15%	km ²							Cuantificar
	Superficie con topografía mayor de 15%	km ²							Cuantificar
	Superficie de zona impermeable (casas, industria, pavimento)	km ²							Cuantificar
	Superficie de zona agrícola de temporal	km ²							Cuantificar
	Superficie de zona agrícola con riego	km ²							Cuantificar
	Superficie de pastizales	km ²							Cuantificar
	Superficie de bosque	km ²							Cuantificar
	Superficie de zona federal	km ²							Cuantificar
Clima									
	Número de estaciones climatológicas	Número	15						Monitorear permanentemente, revisar información
	Distribución de estaciones climatológicas (promedio de superficie de cobertura)	km ² /estación	32						Mantenerlas en operación permanente
	Estaciones con información continua de los últimos 20 años	Número							Revisar información disponible. Hay información continua de 2006 a la fecha , para años anteriores la información es discontinua
	Estaciones con información discontinua de los últimos 20 años	Número							Revisar información disponible. Hay información continua de 2006 a la fecha
	Estaciones con información con más de 20 años	Número							Revisar información disponible. Hay información continua de 2006 a la fecha

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
Precipitación									
	Días más lluviosos al año	días			■				Identificar datos
	Precipitación de días más lluviosos	mm/día			■				Identificar datos
	Precipitación máxima diaria	mm/día			■				Identifica datos
	Precipitación media anual	mm/año						■	Monitorear permanentemente
	Precipitación media mensual (1,2,3,...,12)	mm/mes							Cuantificar de 2006 a la fecha y estimar para antes de 2006
Temperatura									
	Temperatura media anual	°C			■				Identificar datos
	Temperatura media mensual (1,2,3,...,12)	°C			■				Cuantificar de 2006 a la fecha y estimar para antes de 2006
Evaporación									
	Evaporación media anual	mm/año			■				Identificar datos
	Evaporación media mensual	mm/mes			■				Cuantificar de 2006 a la fecha y estimar para antes de 2006
	Evaporación media diaria	mm/día			■				Cuantificar de 2006 a la fecha y estimar para antes de 2006
	Evaporación días más lluviosos	mm/día			■				Cuantificar de 2006 a la fecha y estimar para antes de 2006
Estaciones hidrométricas									
	Escurremientos naturales en el acuífero	Número		■					Identificar los escurrimientos susceptibles de aprovechar
	Escurremientos naturales perennes	Número		■					Identificar los escurrimientos susceptibles de aprovechar
	Escurremientos naturales estacionales	Número		■					Identificar los escurrimientos susceptibles de aprovechar
	Número de estaciones	Número	1		■				Ubicar estaciones de los escurrimientos a las entradas del acuífero Santa Rosa de Jaúregui, La Cañada, El Batán
	Condiciones de las estaciones hidrométricas	condición		■					Construir estaciones
	Volumen que transita por las estaciones hidrométricas a la entrada del acuífero	m³		■					Generar información
	Volumen que transita por las estaciones hidrométricas a la salida del acuífero	m³				■			Mantener el monitoreo en la estación Ameche

Anexo. (Continuación).

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
Almacенamientos superficiales									
	Bordos	Número	12						Mantener monitoreo permanente, se cuenta con información continua de 2006 a la fecha
	Volumen de almacenamiento	m ³							Cuantificar volumen, se cuenta con información continua de 2006 a la fecha
	Presas	Número	2						Mantener monitoreo, se cuenta con información continua de 2006 a la fecha
	Volumen de almacenamiento	m ³							Cuantificar volumen, se cuenta con información continua de 2006 a la fecha
	Operación de los almacenamientos	Situación							Continuar con la operación
Geología									
	Calizas y lutitas (1)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día							Cuantificar
	Transmisividad	m ² /s							Cuantificar
	Coeficiente de almacenamiento								Cuantificar
	Espesor promedio	m							Cuantificar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar
	Andesitas (2)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día	0.8 a 40						Actualizar
	Transmisividad	m ² /s	0.8 x10 ⁻³						Actualizar
	Coeficiente de almacenamiento		0.07						Actualizar
	Espesor promedio	m	200						Actualizar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Ignimbritas (3)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día	0.8 a 40 m/día						Actualizar
	Transmisividad	m ² /s	0.8 x10 ⁻³ m ² /s						Actualizar
	Coeficiente de almacenamiento								Cuantificar
	Espesor promedio	m	poco						Cuantificar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar
	Basalto lajeado (4)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día	0.8 a 40 m/día						Actualizar
	Transmisividad	m ² /s	0.8 x10 ⁻³ m ² /s						Actualizar
	Coeficiente de almacenamiento		0.07						Actualizar
	Espesor promedio	m	350 m						Actualizar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar
	Tobas brechoides (5)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día	0.8 a 40 m/día						Actualizar
	Transmisividad	m ² /s	0.8 x10 ⁻³ m ² /s						Actualizar
	Coeficiente de almacenamiento								Cuantificar
	Espesor promedio	m	variable						Cuantificar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar

Anexo. (Continuación)

	Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
Tobas vitrocrystalinas (6)	Km ²							Cuantificar
Conductividad hidráulica	m/día							Cuantificar
Transmisividad	m ² /s							Cuantificar
Coeficiente de almacenamiento								Cuantificar
Espesor promedio	m							Cuantificar
Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
Dirección preferencial								Cuantificar
Tobas limo arenosas (7)	Km ²							Cuantificar
Conductividad hidráulica	m/día							Cuantificar
Transmisividad	m ² /s							Cuantificar
Coeficiente de almacenamiento								Cuantificar
Espesor promedio	m							Cuantificar
Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
Dirección preferencial								Cuantificar
Tobas vítreas (8)	Km ²							Cuantificar
Conductividad hidráulica	m/día							Cuantificar
Transmisividad	m ² /s							Cuantificar
Coeficiente de almacenamiento								Cuantificar
Espesor promedio	m							Cuantificar
Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
Dirección preferencial								Cuantificar
Sedimentos vulcanolacustres (9)	Km ²							Cuantificar
Conductividad hidráulica	m/día	0.032 a 1.0						Actualizar
Transmisividad	m ² /s	0.3 x10 ⁻³						Actualizar
Coeficiente de almacenamiento		0.07						Actualizar
Espesor promedio	m	340 a 600						Actualizar

Anexo. (Continuación)

	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar
	Basalto (10)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día	0.8 a 40						Actualizar
	Transmisividad	m ² /s	0.8 x10 ⁻³						Actualizar

Anexo. (Continuación)

		Unidad	Cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Coefficiente de almacenamiento		0.07						Actualizar
	Espesor promedio	m	350						Actualizar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar
	Brecha volcánica (11)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día	0.8 a 40						Actualizar
	Transmisividad	m ² /s	0.8 x10 ⁻³						Actualizar
	Coefficiente de almacenamiento		0.07						Actualizar
	Espesor promedio	m	20 a 100						Actualizar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar
	Aluvión y suelo residual (12)	Km ²							Cuantificar
	Conductividad hidráulica	m/día	0.032 a 1						Actualizar
	Transmisividad	m ² /s	0.2 x10 ⁻³						Actualizar
	Coefficiente de almacenamiento		0.07						Actualizar
	Espesor promedio	m	70						Actualizar
	Índice de fracturamiento	m/m ²							Cuantificar
	Dirección preferencial								Cuantificar

Anexo. (Continuación)

Geohidrología										Cuantificar
	Número de pozos	Número	239							Mantener actualizado el censo de aprovechamientos
	Número de pozos activos	Número	239							Actualizar
	Número de pozos inactivos	Número								Actualizar
	Número de pozos secos en el año anterior	Número								Cuantificar
	Profundidad promedio de los pozos activos	m	150 a 500							Actualizar

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Profundidad mínima de los pozos activos	m	150						Actualizar
	Profundidad máxima de los pozos activos	m	500						Actualizar
	Densidad de pozos	pozo/km ²							Actualizar
	Densidad de pozos en unidad geológica 1	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 2	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 3	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 4	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 5	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 6	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 7	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 8	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 9	pozo/unidad geológica							Calcular dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Densidad de pozos en unidad geológica 10	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 11	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Densidad de pozos en unidad geológica 12	pozo/unidad geológica							Calcular dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 1	M							Calcular dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 2	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 3	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 4	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 5	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 6	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 7	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 8	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 9	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 10	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 11	M							Actualizar dato
	Profundidad de pozos en unidad geológica 12	M							Actualizar dato
	Gasto promedio de los pozos	Lps							Actualizar dato
	Gasto promedio en pozos con profundidad de 0 a 100 m	Lps							Actualizar dato
	Gasto promedio en pozos con profundidad de 100 a 150 m	Lps							Actualizar dato
	Gasto promedio en pozos con profundidad de 150 a 200 m	Lps							Actualizar dato
	Gasto promedio en pozos con profundidad de 200 a 250 m	Lps							Actualizar dato
	Gasto promedio en pozos con profundidad de 250 a 300 m	Lps							Actualizar dato
	Gasto promedio en pozos con profundidad de 300 a 500 m	Lps							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1a	2	3	4	Acción inmediata
	Gasto promedio en pozos con profundidad mayor de 500 m	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 1	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 2	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 3	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 4	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 5	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 6	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 7	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 8	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 9	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 10	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 11	lps							Actualizar dato
	Gasto promedio de pozos en unidad geológica 12	lps							Actualizar dato
	Red de pozos piloto	número							Actualizar dato
	Densidad de pozos piloto	pozos/km ²							Actualizar dato
	Pozos piezométricos específicos para la función	pozos							Actualizar dato
	Pozos de extracción que operan como pozos piloto	pozos							Actualizar dato
	Historial piezométrico								Actualizar dato
	Anual (al término de la temporada de lluvias)	pozos							Actualizar dato
	Bianual (al término de la temporada de estiaje)	pozos							Actualizar dato
	Años con historial piezométrico	años							Actualizar dato
	Volumen anual de extracción por estudios técnicos	m ³							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Volumen anual de extracción REPDA	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 1	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 2	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 3	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 4	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 5	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 6	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 7	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 8	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 9	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 10	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 11	m ³							Actualizar dato
	Volumen de extracción de la unidad geológica 12	m ³							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 1	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 2	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 3	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 4	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 5	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 6	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 7	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 8	cantidad							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 9	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 10	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 11	cantidad							Actualizar dato
	Pruebas de bombeo en la unidad geológica 12	cantidad							Actualizar dato
	Configuración de la profundidad al nivel estático	mapa							Actualizar dato
	Configuración de la elevación del nivel estático	mapa							Actualizar dato
	Configuración de la evolución del nivel estático con relación al último año	mapa							Actualizar dato
Sector agrícola									Actualizar dato
	Volumen de agua subterránea extraído	m³/año							Actualizar dato
	Volumen de agua superficial de escurrimiento natural utilizado	m³/año							Actualizar dato
	Volumen de agua residual utilizado	m³/año							Actualizar dato
	Volumen de agua superficial concesionado (REPDA)	m³/año							Actualizar dato
	Volumen de agua subterráneas concesionado (REPDA)	m³/año							Actualizar dato
	Volumen de agua residual concesionado (REPDA)	m³/año							Actualizar dato
	Tipos de cultivo	tipo							Actualizar dato
	Rotación de cultivos	número							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Tipo de tratamiento a las aguas residuales	tipo							Actualizar dato
	Pozos con medidor operando	número							Actualizar dato
	Pozos con medidor no funcionando	número							Actualizar dato
	Pozos sin medidor	número							Actualizar dato
	Sitios donde vierte sus efluentes	número							Actualizar dato
	Mantenimiento de los pozos	periodicidad							Actualizar dato
Sector público urbano	Volumen de agua de pozo	m ³ /año							Actualizar dato
	Tipo de tratamiento del agua de pozo	Tipo							Actualizar dato
	Volumen de aguas residuales producidas	m ³ /año							Actualizar dato
	Plantas de tratamiento	número							Actualizar dato
	Tipo de tratamiento de las aguas residuales	tipo							Actualizar dato
	Volumen de aguas tratadas	m ³ /año							Actualizar dato
	Uso de agua tratada	uso							Actualizar dato
	Tanques de almacenamiento de agua potable	número							Actualizar dato
	Volumen de tanques de almacenamiento	m ³							Actualizar dato
	Condición de la red de distribución	situación							Actualizar dato
	Condición de la red de alcantarillado	situación							Actualizar dato
	Condición de la red pluvial	situación							Actualizar dato
	Longitud de la red de abastecimiento	km							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Cosecha por tipo de cultivo	Ton							Actualizar dato
	Lámina de riego aplicada por cultivo	mm							Actualizar dato
	Tipos de cultivo por riego de pozos	km ²							Actualizar dato
	Tipos de cultivo por riego de temporal	km ²	0						Actualizar dato
	Evapotranspiración	Mm ³ /año							Actualizar dato
	Superficie de riego tecnificada	km ²							Actualizar dato
	Tipos de tecnificación de riego (superficie)	km ²							Actualizar dato
	Tipo de medidor	número							Actualizar dato
	Pozos con medidor operando	número							Actualizar dato
	Pozos con medidor no funcionando	número							Actualizar dato
	Pozos sin medidor	número							Actualizar dato
	Periodicidad en el mantenimiento de los pozos								Actualizar dato
	Relación consumo de agua por tipo de cultivo	m ³ /ton							Actualizar dato
Sector industrial									Actualizar dato
	Volumen de agua subterránea extraído	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua superficial	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua residual utilizada	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua concesionada (REPDA)	m ³ /año							Actualizar dato
	Tipo de industria	tipo							Actualizar dato
	Tipo de procesos de utiliza	tipo							Actualizar dato
	Usos del agua	uso							Actualizar dato
	Relación consumo de agua por producto industrial	m ³ /producción							Actualizar dato
	Volumen de agua residual producida	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua residual tratada	m ³ /año							Actualizar dato
	Plantas de tratamiento	cantidad							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1a	2	3	4	Acción inmediata
	Diámetros y longitudes de la red de abastecimiento	Diam y longitud							Actualizar dato
	Longitud de la red de alcantarillado	km							Actualizar dato
	Diámetros y longitudes de la red de alcantarillado	Diam y longitud							Actualizar dato
	Mantenimiento de la red de alcantarillado	km	174						Actualizar dato (último 2004)
	Diámetros y longitudes de la red pluvial	Diam y longitud							Actualizar dato
	Planos de la red de abastecimiento	cantidad							Actualizar dato
	Planos de la red de alcantarillado	cantidad							Actualizar dato
	Planos de la red pluvial	cantidad							Actualizar dato
	Mantenimiento de los pozos	periodicidad							Actualizar dato
	Mantenimiento de la red de alcantarillado	periodicidad							Actualizar dato
	Mantenimiento de la red de distribución	periodicidad							Actualizar dato
	Mantenimiento de la red pluvial	periodicidad							Actualizar dato
	Áreas recurrentes de roturas de la red de abastecimiento	lugar							Actualizar dato
	Áreas recurrentes de roturas de la red de alcantarillado	lugar							Actualizar dato
	Áreas recurrentes de roturas de la red pluvial	lugar							Actualizar dato
	Volumen de agua por persona en zona residencial	m ³							Actualizar dato
	Volumen de agua por persona en zona media	m ³							Actualizar dato
	Volumen de agua por persona en zona popular	m ³							Actualizar dato
	Costo del agua por persona en zona residencial	\$							Actualizar dato
	Costo del agua por persona en zona media	\$							Actualizar dato
	Costo del agua por persona en zona popular	\$							Actualizar dato
	Número de tomas domiciliarias con medidor	número							Actualizar dato
	Número de tomas domiciliarias sin medidor	número							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1a	2	3	4	Acción inmediata
	Número de casas o departamentos	número							Actualizar dato
	Condición de los medidores	situación							Actualizar dato
	Periodicidad de cambio de medidores	periodicidad							Actualizar dato
	Volumen de agua facturado	m ³							Actualizar dato
	Volumen de agua sin facturar	m ³							Actualizar dato
Tenencia de la tierra									
	Títulos de propiedad agrícola	número							Actualizar dato
	Títulos de propiedad industrial	número							Actualizar dato
	Títulos de propiedad comercio	número							Actualizar dato
	Títulos de propiedad habitación	número							Actualizar dato
	Títulos de propiedad público urbano	número							Actualizar dato
	Títulos de propiedad federal	número							Actualizar dato
Zonas de infiltración									
	Áreas de inundación	km ²							Realizar estudio
	Áreas de recarga	km ²							Realizar estudio
	Áreas con pendiente	km ²							Realizar estudio
	Áreas con cambio de pendiente brusco	km ²							Realizar estudio
	Zonas de falla	lugar							Realizar estudio
	Zonas con fracturamiento	lugar							Realizar estudio
Calidad del agua									
	Potable	calidad							Actualizar dato
	Industrial	calidad							Actualizar dato
	Agrícola	calidad							Actualizar dato
	Residual potable sin tratamiento	calidad							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1	2	3	4	Acción inmediata
	Cosecha por tipo de cultivo	Ton							Actualizar dato
	Lámina de riego aplicada por cultivo	mm							Actualizar dato
	Tipos de cultivo por riego de pozos	km ²							Actualizar dato
	Tipos de cultivo por riego de temporal	km ²	0						Actualizar dato
	Evapotranspiración	Mm ³ /año							Actualizar dato
	Superficie de riego tecnificada	km ²							Actualizar dato
	Tipos de tecnificación de riego (superficie)	km ²							Actualizar dato
	Tipo de medidor	número							Actualizar dato
	Pozos con medidor operando	número							Actualizar dato
	Pozos con medidor no funcionando	número							Actualizar dato
	Pozos sin medidor	número							Actualizar dato
	Periodicidad en el mantenimiento de los pozos								Actualizar dato
	Relación consumo de agua por tipo de cultivo	m ³ /ton							Actualizar dato
Sector industrial									Actualizar dato
	Volumen de agua subterránea extraído	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua superficial	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua residual utilizada	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua concesionada (REPDA)	m ³ /año							Actualizar dato
	Tipo de industria	tipo							Actualizar dato
	Tipo de procesos de utiliza	tipo							Actualizar dato
	Usos del agua	uso							Actualizar dato
	Relación consumo de agua por producto industrial	m ³ /producción							Actualizar dato
	Volumen de agua residual producida	m ³ /año							Actualizar dato
	Volumen de agua residual tratada	m ³ /año							Actualizar dato
	Plantas de tratamiento	cantidad							Actualizar dato

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1a	2	3	4	Acción inmediata
	Residual potable con tratamiento	calidad							Actualizar dato
	Residual industrial sin tratamiento	calidad							Actualizar dato
	Residual industrial con tratamiento	calidad							Actualizar dato
	Tipo de contaminantes antropogénicos	tipo							Actualizar dato
	Tipos de contaminantes naturales	tipo							Actualizar dato
	Áreas donde se presentan los contaminantes antropogénicos	lugar							Actualizar dato
	Áreas donde se presentan los contaminantes naturales	lugar							Actualizar dato
Suelo									
	Tipo de suelo	Tipo							Mantener información
	Permeabilidad del suelo								Realizar estudios
	Pruebas de permeabilidad por tipo de suelo	número							Realizar estudios
	Espesor del suelo	m							Realizar estudios
	Salinización del suelo	%							Realizar estudios
Zona drenada									
	Espesor drenado de la unidad geológica 1	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 2	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 3	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 4	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 5	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 6	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 7	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 8	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 9	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 10	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible

Anexo. (Continuación)

		Unidad	cantidad	0	1a	2	3	4	Acción inmediata
	Espesor drenado de la unidad geológica 11	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Espesor drenado de la unidad geológica 12	m							Interpretar y calcular con base en información geofísica y geohidrológica disponible
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 1	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 2	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 3	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 4	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 5	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 6	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 7	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 8	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 9	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 10	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 11	m/día							Realizar estudio
	Permeabilidad hidráulica en la zona drenada de la unidad geológica 12	m/día							Realizar estudio
	Tipo de pruebas de permeabilidad aplicada	tipo							Realizar estudio
Cultura del agua infiltrada									Desarrollar estrategia
Administración del agua infiltrada									Definir responsable
Aspectos legales									