

Uso racional y sostenible de los recursos hídricos del acuífero del valle de Toluca

Jaime Gárfias Soliz,* Luvina Bibiano Cruz* e Hilario Llanos Acebo**

Recepción: 30 de enero de 2007
Aceptación: 28 de agosto de 2007

*Fac. de Ingeniería (CIRA), UAEM.
Correo electrónico: jgarfias@uaemex.mx
**Universidad del País Vasco. Dpto. de Geodinámica. Vitoria-Gasteiz, País Vasco.
Correo electrónico: gpplach@vc.ehu.es
Los autores desean expresar su agradecimiento al Conacyt (Proyecto México-Québec) y a la Universidad Autónoma del Estado de México (proyectos 2229/2006U y 2205/2006E) por la financiación y el apoyo prestado para el desarrollo de la presente investigación, así como a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) por facilitar la información hidrogeológica del acuífero del valle de Toluca.

Resumen. El agua subterránea constituye la principal fuente de agua potable en el valle de Toluca, esto ha inducido a una sobreexplotación del acuífero, así como la extinción de zonas húmedas y una constante degradación de la calidad del agua, por lo cual es necesario adoptar medidas de protección, realizando una evaluación cuantitativa de la evolución del acuífero y sus efectos a partir de estudios detallados en un contexto multidisciplinario y de datos fiables. En un primer paso hacia esta meta, el presente artículo tiene como finalidad plantear estrategias de ordenación de este recurso en el marco de un sistema más integrado y equitativo que conlleve a una explotación adecuada y duradera del recurso hidráulico. En consecuencia, se examinan algunas de las opciones de políticas esenciales en relación con distintos aspectos de la gestión del agua, ya que brindan considerables posibilidades de ser catalizadoras de un proceso más amplio de reforma de las políticas y la gestión de los recursos hídricos. Finalmente se describen los pasos para evolucionar hacia el uso sostenible de las aguas subterráneas en el valle de Toluca, buscando una mejora del conocimiento base en el que se adaptan los enfoques administrativos de ecosistemas y la administración en el manejo de las aguas subterráneas.

Palabras clave: gestión hídrica, sobreexplotación, desarrollo sustentable, explotación intensiva, valle de Toluca.

Rational and Long Term use of Aquatic Hydrolytic Resources of the Toluca Valley

Abstract. Groundwater is the primary water source in the valley of Toluca, this demand has been accompanied by the over-exploitation of the aquifer, the disappearance of wetlands and a significant risk to long-term groundwater quality. Implementing groundwater management and protection measures needs quantitative appraisal of aquifer evolution and effects based on detailed multidisciplinary studies, which have to be supported by reliable data. As a first step towards this effort, the main goal of this paper is to outline water management strategies in a more integrated and equitable system in order to move towards sustainable use of groundwater in the valley of Toluca. In consequence, some of the key policy issues in relation to these different aspects of water management are discussed here, as they offer considerable potential to be the catalysts for a wider process of change within water resources policies and management. Finally, the basic steps necessary for sustainable use of groundwater in the valley of Toluca are delineated, such as improving the knowledge base, as well as adopting the ecosystem and adaptive management approaches to managing groundwater; further improving water efficiency and adopting a goal of long-term sustainable use.

Key words: Groundwater management, overexploitation, intensive aquifer development, sustainable development, valley of Toluca.

Introducción

La vida contemporánea, debido a su alta productividad, se ha caracterizado por la elevadísima tasa de desperdicios por persona, tanto así que los problemas de contaminación constituyen una de las mayores preocupaciones de nuestra época, y aunque el interés por la investigación y la adopción de medidas para resolverlos se inició en los países más avanzados, en nuestro medio tenemos la necesidad de estudiarlos y corregirlos e indudablemente esta exigencia irá en aumento.

A medida que se utilizan y contaminan los torrentes y las aguas superficiales del planeta, se presta mayor atención a los recursos que están en el subsuelo: los acuíferos subterráneos, por eso algunos observadores afirman que las aguas subterráneas son el recurso hídrico del mañana, sin embargo es importante tomar precauciones ya que las aguas subterráneas no son inmunes a la contaminación ni tampoco inagotables, por el contrario, los acuíferos son muy vulnerables a la contaminación causada por los desechos del hombre, los residuos industriales, los abonos y pesticidas.

Las aguas subterráneas se acumulan lentamente en las fisuras de las rocas y los intersticios del suelo, por consiguiente el proceso para que los contaminantes salgan del acuífero también será lento. Generalmente se sostiene que una vez que un acuífero se contamina, la situación perdurará “para siempre”, aunque se puede discutir cuánto es este “para siempre”, pues se sabe que el lapso necesario para que se produzca un cambio en un acuífero varía entre cientos y miles de años.

Al respecto, México enfrenta grandes problemas, entre los que destacan la disminución acelerada de la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y la creciente contaminación de los cuerpos de agua susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento, por lo que es claro que nuestro país no ha podido sustraerse de las consecuencias de un desarrollo acelerado que ha propiciado el aumento en la extracción y el consumo del agua. Esto se traduce, consecuentemente, en una mayor generación de aguas residuales que, al ser descargadas sin tratamiento en los cuerpos receptores, perjudican sus usos legítimos y disminuyen su potencial de aprovechamiento, por lo que probablemente en un futuro cercano se presentarán déficits en algunas regiones, lo que plantea un serio desafío para las autoridades responsables de la administración y distribución del agua.

En diferentes regiones del mundo se han documentado casos dramáticos de sobreexplotación del agua subterránea similares al mostrado en el presente estudio (Sophocleous, 2000). Cabe señalar que en el valle de Toluca la inadecuada explotación de los recursos subterráneos y los impactos no deseados de ciertas prácticas en el uso del suelo han producido efectos adversos, tales como la degradación de la calidad del agua, el daño a los ecosistemas acuáticos, el descenso excesivo de los niveles del agua subterránea y, en consecuencia, la subsidencia del terreno y la desaparición de humedales (Rudolph *et al.*, 2006, 2007). Bajo estas circunstancias, el presente artículo tiene como finalidad plantear estrategias de ordenación de este recurso en el marco de un sistema más integrado y equitativo que conlleve a una explotación adecuada y duradera del recurso hidráulico. Se examinan algunas opciones de políticas esenciales en relación con esos distintos aspectos de la gestión del agua, ya que brindan considerables posibilidades de ser catalizadoras de un proceso más amplio de reforma de las políticas y la gestión de los recursos hídricos.

1. Situación de los recursos hídricos en México

En México, la densidad de población y la actividad económica generalmente están relacionadas inversamente con la disponibilidad de los recursos del agua. Menos de una tercera parte de los recursos del agua de la nación están localizados dentro del 75% de su territorio que constituyen zonas áridas y semiáridas,

donde se localizan la mayoría de las grandes ciudades, las instalaciones industriales y las tierras de riego, y se genera casi el 85% del PIB (Sultan, 2001; Hancox, 2005). Las aguas superficiales y del subsuelo son insuficientes para atender la alta demanda, lo que tiene como resultado una competencia creciente por el agua superficial, la sobreexplotación de los acuíferos y la calidad del agua. El desarrollo de la infraestructura hidráulica adicional, incluyendo la obra civil para transferir el agua entre la cuenca de los ríos, es cada vez más difícil porque casi todas las opciones “fáciles” han sido desarrolladas y las restantes son muy costosas y ambientalmente cuestionables. Además, el incremento de la contaminación en superficie y del agua subterránea están agravando el problema de la escasez del agua. Este es el caso del Estado de México que, como consecuencia de las actividades sísmicas de la ciudad de México, se constituye actualmente en uno de los centros industriales más importantes del país. En este sentido, uno de los factores primordiales que sustentan el desarrollo del Estado de México es el agua subterránea. En efecto, la mayor parte de las zonas industriales de la cuenca se abastecen mediante pozos profundos. Aunque en algunas áreas, la intensidad del bombeo está ocasionando efectos nocivos como el descenso progresivo de los niveles, infiltración de contaminantes y el agrietamiento del terreno.

Ante estas modificaciones del medio ambiente y la correspondiente necesidad de preservar los recursos hídricos y los ecosistemas de esta región, es imprescindible contar con conocimientos hidrológicos y métodos apropiados para mitigar los efectos de las actividades vinculadas a los procesos de contaminación que impiden un desarrollo sustentable. En consecuencia, el interés por estudiar los problemas de contaminación no se limita a su detección, evaluación y previsión de su evolución futura, sino además incluye el desarrollo e investigación de métodos para limpiar y restaurar los sitios ya contaminados. En el caso de la contaminación de las aguas subterráneas, en términos muy generales, el estudio de cualquier caso específico involucra tres aspectos: en primer lugar es necesario determinar si ha existido una descarga de contaminación al sistema hidrológico subterráneo y en ese caso conocer sus características, incluyendo su distribución en espacio y tiempo, así como sus interacciones con el medio circundante. El tercer aspecto a considerar está relacionado con la evaluación de los efectos que ha tenido y la previsión de los que pueda tener, e incluye el estudio de los grupos humanos expuestos.

En este sentido, la tecnología debe desempeñar un papel clave en este esfuerzo y estar estrechamente ligada al desarrollo de conocimiento que facilite la obtención de soluciones realistas que coadyuven al avance de la tecnología. Una parte esencial de esta estructura es la vinculación entre quienes se dedican al estudio práctico y quienes desarrollan la ciencia.

La planificación y la gestión integral de las cuencas, desde el ámbito local al internacional, son elementos importantes de dicha estrategia. La gestión del consumo, es decir, la planificación de políticas que reconozcan el valor económico del agua a fin de reducir la demanda, se puede considerar como la piedra angular de la misma. La urgente necesidad de prevenir y controlar la contaminación, pone de manifiesto los grandes problemas del presente milenio. Es indudable e incuestionable la magnitud del problema, sobre todo si se toman en cuenta los problemas actuales y el aumento incontrolable de la demanda.

2. Análisis de la sobreexplotación del acuífero del valle de Toluca

2.1. Antecedentes

Actualmente se extrae agua subterránea de muchos acuíferos, a un ritmo mayor que con el que la naturaleza la recarga. Este “déficit de aguas subterráneas” está conduciendo a la caída de los niveles piezométricos de los acuíferos, la intrusión de agua salada, el hundimiento del suelo y la reducción de las descargas de agua superficial a corrientes y humedales. Este hecho significa que los sistemas de agua superficial y subterránea están estrechamente ligados y constituyen una interacción compleja y variable. La función de los humedales, como de los cenegales de las praderas que se encuentran en terrenos altos, suele ser recargar los acuíferos que yacen bajo su manto, mientras que los que se encuentran en altitudes menores suelen recibir la mayoría de sus aguas del subsuelo (Mitsch y Gosselink, 1993; Winter *et al.*, 1998). Así, los cambios en los niveles de las aguas subterráneas pueden tener efectos significativos en hábitats críticos como la vegetación ribereña y en la vida silvestre que de ellos dependen. Por consiguiente, identificar la vulnerabilidad de este tipo de ecosistemas por efecto de las actividades antropogénicas o variaciones naturales del clima y otros fenómenos, necesita la comprensión de la interacción del agua superficial y subterránea para mantener la gestión sustentable de estos ecosistemas (Wurster *et al.*, 2003). Varios casos dramáticos han sido documentados en México donde

se localizan las grandes ciudades, uno de los cuales es el objetivo del presente estudio.

El crecimiento sostenido de la ciudad de México, y de las regiones que la rodean, ha dependido de la continua disposición de los recursos hídricos locales y regionales, para uso industrial y doméstico. El agua subterránea ha sido la fuente primaria de abastecimiento para uso potable en la región, siendo un recurso de vital importancia y objeto de numerosos estudios (Rudolph *et al.*, 1991; Ortega *et al.*, 1993; Legorreta, 1997; DGCOH, 1997). La ciudad de México, con una densidad poblacional de más de 18 millones de habitantes en un área de 400 km², ha propiciado una fuerte demanda de las fuentes de abastecimiento de agua (Legorreta, 1997). Así, la disminución de los recursos hídricos subterráneos dentro del valle de México ha forzado a esta metrópoli a buscar en las cuencas vecinas su abastecimiento.

Desde 1942, la cuenca del valle de Toluca ubicada dentro del Estado de México, a aproximadamente 100 km al oeste del valle de México, ha proveído de agua potable a la ciudad de México (Sabalcagaray, 1981; UAEM, 1993) (figura 1).

Figura 1. Extensión de la cuenca alta del río Lerma donde se muestra la división de la cuenca del valle de Toluca al sur y la cuenca Atlacomulco / Ixtlahuaca al norte (modificada de DGCOH, 1997; Cortés y Farvolden, 1989 y DGCOH, 1992).

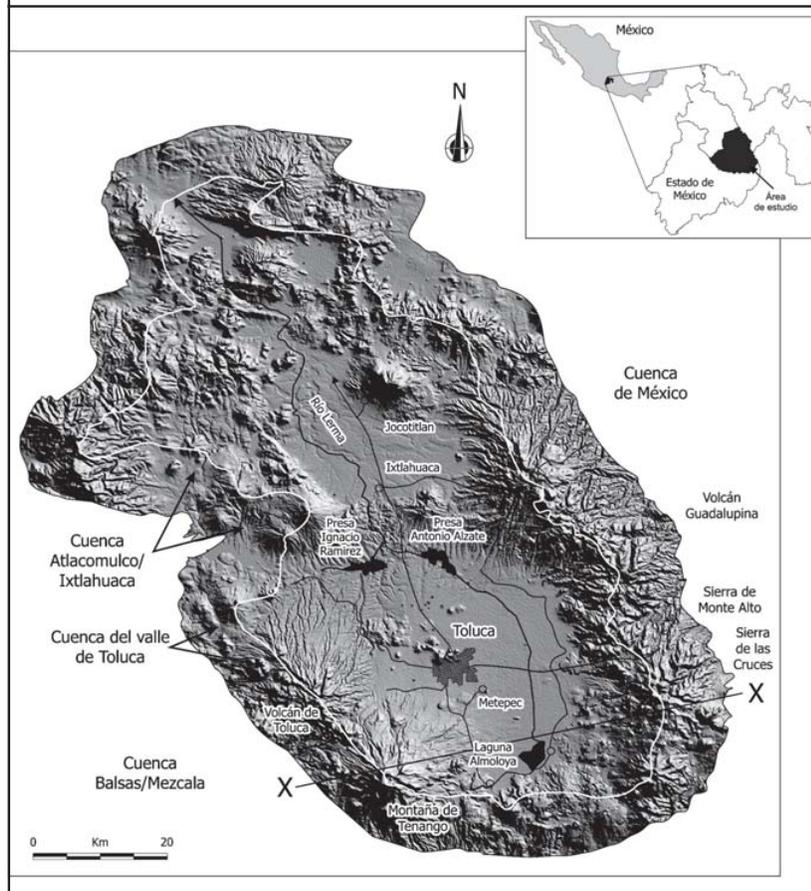
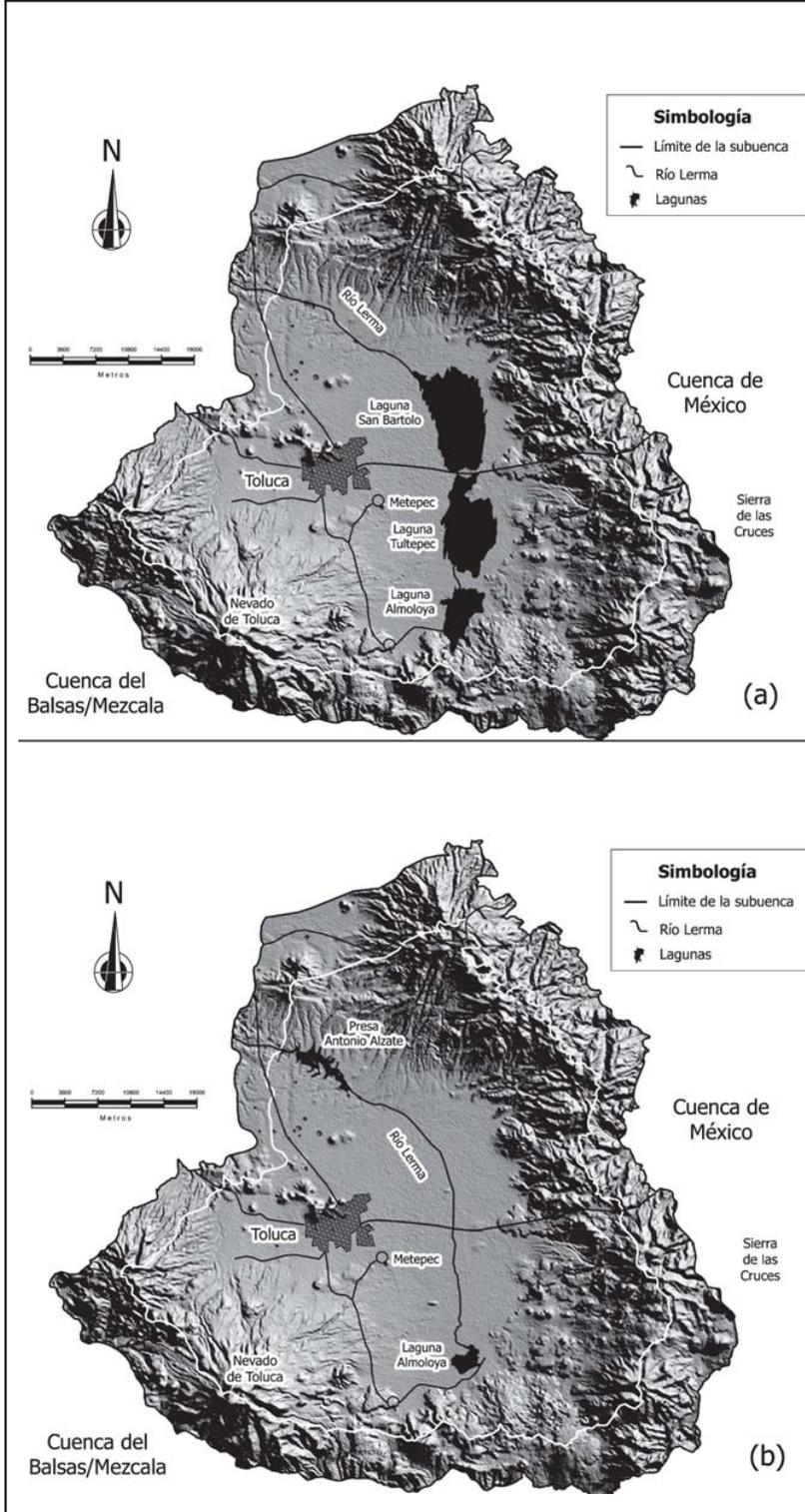


Figura 2. Extensión de la cuenca del valle de Toluca considerando la presa Alzate como límite inferior: a) extensión de las lagunas de Almoloya, Tultepec y San Bartolo con datos de 1870, b) extensión de la laguna de Almoloya con datos de 2005 (modificado de DGCOH, 1997 y DGCOH, 1992).



Inicialmente fueron captados los manantiales que afloraban en las montaña que rodean la cuenca, iniciándose en 1951 la extracción del agua subterránea en el sistema Lerma (Rudolph *et al.*, 2006, 2007). En la actualidad una serie de 236 pozos asociados al sistema Lerma proveen aproximadamente $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de agua a la ciudad de México (casi un 9% del total de la demanda) (Legorreta, 1997). La mayoría de los pozos han sido instalados a profundidades de entre 200 y 300 m, con extensas secciones de tubo ranurado que captan el agua de los estratos basálticos intercalados con sedimentos volcánico-clásticos asociados a las montañas de la Sierra de las Cruces. Esta línea continua de pozos capta agua subterránea de las áreas montañosas adyacentes y del acuífero que subyace la cuenca del valle de Toluca, formando, efectivamente, un dren lineal o sumidero a lo largo de la frontera este de la cuenca.

La excesiva extracción del agua subterránea en la cuenca del valle de Toluca ha disminuido el nivel freático y cambiado los patrones regionales del flujo subterráneo, revirtiendo los gradientes hidráulicos verticales en el acuífero. Adicionalmente, los manantiales de las regiones montañosas circundantes han desaparecido progresivamente (UAEM, 1993). Se cree que la extracción masiva de agua subterránea en la cuenca ha contribuido a la lenta desaparición de los cuerpos de agua superficiales y zonas lacustres, como ha ocurrido a lo largo de varios decenios en la parte sur de ésta (UAEM, 1993; CNA, 1996a, Díez, 1998). En particular, los pozos de extracción del sistema Lerma han estado ligados a la desaparición progresiva del antiguo sistema lagunar adyacente (Rudolph *et al.*, 2006, 2007).

Históricamente, los humedales de la porción sur de la cuenca del valle de Toluca han jugado un rol significativo en la economía y la ecología de la zona (figura 2). Anteriormente, la economía de

las comunidades dependía de la pesca y manufactura del tule, actividades relacionadas estrechamente a los recursos del sistema lagunar que actualmente se encuentran en proceso de desaparición (Gárfias, 1997). Como resultado de la reducción del tamaño de la laguna, la nueva superficie ha sido transformada en áreas de cultivo, aunque ha tenido un beneficio significativo, sin embargo, el producto del ingreso agrícola ha sido incapaz de compensar las pérdidas económicas resultado de la desaparición de estas lagunas (Sabalcagaray, 1981). Además del impacto a la población rural del sur de la cuenca, la disminución del tamaño de la laguna y del complejo lacustre, ha influenciado severamente la ecología natural de la región, siendo de primordial preocupación la pérdida del hábitat reproductivo y de crianza de diversas especies de aves migratorias (Díez, 1998).

El área lacustre comenzó a reducirse en los años cincuenta, coincidiendo con la expansión del sistema de extracción hacia el valle de México (Díez, 1998). En 1943, las tres principales lagunas del sistema cubrían un área superior a las 10 700 ha, reduciéndose en 1995 a 3 200 ha (UAEM, 1993). Estos cuerpos de agua constituyeron la cabecera del río Lerma, siendo el principal sistema superficial de drenaje de la región (figura 2). Hacia el sur, la laguna de Almoloya es el último cuerpo lacustre que resta de la cuenca del valle de Toluca, en el cual la cantidad y calidad del agua está disminuyendo progresivamente. Este cuerpo de agua también es receptor de la descarga directa de aguas residuales no tratadas provenientes de las poblaciones que la rodean y de la industria. Esta circunstancia ha propiciado que la calidad del agua en la laguna de Almoloya, así como la del río Lerma haya disminuido significativamente a través del tiempo (UAEM, 1993).

2.2. Hidrología regional

2.2.1. Hidrogeología y explotación del agua subterránea

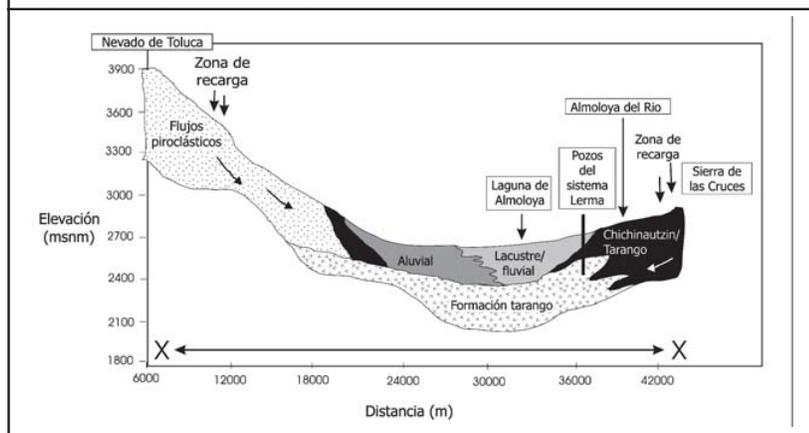
El sistema hidrogeológico regional dentro de la cuenca del valle de Toluca se distingue por contener dos acuíferos principales: el inferior, semiconfinado, que consiste en una combinación de depósitos volcanoclasticos asociados a una extensa formación basáltica (CNA, 1996b), la cual tiene un espesor de 100 a 400 m a través del acuífero (CNA, 1996b). La mayoría de los pozos de extracción abastecen de agua a las comunidades locales, la agricultura, el suministro industrial y además se exporta a la ciudad de México (DGCOH, 1972; 1992). El segundo acuífero importante, conocido como acuífero superior, está localmente semiconfinado y libre, y consiste principalmente de sedimentos aluviales heterogéneos, intermitentemente separado del acuífero inferior por materiales arcillosos orgánicos de baja permeabilidad (CNA, 1996b). Este segundo acuífero está cubierto y ocasionalmente entremezclado con depósitos discontinuos de arcilla lacustre (CNA, 1996a). Estos depósitos lacustres y aluviales se encuentran en un rango que fluctúa entre 100 m de espesor, hacia el centro del acuífero, hasta desaparecer a lo largo de los límites de la cuenca.

A lo largo de la porción este de la cuenca del valle de Toluca, materiales basálticos y depósitos de ceniza de la formación Chichinautzin cubren a la formación Tarango (figura 3). Estos materiales tienen alta porosidad, pero tienden a ser de menor permeabilidad que la formación Tarango (DGCOH, 1992). Estas formaciones alcanzan un espesor máximo aproximado de 300 m a lo largo de la frontera este de la cuenca (CNA, 1996b), y hacia el oeste, en áreas aledañas al volcán de Toluca, se obser-

van flujos piroclásticos, conformando zonas primarias de recarga para el acuífero inferior dentro de la formación Tarango (DGCOH, 1992; CNA, 1996b; CNA, 1996a).

Históricamente, el flujo subterráneo regional se dirigía de sur a norte (CNA, 1996b), pero el bombeo de los pozos profundos a través de la cuenca ha alterado progresivamente su dirección. El mayor impacto se debe al sistema de pozos Lerma (CNA, 1997), el cual ha inducido el flujo hacia el este de la cuenca. Estos pozos podrían también captar una parte de la recarga regional de las montañas de la Sierra de las Cruces, las cuales se extienden hasta el complejo acuífero inferior (DGCOH, 1997; CNA, 1997).

Figura 3. Geología general de la cuenca: la sección oeste-este (sección X-X' de la figura 1) a través del sur de la cuenca del río Lerma y del volcán Nevado de Toluca hasta el pie de la Sierra de las Cruces. Se indican las áreas primarias de recarga y la dirección general del flujo de agua subterránea. Modificado de CNA (1996b).



Como esto ocurre simultáneamente, se cree que el descenso progresivo del nivel freático por efecto de la extracción de agua subterránea pudo haber contribuido a la desaparición de los cuerpos superficiales y la desecación de áreas lacustres en diversas formas. Primero, el sistema de pozos Lerma pudo haber interceptado una porción significativa de la recarga lateral de las montañas circundantes, las cuales históricamente alimentaban el área lacustre en la parte sur de la cuenca del valle de Toluca. Adicionalmente, la disminución regional, observada en los niveles piezométricos del acuífero, pudo ocasionar la caída significativa del nivel freático, por lo que redujo la recarga subterránea hacia la zona lacustre.

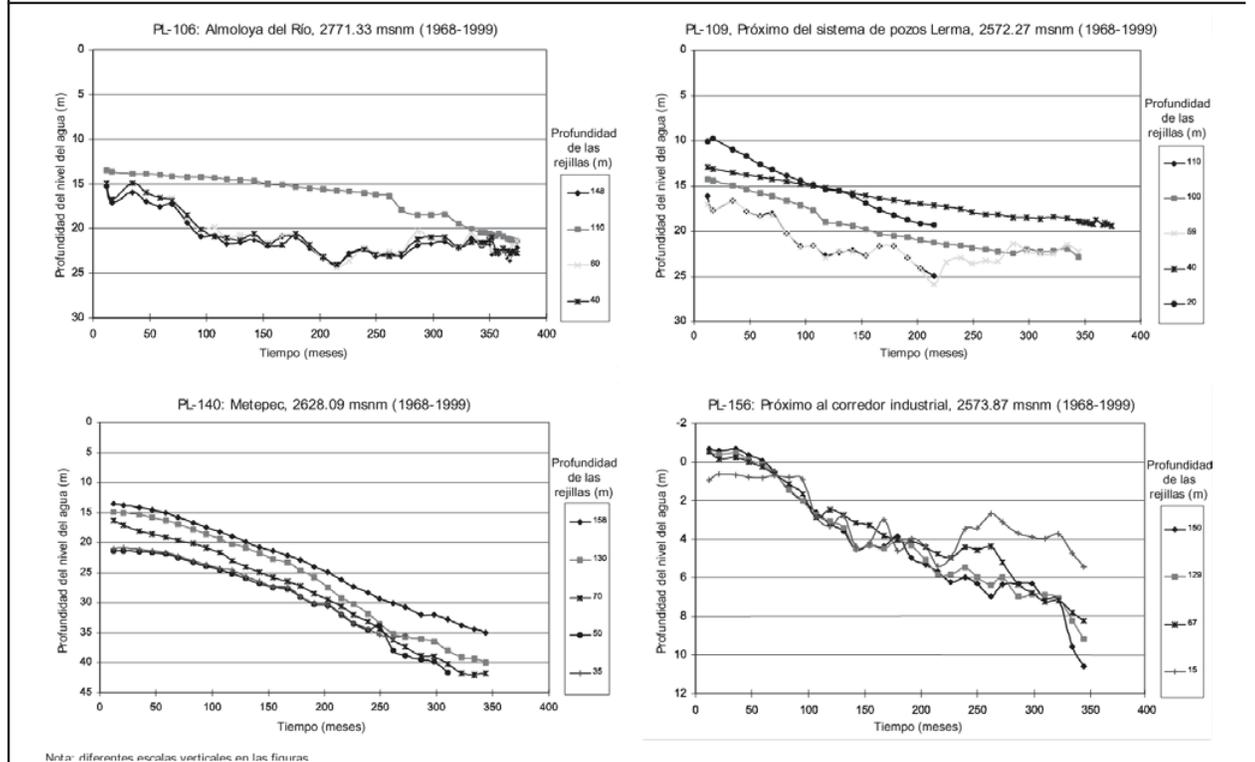
Los niveles piezométricos en la cuenca alta del río Lerma se encontraban cercanos a la superficie del suelo. En la cercanía a las antiguas lagunas, al sureste de la cuenca, existían manantiales en condiciones artesianas (Lesser y Asociados, S.A., 1992). Actualmente, los niveles estáticos regionales en el acuífero inferior se encuentran a una profundidad de 10 a 30 metros bajo la superficie, hacia el sur de la cuenca, ocurriendo los niveles de agua más profundos en la cercanía al sistema de pozos Lerma (DGCCH, 1992; Lesser y Asociados, S.A., 1992).

La Comisión Nacional del Agua (CNA) instaló en 1968 una

serie de multipiezómetros para monitorear el sur de la cuenca del valle de Toluca, la cual estuvo constituida por puntos de monitoreo discretos (normalmente cinco o seis), en profundidades que fluctúan entre 10 y 180 m para algunos sitios (figura 4). Los datos obtenidos de estos pozos de monitoreo se reportaron y analizaron en diversos informes (CNA, 1996a y CNA, 1997), y aportaron información histórica de los niveles del agua subterránea sobre la secuencia hidroestratigráfica. Los registros de la mayoría de los piezómetros muestran que los niveles de carga hidráulica han disminuido con el tiempo. Los gradientes hidráulicos verticales también comenzaron a revertirse, de ascendentes a descendentes en las partes profundas de la secuencia hidroestratigráfica, además que los procesos parecen continuar en estado transitorio (CNA, 1996a).

De acuerdo con los datos históricos de los multipiezómetros de la CNA, los gradientes hidráulicos verticales fueron muy ligeros en la cuenca del valle de Toluca en las etapas iniciales de bombeo de los pozos del sistema Lerma en los años cincuenta (CNA, 1996a). No obstante, se ha observado que las cargas hidráulicas profundas en el sistema presentan una caída en los valores históricos, observándose una caída aproximada de 15 m (figuras 4 y 5). Cerca de la superficie del suelo, los

Figura 4. Profundidad de los niveles del agua para cuatro multipiezómetros de 1968 a 1996. PL-106 y PL-109 se encuentran cercanos al sistema de bombeo Lerma, desde 1984 muestran una estabilización o ligera recuperación en la mayoría de los pozos. PL-140 y PL-156 se encuentran en Metepec y cerca del corredor industrial, muestran un descenso sin recuperación de los niveles del agua a una tasa de 0.3-0.7 metros por año. Datos de la CNA (1996a).



gradientes verticales no han tenido cambios drásticos. Esto se debe a que los sedimentos superficiales se encuentran en un estado transitorio respecto a la respuesta del bombeo profundo, y que los cambios en la presión de poro no han alcanzado las trayectorias de flujo de la superficie. La posibilidad existe, sin embargo, en el tiempo, dado que el bombeo es continuo, podrían propagarse a la superficie fuertes gradientes descendentes que se encuentran en los sedimentos profundos afectando las aguas superficiales dentro del acuífero.

Los niveles del agua en los multipiezómetros de la CNA, cercanos a los pozos del sistema Lerma, evidencian una caída en todas las sondas medidas para este efecto. La mayoría de los multipiezómetros con rejillas más someras a 20 m, tienden a permanecer estables desde 1968, cuando se iniciaron las mediciones (figura 4) (CNA, 1996b). La comparación de los niveles del agua entre 1984 y 1997, medidos con el sistema de multipiezómetros profundos, muestra que los niveles regionales en la porción este de la cuenca del valle de Toluca, cercanos a los pozos de producción del sistema Lerma, tienden a ser más estables o están bajo una recuperación ligera como resultado de la disminución en la extracción de los pozos (figuras 4 y 5) (CNA, 1997). Asimismo, el monitoreo de los pozos cercanos a la ciudad de Toluca y al corredor industrial, indica que los niveles del agua están declinando permanentemente a una tasa de 0.3 a 0.7 metros por año (figura 4) (CNA, 1997).

2.2.2. Hidrología del agua superficial

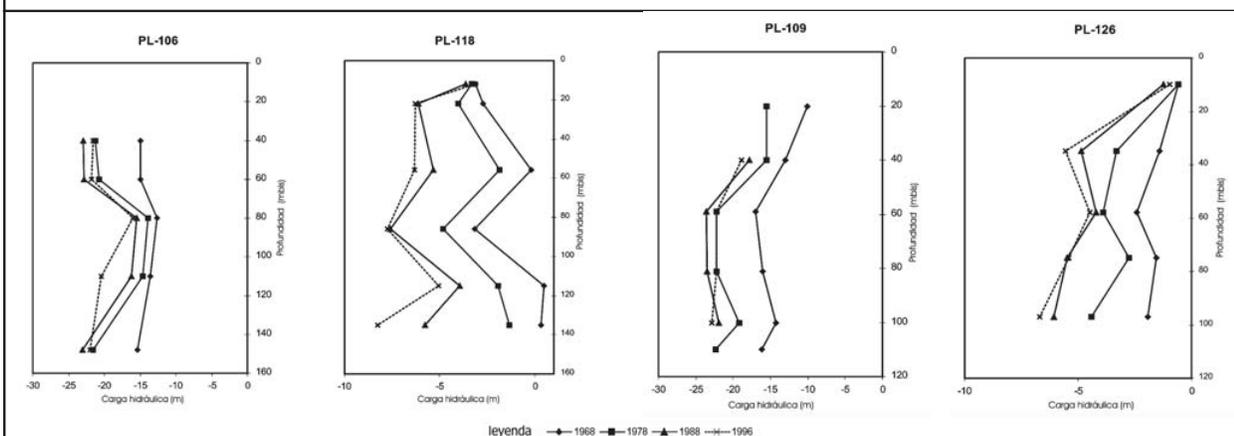
En la cuenca del valle de Toluca existieron tres cuerpos de agua superficiales: las lagunas de Almoloya, Tultepec y San Bartolo, las cuales cubrían un área de 10 700 ha en 1943. Estos cuerpos han disminuido su tamaño a lo largo de los años (UAEM, 1993) (figura 2). En la actualidad, el único

cuerpo remanente es la laguna de Almoloya, la cual tiene una extensión de 3 200 ha (UAEM, 1993). La desaparición de esta zona lacustre ha sido preocupante para las comunidades locales dependientes del sustento y los recursos abundantes de las lagunas, que incluyen la pesca comercial, el forraje, la manufactura del tule que crecía en esta región, y el ingreso generado por las actividades recreacionales que ahí se realizaban (Sabalcagaray, 1981; Gárfias, 1997).

En la Antigüedad, los grandes manantiales ubicados al pie de las montañas, alrededor de las fronteras este y sur de las lagunas, fueron una continua fuente de recarga para la zona lacustre. En 1942 una buena parte del flujo de los manantiales fue captada para aumentar el abastecimiento de agua potable en la ciudad de México (Vázquez, 1987). Con el paso del tiempo y debido a la desecación de la zona lacustre en la cuenca del valle de Toluca (Vázquez, 1987), el flujo de los manantiales fue disminuyendo hasta desaparecer, debido probablemente a la disminución regional del nivel freático que se atribuye a la extracción de agua subterránea de los pozos del sistema Lerma (Sabalcagaray, 1981; Vázquez, 1987).

En 1975 se construyeron diques en la laguna de Almoloya para restringir la descarga superficial de ésta y mantener el volumen de agua en la zona (Díez, 1998), lo cual ayudó a mantener el flujo base en el río Lerma, minimizando el impacto potencial de posibles inundaciones. El sistema de diques ha sido expandido para retener agua pluvial que pueda ser utilizada en irrigación durante la estación de sequía (Díez, 1998). Este proyecto estuvo soportado por la Canadian Organization Duck Management and Conservation (DUMAC), debido a la importancia de esta zona lacustre para la migración y crianza de numerosas especies de aves migratorias (Díez, 1998).

Figura 5. Carga hidráulica relativa con la profundidad en función del tiempo para cuatro multipiezómetros. PL-106 and PL-109 están cerca de los pozos del Sistema Lerma. PL-126 y PL-118 se localizan al interior de la cuenca del río Lerma. Éstos muestran la dependencia de los cambios en el nivel del agua entre 1968 y 1996, el cambio en los gradientes hidráulicos verticales y la estabilidad de los niveles del agua de los pozos someros a 20 metros bajo la superficie (mbls) en la cuenca interior. Notar las diferentes escalas en cada gráfica. Información de la CNA (1996).



La contaminación ocurre aguas abajo, en el río Lerma, donde empresas ubicadas en el corredor industrial y en las comunidades cercanas vierten residuos directamente sobre el río (Sultan, 2001; Hancox, 2005).

3. Manejo integral de recursos hídricos

El concepto del manejo integral de recursos hídricos no es nuevo, tampoco surgió de la Conferencia en Dublín en 1992, contrario a lo que se menciona en GWP (IWRM Toolbox, 2003), más bien ha existido desde la década de los treinta y las Naciones Unidas empezó a promoverlo desde finales de los años cincuenta, sin embargo, ha sido muy difícil de aplicar en el mundo real. Cabe mencionar que este concepto se ha convertido en una corriente principal en sí mismo, aunque el aspecto esencial en la actualidad no es qué tan atractivo parezca el concepto, o dónde radique su popularidad, sino hasta qué punto ha sido posible aplicarlo en el mundo actual para que las prácticas y procesos del manejo del agua sean más eficientes.

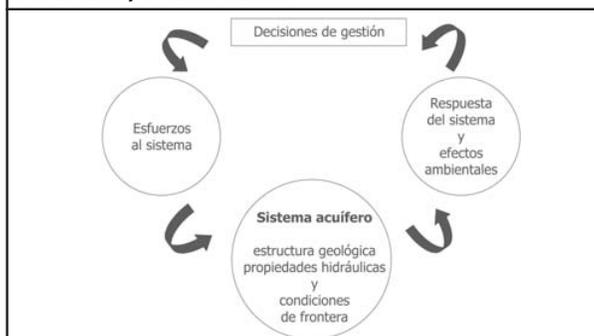
Estos aspectos tan diversos en cuanto a la utilización de los recursos hídricos plantean una amplia gama de problemas institucionales y administrativos asociados a su éxito. No obstante, la tarea de velar porque esos diferentes tipos de sistemas de gestión se establezcan con el más alto nivel posible de sinergia y un mínimo de conflictos entraña, por sí sola, una importante consecuencia: la necesidad de un marco de gestión integrada de los recursos hídricos con importantes reformas de las políticas y una coordinación de éstas mucho mayor que la que rige en la mayoría de los gobiernos. Establecer estos niveles de sinergia dista de ser fácil, y tal vez la solución más pragmática consista en proceder de modo gradual, velando para que en cada etapa haya una finalidad clara y beneficios demostrables. Cualquiera sea la forma en que se lleve a cabo, desde el punto de vista de los recursos hídricos, la gestión integrada presenta muchas ventajas y puede ser

considerada un objetivo al que, se espera, habrán contribuido los distintos aspectos de la elaboración de políticas examinadas en este documento.

En consecuencia, una desmedida sobreexplotación de los recursos hídricos, por efecto del incremento de las demandas del agua, está ocasionando que la gestión de las aguas subterráneas constituya una tarea compleja, conduciendo a muchos enfoques innovadores para coadyuvar al aprovechamiento y la ordenación de los recursos hídricos. Las prácticas de gestión de las aguas subterráneas incluyen el almacenamiento en los acuíferos y proyectos de recuperación, uso conjuntivo de recursos de aguas subterráneas y superficiales, conservación y reuso, y el bombeo controlado de las aguas subterráneas. Una acertada gestión de las aguas subterráneas, empero, requiere una cuidadosa comprensión de las propiedades y procesos del sistema acuífero que será analizado, los efectos ambientales y otras consecuencias que resulten de planes alternos de gestión. En este sentido, es de vital importancia considerar la gestión de las aguas subterráneas como elemento de un sistema integral de un ecosistema que preserve la integridad del medio ambiente.

Las prácticas de gestión de las aguas subterráneas incluyen factores técnicos, económicos y políticos que afectan la localización, tasas y presiones ejercidas sobre los respectivos recursos hídricos (extracciones de agua subterránea, recarga artificial y otros). Estos esfuerzos hidrológicos impuestos afectan las respuestas o salidas del sistema acuífero, niveles piezométricos, tasas de descarga y condiciones de la calidad del agua, que en su momento pueden afectar las tasas de escurrimiento en las corrientes superficiales, los hábitats acuáticos y otras condiciones medioambientales. Finalmente, las restricciones legales y políticas podrían obstaculizar la elaboración de lineamientos y sistemas más eficaces para el aprovechamiento compartido de los recursos hídricos, cuyo principal propósito es mejorar la administración del recurso de modo que sea más equitativa y sostenible. La gestión sistémica de las aguas subterráneas es provechosa para un ecosistema, debido a que dirige su atención a las interacciones y consecuencias que ocurren entre los elementos que componen el sistema de recursos hídricos disponibles. Cambios adversos en el sistema acuífero y ecosistemas asociados pueden promover cambios en la protección y una cuidadosa gestión de este recurso. En consecuencia, es importante enfatizar que la gestión de los recursos de aguas subterráneas requiere la consideración de la interacción entre las decisiones políticas, la naturaleza dinámica del sistema acuífero a ser explotado, el medio ambiente y otras consecuencias que resulten de las acciones subsidiarias

Figura 6. Esquema conceptual de la interacción de la gestión sistémica o adversa entre las diferentes componentes críticas que afectan el acceso duradero a recursos hídricos de buena calidad y en cantidad suficiente.



negativas del desarrollo de los recursos hídricos. En tal sentido, lo expresado en el contenido de este apartado puede ser resumido en la figura 6, donde se observa claramente que la interacción sistémica o adversa entre los diferentes componentes críticos afectan el acceso duradero a recursos hídricos de buena calidad y en cantidad suficiente.

4. Manejo integral de los recursos hídricos en el valle de Toluca

En la época actual, dentro de un contexto de permanente aumento de las demandas de agua frente a una limitada disponibilidad del recurso, conceptos como los de ahorro, eficiencia y conservación, están llamados a desempeñar un mayor protagonismo en el futuro de los recursos hídricos en el valle de Toluca. Un futuro que, en línea con los postulados del desarrollo sostenible, deberá estar presidido por el uso prudente y racional del agua, acomodando nuestros hábitos de uso y consumo, tanto cotidianos como productivos, a la realidad que enfrenta actualmente el Estado de México en términos de la gestión de sus recursos hídricos.

Como refiere el documento del programa hidráulico integral, el Estado de México, a lo largo de más de cincuenta años, ha exportado agua de su territorio a otras entidades federativas, lo que ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos del valle de Toluca, Ixtlahuaca-Atzacomulco y Cuautitlán-Pachuca, entre otros, sin que en modo alguno se haya sometido la realización de tales transferencias, a cautelas ambientales y socioeconómicas destinadas a garantizar el desarrollo futuro de las cuencas cedentes. Por lo que se refiere al aprovechamiento de las aguas superficiales, éstas han sido asignadas o concesionadas a través del tiempo para distintos usos dentro y fuera de la entidad. En consecuencia, los resultados globales de los balances hídricos para las cuatro cuencas hidrológicas con origen en el Estado de México, muestran que los escurrimientos superficiales se encuentran, en su mayor parte, comprometidos aguas abajo del territorio estatal. Es evidente que no se pueden seguir satisfaciendo ilimitadamente las demandas mediante la permanente expansión de una oferta que tiene límites: físicos, ecológicos y económicos. Y es que, en la medida en que se van agotando las fuentes más accesibles y económicas, la obtención de nuevos recursos resulta cada vez más limitada y distante y, por tanto, más cara, lo que unido al creciente deterioro del recurso —contaminación de ríos, sobreexplotación de acuíferos, degradación de humedales, riberas y demás ecosistemas asociados al medio acuático— ha puesto de

manifiesto la necesidad de avanzar hacia una nueva cultura del agua basada en el uso racional y sostenible del más preciado de nuestros recursos naturales.

4.1. Nuevos enfoques

En los últimos años han surgido nuevos enfoques y propuestas acerca de la administración del recurso hídrico, más favorables al control y contención de la demanda que al incremento de los recursos mediante ambiciosos proyectos hidráulicos. Gastar menos y adecuadamente los recursos disponibles, es el reto. En esta línea se inscribe el denominado “manejo integral sustentable”, término genérico en el que se engloban todas aquellas técnicas que tienen como finalidad el ahorro de agua o la mejor gestión de los recursos y que incluyen un amplio abanico de medidas y actuaciones que van desde la modernización y rehabilitación de redes para minimizar las fugas, a la instalación de equipamientos sanitarios de bajo consumo, pasando por el desarrollo educativo y concientización de la opinión pública sobre la necesidad de hacer un buen uso del agua, así como la reutilización de las aguas residuales depuradas, la implantación de tarifas incentivadoras del ahorro y la promoción de prácticas agrícolas y de jardinería con menores exigencias hídricas.

En la actualidad, las modernas tecnologías permiten reducir de forma importante el consumo de agua en los diferentes usos —agrícola, urbano e industrial— sin menoscabo alguno del servicio prestado. Así, en el ámbito del abastecimiento urbano, una de las principales vías de ahorro hídrico es la reducción de las pérdidas que se producen en las conducciones. En el valle de Toluca, el volumen de agua no registrada se sitúa en un valor medio del 35 al 40%, lo que significa que más de una tercera parte del agua que entra en la red no llega a su destino final en los puntos de consumo. No obstante, conviene matizar que en este concepto genérico se engloban no sólo las pérdidas por fugas debidas a la falta de estanqueidad de los depósitos y tuberías, sino que se incluyen también los consumos no facturados, como suministro a centros oficiales, riego de parques y jardines, limpieza de calles, etc. Lo que pone de manifiesto la necesidad de extender la medición a todos los consumos, con independencia de la obligación de tener que pagar o no el recibo del agua, tanto para poder diferenciar la proporción real de pérdidas como para someter estos usos a un mayor control de eficiencia.

En la práctica resulta imposible lograr la estanqueidad absoluta de la red, existiendo un límite técnico y económico para las pérdidas, que los expertos estiman entre el 10 y 15%. Para lograr estos niveles de eficiencia hídrica en la gestión de las redes de distribución, los especialistas consideran necesario, entre otras medidas, la disposición de sistemas

automatizados de control que permitan conocer en tiempo real el estado de la red y así actuar con la necesaria rapidez. Al respecto, cabe destacar la experiencia de Alicante, España, una de las pocas ciudades españolas en las que se ha alcanzado un aprovechamiento del agua por encima del 85%, además de la plena universalización de los medidores individuales. La empresa que gestiona el abastecimiento urbano, Aguas de Alicante, ha desarrollado un sistema que permite la localización y detección precoz de fugas para su sellado inmediato mediante un robot que actúa desde el interior de la tubería.

4.2. Consumo doméstico

El agua destinada al consumo doméstico ha sido y seguirá siendo una máxima prioridad en todo el mundo. El reto planteado supone mucho más que el suministro y saneamiento a aquellos cuyas necesidades básicas no están satisfechas; es preciso elaborar un conjunto de medidas relativas a la legislación, la fijación de precios y las inversiones a fin de fomentar la eficiencia, la productividad, la conservación y el control de la calidad de los recursos. Estas son esencialmente decisiones de administración y políticas que requieren un criterio integrado que tome en cuenta las demandas de los distintos usuarios y, al mismo tiempo, fije prioridades que garanticen la sostenibilidad a largo plazo de los recursos hídricos y de los problemas que enfrentan. De otra manera, el abastecimiento urbano requerirá explotar aguas subterráneas cada vez más profundas y fuentes de agua de superficie cada vez más distantes, con unos costos que resultan insostenibles en términos tanto económicos como ambientales.

Se estima que más del 60% de la población mundial (cerca de 5 000 millones de personas) en el año 2030, vivirá en zonas urbanas; por esta razón el consumo doméstico está adquiriendo un alto nivel de prioridad en las políticas. Ahora bien, el ahorro de agua puede tener un significado cuantitativo mucho mayor ya que sin duda es el abastecimiento urbano el que acapara 84% de la demanda total en el valle de Toluca; en este caso, es preciso explorar nuevas modalidades para responder a los rápidos cambios y lograr que el medio urbano sea viable, especialmente es conveniente una mejor gestión que considere una política de precios más adecuada y una mayor participación de los grupos comunitarios. Otra posibilidad de ahorro hidráulico es la utilización de equipamientos sanitarios –grifos, duchas, cisternas– que permitan el ahorro de agua. Se trata de dispositivos que contribuyen a mejorar la eficiencia en la utilización doméstica de este líquido –que representa un 70% del consumo urbano–, manteniendo los niveles confortables. Para su implantación, además de incentivos económicos y de campañas de información, los especialistas conside-

ran muy importante la homologación de estas instalaciones, regulando las capacidades máximas autorizadas para el equipamiento sanitario doméstico.

4.3. Consumo agrícola

La variedad en cuanto al uso de los recursos hídricos es tan compleja y diversa como los propios recursos. En la mayoría de los países, el sector donde más se utiliza el agua es en la agricultura, ya que representa aproximadamente el 70% del total de extracciones mundiales y un porcentaje muy superior a éste en muchos países en desarrollo. No obstante, dado que la demanda del sector agrícola en el valle de Toluca es tan sólo de 7.3% del consumo total, el valor de las técnicas de ahorro y eficiencia, que pueden ser muy relevantes a la hora de resolver problemas locales, es sobre todo pedagógico, de concienciación pública en cuanto al uso racional de un bien que cada vez es más escaso y limitado. Asimismo, el consumo agrícola es un sector en el que también es posible un amplio abanico de medidas y actuaciones de fomento del uso racional del recurso, principalmente en todo lo relativo a la rehabilitación y modernización de las infraestructuras de conducción y distribución, cuya obsolescencia y mal estado de conservación ocasiona la pérdida de importantes volúmenes en canales y acequias. Una reducción importante de las demandas se puede lograr también mediante cambios en los sistemas de riego, sustituyendo los de alto consumo, como el riego tradicional por gravedad, por otros más avanzados de consumo reducido, como el riego localizado.

Los planes de gestión integral recogen este tipo de medidas y definen las normas básicas sobre mejoras y transformaciones en regadío, incluyendo los métodos de riego más adecuados para los distintos tipos de climas, tierras y cultivos; las dotaciones de agua necesarias, las condiciones de drenaje o las de reutilización de aguas para riego. Como medidas concretas de gestión de la demanda para lograr un uso más racional del recurso, se incluye la mejora de las instalaciones de regulación y control de redes principales automatizando su funcionamiento, la construcción de depósitos de almacenamiento en las márgenes de los canales principales, junto a la instalación de elementos de medida y control, entre otras.

4.4. Cambio de perspectiva

Desde el punto de vista de la oferta, las modernas tecnologías ofrecen hoy día procedimientos alternativos que permiten el incremento de los recursos disponibles como la reutilización. En este sentido, la existencia tanto de normativas sanitarias y ambientales sobre calidad de los vertidos cada vez más restrictivas, como las dificultades crecientes para disponer de nuevos recursos hídricos mediante soluciones

tradicionales, han propiciado la consideración de las aguas residuales urbanas como una herramienta esencial en la planificación y gestión hidráulica. En este cambio de perspectiva han sido decisivos los avances tecnológicos experimentados en el campo de la depuración de las aguas residuales –avanzados procesos terciarios de filtración, coagulación-sedimentación y absorción de carbono– que consiguen eliminar gran parte de la carga contaminante, convirtiendo la reutilización en una fuente alternativa de agua perfectamente segura desde el punto de vista sanitario y ambiental.

4.5. *Calidades mínimas*

Uno de los principales obstáculos para la expansión de la reutilización directa ha sido la falta de una normativa específica de ámbito federal, que regule los criterios de calidad exigibles a dichas aguas y evite que su aprovechamiento se realice en condiciones inadecuadas. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) ultima un borrador de propuesta sobre las calidades mínimas exigibles para la reutilización directa de efluentes depurados según los distintos aprovechamientos. El documento contempla varios usos a los que se puede destinar el agua regenerada: domésticos (tales como el riego de jardines privados, descargas de inodoros, sistemas de calefacción y refrigeración de aire domésticos, lavado de vehículos), urbanos (riego de zonas verdes, limpieza de calles, fuentes ornamentales, etc.) y diversos riegos agrícolas y forestales, además de aplicaciones como la refrigeración industrial y la recarga de acuíferos. Para cada uno de ellos se fijan diferentes parámetros físico-químicos, bacteriológicos y de sustancias tóxicas, que garantizan la calidad exigible en todo momento según la utilización prevista.

Los expertos consideran necesaria la adopción de incentivos financieros para el establecimiento de programas de sustitución –en usos que no requieran una calidad elevada– de aguas potables de las redes municipales por aguas residuales regeneradas. El objetivo de estos programas es ajustar el recurso a las exigencias de los aprovechamientos previstos con la consiguiente liberación de caudales de elevada calidad para los usos más exigentes, ya que no es posible que para regar el jardín, lavar el coche o limpiar las calles se utilice un bien cuya obtención resulta cada vez más costosa en términos económicos y ambientales.

4.6. *Protección y conservación*

Si en el pasado, por razones históricas justificables, en la administración hidráulica mexicana han pesado más los aspectos de cantidad del recurso, no cabe duda de que en los momentos actuales y cada vez más en el futuro, la protección y conservación de la calidad del agua y sus valores ambientales y ecológicos va a constituir la máxima prioridad. En esta

línea, el Estado de México, además de continuar con el desarrollo del Programa Hidráulico Integral, y de intensificar el control de los vertidos industriales, debe incrementar los esfuerzos en materia de control y vigilancia de la calidad de las aguas para así tener un mejor conocimiento de la realidad y poder establecer las estrategias adecuadas. Para ello se deberá realizar un mayor impulso a las autorizaciones definitivas de vertido y revisión de las existentes en función de los objetivos de calidad que se definan. Se deberá poner en marcha una red de control de sustancias peligrosas y programas específicos de reducción de la contaminación originada por este tipo de sustancias. También se deben optimizar y reforzar las redes de control existentes, tanto para aguas superficiales como subterráneas.

En relación con las aguas superficiales se deberá actualizar y mejorar el monitoreo hidrológico e hidrogeológico de la cantidad y calidad del agua, incluyendo las redes telemétricas para proporcionar información en tiempo real a fin de mejorar la calidad de la información para el mejor y más eficiente manejo de los recursos hídricos. En este proceso de mejora de las redes, una de las novedades más significativas será la incorporación de indicadores biológicos, hasta ahora escasamente representados en los muestreos analíticos que tradicionalmente se han venido basando casi exclusivamente en parámetros físico-químicos. Ello permitirá evaluar en un sentido amplio la calidad ecológica de las aguas y no sólo su aptitud para determinados usos como el potable, la higiene personal y la acuicultura, como se hace ahora.

Conclusiones

En el contexto de la reflexión en torno a la aplicación de una política estatal del agua que arroje buenos resultados en el valle de Toluca, es indispensable poner en práctica una política educativa dirigida a toda la población, sobre la gestión duradera de los recursos hídricos. Esta política educativa puede basarse en las estructuras de la enseñanza escolar, pero también puede hacerlo sobre la población en general; por ello conviene seleccionar cuidadosamente a los encargados de aplicarla. Estos esfuerzos deberían propiciar un espíritu de concertación, orientado a la elaboración o la actualización de la política vigente en materia de gestión hídrica, adaptando las actividades humanas a los límites de la capacidad de la naturaleza y combatiendo las enfermedades relacionadas con el agua.

Es primordial reducir la sobreexplotación del acuífero del valle de Toluca a fin de alcanzar su equilibrio. Para ello es indispensable la precisa medición de las extracciones, un mejor manejo y aprovechamiento del agua, tanto la que se

trasvasa al Distrito Federal como en el valle de Toluca. Con estas acciones será posible disminuir gradualmente el trasvase hacia la ciudad de México, cuyo crecimiento poblacional tiende a incrementarlo.

Es urgente realizar acciones que permitan la recuperación de los acuíferos, entre otras, la conservación y estimulación de infiltración de aguas pluviales, la recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas y la protección y recuperación de las zonas naturales de recarga. En la medida en que se implementen acciones para el reciclado y reuso de las aguas residuales tratadas, se incidirá en la reducción de la demanda

y se reducirá la creciente presión sobre las fuentes de abastecimiento actualmente sobreexplotadas. Asimismo, es de vital interés la estimación, tanto cualitativa como cuantitativa, del impacto de la consolidación diferencial como resultado de la sobreexplotación del acuífero y, por ende, del descenso de los niveles piezométricos, problemas todos ellos asociados a la disminución del almacenamiento del acuífero y a la consiguiente reactivación del sistema de fallas que interceptan el valle. Esto significa la elaboración de cartas que incluyan zonas de alta subsidencia, zonas susceptibles de agrietamiento y delimitación de zonas de veda de extracción de agua.

Bibliografía

- CNA (Comisión Nacional del Agua)
- _____. (1996a). *Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México; Tomo I: Informe y Tomo II: Anexos*. Unitecnia, México.
- _____. (1996b). *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca. Tomo 3: Acuífero de Toluca*. Ariel Consultores México.
- _____. (1997). *Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Estado de México*. Unitecnia, México.
- Cortés, A. and R.N. Farvolden (1989). "Isotopic studies of precipitation and groundwater in the Sierra de las Cruces, México", *Journal of Hydrology*. Vol. 107, pp. 147-153. DGCOH
- Cortés, A. (1972). *Manual de Operación del Sistema Lerma de Agua Potable*. Departamento del Distrito Federal, Secretaría de Obras y Servicios.
- Cortés, A. (1992). *Estudio hidrogeológico regional de los valles de Toluca e Ixtlahuaca*. Tomo I. Grupo Herram de México, México.
- Cortés, A. (1997). *Estudio de evolución de niveles piezométricos en la cuenca del Alto Lerma para el periodo 1985-1997: Informe Final*. Eteisa, México.
- Díez, J.A. (1998). *Análisis de las zonas de recarga de acuíferos mediante la percepción remota: aplicación a la cuenca de Almoloya del Río*. Tesis de maestría, UAEM: CIRA.
- Gárfias, J. (1997). *Problemática hídrica en la República Mexicana y la cuenca del río Lerma*. Informe presentado a Conestoga Rovers & Associates Ltd. Toluca.
- Hancox, J. (2005). *Aspects of Aquifer Vulnerability in Volcanic Terrain: South-eastern Toluca Basin, Mexico*. Tesis de maestría. Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- IWRM (Integrated Water Resources Management) Toolbox (2003). *Sharing Knowledge for Equitable, Efficient and Sustainable Water resources Management*. Global Water Partnership, Stockholm, Sweden.
- Legorreta, J. (1997). "Agua de la lluvia, la llave del futuro en el valle de México", *La Jornada Ecológica*. Año 5. Núm. 58, pp. 1-12.
- Lesser y Asociados (1992). *Estudio para el diagnóstico del acuífero del valle de Toluca, para implementar la reglamentación de la extracción del agua subterránea*, Contrato No. DIA 92-21-C.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink, (1993). *Wetlands*. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
- Ortega, A.; J.A. Cherry and D.L. Rudolph (1993). *Large Scale Aquitard Consolidation Near Mexico City*. Vol. 31:5, Groundwater.
- Rudolph, D.L.; J.A. Cherry and R.N. Farvolden (1991). *Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico City*. Vol. 27, Water Resources Research.
- Sultan, R. J. Gárfias and R.G. McLaren (2006). "Significance of Enhanced Infiltration due to Groundwater Extraction on the Disappearance of a Large Wetland System: Lerma River Basin, Mexico". *Hydrogeology Journal*. Vol. 14 (1-2).
- Sultan, R. J. Gárfias, and R. G. McLaren (2007). "Análisis de la interacción del agua superficial y subterránea y su influencia en la extinción de zonas húmedas". *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XXII, Núm. 1, pp. 15-30.
- Sophocleous M. and S.P. Perkins (2000). "Methodology and Application of Combined Watershed and Ground-water Models in Kansas", *Journal of Hydrology*. Vol. 236, pp. 185-201.
- Sabalagaray, M.D. (1981). *Érase una vez Chignahuapan: la primera de las tres lagunas de Lerma*. Boletín del Archivo General del Estado de México. Toluca, México. Núm. 9.
- Sultan, R. (2001). *Impacts on Wetland Hydrology from Extensive Groundwater Extraction: Lerma River Basin, Mexico*. M. Sc., University of Waterloo.
- UAEM (1993). *Problemática ambiental de los recursos hídricos en la cuenca alta del río Lerma*. Seminario sobre el Ambiente. Vol. 1, pp. 170-181.
- Vásquez, J. (1987). *Monografía municipal: Almoloya del Río: Región 1*. Editado por el Gobierno Municipal de Almoloya del Río.
- Winter, T.C.; J.W. Harvey; O.L. Franke; W.M. Alley (1998). *Ground Water and Surface Water a Single Resource*. US Department of the Interior, Geological Survey Circular 1139.
- Wurster, F.C.; D.J. Cooper and W.E. Sanford (2003). "Stream/aquifer Interactions at Great Sand Dunes National Monument, Colorado: Influences on Interdunal Wetland Disappearance". *Journal of Hydrology*. Vol. 271.