

Condiciones hídricas en la cuenca del Valle de México **Water conditions in the Valley of Mexico Basin**

Salvador Peña-Díaz¹

¹Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México,
salvadorpd@colpos.mx

Autor para correspondencia: Salvador Peña-Díaz, salvadorpd@colpos.mx

Resumen

La cuenca del Valle de México es la zona más poblada del país, con más de 22 millones de habitantes, donde se genera 22% del producto interno bruto nacional. Para abastecer de agua a esta población se requiere un volumen bruto de 2 142 hm³/año y además 641 hm³/año para los usos agrícola, industrial y de otros servicios. De este volumen, 62% proviene de los acuíferos de la propia cuenca; 17%, de aguas superficiales y residuales, y el restante 21% se importa de otras cuencas. En la actualidad, dicha cuenca está sujeta a un gran estrés hídrico debido a la sobreexplotación de los acuíferos, con un volumen de 639 hm³/año, lo que representa casi 40% de la extracción bruta de agua subterránea. Asimismo, la población continúa con un crecimiento, aunque moderado, de 0.6% anual. Se trata de una cuenca cerrada, lo que originó la construcción de una serie de obras para desalojar avenidas extraordinarias, iniciadas en el siglo XVII y que continúan hasta nuestros días. De los escurrimientos directos de agua superficial que se generan en la cuenca, sólo se usa 15% (95 hm³/año), pues el volumen de aguas blancas restante descarga a la cuenca del río Tula (521 hm³/año). El volumen total que se usa en el riego, incluyendo aguas residuales, es de 207 hm³/año, para una superficie de unas 24 000 ha, quedando una descarga de aguas residuales de 1 260 hm³/año,

valores aforados a la salida de la cuenca. Mediante un balance calculado por aproximaciones sucesivas para la obtención de la infiltración inducida a los acuíferos, resulta un déficit o minado de $639 \text{ hm}^3/\text{año}$. Ante el problema de estrés al que está sujeta esta Cuenca, es necesario implementar acciones que además de contemplar la disminución del uso del agua incluya una campaña de medición que permita conocer la efectividad de acciones que se realicen. Las propuestas estructurales que se contemplan son el uso del agua superficial para la recarga de acuíferos, uso eficiente y reúso del agua. A fin de incrementar el uso del agua superficial es necesario construir presas que retengan las aguas broncas, y definir sistemas de aprovechamiento y/o zonas de recarga a los acuíferos. Respecto al reúso, se propone realizar su tratamiento y propiciar el uso en jardines y talleres de lavado de vehículos, entre otros. Lo más importante es implementar acciones encaminadas a la disminución del uso público-urbano. Además, resulta indispensable replantear los compromisos aguas abajo en la cuenca del río Tula. Los métodos empíricos propuestos en la norma NOM-011-Conagua-2015 para la obtención del escurrimiento superficial dan resultados bastante certeros, por lo menos en este ejercicio. Además, el presente escrito muestra una metodología para obtener la disponibilidad en forma conjunta de agua superficial y subterránea, realizando un análisis mediante aproximaciones sucesivas, que permita obtener los coeficientes de infiltración al acuífero por el uso del agua.

Palabras clave: Valle de México, recursos hídricos, balance hídrico.

Abstract

With more than 22 million inhabitants, the Basin of the Valley of Mexico is the most populated area in Mexico. Within this region 22% of the gross domestic product is generated. The water needs by its inhabitants reaches a gross volume of $2\,142 \text{ hm}^3/\text{year}$ and an additional $641 \text{ hm}^3/\text{year}$ for other uses as agricultural, industrial and other services is required. Of this volume, 62% is withdrawn from aquifers located within the basin, 17% comes from surface water and waste-water, and the remaining 21% is imported from other basins. The basin is currently under high water stress, there is an overexploitation about $639 \text{ hm}^3/\text{year}$, which is almost 40% of the gross groundwater withdrawal. In addition the population, although moderate still is growing, at a rate of 0.6% per year. Since it is a closed basin, infrastructure to solve floods

and sewage problems were built starting in the XVII century and continue until our days. Only 15% ($95 \text{ hm}^3/\text{year}$) of the surface runoff is used, the remaining volume of water ($521 \text{ hm}^3/\text{year}$) discharges into the Tula river basin. The total amount of water used in irrigated agriculture, including wastewater, is $207 \text{ hm}^3/\text{year}$. This amount of water is used to irrigate approximately 24 000 ha. On the other hand, the wastewater volume at the exit of the basin is $1\,260 \text{ hm}^3/\text{year}$. By means of water balance it was estimated a water deficit of $639 \text{ hm}^3/\text{year}$. The balance was calculated by successive approximations, in order to obtain the infiltration to the aquifers. The basin is under a huge water stress; therefore it is necessary to implement actions to decrease the water use, it also necessary to improve the water monitoring to be able to evaluate the effectiveness of such actions. The proposed structural actions are to increase aquifers recharge, define systems and recharge zones, to make an efficient use of water and to increase the reuse. Water treatment should be wider implemented and its use should be promoted for gardens and car washing, among others. In order to increase the use of surface water it is necessary to build dams. The most important thing is to reduce the water use in the cities. This will require reconsidering the downstream commitments with the Tula River basin. The empirical methods proposed by the norm NOM-011-Conagua-2015, give very accurate results, at least in this exercise. In addition, the present document shows a methodology to obtain the joint availability of surface and ground water, the analysis is carried out by means of successive approximations to obtain the infiltration coefficients for the water use.

Keywords: Valley of Mexico, water resources, water balance.

Recibido: 11/04/2017

Aceptado: 15/07/2018

Antecedentes

La cuenca del Valle de México es una cuenca cerrada topográficamente, donde tiene asiento la megalópolis de la Ciudad de México. Es la región más poblada del país, con más de 22 millones de personas asentadas en una superficie del orden de 10 000 kilómetros cuadrados, que incluyen a la Ciudad de México en forma total y parcialmente en los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala y Puebla. La cuenca está integrada por un centenar de municipios y delegaciones, y donde se genera 22% del Producto Interno Bruto del país.

Debido al carácter de cuenca cerrada, en el siglo XVII se construyó el primer conducto para dar salida a las aguas del Valle, denominado Túnel de Nochistongo, convirtiéndose en el Tajo debido a los derrumbes que se suscitaron. En 1900 se construyó el Gran Canal del Desagüe, con salida de la cuenca a través del Túnel de Tequisquiac, a fin proteger a la población, unos 550 000 habitantes, contra inundaciones. El continuo crecimiento de la población y sus consecuentes problemas de desalojo de agua hicieron necesaria la construcción del drenaje profundo en 1967, sistema cuya ampliación continúa hasta nuestros días con el Túnel Emisor Oriente.

Respecto al abastecimiento de agua y ante el crecimiento de la población, surgió la necesidad de realizar una serie de perforaciones de pozos en las décadas de 1950 y 1960, iniciando así la sobreexplotación de los acuíferos.

Además, se importa agua de otras cuencas (transvases), entre las que se cuenta la proveniente del Valle de Lerma, que inició su operación en 1951, con un caudal de 2.5 m³/s, mismo que proviene de pozos ubicados en aquel Valle. El caudal incrementó con el tiempo, de tal manera que en 1974 se llegaron a importar cerca de 13.0 m³/s. Después de ese año, el caudal bajó de forma paulatina hasta llegar en 1990 a valores cercanos a 4.0 m³/s (123 hm³/año), volumen que se mantiene prácticamente constante hasta la actualidad.

Otra fuente externa es el llamado Sistema Cutzamala, que inició su operación en 1982, con un caudal de 126 hm³/año, incrementado en 1994 a unos 462 hm³/año, aportación proveniente de una serie de presas, esto es, de agua superficial.

Aspectos administrativos

Para administrar los recursos hídricos, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) divide la cuenca del Valle de México en siete zonas para las aguas superficiales y otras siete para las aguas subterráneas (Tabla 1), cuyas sumas parciales en ambos casos son sensiblemente las mismas y cuya división geográfica se muestra en la Figura 1 y Figura 2. La población de esta megalópolis se concentra en las zonas administrativas de agua subterránea denominadas Cuautitlán-Pachuca, Texcoco, Chalco-Amecameca y la llamada Zona Metropolitana de la Ciudad de México, donde habita 99% de las personas asentadas en la cuenca del Valle de México (Conapo, 2015).

Tabla 1. Zonas administrativas en materia de recursos hídricos.

| Clave acuífero | Nombre del acuífero | Área (km ²) | Sub-Cuenca hidrológica | Nombre de la cuenca | Área (km ²) |
|--|---|-------------------------|--|--------------------------------|-------------------------|
| Aguas subterráneas | | | Aguas superficiales | | |
| 901 | Zona Metropolitana de la Ciudad de México | 1,900 | I | Xochimilco | 508 |
| 1319 | Tecocomulco | 564 | II | Río La Compañía | 1,167 |
| 1320 | Apan | 733 | III | Tochac-Tecocomulco | 1,328 |
| 1506 | Chalco-Amecameca | 1,393 | IV | Río de las Avenidas de Pachuca | 2,647 |
| 1507 | Texcoco | 934 | V | Texcoco | 1,399 |
| 1508 | Cuautitlán-Pachuca | 3,870 | VI | Ciudad de México | 1,816 |
| 2902 | Soltepec | 429 | VII | Río Cuautitlán | 832 |
| Suma Cuenca del Valle de México | | 9,823 | Suma Cuenca del Valle de México | | 9,698 |

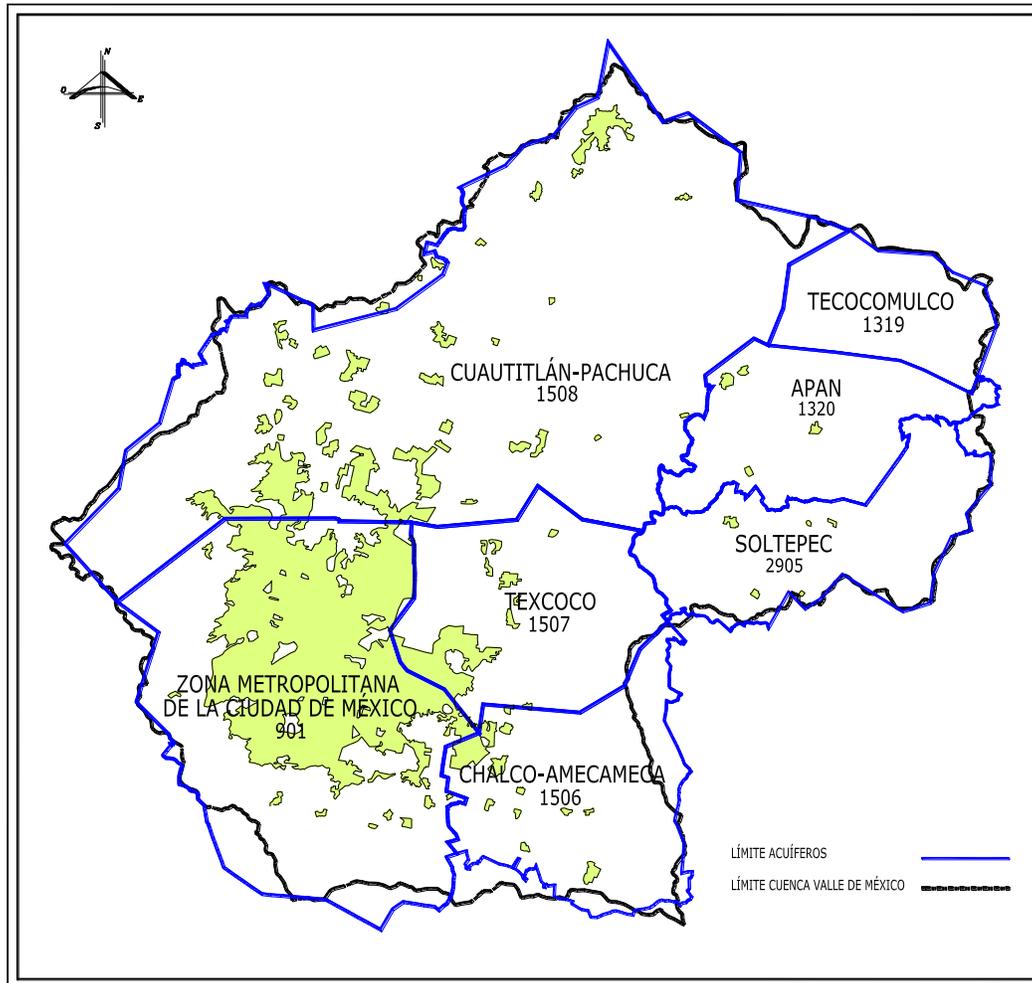


Figura 1. Zonas administrativas en materia de aguas del subsuelo (acuíferos).

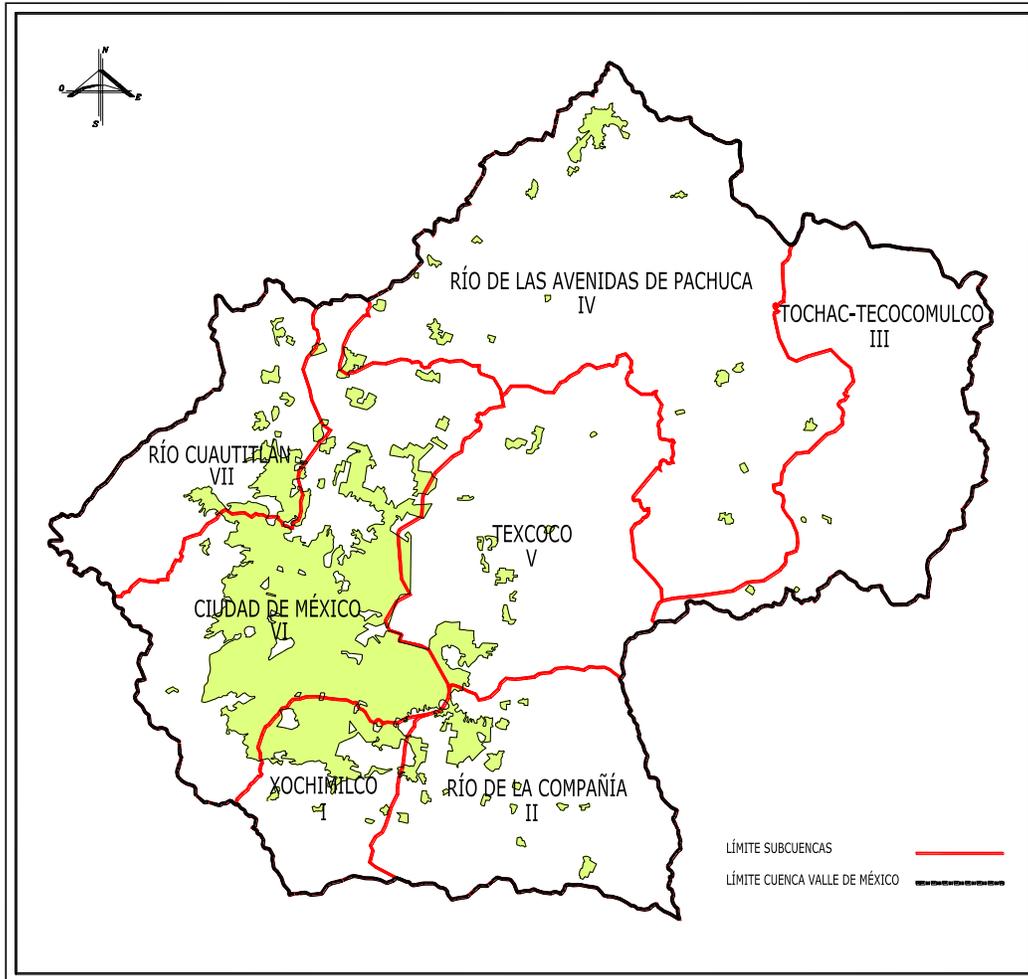


Figura 2. Zonas administrativas en materia de aguas superficiales (cuencas).

En este punto conviene recordar que acuífero se define como “cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo” (Ley de Aguas Nacionales, 1992). Lo anterior significa que no necesariamente toda el área administrativa es propiamente acuífero, pues incluyen a las áreas de recarga y en algunas ocasiones sus límites coinciden con divisiones políticas.

Independientemente de la definición de los límites convencionales, las áreas administrativas de aguas subterráneas en que está dividida la Cuenca del Valle de México, son prácticamente independientes entre sí, sólo flujos incipientes entre el acuífero de Cuautitlán-Pachuca comunican con los de Apan y Soltepec, por lo menos así lo demuestra la red de flujo subterráneo obtenida de pozos con una profundidad entre los 100 a 300 m, según se puede ver en la figura 3 (Conagua-Ocavm, 2007).

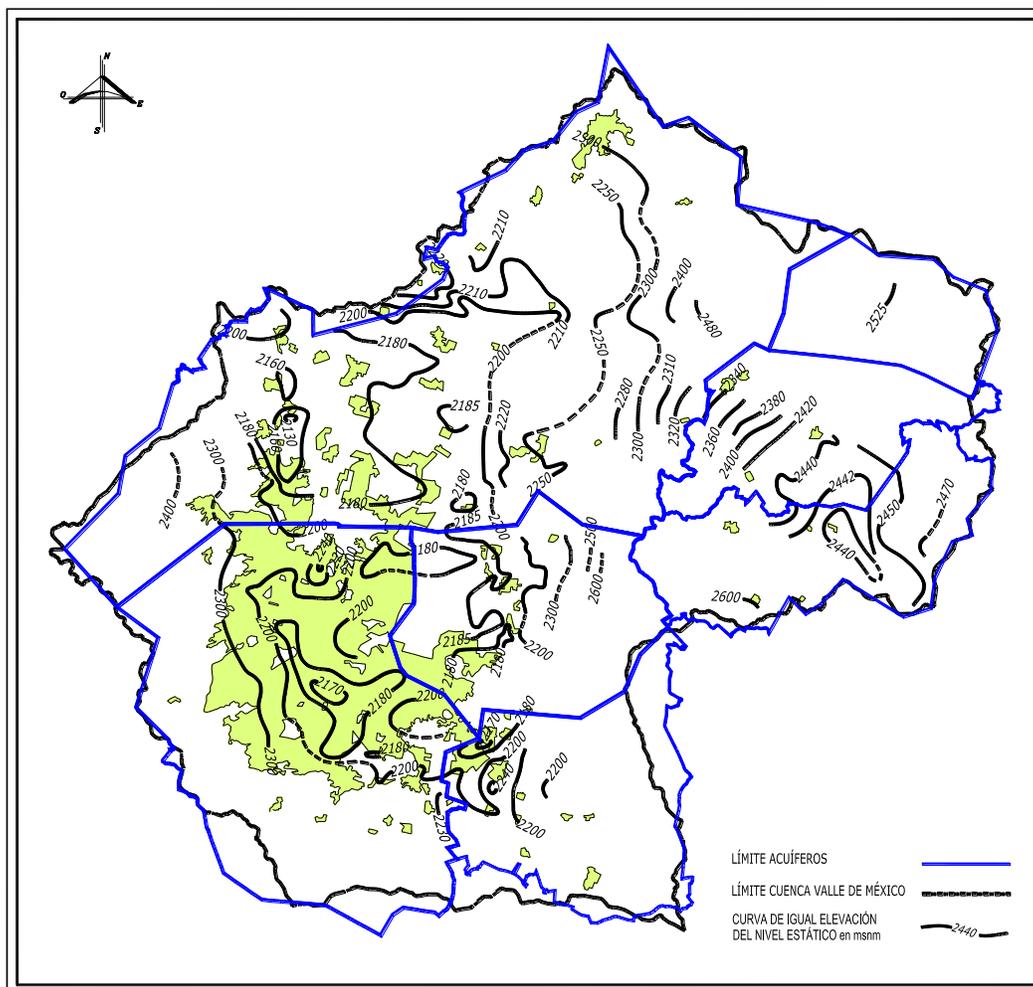


Figura 3. Red de flujo subterráneo en la Cuenca del Valle de México.

Por lo que respecta a la división administrativa de las sub-cuencas de aguas superficiales, es sin lugar a dudas las denominadas de la Ciudad de México, Xochimilco y Río Cuautitlán, donde se concentra la mayor población y las actividades económicas de esta gran región (Conagua-Ocavm, 2010a; Conagua-Ocavm, 2010b).

Adicionalmente y según la Ley de Aguas Nacionales de 1992, "Cuenca Hidrológica, es la unidad del territorio,... normalmente delimitada por un parteaguas o divisoria de las aguas -aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad,... La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos" (Ley de Aguas Nacionales, 1992). Por lo que esta división de cuencas obedece en principio a los parteaguas topográficos superficiales, aunque en algunos casos existe comunicación entre sí, en especial en el Valle de México, debido a la construcción de obras de drenaje que han modificado esta independencia, por lo que desde el punto de vista hidrológico hay que tomar en cuenta estas transferencias al realizar balances hídricos por sub-cuenca.

Para obviar esta situación, en este escrito se hace el análisis del agua superficial para toda la Cuenca del Valle de México y en el caso de las aguas subterráneas, el análisis se hizo por área administrativa, de acuerdo con los estudios realizados por la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (Conagua-Ocavm, 2007).

Usos del agua

Agua subterránea

Los censos de aprovechamientos de aguas subterráneas realizados por la Conagua-Ocavm reportan una extracción bruta de agua subterránea

de unos 1,736 hm³/año, de los cuales el 87% corresponde al uso público urbano y sólo el 13% se integra por los demás usos agrícola, industrial y servicios (Tabla 2) (DOF, 2015a). Este volumen se utiliza en el riego de unas 17,783 ha y para el abasto de una población de unos 22 millones de habitantes, como uso público urbano, mismo que considera servicios, comercial, industria, fugas en la red de distribución y en general, para cubrir todas las necesidades de la población.

Tabla 2. Volúmenes brutos usados de agua subterránea (hm³/año).

| | Agrícola | Público Urbano | Industrial | Otros | Suma |
|--------------------|------------|----------------|------------|-----------|--------------|
| ZMCM | 1 | 559 | 64 | 1 | 625 |
| Cuautitlán-Pachuca | 45 | 687 | 16 | 4 | 752 |
| Texcoco | 47 | 130 | 4 | 2 | 183 |
| Chalco-Amecameca | 16 | 108 | 4 | 1 | 129 |
| Apan | 1 | 12 | 0 | 2 | 15 |
| Tecocomulco | 0 | 12 | 1 | 0 | 13 |
| Soltepec | 13 | 5 | 1 | 0 | 19 |
| Total | 123 | 1,513 | 90 | 10 | 1,736 |

Agua superficial

Es complicado estimar los volúmenes usados de agua superficial, debido a que los escurrimientos resultan de una mezcla entre agua residual y los propios superficiales. Según las estadísticas de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sagarpa), la superficie bajo riego en la región alcanza las 41,665 ha, que destinan en un 81% a cultivos anuales y el restante 19% a cultivos perennes, (cuadro 3). Superficie obtenida para el Distrito Federal y los 70 municipios que cuentan con riego, del total de 128 municipios y delegaciones integrados en la cuenca, misma que es regada por agua superficial y subterránea,

aspecto que no se especifica en estas estadísticas (Sagarpa-Siacon, 2015).

Tabla 3. Superficie bajo riego en la Cuenca del Valle de México.

| Acuífero | Anual (ha) | Perenne (ha) |
|--|---------------|--------------|
| Chalaco Amecameca | 1 064 | 141 |
| Texcococo | 5 070 | 765 |
| ZMCM | 2 464 | 29 |
| Cuautitlán-Pachuca | 23 463 | 6776 |
| Apan | 296 | 67 |
| Tecocomulco | 53 | 16 |
| Soltepec | 1 377 | 84 |
| Suma Cuenca del Valle de México | 33 787 | 7 878 |

Por otro lado, el uso de agua superficial obtenido de la programación de riegos del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, que toma en cuenta estadísticas históricas y por lo tanto, se puede suponer que los valores del cuadro 4 muestran el volumen usado en la agricultura en un periodo amplio (Conagua-Ocavm, 2010a; Conagua-Ocavm, 2010b). De esta forma, el agua superficial usada es del orden de 207 hm³/año, para el riego de 23 882 ha, según el informe mencionado, de este valor sólo 64 hm³/año provienen de aguas blancas y los restantes 143 hm³/año de aguas residuales.

Como la superficie total es de 41 665 ha reportada por SIACON y según lo anterior, 23 882 ha son irrigadas por aguas de origen superficial, por lo tanto, las restantes 17 783 ha son irrigadas con agua subterránea. De esta manera resulta una lámina bruta de 0.87 m para el agua superficial y de 0.69 m para el agua subterránea (Tabla 4).

Tabla 4. Aprovechamiento de agua superficial para riego en la Cuenca del Valle de México.

| Programación 2011-2012 | | | |
|------------------------|---------------|----------------------|----------|
| | Superficie ha | miles m ³ | Lámina m |
| | | | |

| | | | | |
|---------------------------|--------|---------|------|------------------|
| Presa Iturbide | | | | |
| UR Tlazala | 382 | 1,529 | 0.40 | Aguas blancas |
| UR Transfiguración | 112 | 673 | 0.60 | Aguas blancas |
| Presa El Manantial | 115 | 781 | 0.68 | Aguas blancas |
| Presa Guadalupe | | | | |
| UR Coyotepec | 360 | 1,950 | 0.54 | Aguas blancas |
| UR Teoloyucan | 1,670 | 15,853 | 0.95 | Aguas blancas |
| UR Cuautitlán | 4,245 | 36,278 | 0.85 | Aguas blancas |
| Presa La Concepción | | | | |
| DR 073 La Concepción | 343 | 3,565 | 1.04 | Aguas blancas |
| U de R Tepotzotlán | 952 | 2,952 | 0.31 | Aguas blancas |
| Laguna de Zumpango | | | | |
| UR Dique 3 al 7 | 246 | 1,334 | 0.54 | Aguas grises |
| UR Ass Usuarios | 695 | 7,194 | 1.04 | Aguas grises |
| Apoyo al sistema | | 7,750 | | Aguas grises |
| Gran Canal del Desagüe | | | | |
| DR 88 Chiconautla | 2,162 | 25,438 | 1.18 | Aguas residuales |
| Antes de los túneles | | | | |
| DR 074 Zumpango | 8,965 | 72,478 | 0.81 | Aguas residuales |
| Río Cuautitlán | | | | |
| Unidades de riego | 3,635 | 29,603 | 0.81 | Aguas residuales |
| | 8,179 | 63,581 | 0.78 | Aguas blancas |
| | 941 | 16,278 | 1.73 | Aguas grises |
| | 14,762 | 127,519 | 0.86 | Aguas residuales |
| Total agua superficial | 23,882 | 207,378 | 0.87 | |
| Aguas superficiales | 23,882 | 207,378 | 0.87 | |
| Aguas subterráneas | 17,783 | 122,427 | 0.69 | |
| Total superficie irrigada | 41,665 | 329,805 | | |

Recarga natural

Escorrentamiento superficial por cuenca propia

De la precipitación, una parte escurre superficialmente (escorrentamiento directo), otra parte se infiltra, recargando a los acuíferos y el volumen restante se evapora. Para obtener el escorrentamiento directo se analizaron los volúmenes aforados a la salida de la cuenca, mismos que se miden en las estaciones hidrométricas 26030 El Salto, 26216 Túnel Nuevo de Tequixquiac, 26007 Tajo de Tequixquiac, 26500 Emisor Requena y 26437 Conejos, cuya localización se muestra en la figura 4. De los datos de estas estaciones resulta un volumen total anual de 1,781 hm³/año, como promedio en el periodo 1980-2011, valores que se muestran en la cuadro 5 (Conagua, 2015).



Figura 4. Sistema de drenaje a la salida de la Cuenca del Valle de México.

Al separar el escurrimiento total aforado ($1,781 \text{ hm}^3/\text{año}$), en flujo directo ($521 \text{ hm}^3/\text{año}$) y flujo base ($1,260 \text{ hm}^3/\text{año}$), como un promedio en el periodo mencionado. La componente de flujo base, así calculada, se refiere al de origen subterráneo más los retornos por el drenaje debidos al uso del agua, tanto de origen superficial como subterráneo.

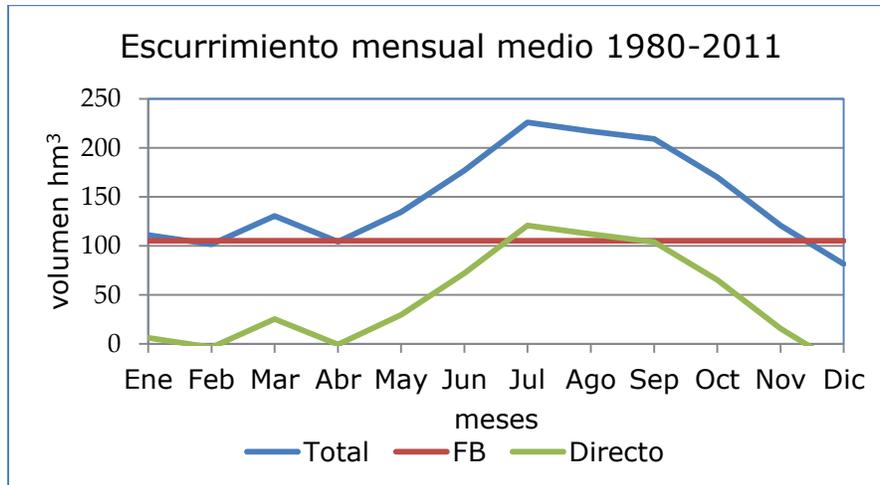


Figura 5. Escurrecimientos directo y total a la salida de la cuenca.

Tabla 5. Volumen aforado a la salida de la Cuenca del Valle de México.

| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Anual |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Escurrecimiento Total | 111 | 101 | 130 | 104 | 134 | 177 | 226 | 217 | 209 | 170 | 121 | 81 | 1,781 |
| Flujo en estiaje | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 1,260 |
| Escurrecimiento Directo | 6 | -4 | 25 | -1 | 29 | 72 | 121 | 112 | 104 | 65 | 16 | -24 | 521 |

Según el cuadro anterior, el volumen aforado a la salida de la cuenca, por flujo directo medido en las estaciones hidrométricas, resulta de 521 $\text{hm}^3/\text{año}$. Al sumar a este volumen la evaporación en la laguna de Tecocomulco, donde sólo se ha tomado el 50% de la evaporación calculada en 2010, al considerar que la otra mitad proviene de agua subterránea, más el volumen usado en la Presa Madín para uso público urbano y el uso agrícola en otras presas, da como resultado un valor de 616 $\text{hm}^3/\text{año}$, valor muy cercano al obtenido, mediante métodos empíricos en el estudio de disponibilidad (682 $\text{hm}^3/\text{año}$), como se ve en los cuadros 6 y 7 (Conagua-Ocavm, 2010a; Conagua-Ocavm, 2010b).

Tabla 6. Resultados del balance de aguas superficiales en la Cuenca del Valle de México.

| | |
|--|-----|
| Salida de escurrecimiento directo medido en estaciones hidrométricas | 521 |
|--|-----|

| | |
|---|------------|
| Evaporación en laguna de Tecocomulco | 19 |
| Presa Madín aprovechamiento | 12 |
| Uso agrícola superficial agua blanca | 64 |
| Escurrimiento por cuenca propia (hm³/año) | 616 |

Lo anterior significa que del volumen superficial que se genera en la Cuenca del Valle de México (616 hm³/año), sólo se aprovecha el 15% dentro de la misma cuenca (95 hm³/año), quedando un sobrante de escurrimiento directo que descarga hacia la Cuenca del Río Tula de 521 hm³/año.

De acuerdo con los estudios realizados por la Conagua, el escurrimiento por cuenca propia en la Cuenca del Valle de México que se muestra en el siguiente cuadro 7, se obtuvo mediante métodos empíricos y para cada una de las sub-cuencas administrativas en que se divide la Cuenca del Valle de México, valores que se encuentran publicados en el Diario Oficial de la Federación el 8 de julio de 2011 y el 8 de marzo de 2016 (DOF, 2011; DOF, 2016). En este caso, el volumen de escurrimiento se calculó mediante los métodos empíricos sugeridos en la NOM-01-Conagua-2015 (DOF, 2015b):

$$\text{Volumen anual de escurrimiento natural en la cuenca} = (\text{precipitación anual en la cuenca}) * (\text{área de la cuenca}) * (\text{Coeficiente de escurrimiento})(1)$$

En la expresión anterior el coeficiente de escurrimiento es función del tipo y uso de suelo.

Los valores obtenidos con ambas metodologías, coinciden sensiblemente, para el caso de las medidas directas a la salida de la cuenca (616 hm³/año, cuadro 6) y por métodos empíricos (682 hm³/año, cuadro 7), resultando una diferencia de 11%.

Tabla 7. Resultados del cálculo del escurrimiento superficial por métodos indirectos (Conagua-OCAVM, 2010a; Conagua-OCAVM, 2010b).

| Cuenca hidrológica | Área km ² | K | Precipitación anual mm | Coeficiente de escurrimiento | hm ³ /año |
|--------------------|----------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------------|
|--------------------|----------------------|---|------------------------|------------------------------|----------------------|

| | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------|--------|------------|
| I | Xochimilco | 508 | 0.249 | 707 | 0.1231 | 45 |
| II | Río La compañía | 1,167 | 0.223 | 681 | 0.0969 | 78 |
| III | Tochac-Tecocomulco | 1,328 | 0.219 | 644 | 0.0890 | 77 |
| IV | Río de las Avenidas de Pachuca | 2,647 | 0.228 | 542 | 0.0851 | 124 |
| V | Texcoco | 1,399 | 0.241 | 580 | 0.1003 | 82 |
| VI | Ciudad de México | 1,816 | 0.270 | 729 | 0.1440 | 192 |
| VII | Río Cuautitlán | 833 | 0.241 | 790 | 0.1257 | 84 |
| Cuenca del Valle de México | | 9,698 | 0.238 | 643 | | 682 |

Con base en lo anterior es posible realizar un balance de aguas superficiales mismo que se muestra en la figura 6.

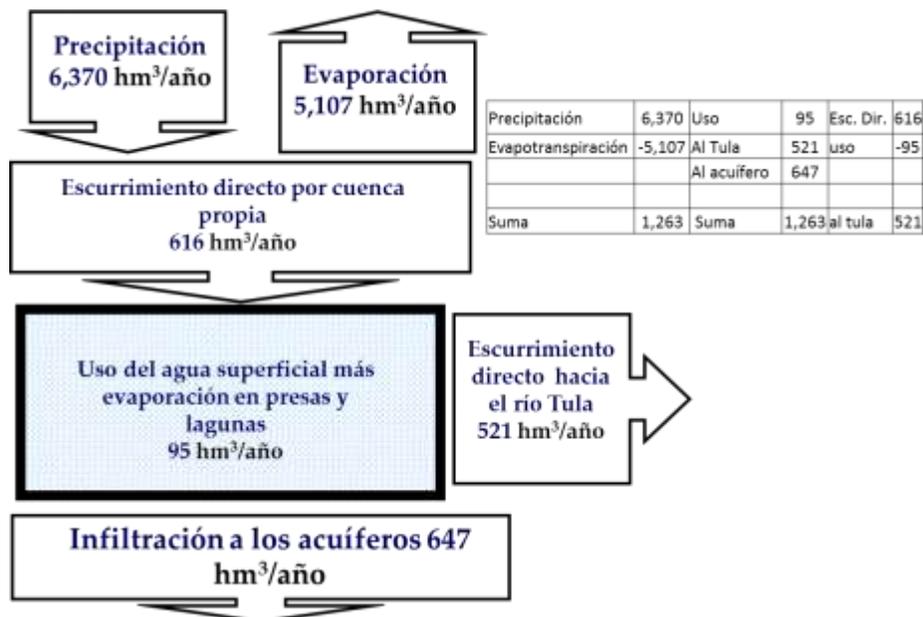


Figura 6. Balance hídrico de aguas superficiales.

El resultado del balance indica que la precipitación menos la evaporación (1,263 hm³/año) constituye el escurrimiento directo (616 hm³/año) más la infiltración o recarga natural a los acuíferos (647 hm³/año), valor este último, que se obtiene más adelante.

Recarga natural a los acuíferos

Por lo que respecta a la recarga natural a los acuífero, concepto equivalente al escurrimiento por cuenca propia en las aguas superficiales, su cálculo se realizó aplicando la misma metodología de la misma norma para obtener el escurrimiento directo. Agregando el concepto de evapotranspiración (ET) obtenida mediante la fórmula empírica propuesta por Turc, fórmula que está en función de la precipitación (P) y la temperatura (T), y cuya diferencia con el escurrimiento superficial y la precipitación, es la infiltración o la recarga natural a los acuíferos (Réménieras, 1960).

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + (P/L)^2}} \quad (2)$$

Donde L se obtiene mediante:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (3)$$

$$\text{Volumen de infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Evaporación} - \text{Eskurrimiento} \quad (4)$$

En este caso, se calculó la infiltración natural en el área total administrativa de cada acuífero, posteriormente se obtuvo un coeficiente de infiltración (*la infiltración entre la precipitación*), coeficiente que se aplica sólo a las zonas altas o de recarga, y posteriormente, en la zona donde se tienen datos de piezometría se calcularon las entradas horizontales con la fórmula de Darcy, de esta forma se tienen dos

valores que conforman la recarga natural, en zonas altas e infiltración en la zona de valle, tal como se muestra en el cuadro 8.

La ley de Darcy muestra que la velocidad del flujo (v) es directamente proporcional al desnivel (Δh) e inversamente proporcional a la distancia (L) en que ocurre ese cambio:

$$v = k \frac{\Delta h}{L} \quad (5)$$

donde k es la conductividad hidráulica.

Tabla 8. Resultados del cálculo de la recarga natural a los acuíferos.

| Concepto | Unidades | ZMCM | Cuautitlán-Pachuca | Texcoco | Chalco-Amecameca | Apan | Tecocomulco | Soltepec | Total V. M. |
|--------------------------------|---------------------------|------------|--------------------|------------|------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Área total | km ² | 1,900 | 3,870 | 934 | 1,393 | 733 | 564 | 429 | 9,823 |
| Área de valle | km ² | 970 | 1,800 | 600 | 300 | 285 | 417 | 180 | |
| Coefficiente | I_1 | 0.0222 | 0.0854 | 0.1000 | 0.1140 | 0.0641 | 0.1000 | 0.1000 | |
| Precipitación | mm/año | 675 | 643 | 575 | 700 | 597 | 620 | 700 | |
| Infiltración en zonas altas | hm ³ /año | 15 | 99 | 35 | 24 | 11 | 26 | 13 | 223 |
| Entradas horizontales al valle | hm ³ /año | 137 | 116 | 65 | 18 | 17 | 3 | 68 | 424 |
| Recarga natural | hm³/año | 152 | 215 | 100 | 42 | 28 | 29 | 81 | 647 |

Finalmente, la recarga natural como escurrimiento directo en los ríos (616 hm³/año, cuadro 6) y como recarga a los acuíferos (647 hm³/año, cuadro 8), resulta en total de unos 1,263 hm³/año, tal como ya se mencionó (figura 6).

Balances hídricos en la cuenca del Valle de México

El balance de aguas subterráneas resulta complejo, ya que el acuífero recibe una recarga natural y una inducida por el uso del agua superficial, subterránea y residual. Como valores iniciales, se tiene que la recarga natural a los acuíferos es de 647 hm³/año, la extracción bruta de aguas subterráneas es de 1,736 hm³/año, quedando un flujo base o de drenaje hacia el río Tula de 1,260 hm³/año. El balance se realizó con el "método de los coeficientes" por aproximaciones sucesivas, verificando el rendimiento específico de los acuíferos y comparando con algunos datos publicados (Peña, 2014; DOF, 2015a).

Por otra parte, para los principales acuíferos que integran la cuenca, los balances resultan negativos: ZMCM (-147 hm³/año), Cuautitlán-Pachuca (-379 hm³/año), Texcoco (-47 hm³/año) y Chalco-Amecameca (-66 hm³/año). Los tres acuíferos restantes (Apan, Tecocomulco y Soltepec) están en equilibrio y en conjunto representan el 20% del área total de la Cuenca del Valle de México, con una población de tan sólo 250,000 habitantes.

La recarga inducida se calculó considerando un 20% por el uso público urbano y 25% por el uso agrícola, resultando una infiltración inducida al acuífero de 566 hm³/año.

Finalmente, el resultado del balance de aguas subterráneas arroja un valor de 639 hm³/año como minado del acuífero (cuadro 9 y figura 7), valor que dividido entre el volumen drenado, muestra el 0.13 como coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico de los acuíferos, cifra que es acorde con los materiales que se presentan en el subsuelo. Los abatimientos anuales promedio en el periodo 2002-2007 se muestran en la Figura 8.

Tabla 9. Balance de agua subterránea (hm³/año).

| | ZMCM | Cuautitlán-Pachuca | Texcoco | Chalco-Amecameca | Apan | Tecocomulco | Soltepec | Total V de M |
|------------------|------|--------------------|---------|------------------|------|-------------|----------|--------------|
| Recarga natural | 152 | 215 | 100 | 42 | 28 | 29 | 81 | 647 |
| Recarga inducida | 326 | 158 | 46 | 27 | 3 | 2 | 4 | 566 |

| | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| Recarga total | 478 | 373 | 146 | 69 | 31 | 31 | 85 | 1,213 |
| Extracción bruta | 625 | 752 | 183 | 129 | 15 | 13 | 19 | 1,736 |
| Manantiales | | | 10 | 3 | | | | 13 |
| Evaporación | | | | | | 18 | | 18 |
| Flujo subterráneo | | | | 3 | 16 | | 66 | 85 |
| Descarga total | 625 | 752 | 193 | 135 | 31 | 31 | 85 | 1,852 |
| Minado | -147 | -379 | -47 | -66 | 0 | 0 | 0 | -639 |



Figura 7. Balance hídrico de aguas subterráneas.

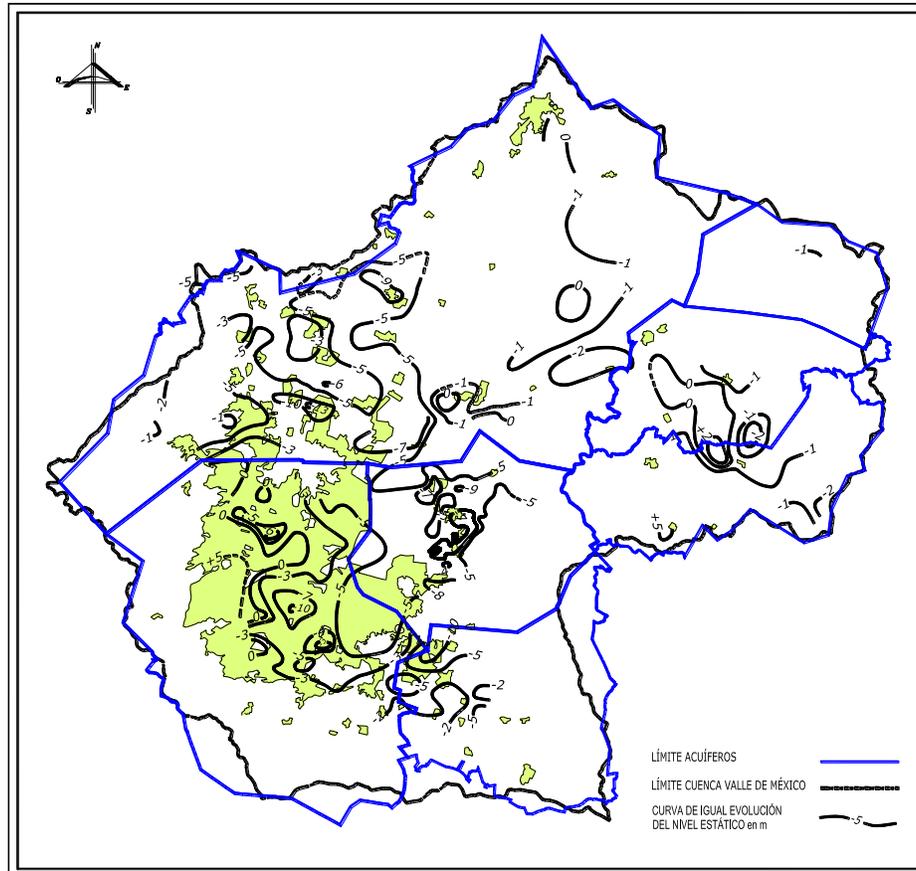


Figura 8. Abatimientos del nivel estático observado en la Cuenca del Valle de México.

De acuerdo con la multicitada norma donde se anota que el retorno al drenaje del uso agrícola es del orden del 80%, el uso público urbano de 75% y el industrial 55%. En el cuadro 9 se muestra el balance hídrico, donde el coeficiente aplicado al uso público urbano fue del 51%, valor ajustado para lograr la descarga medida a la salida de la cuenca de 1,260 hm³/año. Bajo esta premisa, los coeficientes son cercanos a los recomendados por la norma, los demás coeficientes no fueron modificados (DOF, 2015c).

Procediendo de esta forma, del volumen bruto de agua usada, es de 2,783 hm³/año, el retorno al drenaje, resulta de 1,260 hm³/año, la infiltración a los acuíferos de 567 hm³/año, por lo que el consumo neto, resulta de 956 hm³/año, este último valor representa el 34% del total del agua usada (Tabla 9).

Cabe aclarar que la descarga al río Tula en época de estiaje es producto de sobrantes del uso del agua exclusivamente (drenaje), debido a que los niveles estáticos del agua subterránea son bastante profundos como para existir una descarga significativa de las aguas subterráneas a los ríos o drenes (flujo base).

Tabla 9. Resultados del balance hídrico en la Cuenca del Valle de México.

| Fuente/uso | Volumen usado hm ³ /año | Al drenaje | | Al subsuelo | | Drenaje + infiltra hm ³ /año | Consumo hm ³ /año |
|---|---------------------------------------|-------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|--|---------------------------------|
| | | Coeficiente | Volumen hm ³ /año | Coeficiente | Volumen hm ³ /año | | |
| Lerma | 123 | 0.51 | 63 | 0.20 | 25 | 88 | 35 |
| Cutzamala | 462 | 0.51 | 237 | 0.20 | 92 | 330 | 132 |
| Manantiales DF | 26 | 0.51 | 13 | 0.20 | 5 | 18 | 7 |
| Madín (Gestión hídrica 2010) | 12 | 0.51 | 6 | 0.20 | 2 | 9 | 4 |
| Magdalena PU | 6 | 0.51 | 3 | 0.20 | 1 | 5 | 2 |
| Agua subterránea | 1,513 | 0.51 | 777 | 0.20 | 303 | 1,080 | 433 |
| Suma uso público urbano | 2,142 | | 1,101 | | 428 | 1,529 | 613 |
| Uso de aguas residuales agrícola plantas tratamiento | 214 | 0.20 | 43 | 0.25 | 54 | 96 | 118 |
| Uso de aguas superficiales agrícola (superficial blancas, residuales) | 207 | 0.20 | 41 | 0.25 | 52 | 93 | 114 |
| Otros | 9 | 0.20 | 2 | 0.25 | 2 | 4 | 5 |
| Agua subterránea | 122 | 0.20 | 24 | 0.25 | 31 | 55 | 67 |
| Suma agrícola | 553 | | 111 | | 138 | 249 | 304 |
| Industrial | | | | | | | |
| Industrial | 88 | 0.55 | 49 | | | 49 | 40 |
| Uso industrial | 88 | | 49 | | 0 | 49 | 40 |
| Suma industrial | 88 | | 49 | | 0 | 49 | 40 |
| Total por el uso de agua | 2,783 | | 1,260 | | 567 | 1,827 | 957 |

El procedimiento utilizado en este análisis consistió en hacer variaciones paramétricas a los coeficientes utilizados, tanto en el balance del acuífero, como de los escurrimientos superficiales, es decir, el análisis es por aproximaciones sucesivas (Arcos-Hernández, 2000).

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con el balance hídrico mostrado se desprende que del agua superficial generada en la cuenca (616 hm³/año) sólo se aprovecha el 15% dentro de la cuenca (95 hm³/año), quedando un sobrante de escurrimiento directo que se va hacia la Cuenca del Río Tula de 521 hm³/año, como lo muestran las mediciones realizadas en la estaciones hidrométricas a la salida de la cuenca.

| | Volumen hm ³ /año | |
|-------------|------------------------------|-----------|
| Superficial | 521 | Excedente |
| Subterránea | -639 | Déficit |
| Residual | 1,260 | Excedente |

Aunque es difícil retener esa agua, es deseable hacer uso de ella dentro de la propia Cuenca del Valle de México, para la recarga de acuíferos o su aprovechamiento, ya que se supone que no están contaminadas. Aunque se requerirían obras para retener esas aguas brancas. Un programa semejante al realizado en el periodo de 1940-1950, con la construcción de una serie de presas en el poniente del Valle, mismas que han sido abandonadas por el crecimiento de la mancha urbana.

El agua que transita por el drenaje, prácticamente con régimen uniforme, alcanza un valor de 1,260 hm³/año, que también escurre hacia la Cuenca del Río Tula. Lo anterior significa que si el minado del acuífero estimado en 639 hm³/año y si se implementa una política de

reúso dentro de la cuenca, con su debido tratamiento, es posible disminuir sensiblemente la sobreexplotación de los acuíferos.

Por lo que es necesario implementar un programa intensivo para el reúso del agua, donde el principal usuario sería los propios organismos encargados del abasto a las poblaciones, en el riego de jardines o el uso en establecimientos como los de lavado de vehículos y aún en los usos residenciales. En ambos casos, en esta conclusión y la anterior, será necesario revisar los compromisos aguas abajo y su reprogramación.

El volumen bruto total de agua usada en la Cuenca del Valle de México es de 2,783 hm³/año, de los cuales 1,736 hm³/año provienen de los acuíferos (62%), 462 hm³/año del agua superficial (17%), que incluyen el uso de aguas residuales y los restantes 585 hm³/año de importaciones de otras cuencas (21%).

De este volumen de 2,783 hm³/año, el 77% (2,142 hm³/año) se utiliza en los centros urbanos constituyendo el uso público urbano, agrícola 553 hm³/año (20%) y los restantes 88 hm³/año (3%) se destina a los demás usos (figuras 9 y 10).



Usos del agua

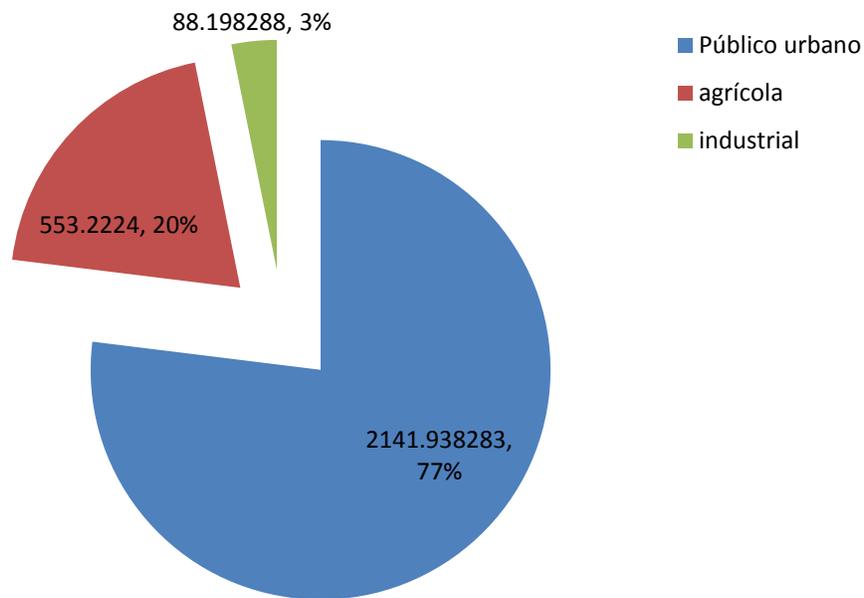


Figura 9. Usos de los recursos hídricos en la Cuenca del Valle de México.

Origen del agua

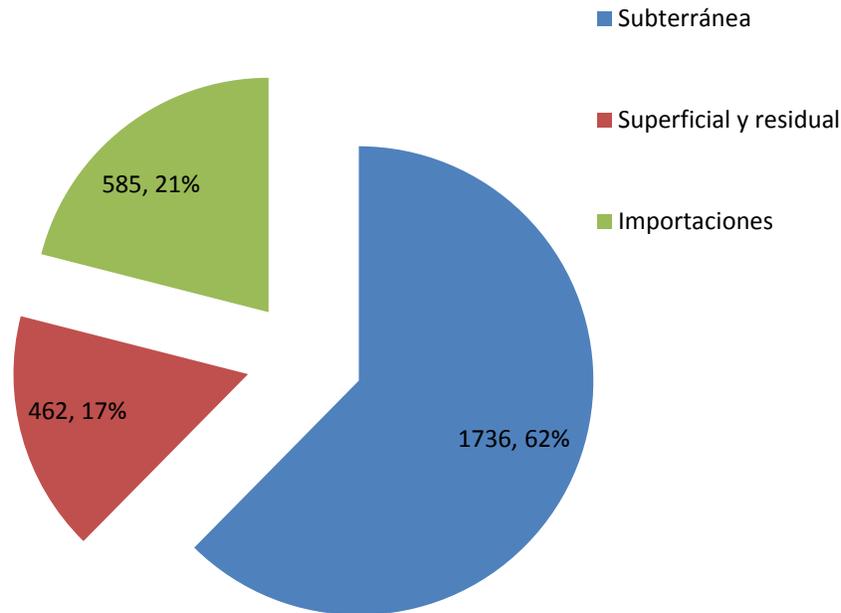


Figura 10. Origen de los recursos hídricos en la Cuenca del Valle de México.

Ante esta situación, es necesario realizar acciones encaminadas hacia la disminución del uso público urbano, sin olvidar el uso agrícola, en donde hay que tener cuidado con la venta de derechos cuando los usuarios tengan ahorros.

Visitas recientes a los pozos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (2010) indican que sólo 13% cuenta con medición, lo que significa que no se tiene la certeza del volumen usado. Por otro lado, en la micromedición existe también una deficiencia importante, de por lo menos un millón de tomas domiciliarias, pues sólo un 65% cuenta con medidor.

Por lo tanto, la medición es una tarea urgente para evaluar las acciones que se implementen o realicen sobre los usos del agua, verificando la eficacia de dichas acciones.

Una de las acciones propuestas más comunes para disminuir el uso del agua en el sector público urbano, se refiere a la disminución de las fugas en la red.

Acción que indudablemente disminuirá la dotación en el sector público urbano, acción que es necesario tomar en cuenta en los balances ya que al mismo tiempo disminuye la recarga inducida al acuífero.

En los balances realizados se han supuesto una serie de coeficientes, lo que hace necesario llegar a cifras más precisas.

Por lo tanto es necesario implementar un sistema de mediciones del escurrimiento del agua y el uso real tanto superficial, subterráneo y residual. En las estaciones hidrométricas instalar sistemas más efectivos que actualmente ya están desarrollados por varias empresas en el mundo (<http://www.photrack.ch>)

Ante lo expuesto, será posible medir las acciones estructurales, contenidas en la mayoría de los Planes de Manejo, realizados por la Dirección Técnica de la Conagua, para lograr la sustentabilidad del agua, donde figuran tres ejes principales: Recarga de acuíferos, uso eficiente del agua y el reúso del agua y de un análisis costo-eficacia.

Por último, es importante mencionar que los métodos empíricos propuestos por la Norma Oficial Mexicana NOM-011-Conagua-2015 dan resultados bastante certeros, por lo menos en el ejercicio realizado en este caso. Además, el presente escrito muestra una metodología que obtiene la disponibilidad en forma conjunta, de agua superficial y subterránea, que incluye la obtención de los coeficientes de infiltración por aproximaciones sucesivas para la obtención de la infiltración a los acuíferos por el uso del agua.

Referencias

- Arcos-Hernández, D. J. (2000). *Actualización de los coeficientes para obtener la recarga en los acuíferos del Valle de México* (tesis de maestría). México, DF, México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación.
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2013). *Edición 2012. Situación del Subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, DF, México: Comisión Nacional del Agua.

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2015). *Banco Nacional de Datos de Agua Superficial*. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx>

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2007). *Apoyo técnico para la actualización de la disponibilidad de los acuíferos ZMCM, Texcoco, Chalco-Amecameca, y Cuautitlán-Pachuca, para su publicación*. D.F., México: Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2010a). *Revisión de la disponibilidad de aguas superficiales en las Cuencas del Valle de México y Tula*. D.F., México: Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2010b). *Programación de riegos en el Valle de México*. D.F., México: Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México.

Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. (2016). *Resumen del estado de los pozos visitados del Sistema de Aguas de la Ciudad de México*. D.F., México: Conagua-OCAVM, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, Dirección de Administración del Agua.

Conapo, Consejo Nacional de Población. (2015). *Proyecciones de población 2010-2030, a nivel municipal*. Recuperado de <http://www.conapo.gob.mx/>

DOF, Diario Oficial de la Federación. (8 de julio, 2011). *Tercera Sección. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas Xochimilco, Río la Compañía, Tochac-Tecocomulco, Río de las avenidas de Pachuca, Texcoco, Ciudad de México, Río Cuautitlán, Presa Requena, Presa Endhó, Río Salado, Río Actopan, Río Alfajayucan, Río Tula, mismas que forman parte de la Subregión Hidrológica Valle de México y Río Tula de la Región Hidrológica número 26 Pánuco*. México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (20 de abril, 2015a). *Segunda sección. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad de agua*

- subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones administrativas que se indican.* México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (20 de abril, 2015b). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-Conagua-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.* México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (20 de abril, 2015c). *Documento de apoyo para el cálculo de la actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea.* México, DF, México: Diario Oficial de la Federación.
- DOF, Diario Oficial de la Federación. (8 de marzo, 2016). *Segunda Sección. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales nacionales de las 731 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 Regiones hidrológicas en que se encuentra dividido los Estados Unidos Mexicanos.*
- Ley de Aguas Nacionales de 1992, *Diario Oficial de la Federación* (24/03/2016). Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf
- Peña, S. (2014). *Introducción a la hidrología subterránea* (pp. 170-176). D.F., México: Proyectos, Estudios y Sistemas, S.A. de C.V.
- Réménieras, G. (1960). *L'Hydrologie de L'Ingénieur* (225 pp.). Paris, France: Collection Du Laboratoire National D'Hydraulique.
- Sagarpa-Siacon, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. (2015). *Sistema de Información Agroalimentario.* México, DF, México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta.
- Sistema de Aguas de la Ciudad de México. (2010). *Reporte de consumo de agua a nivel residencial.* México, DF, México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.