

Posibles escenarios de distribución de agua para el Valle de México

Salazar, M. R.,* Szidarovszky, F.**.,
Rojano, A. A*., Zatarain, T.A.*

Resumen

Se construyen escenarios de distribución de agua entre los usos agrícolas, industriales y urbanos del Valle de México, que incluye agua superficial, subterránea, residual e importada. Se plantea un modelo de programación lineal con el objetivo de disminuir la escasez de agua en el sector agrícola, industrial y urbano. Se analizan tres escenarios de política, y dos órdenes de prioridad entre el uso urbano y agrícola y se muestra que el problema de baja disponibilidad en esta región está relacionado con la falta de planeación de los recursos hídricos, debido a que la generación de aguas residuales es mayor que la sobreexplotación de los mantos acuíferos, y la pérdida de agua superficial en el periodo de lluvias es mayor al agua importada de otras regiones; se sostiene que el problema de abastecimiento de agua para el Valle de México representa un peligro que podría generar una crisis que devastará a esta región el país.

Palabras clave

- Agua
- Recursos agotables
- Políticas gubernamentales

Abstract

Scenes of water distribution are constructed between the agricultural, industrial and urban uses of the Valle de Mexico, which includes superficial, underground, residual and imported water. There appears a model of linear programming with the aim to diminish the water shortage in the agricultural, industrial and urban sector. Three scenes of politics are analyzed, and two orders of priority between the urban and agricultural use and it shows that the problem of low availability in this region is related to the lack of planeación of the water resources, due to the fact that the generation of waste water is major that the overexploitation of the aquiferous mantles, and the loss of superficial water in the period of rains is bigger than the water imported from other regions; is held that the problem of water supply for the Valle de Mexico represents a danger that might generate a crisis that will devastate to this region the country.

Key words

- Water/Air
- Exhaustive Resources and Economic Development
- Government Policy

JEL Classifications: Q25, Q32, Q48

Introducción

De acuerdo al Programa Ambiental de las Naciones Unidas, la escasez de agua es uno de los problemas mas preocupantes del nuevo milenio. Para el año 2020 necesitaremos mas de 17% de la oferta total del mundo para satisfacer las demandas. Existen diversas razones para la crisis del agua, una es el crecimiento de la población y el deseo de mejores estándares de vida, la otra razón es la ineficiencia en el uso de la misma.

México es un país clasificado con baja disponibilidad de agua (56% del país es árido). Mas aun la disminución en la precipitación ha resultado en un incremento en

* Universidad Autónoma Chapingo

** Universidad de Arizona

raquels85@yahoo.com.mx

A pesar de la clara existencia de múltiples tomadores de decisiones el autor no lo considera como un problema multiobjetivo.

La aplicación de toma de decisiones con múltiples criterios para resolver problemas en el manejo del agua tiene una amplia literatura. Algunos métodos se aplican a ciertos problemas e incluso hay autores que presentan diferentes modelos y procedimientos a elegir de acuerdo a determinados problemas.

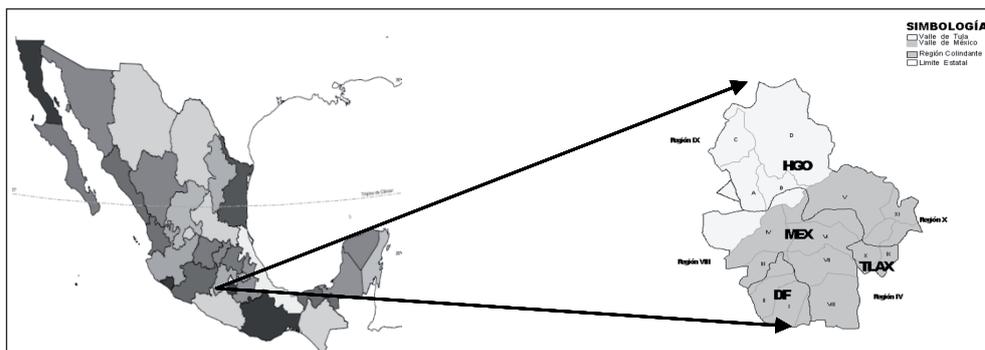
Bogardi (1992) y Nachtnebel (1986) hacen un buen resumen de los diferentes métodos y áreas de aplicación en el manejo de los recursos hídricos. El artículo de Hipel (1992) provee un panorama general. Gershon y Duckstein (1983) presentan una serie de procedimientos y métodos de toma de decisiones con múltiples criterios (MCDM).

En este estudio se utilizaron las técnicas de MCDM que se discuten en detalle en Forgo *et al.*(1999) y Szidarovszky *et al.* (1986). Un resumen sobre modelado y aspectos computacionales lo encontramos en Zeleny (1981), Chankong y Haimes (1983), Goicoechea *et al.* (1982) y Steuer (1986).

Área de estudio

En la 5a sesión plenaria de la comisión ejecutiva de Coordinación Metropolitana, celebrada 12 de marzo de 2008 se acordó la nueva delimitación de la Zona Metropolitana del Valle de México que entró en vigor a partir del año 2009, y que incluye 59 municipios del Estado de México, 16 delegaciones del DF y 29 municipios del estado de Hidalgo (Figura 1).

Figura 1
Mapa del Valle de México



El Valle de México (VM) es la concentración urbana más grande de América Latina y la segunda a nivel mundial, genera una tercera parte del PIB, sin embargo representa una de las regiones a nivel mundial con mayor presión por el agua, con una disponibilidad de agua de tan solo 85 m³/hab/año (CNA, 2006).

La superficie bajo riego es de 50 000 has y se siembra principalmente maíz, alfalfa, avena, cebada y hortalizas. De acuerdo con información del Programa Hidráulico Regional 2002-2006, el agua subterránea es proveniente de siete acuíferos en el Valle de México cuya recarga es de 788 mill m³/año. Se ha recurrido a la importación de agua de cuencas externas, una primera proviene de las aguas superficiales del río Cutzamala y la segunda proviene de las aguas subterráneas del sistema Lerma, con ambas fuentes, se suministra al VM un caudal de 623 mill m³ de agua/año, lo cual equivale a casi una cuarta parte del agua que se utiliza para todos los usos.

Desde el año 2002, las descargas de aguas residuales provenientes del Valle de México equivalían a 1 412 mill m³ al año (44.8 m³/s)(CONAGUA, 2003). Una fracción importante de las aguas residuales, del orden de 5 m³/s se combinan con agua proveniente de los almacenamientos y permite dentro del mismo Valle el riego de más de 35,000 ha. Se desea conservar las zonas agrícolas existentes dentro del Valle por sus importantes beneficios ambientales, en particular para permitir una mayor recarga de los acuíferos así como limitar el crecimiento urbano. Un gran porcentaje de aguas residuales del Valle de México se envía sin ningún tratamiento previo al Valle de Mezquital, dentro de la Cuenca del Río Tula, para el riego de 84 500 ha (CONAGUA, 2006).

Metodología

Para poder encontrar las estrategias de distribución de agua, se propuso un modelo lineal con tres usuarios de agua: agricultura, industria y uso urbano. Los usuarios utilizan agua superficial, subterránea, residual e importada. Los objetivos y restricciones se describen a continuación:

Los objetivos son minimizar la escasez de agua en los tres sectores:

Objetivo I: Minimizar la escasez de agua en la Agricultura:

$$\min D_I - (s_I + g_I + t_I(s_I^* + g_I^*))$$

Sujeto a

$$D_{LI} \leq s_I + g_I + t_I + s_I^* + g_I^* \leq D_{SI} \quad (2)$$

Donde

$$0.00586s_1 - 0.99414g_1 + 0.00586t_1 + 0.00586s_1^* - 0.99414g_1^* \leq 0 \quad (4)$$

Se requiere además que la proporción de agua residual respecto al total de agua disponible sea menor que la proporción de agua utilizada por todos los cultivos que pueden ser irrigados con agua residual.

$$\frac{t_1}{s_1 + g_1 + t_1 + s_1^* + g_1^*} \leq \frac{\sum_{i \in T} a_i w_i}{W} \quad (5)$$

T= grupo de cultivos que solo pueden utilizar agua residual

Los cultivos que pueden ser regados con agua residual son: maíz y alfalfa, los cuales utilizan en conjunto 0.00743 mill m³ de agua/ha, considerando lo anterior la restricción (5) se puede reescribir como:

$$-0.16629s_1 - 0.16629g_1 + 0.83371t_1 - 0.16629s_1^* - 0.16629g_1^* \leq 0 \quad (6)$$

El resto de los cultivos se puede regar con agua superficial.

Objetivo 2: Minimizar la escasez de agua en la industria

$$\min D_2 - (s_2 + g_2 + t_2 + s_2^* + g_2^*) \quad (7)$$

Sujeto a

$$D_{L2} \leq s_2 + g_2 + t_2 + s_2^* + g_2^* \leq D_{S2} \quad (8)$$

La máxima y mínima cantidad de agua utilizada por la industria es 460 mill/m³ y 177 mill/ m³ (CNA, 2007 p. 49) respectivamente.

Por otro lado, también se consideran restricciones relacionadas a la mínima cantidad de agua subterránea que debe ser utilizada por la industria (9) así como la máxima cantidad de agua residual utilizada por este mismo sector (10).

$$\frac{g_2 + g_2^*}{s_2 + g_2 + t_2 + s_2^* + g_2^*} \geq B_g \quad (9)$$

$$\frac{t_2}{s_2 + g_2 + t_2 + s_2^* + g_2^*} \leq B_t \quad (10)$$

$$g_1 + g_2 + g_3 = S_g \quad (16)$$

El Valle de México importa agua superficial del río Cutzamala ($S^*=453$ mill m³) que se encuentra a 127 km del Valle de México, y también importa agua subterránea del sistema Lerma ($G^*=170$ mill m³) a 15 km del VM (CNA, 2006 p 46), el total de agua superficial y subterránea importada de otras regiones debe ser menor a estos límites, como se expresa en (17) y (18).

$$s_1^* + s_2^* + s_3^* \leq S^* \quad (17)$$

$$g_1^* + g_2^* + g_3^* \leq G^* \quad (18)$$

Donde:

S_s = cantidad total de agua superficial disponible en la región

S_g = cantidad total de agua subterránea disponible en la región

S^* = cantidad máxima de agua superficial que puede ser importada

G^* = cantidad máxima de agua subterránea que puede ser importada

El problema anterior se puede considerar como un problema de programación multiobjetivo, en el cual existe un tomador de decisiones que tiene que enfrentarse a tres objetivos que deben ser satisfechos. El vector decisión es $x_k=(s_k, g_k, t_k, s^*k, g^*k)$ para cada uno de los tres usuarios $k= 1, 2, 3$. Los requerimientos individuales de cada usuario están determinados por las condiciones de no negatividad y por las restricciones (2), (4), (6) para $k=1$ (agricultura), por las restricciones (8), (9), (10) para $k=2$ (industria), y por las restricciones (12) y (14) para $k=3$ (uso urbano).

Las restricciones adicionales son (15), (16), (17), (18). Dado que las funciones objetivo (1), (7) y (11) son lineales así como todas las restricciones, el problema puede ser abordado como un problema de Programación Lineal Multiobjetivo, el vector de decisión global es $x=(x^1, x^2, x^3)$. El objetivo conjunto de los tres sectores se expresa en (19).

$$\begin{aligned} \max \quad & c_k^T x_k, \quad k = 1, 2, 3, \\ \text{s.t.} \quad & x_k \geq 0 \quad k = 1, 2, 3, \\ & A_1 x_1 + A_2 x_2 + A_3 x_3 \leq b. \end{aligned} \quad (19)$$

tres sectores, pero disminuyendo la extracción de agua subterránea a 1000 mill m³/año (59%) e incrementar el uso de agua residual en la agricultura en 50%. Para implementar este escenario, cambiamos el valor de Sg a 1000 mill m³ en lugar de 1684 mill m³ y la restricción (6) es sustituida por la expresión (23)

$$-0.5s_1 - 0.5g_1 + 0.5t_1 - 0.5s_1^* - 0.5g_1^* \leq 0. \quad (23)$$

Escenario 3. Al igual que los escenarios anteriores se desea reducir la escasez de agua en los tres sectores, pero manteniendo la sustentabilidad del acuífero, es decir, la extracción máxima debe ser de 788 mill m³ anuales e incrementar el uso de agua superficial a 857 mill m³/año, para la implementación de este escenario se modificaron las restricciones (15) y (16).

Además de los tres escenarios anteriores se consideraron dos ordenes de importancia, el primero cuando la agricultura es la prioridad y el segundo cuando el agua para uso urbano es la prioridad, la industria no se considera en las prioridades dado que su demanda es pequeña comparada con los otros dos sectores.

Resultados

Los resultados obtenidos en los tres escenarios se despliegan en las Tablas I-4.

En el escenario I cuando la agricultura es la prioridad los usuarios urbanos obtienen su demanda mínima de agua, pero los agricultores satisfacen la demanda de agua para los dos ciclos, por otro lado, si los usuarios urbanos tienen mayor prioridad entonces ellos obtienen una asignación de 292.5 lt/persona/día, y los agricultores tienen suficiente agua para sembrar un ciclo.

Tabla 2
Distribución óptima del agua en mill m³ para el Escenario 2 con dos prioridades

Uso	Fuentes de agua	Prioridad	
		Uso Urbano w1=0.01, w2=0.09, w3=0.9	Uso Agrícola w1=0.9, w2=0.09, w3=0.01
Agricultura	Superficial	58.21	63.49
	Subterránea	128.03	141.30
	Residual	317.5	344.5
	Agua superficial del Cutzamala	84.01	89.57
	Agua subterránea del Lerma	47.23	50.17
	Total oferta de agua para agricultura	634.99	689.1
	Industria	Superficial	6.89
Subterránea		97.64	96.47
Residual		30.09	30.09
Agua superficial del Cutzamala		8.14	8.09
Agua subterránea del Lerma		34.21	35.40
Total oferta de agua para la industria		177	177
Uso urbano		Superficial	168.89
	Subterránea	774.31	762.22
	Residual	88.88	87.16
	Agua superficial del Cutzamala	360.83	355.32
	Agua subterránea del Lerma	88.54	84.42
	Total oferta de agua para uso urbano	1481.47	1452.7
	Uso	Oferta Total de Agua	2293.47

En términos ambientales el Escenario 3 es el mejor, ya que en el peor de los casos los agricultores obtienen 635 mill m³ para satisfacer más de un ciclo de producción y el sector urbano obtienen mayor cantidad de agua que su demanda mínima. La mayor ventaja de este escenario es la sustentabilidad del acuífero y la disposición de aguas residuales, la desventaja es que se requiere de mayor inversión en infraestructura para almacenar el agua superficial, aunque se reducirían las inundaciones.

La Tabla 4 despliega un resumen de los tres escenarios. Se puede observar que en términos generales existe un balance entre la inversión del gobierno y el uso de agua subterránea y residual.

Tabla 4
Distribución óptima del agua para tres escenarios con dos prioridades (mill m³)

Sector/prioridad	La misma situación actual con sobreexplotación de los acuíferos en mas de 100%		Reducción en la sobreexplotación de acuíferos en 41 y 50% de incremento en el uso de agua residual en la agricultura		Sustentabilidad de los acuíferos, 50% de incremento en el uso de agua residual en la agricultura, mayor uso del agua superficial	
	Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
	Urbano	Agrícola	Urbano	Agrícola	Urbano	Agrícola
Agrícola	474.90	950.00	635.00	689.10	635.00	950.00
Industrial	177.00	460.00	177.00	177.00	177.00	460.00
Urbano	2125.50	1454.33	1481.48	1452.70	1918.71	1501.28
Uso de agua superficial	233.90	233.99	234	233.99	857	857
Uso de agua subterránea	1684	1684	999.99	1000	788	788
Uso de agua residual	236.5	323.33	436.47	461.80	462.71	643.27
Fuentes externas	623.00	623.00	623.00	623.00	623.00	623.00
Abastecimiento total	2777.40	2864.33	2293.47	2318.80	2730.71	2911.27
Inversión	La misma que en la actualidad		Mediana		Alta	

