

*Ensayos-Volumen XXIX, No. 1, mayo 2010, pp. 23-38*

## **Manejo sustentable del uso de agua y crecimiento urbano**

Nicholas P. Sisto\*

Fecha de recepción: 18 XII 2009

Fecha de aceptación: 25 II 2010

### **Resumen**

Los organismos operadores de agua enfrentan un complejo conjunto de desafíos ambientales, económicos, técnicos y administrativos, entre otros. En el Norte de México, el crecimiento de las áreas urbanas en un entorno con escasez de recursos hídricos plantea un serio problema de sustentabilidad. En este contexto, el manejo de la demanda de los usuarios y de la oferta de los organismos operadores puede incidir en el equilibrio de las fuentes de abastecimiento, ya integradas a los sistemas municipales de agua, y contribuir a la sustentabilidad de los mismos. En este trabajo, se evalúa el potencial de dos instrumentos específicos de manejo para lograr este propósito: el costo del agua para los usuarios (para el control de la demanda) y la eficiencia física de las infraestructuras de conducción y distribución de agua (para el control de la relación entre la extracción y el uso). Para ello, se presenta una metodología que establece la relación, en un sistema de suministro de agua para uso público-urbano, entre población, consumo, eficiencia física, eficiencia administrativa y requerimiento de extracción; se desarrolla un procedimiento para el pronóstico del requerimiento de extracción en el largo plazo, según diversos escenarios en cuanto a la aplicación de los instrumentos de manejo; y se determina cuáles serán las pautas para la especificación de estos escenarios, con base en el análisis de datos técnicos y financieros de los organismos operadores de agua de la zona de estudio. La metodología se aplica al caso particular de la Zona Metropolitana de la Laguna, pero se puede replicar en cualquier otra región. El análisis de los resultados, a la luz del balance hidrológico de la zona de estudio, comprueba que los instrumentos de manejo pudieran tener un

---

\* Profesor Asociado. Departamento de Economía y Centro del Agua para América Latina y el Caribe. Tecnológico de Monterrey, Monterrey.

Dirección: Ave. Eugenio Garza Sada 2501 Sur. Col. Tecnológico. C. P. 64849, Monterrey, Nuevo León, México.

Correo electrónico: [sisto@itesm.mx](mailto:sisto@itesm.mx)

El autor agradece al “Consejo Ciudadano por el Agua de la Laguna” haber proporcionado los datos de operación de los organismos operadores de agua de la zona de estudio, sin los cuales este trabajo no se hubiera podido llevar a cabo.

## 24 Ensayos

impacto significativo sobre el requerimiento de extracción; no obstante, también establece su insuficiencia y la necesidad de un marco integrado para el manejo sustentable del agua, en el que se consideren simultáneamente todos los usos del agua y no solamente el público-urbano.

**Palabras clave:** uso público-urbano de agua, requerimiento de extracción, crecimiento, sustentabilidad, Zona Metropolitana de la Laguna.

**Clasificación JEL:** Q25, Q56.

### Abstract

Municipal water utilities face a complex set of environmental, economic, technical and administrative challenges, among others. In Northern Mexico, urban growth in the face of scarce water resources poses a serious sustainability problem. Water demand and supply management in that context could contribute towards improving the balance between extraction and recharge in the water sources exploited by municipal water systems, and thereby the sustainability of municipal water use. This paper evaluates the potential in that respect of two specific management tools: the cost of water for users (for demand control) and the physical efficiency of conveyance and distribution infrastructures (to control the balance between extraction and use). For that purpose, it is established the relationship between population, water use, physical efficiency, administrative efficiency and extraction requirement in a municipal water system; develop a long term extraction requirement forecast procedure that takes into account distinct scenarios with respect to the application of the aforementioned management tools; and, specify these scenarios based on the analysis of technical and financial data from municipal water utilities. It is presented a case study for the Laguna Metropolitan Area however the methodology could be applied to any other region. The results, combined with relevant hydrological information for the case study region, suggest that the application of the management tools could have a significant impact on municipal extraction requirements; however, this would be insufficient in and of itself to attain sustainability. For that, an integrated water resources management approach that considers simultaneously all types of water uses would be necessary.

**Keywords:** municipal water use, extraction requirement, growth, sustainability, Laguna Metropolitan Area.

**JEL Classification:** Q25, Q56.

## **Introducción**

La tarea básica de los organismos operadores de agua consiste en proveer el líquido en cantidad y calidad suficientes para satisfacer las necesidades de sus usuarios. Aunado a los retos técnicos que ello en sí implica, el manejo del agua para uso público-urbano hoy en día envuelve un complejo conjunto de desafíos económicos, ambientales, tecnológicos administrativos y sociales que incluyen: garantizar el acceso al servicio de agua potable ante el acelerado crecimiento horizontal de las zonas urbanas; maximizar la eficiencia física de los sistemas, es decir, minimizar las pérdidas de agua por fugas en las infraestructuras de conducción y distribución; administrar de manera transparente y eficiente los recursos recaudados; educar a los usuarios en términos de la llamada “cultura del agua”, la cual busca básicamente la racionalización del consumo, y lograr la sustentabilidad ambiental. Este último punto implica el tratamiento de las aguas residuales para evitar la contaminación de los cuerpos receptores de los sistemas de alcantarillado, así como cuidar el equilibrio entre la extracción y la recarga en las fuentes de abastecimiento para prevenir su sobreexplotación.

En el Norte de México, la escasa disponibilidad natural de recursos hídricos y el alto dinamismo poblacional de las grandes áreas urbanas, agudizan todavía más la problemática de los organismos operadores. En este contexto, optimizar el uso de las fuentes de agua, ya integradas a los sistemas municipales de abastecimiento, representa un paso necesario hacia la sustentabilidad tanto ambiental como económica de las zonas urbanas. En este trabajo, para lograr el objetivo, se evalúan dos instrumentos de manejo: 1) el costo del agua para los usuarios, como medida de control de la demanda, y 2) la eficiencia física de las infraestructuras, como fuente para la expansión de la oferta; para ello, se desarrolla un marco metodológico general que se implementa en la Zona Metropolitana de la Laguna (ZML).

La ZML definida por SEDESOL (2007), agrupa a cuatro municipios de los estados de Durango (Lerdo y Gómez Palacio) y Coahuila (Matamoros y Torreón). Se incluye en la zona, para este estudio, a tres municipios colindantes (Francisco I. Madero, San Pedro y Viesca), los cuales reciben el servicio de agua potable por sistemas que también abarcan parte de la ZML. Estos siete municipios han conocido y seguirán teniendo un significativo crecimiento poblacional, de 1,275,423 habitantes según el último conteo de población de 2005 del INEGI, pero cuya población llegará a 1,628,829 habitantes en 2030, según las proyecciones de la Comisión Nacional de Población (CONAPO). Por otra parte, con una precipitación media anual sólo de 260 mm/año y la ausencia de manantiales o corrientes permanentes (CONAGUA, 2002), el entorno natural de la zona de estudio se caracteriza por su aridez; la totalidad de su suministro de agua para uso público-urbano

## 26 Ensayos

proviene del acuífero denominado “Principal-Región Lagunera”, uno de los más severamente sobreexplotados del país (CONAGUA, 2008).

A continuación se presenta un marco metodológico que establece la relación, entre población, consumo, eficiencia física, eficiencia administrativa y requerimiento de extracción, en un sistema de suministro de agua para uso público-urbano, y desarrolla un procedimiento para el pronóstico del requerimiento de extracción con respecto a diversos escenarios en cuanto al costo del agua para los usuarios así como sobre la eficiencia física del sistema; además, determina las pautas para la especificación de estos escenarios con base en el análisis de datos técnicos y financieros de los organismos operadores de la zona de estudio. En la siguiente sección, se describen los datos que se emplean para el análisis de la relación entre el costo del agua para los usuarios y su consumo, así como para la estimación de la eficiencia física de los sistemas de agua de la zona de estudio; así mismo, se reporta y aprovechan los hallazgos para especificar diversos escenarios y calcular pronósticos del requerimiento de extracción hacia 2030. En la penúltima sección, se presenta una discusión sobre los resultados de este trabajo, en términos de sus alcances y limitaciones, así como su relación con la literatura relevante, y se evalúa la contribución potencial de los instrumentos de manejo anteriormente referidos hacia la sustentabilidad del suministro de agua; para ello, se emplea información del balance hidrológico del acuífero Principal-Región Lagunera. Finalmente, a modo de conclusión, se ofrecen recomendaciones para fomentar la sustentabilidad de los recursos hídricos de la región.

### 1. Metodología

Existen varias metodologías estándares para pronosticar el uso público-urbano de agua, desde sencillas proyecciones de tendencias hasta sofisticadas simulaciones que involucran múltiples parámetros (Billings y Jones, 1996; Boland, 1998). Una vez que se cuenta con los datos así como con los objetivos específicos, se desarrolla una metodología propia.

La base teórica del marco metodológico de este trabajo descansa en un balance de agua. Este balance relaciona un volumen de agua extraído de una fuente para abastecer un sistema municipal de agua,  $V^{Ext}$ , con el volumen de agua que efectivamente llega a los usuarios,  $V^{Uso}$ , así como el volumen de las pérdidas físicas (las fugas) que ocurren inevitablemente a lo largo del sistema,  $V^{Per}$ . De acuerdo con la naturaleza de los datos que más adelante se emplearán, es necesario distinguir entre el volumen de uso que genera facturación,  $V^{UsoF}$ , y el que no,  $V^{UsoNF}$ ; el uso no facturado representa una pérdida comercial para el sistema, la cual deriva por ejemplo de la existencia

de usuarios informales y/o irregulares. Considerando que el agua constituye una cantidad conservada en el sistema, el cual no crea ni destruye agua, tenemos entonces el siguiente balance:

$$V^{Ext} \equiv V^{Uso} + V^{Per} \equiv (V^{UsoF} + V^{UsoNF}) + V^{Per} \quad (1)$$

Aislando  $V^{UsoF}$  en (1) y dividiendo ambos lados por  $V^{Ext}$ , obtenemos tres cantidades que sirven para describir el desempeño del sistema:

$$\frac{V^{UsoF}}{V^{Ext}} \equiv \varepsilon \equiv 1 - \frac{V^{UsoNF}}{V^{Ext}} - \frac{V^{Per}}{V^{Ext}} \equiv 1 - \rho^{Com} - \rho^{Fis} \quad (2)$$

En la ecuación (2), el término  $\rho^{Com}$  (razón entre el uso no facturado y la extracción) representa un coeficiente de pérdida comercial;  $\rho^{Fis}$  (razón entre la pérdida física y la extracción), un coeficiente de pérdida física; la eficiencia global (física y comercial) del sistema, tomando en cuenta ambos tipos de pérdidas, se mide entonces por  $\varepsilon$ . Con base en la ecuación (2), se pronosticará el requerimiento de extracción en un período futuro  $t$ , con:

$$V_t^{Ext} = \frac{1}{(\varepsilon_t | k)} (V_t^{UsoF} | j) = \frac{1}{(1 - \rho^{Com} - \rho^{Fis} | k)} N_t [v_t^{UsoF} | j] \quad (3)$$

donde  $N_t$  representa la población de la región en el período  $t$ , y  $v_t^{UsoF}$ , el uso facturado *per cápita* (i.e., razón entre el volumen facturado y la población). En la ecuación (3), los valores futuros de eficiencia global ( $\varepsilon_t | k$ ) así como de uso facturado *per cápita* ( $v_t^{UsoF} | j$ ) se establecen con respecto a diversos escenarios  $k$  y  $j$ , respectivamente. Se especifican estos escenarios a partir del análisis de los datos de operación de los organismos operadores de la zona de estudio.

En el caso del uso facturado, el procedimiento para la especificación de los escenarios consta de varias etapas. Primero, se lleva a cabo un análisis de regresión que relaciona el uso facturado por toma (donde  $v$ , es la razón entre el uso facturado y el número de tomas) con un conjunto de variables explicativas. Estas variables incluyen: el costo del agua para los usuarios ( $CostoUso$ ), que se calcula como la razón entre la recaudación de los organismos operadores por concepto de servicio de agua y el volumen de uso facturado, se trata entonces de un costo promedio para todos los usuarios domésticos, industriales y otros, que refleja también la capacidad de los organismos para efectivamente cobrar lo que facturan; la razón entre el número de tomas domésticas y el número total de tomas ( $TomDom$ ) y, una

## 28 Ensayos

variable dicotómica (*Centro*), cuyo valor es 1 para las observaciones que corresponden al corazón urbano de la región -la mancha urbana conformada por los municipios de Torreón, Gómez Palacio y Lerdo- y 0 para las demás. La ecuación de regresión queda entonces, como:

$$v = f(\text{CostoUso}, \text{TomDom}, \text{Centro}) + \mu \quad (4)$$

donde  $\mu$  es un término de error.

Con base en los resultados obtenidos de la regresión, se calcula la elasticidad-precio del uso facturado por toma, como:

$$e = \frac{\partial v}{\partial (\text{CostoUso})} \frac{(\text{CostoUso})}{v} \quad (5)$$

La elasticidad  $e$  calculada permite especificar los escenarios de uso con respecto a futuras variaciones en el costo del agua para los usuarios; se contemplan aumentos de 10% y 20%.

En el caso de la eficiencia global  $\mathcal{E}$ , primero se calcula su valor para el conjunto de los organismos operadores de la región; luego se establecen escenarios de reducción para el coeficiente de pérdida física  $\rho^{Fis}$ , manteniendo constante el coeficiente de pérdida comercial  $\rho^{Com}$ , ya que éste no incide en el requerimiento de extracción. Ello se comprueba con base en las expresiones (1) y (2); de donde se tiene, que  $V^{Ext} = (V^{UsoF} + V^{UsoNF}) / (1 - \rho^{Fis})$ , por lo que, la proporción en la cual se divide el uso entre el facturado y el no facturado, resulta irrelevante con respecto al requerimiento de extracción. Las reducciones contempladas para  $\rho^{Fis}$ , en los escenarios, son hasta cierto punto arbitrarias. Más adelante, en la sección de discusión, se explica su relación con el desempeño en la actualidad de uno de los más eficientes sistemas del norte del país, operado por Agua y Drenaje de Monterrey; por ende, se limitan esas reducciones a no más del 10%, considerando que típicamente las acciones necesarias para reducir las fugas en un sistema de agua -por ejemplo, el reemplazo de tuberías de conducción- suelen ser costosas, además de técnica y logísticamente complejas.

## 2. Datos y resultados

### 2.1 Elasticidad-precio del uso y escenarios de uso futuro

La tabla ofrece un resumen de los datos de los organismos operadores de la región que se emplean para el análisis del uso y el desarrollo de escenarios

de uso futuro. En total, son treinta y una observaciones que incluyen cuatro años de datos para siete de los ocho organismos operadores, y tres años de datos para el organismo restante. Para cada variable de la ecuación de regresión (4), se reporta el mínimo, el promedio y el máximo observado en la base de datos. El uso por toma así como el costo del agua para los usuarios presentan grandes variaciones en la base de datos, lo que justifica *ex ante* la conveniencia de proceder con un análisis de regresión.

Tabla 1  
Resumen de los datos para el análisis del uso

		$v^{(a)}$ (m <sup>3</sup> /año)	<i>CostoUso</i> <sup>(b)</sup> (\$/m <sup>3</sup> )	<i>TomDom</i> <sup>(c)</sup> (prop.)
2004	Mín.	169.91	1.51	0.9201
	Prom.	226.08	3.86	0.9611
	Máx.	368.60	5.57	0.9870
2005	Mín.	158.92	1.31	0.9212
	Prom.	222.30	4.31	0.9614
	Máx.	368.06	7.31	0.9817
2006	Mín.	172.32	1.71	0.9231
	Prom.	218.04	4.32	0.9603
	Máx.	368.03	6.68	0.9767
2007 <sup>(d)</sup>	Mín.	168.36	1.83	0.9222
	Prom.	222.52	4.40	0.9563
	Máx.	369.15	7.20	0.9734

(a) *v*: uso facturado por toma; (b) *CostoUso*: costo promedio del agua para los usuarios; (c) *TomDom*: proporción de tomas domésticas en el total de tomas.

(d) Datos para siete de los ocho organismos operadores.

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el Consejo Ciudadano por el Agua de La Laguna (CCAL).

Se especifica para la estimación de la ecuación (4) dos formas funcionales, una lineal y otra lineal en logaritmos, y se corren tres regresiones sobre cada modelo. En cada caso, las regresiones incluyen el costo del agua para los usuarios (*CostoUso*) así como un término constante  $\alpha_0$ . La tabla 2 presenta los resultados de las regresiones: el valor estimado de los coeficientes asociados a las variables incluidas; en paréntesis se presenta la estadística de Student correspondiente, y la estadística de la  $R^2$ , ajustada con respecto al número de variables explicativas.

Tabla 2  
Resultados del análisis de regresión del uso por toma ( $v$ )

	$\alpha_0$	<i>CostoUso</i> $\alpha_1$	<i>TomDom</i> $\alpha_2$	<i>Centro</i> $\alpha_3$	$R^2$ Ajus.	$F$	$LLF$
(1)	1158.8 (1.627)*	-35.930 (-3.869)***	-828.96 (-1.159)	30.003 (1.262)	0.3663	6.780***	-162.156
(2)	1199.2 (1.668)*	-30.536 (-3.666)***	-883.65 (-1.225)		0.3529	9.179***	-163.044
(3)	333.94 (12.16)***	-29.165 (-4.014)***		31.673* (1.327)	0.3585	9.383***	-162.908
(4)	5.9514 (59.79)***	-0.53016 (-5.783)***	-2.4119 (-1.215)	0.12136 (1.672)*	0.5555	13.496***	15.8095
(5)	5.8900 (61.71)***	-0.47579 (-5.381)***	-3.1587 (-1.584)*		0.5270	17.711***	14.2827
(6)	5.9657 (59.85)***	-0.47283 (-5.964)***		0.14123 (1.980)**	0.5479	19.179***	14.9838

\* Significativo al 90%; \*\* significativo al 95%; \*\*\* significativo al 99% o más;

Los modelos de regresión son:

$$(1)-(3): v = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \text{CostoUso} + \alpha_2 \cdot \text{TomDom} + \alpha_3 \cdot \text{Centro} + \mu$$

$$(4)-(6): \ln v = \ln \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln \text{CostoUso} + \alpha_2 \cdot \ln \text{TomDom} + \alpha_3 \cdot \ln \text{Centro} + \mu$$

El número de observaciones para todas las regresiones es de 31.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las regresiones presentan un alto grado de estabilidad y congruencia. En todos los casos, el valor estimado del coeficiente  $\alpha_1$  asociado al costo del agua para los usuarios es negativo y altamente significativo: *ceteris paribus*, entre más alto el costo, menor el uso por toma. De la misma manera, el efecto de la ubicación en el centro urbano de la región (medido por  $\alpha_3$ ) es siempre positivo y por lo general estadísticamente significativo. En el caso de la proporción de tomas domésticas, el efecto (medido por  $\alpha_2$ ) es siempre negativo, dado que las tomas domésticas tienden a consumir menos agua que las demás (*i.e.*, las tomas industriales), pero el efecto no es estadísticamente fuerte, debido probablemente a la relativamente baja proporción de tomas *no* domésticas en el total de tomas. El desempeño del modelo lineal en logaritmos resulta superior al del modelo lineal: explica más de la mitad de la variabilidad observada en los datos de uso por toma según la  $R^2$ , *versus* un poco más del tercio para el modelo lineal. Aplicando directamente la fórmula (5) al modelo lineal en logaritmos, se obtiene que la elasticidad-precio  $e$  del uso facturado por toma se ubica entre -0.47 y -0.53, por lo tanto, se puede concluir, que: un aumento del 10%

en el costo se asocia a una reducción de aproximadamente 5% en el uso por toma.

En la tabla 3 aparecen tres escenarios de uso para 2030. Los escenarios se definen con respecto a valores observados para un año de referencia, 2005. En la segunda columna de la tabla, se reporta para este año la población agregada para los siete municipios de la región ( $N_t$ ), así como la suma de los volúmenes de uso facturado para los ocho organismos operadores que dan servicio a estos municipios ( $V^{UsoF}$ ). Dividiendo este volumen por la población, se obtiene un uso facturado *per cápita* ( $v^{Uso}$ ) de 58.78 m<sup>3</sup>/año. En el primer escenario ( $j=1$ ), se mantiene constante este valor; multiplicándolo por la población proyectada para 2030, se obtiene un volumen de uso facturado de 95,746,837 m<sup>3</sup>/año. El segundo escenario ( $j=2$ ) contempla una reducción del 5% en el uso facturado *per cápita* hacia 2030, es decir, un aumento en el costo del agua para los usuarios del 10% según la elasticidad estimada anteriormente; en el tercer escenario ( $j=3$ ), la reducción en el uso facturado *per cápita* es del 10%, es decir, el aumento en el costo del agua es del 20%.

Tabla 3  
Escenarios de uso futuro

	$t=2005$	$t=2030$		
		$j=1$	$j=2$	$j=3$
$N_t$ (habitantes)	1,275,423 <sup>(a)</sup>		1,628,829 <sup>(b)</sup>	
$v^{UsoF}$ (m <sup>3</sup> /año, per cápita)	58.78	58.78	55.84	52.90
$V^{UsoF}$ (m <sup>3</sup> /año)	74,972,706 <sup>(c)</sup>	95,746,837	90,959,495	86,172,153

(a) Suma de las poblaciones estimadas en INEGI - II Censo de Población y Vivienda 2005 para los municipios de Francisco I. Madero, Matamoros, San Pedro, Torreón, Viesca, Gómez Palacio y Lerdo. (b) Suma de las proyecciones de población para el 2030 en Consejo Nacional de Población (CONAPO). Proyecciones de la Población de México 2005-2050, para los siete municipios listados en la nota anterior. (c) Cifra calculada con base en datos proporcionados por el CCACL.

Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Eficiencia global y escenarios futuros de eficiencia física.

A continuación, la tabla 4 presenta tres escenarios de eficiencia global para el año 2030, que se definen con respecto a valores observados para el año 2005. En la segunda columna de la tabla se reporta, para este año de referencia, la capacidad de extracción instalada operando en la región (equivalente a la suma de las capacidades reportadas por los ocho

## 32 Ensayos

organismos operadores), así como las horas diarias de operación (es decir, el promedio ponderado de las horas de operación reportadas por los organismos operadores). Con base en estas cifras, se calcula el volumen de extracción total para la región,  $V^{Ext}$  (157,723,362 m<sup>3</sup>); si se saca la razón entre el volumen de uso facturado,  $V^{UsoF}$ , y la extracción, se obtiene una eficiencia global  $\varepsilon$  de 0.47534. En las últimas dos filas, se desagrega esta eficiencia en sus dos componentes: considerando un valor de 0.30 para el coeficiente de pérdida física, se obtiene el coeficiente de pérdida comercial como residuo, según la ecuación (2). Estos valores, aunque no constituyan datos duros, se validaron ante los representantes de los principales organismos operadores de la región; además, hay que subrayar que sólo la suma de los dos coeficientes -y no el valor particular de cada uno- incide en el cálculo del requerimiento de extracción, como puede verse en la ecuación (3).

En el primer escenario ( $k=1$ ), se mantienen constantes los valores calculados para 2005. El segundo escenario ( $k=2$ ) contempla una reducción del 5% en el coeficiente de pérdida física y una pérdida comercial constante; en el tercer escenario ( $k=3$ ), la reducción en el coeficiente de pérdida física es del 10% y la pérdida comercial se mantiene constante.

Tabla 4  
Escenarios de eficiencia futura

	$t=2005$	$t=2030$		
Capacidad (l/s)	5,120			
Operación (horas/día)	23.44			
$V^{Ext}$ (m <sup>3</sup> )	157,723,362	$k=1$	$k=2$	$k=3$
$V^{UsoF}$ (m <sup>3</sup> /año)	74,972,706			
$E$ (prop.)	0.47534	0.47534	0.52534	0.57534
$\rho^{Com}$ (prop.)	0.22466	0.22466	0.22466	0.22466
$\rho^{Fis}$ (prop.)	0.30000	0.30000	0.28500	0.27000

La relación entre  $\varepsilon$ ,  $\rho^{Com}$  y  $\rho^{Fis}$  es:  $\varepsilon \equiv 1 - \rho^{Com} - \rho^{Fis}$  - véase la ecuación (2).

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el CCAL.

### 2.3 Pronósticos de requerimiento de extracción.

Se reporta en la tabla 5, una matriz de nueve pronósticos de requerimiento de extracción, calculados según la ecuación (3) y con respecto a los escenarios presentados en las tablas 3 y 4. La celda (1,1) de la matriz se interpreta como un pronóstico tendencial: si se mantiene el uso facturado *per cápita* (el costo del agua para los usuarios) y la eficiencia global en los valores del año 2005,

el requerimiento de extracción llegará a 201,419,128.67 m<sup>3</sup> en 2030. Las demás celdas de la matriz capturan el efecto de reducciones en el uso *per cápita* -mediante un incremento en el costo del agua para los usuarios- así como en las pérdidas físicas; una reducción de 10% en ambas variables -celda (3,3)- reduce el requerimiento de extracción hasta 149,762,914.76 m<sup>3</sup>.

Tabla 5  
**Pronósticos de requerimiento anual de extracción (m<sup>3</sup>), 2030**

Escenarios	$k=1$ ( $\varepsilon=0.47534$ )	$k=2$ ( $\varepsilon=0.52534$ )	$k=3$ ( $\varepsilon=0.57534$ )
$j=1$ ( $v^{UsoF}=58.78$ )	201,419,128.67	182,247,707.00	166,409,529.86
$j=2$ ( $v^{UsoF}=55.84$ )	191,344,745.57	173,132,221.14	158,086,222.31
$j=3$ ( $v^{UsoF}=52.90$ )	181,270,362.48	164,016,735.29	149,762,914.76

Cada pronóstico se calcula con:  $V_{2030}^{Ext} = \frac{1}{(\varepsilon_{2030}|k)} \cdot N_{2030} \cdot [v_{2030}^{UsoF}|j]$ , véase la ecuación (3); el

volumen de extracción que se estimó para 2005, es de 157,723,362 m<sup>3</sup> (tabla 4).

Fuente: Elaboración propia.

### 3. Discusión

Los pronósticos presentados en la sección anterior ilustran el efecto del manejo de la demanda, mediante incrementos en el costo del agua para los usuarios, así como de la oferta, mediante reducciones en las pérdidas físicas en los sistemas municipales de agua potable, sobre el requerimiento de extracción de la zona de estudio. Tales pronósticos permiten cuantificar en qué medida la aplicación de los instrumentos de manejo, al reducir este requerimiento, promovería la sustentabilidad del suministro de agua en el largo plazo, frente al crecimiento poblacional proyectado.

Las reducciones en el uso *per cápita* contempladas en los escenarios de manejo se calibraron en base a una relación estadísticamente fuerte, presente en los datos de los organismos operadores de agua de la zona de estudio, entre lo que pagan los usuarios y su consumo. Cabe recalcar que la elasticidad-precio correspondiente se estimó con datos anuales, eliminando las múltiples fuentes de variación de corto plazo que presenta el uso público-urbano de agua, por ejemplo: las variaciones con respecto a las horas del día, los días de la semana, así como los meses o estaciones del año, las cuales no

### 34 Ensayos

intervienen en el requerimiento de extracción anual y, por ende, no son de interés para este estudio.

En las últimas tres décadas, se ha desarrollado una amplia literatura empírica acerca de los determinantes del uso municipal de agua.<sup>1</sup> En el caso de México, se han llevado a cabo también estudios de este tipo, incluso para algunas grandes zonas urbanas del norte del país, como: Chihuahua (Fullerton *et al.*, 2003), Ciudad Juárez (Fullerton *et al.*, 2006) y Tijuana (Fullerton *et al.*, 2007). Resulta difícil comparar los resultados obtenidos de la literatura, entre sí, con los obtenidos aquí, por varias razones. Primero, por los distintos enfoques en cuanto a la escala de tiempo contemplada y las distintas frecuencias de los datos empleados; por ejemplo, en los tres trabajos anteriormente citados, el enfoque es de corto plazo, los datos son mensuales y se hace énfasis en las variaciones mensuales de la demanda debido al clima y la actividad económica. Segundo, por las distintas formas de medir el precio del agua para los usuarios; por ejemplo, Guzmán-Soria *et al.* (2009), usan la tarifa oficial para un determinado rango de consumo, en el cual caben la mayoría de los usuarios de su zona de estudio, como el estado de Guanajuato, en vez de la recaudación. Tercero, por las condiciones particulares de cada zona, en términos no solamente económicos, sino también sociales y culturales, entre otros, las cuales determinan qué tan sensible es la demanda al costo del agua para los usuarios.

No obstante lo anterior, de la literatura se desprende un sólido consenso: el costo del agua para los usuarios es un determinante significativo del consumo, y la elasticidad-precio del agua es negativa y mayor a -1.0 (por lo general, las cifras reportadas oscilan entre -0.2 y -0.8). El valor obtenido aquí (entre -0.47 y -0.53) es entonces verosímil, aún más si se consideran las excelentes propiedades de las regresiones presentadas en la tabla 2. La interpretación económica de esta elasticidad es clara: entre más elevado el costo del agua para el usuario, mayor incentivo tiene para limitar su consumo. Las medidas que lo permiten, tanto en el sector doméstico como industrial, incluyen desde cambios de hábitos sin consecuencias financieras para el usuario (*v. gr.*, reducir el tiempo o frecuencia de actividades de limpieza), hasta costosas inversiones en infraestructura (*v. gr.*, instalación de tubería nueva en casas o fábricas). No es posible cuantificar el potencial en la zona de estudio para la realización de tales ahorros; sin embargo, las reducciones en el uso *per cápita* contempladas en los pronósticos son suficientemente leves para ser técnicamente factibles y costeables. Además, la disposición a pagar de los usuarios puede superar lo que efectivamente es cobrado por el servicio, como lo comprueban Vásquez *et al.* (2009), en el

---

<sup>1</sup> Véase Worthington y Hoffman (2008) para un extenso resumen de la literatura internacional sobre el tema.

caso del municipio de Parral, Chihuahua, lo que sugiere la factibilidad de un aumento en el costo del agua.

La factibilidad técnica y económica de las mejoras en la eficiencia física de los sistemas municipales de agua, contempladas en los escenarios, representa una cuestión más delicada. Estos sistemas abarcan cientos de kilómetros de tuberías con gran diversidad de antigüedades, materiales y estados. Para identificar dónde se encuentran las mejores oportunidades de inversión para la reducción de fugas, sería necesario tener información precisa acerca del desempeño de cada tramo de los sistemas con base en una extensa capacidad de medición y monitoreo. En la actualidad, los organismos operadores de la zona de estudio no cuentan con esta capacidad; algunos ni siquiera disponen de mapas a escala de la red que operan. En este contexto, más allá de ejercer un control en el consumo, incrementar la recaudación podría contribuir al desarrollo de esta capacidad. Nótese que el valor del coeficiente de pérdida física más bajo (0.27) -contemplado en los escenarios- corresponde al registrado en la actualidad en el sistema operado por Agua y Drenaje de Monterrey (Agua y Drenaje de Monterrey, 2009); lo cual indica que, por lo menos, tal meta no carece de sustento.

Finalmente, la interpretación de los pronósticos requiere considerar la realidad hidrológica de la región. A continuación, la tabla 6 ofrece un resumen del balance hidrológico del acuífero Principal-Región Lagunera. Se reporta la recarga natural, la recarga inducida (por infiltraciones en campos de riego y fugas en sistemas de agua), así como las extracciones por tipo de uso (agrícola, público-urbano y otros). Nótese que la sola recarga natural, estimada en 275,100,000 m<sup>3</sup>/año, pudiera ampliamente cubrir el más elevado pronóstico de requerimiento de extracción para el año 2030: 201,419,128.67 m<sup>3</sup>/año (tabla 5). No obstante, restando la extracción total de la recarga total, se obtiene el cambio de almacenamiento en el acuífero, cuyo valor negativo (-702,900,000 m<sup>3</sup>/año) indica una condición de sobreexplotación. En realidad, la sobreexplotación de un acuífero durante un año particular no representa necesariamente un problema de sustentabilidad, si en un año posterior se compensa con una menor relación entre extracción y recarga. Sin embargo, en este caso, la sobreexplotación ha sido histórica y sistemática: se reporta un abatimiento promedio de 1.25 m<sup>3</sup>/año en el nivel del acuífero durante el período 1975-1999, así como un coeficiente de almacenamiento (razón entre el volumen de agua presente y la capacidad del acuífero) de tan sólo 15.62%, al final de este período (CONAGUA, 2002). Acercarse tanto al límite de la disponibilidad de reservas de agua constituye un problema mayor, ya que la recarga anual es por naturaleza variable; si llegase a sobrevenir una sequía prolongada, con varios años sin recarga significativa para el acuífero, la región se quedaría literalmente sin agua subterránea.

Tabla 6  
**Balance hidrológico, acuífero Principal-Región Lagunera (m<sup>3</sup>/año)**

	Recarga (1)		Extracción (2)	(1) – (2)
Natural	243,800,000	Uso agrícola	1,045,200,000	
Inducida	275,100,000	Uso público-urbano	127,800,000	
		Otros usos	48,800,000	-
Total	518,900,000	Total	1,221,800,000	702,900,000

Los datos son para el 1999.

Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA (2002).

### Conclusiones

Los resultados de este trabajo sugieren que el manejo de la demanda y de la oferta de agua para uso público-urbano pudiera tener un impacto significativo sobre el futuro requerimiento de extracción de la zona de estudio. Sin embargo, la implementación de tales medidas no sería un asunto trivial, ya que supondría un nivel de capacidad institucional y de coordinación entre los organismos operadores de agua de la región que en la actualidad no existe.

En el curso de esta investigación, se encontraron importantes carencias en la información básica requerida para el manejo del agua. No existen mediciones directas de los volúmenes extraídos de los pozos de la región, por lo cual, fue necesario estimar en base a la capacidad de bombeo instalada y las horas de operación reportadas por los organismos operadores. Esos datos son insuficientes, ya que el volumen efectivamente extraído depende también del estado del acuífero; en particular, el nivel freático. Tampoco existen mediciones directas de la eficiencia física de los sistemas, lo que impediría la identificación de las mejores oportunidades para reducir las fugas en sus distintos subcomponentes y tramos. La solución a este problema de información no se limita a la instalación de los equipos de medición correspondientes; también se tendría que asegurar la capacidad institucional para mantenerlos, tomar lecturas periódicas, hacer acopio de la información recabada, analizarla e integrar los resultados en los planes de manejo.

Un alto nivel de coordinación entre los organismos operadores de la región es un requisito para lograr un manejo sustentable del agua, ya que las acciones individuales por sí mismas, tendrían poco efecto. De ahí deriva la oportunidad de evaluar la posibilidad de fusionar los organismos en una sola entidad operativa. Además, tal fusión pudiera generar economías a escala, y

propiciar el fortalecimiento de la capacidad institucional. Ya que todos los organismos explotan la misma fuente de agua y que, en muchos casos, los territorios atendidos se entrecruzan entre los distintos municipios, no debería haber ningún impedimento técnico para la realización de este tipo de racionalización y reestructuración del servicio de agua en la región.

Más allá de lo anterior, los resultados de este trabajo también revelan la necesidad de abordar el manejo sustentable del agua de manera integrada. Se comprueba que reducir el crecimiento en la extracción para uso público-urbano, e incluso mantener el requerimiento en el nivel observado en el año 2005, resultaría insuficiente para alcanzar la sustentabilidad, ya que el uso público-urbano sólo representa una fracción del total extraído del acuífero: más del 85% se destina al uso agrícola (*i.e.*, el riego de cultivos). Por ende, un enfoque sectorial resulta inadecuado; un manejo sustentable requiere un enfoque integrado, que incluya a los diferentes tipos de usuarios, en particular a los agrícolas.

Para concluir, es preciso reflexionar sobre el concepto mismo de uso sustentable del agua. Desde el punto de vista de la ciencia económica, el agotamiento de un recurso natural no necesariamente representa un problema de sustentabilidad; siempre y cuando un sustituto esté disponible. En la región Lagunera, existe tal recurso, que pudiera sustituir al acuífero: en las afueras de la ZML, el Distrito de Riego 017 Región Lagunera recibe volúmenes de aguas superficiales muy superiores a las necesidades para uso público-urbano de la región; en el año agrícola 2005-2006 por ejemplo, se entregó al distrito 715,126,000 m<sup>3</sup> (CONAGUA, 2007). Dado que la región no enfrenta una escasez absoluta de agua, el agotamiento del acuífero Principal-Región Lagunera se podría abordar entonces como un problema de elección entre dos alternativas: preservar el acuífero mediante un manejo sustentable *versus* seguir con la sobreexplotación, para luego pasar al aprovechamiento de la fuente superficial que alimenta al distrito de riego. *A priori*, el manejo sustentable del acuífero no necesariamente representa el mejor curso de acción, habría que investigar a fondo los beneficios y costos de cada alternativa para identificar la mejor elección.

## **Referencias**

- Agua y Drenaje de Monterrey I.P.D. (2009). *Documento base de análisis sobre el sector agua para la elaboración del Plan Estatal de Desarrollo 2010-2015*. Monterrey, Nuevo León, 15.
- Billings, R. and C. Jones (1996). "Forecasting Urban Water Demand." Denver, Colorado: American Water Works Association, 179.

### 38 Ensayos

- Boland, J. (1998). "Forecasting Urban Water Use: Theory and Principles." In D.D. Baumann, J.J. Boland, & W.M. Hanemann, *Urban Water Demand Management and Planning*, New York: McGraw-Hill, 77-94.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2007). *Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego 2005-2006*. México, D.F.
- \_\_\_\_\_. (2008). *Estadísticas del Agua en México*. México, D.F.
- \_\_\_\_\_. (2002). Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Modelación Hidrogeológica. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Principal, Estados de Durango y Coahuila*. México, D.F.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). *Proyecciones de la Población de México 2005-2050*.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *II Censo de población y vivienda 2005*.
- Guzmán-Soria, E., J. Hernández, J. García, S. Rebolgar, M. de la Garza and D. Hernández (2009). "Groundwater Consumption in Guanajuato, Mexico." *AgroCiencia*, 43, 749-761.
- Fullerton T. and A. Nava (2003). "Short-Term Water Dynamics in Chihuahua City, Mexico." *Water Resources Research*, September, 39.
- \_\_\_\_\_, R. Tinajero and M. Barraza de Anda (2006). "Short-Term Water Consumption Patterns in Ciudad Juarez, Mexico." *Atlantic Economic Journal*, 34, 467-479.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_ and J. Mendoza Cota (2007). "An Empirical Analysis of Tijuana Water Consumption." *Atlantic Economic Journal*, 35, 357-369.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) (2007), Consejo Nacional de Población (CONAPO), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005*. México D.F.
- Vásquez, W., P. Mozumder, J. Hernández and R. Berrens (2009). "Willingness to Pay for Safe Drinking Water: Evidence from Parral, Mexico." *Journal of Environmental Management*, 90, 3391-3400.
- Worthington, A. and M. Hoffman (2008). "An Empirical Survey of Residential Water Demand Modelling." *Journal of Economic Surveys*, 22(5), 842-871.