

Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera

Brenda Aracely Ramírez Barraza^{1§}

Adrián González Estrada²

Ramón Valdivia Alcalá¹

José María Salas González¹

José Alberto García Salazar³

¹Posgrado de la División de Ciencias Económico-Administrativas-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 01(595) 9521500, ext. 1665. (ramvaldi@gmail.com; jmsalasangonzalez@gmail.com). ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Texcoco, Estado de México. CP. 56250. (adrglez@prodigy.net.mx). ³Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (jsalazar@colpos.mx).

§Autora para correspondencia: brenda.r.economics@gmail.com.

Resumen

El agua es un recurso cada vez más escaso por lo que tiene una creciente importancia para la sociedad, razón por la cual resulta pertinente y necesaria la determinación de su precio económico. Los objetivos de esta investigación fueron determinar el precio sombra del agua de uso agrícola suministrada por riego de gravedad y de bombeo en la Región Lagunera (Coahuila y Durango), con el fin de calcular las tarifas eficientes, que induzcan un uso óptimo económico del recurso. Se usó un modelo de programación lineal con restricciones de disponibilidad de fuerza de trabajo, tierra y agua. Se analizaron distintos escenarios de disminución de la disponibilidad del agua con el fin de estudiar el comportamiento de su precio sombra ante los cambios en la cantidad disponible de la misma. Los resultados indican que el precio sombra del agua es \$1.56 m⁻³ MN para bombeo y \$0.91 m⁻³ MN para gravedad. Se concluyó que las cuotas que se pagan por el agua de riego en la región son considerablemente menores que el costo de oportunidad o precio sombra del agua. También se concluyó que la asignación actual del agua de uso agrícola genera un patrón de cultivos ineficiente, pues se emplea para producir alfalfa y otros forrajes, los cuales no aparecen en el patrón óptimo de cultivos calculado con el modelo de programación lineal construido para la Región. Se recomienda que las tarifas sean definidas tomando como referencia el precio sombra del agua, el cual se debe ajustar de acuerdo con los cambios periódicos en el nivel de escasez del agua.

Palabras clave: patrón óptimo de cultivos, precio sombra del agua, tarifas eficientes.

Recibido: febrero de 2019

Aceptado: mayo de 2019

Introducción

El agua es un elemento fundamental de subsistencia; en promedio más de 70% del agua consumida mundialmente se destina para uso agrícola. Las cantidades de agua requeridas en los sistemas de producción agrícola (cultivo, ganado, y acuicultura) son, muchas veces superiores a los 20 litros que requiere un ser humano. Se estima que entre el 70 y 90% de los suministros de agua dulce en los países en desarrollo son utilizados para producir alimentos. El 75% de los 1 200 millones de personas pobres del mundo dependen de la agricultura como fuente principal de ingresos (Villholth, 2009).

Sin embargo, la cantidad de agua disponible se ve afectada directamente por el incremento en la población. En el siglo XX la población mundial se triplicó aumentando la presión sobre el recurso hídrico, por lo que las extracciones de agua se sextuplicaron, lo cual se ve agravado en regiones con severa escasez de agua, ya que ahí radica cerca de 35% de la población mundial. Además, aproximadamente 65% de los ríos y ecosistemas acuáticos del mundo presentan una degradación media o alta (Kahil *et al.*, 2015). Entre los principales países con mayor extracción de agua se encuentran India, China y Estados Unidos de América con una extracción total de 761, 554.1 y 478.4 miles de millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ respectivamente (CONAGUA, 2014).

México se ubica en el noveno lugar con 81.65 miles de millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ y cuenta con regiones donde la concentración de la población y la actividad económica han generado zonas de alta escasez, debido a que el espacio urbano sobrepasa al sistema natural hídrico en el que se apoya (Morales y Rodríguez, 2007). Las principales zonas demandantes de agua están ubicadas en el Norte y Centro del país, área que concentra 77% de la población y 84% del Producto Interno Bruto (Garduño, 2003).

Un factor determinante en la disponibilidad de agua es el tamaño de la población y su tendencia a concentrarse en zonas urbanas; se calcula que para el año 2030 la población de México será de 137.5 millones. De 2015 a 2030, la CONAGUA prevé un decremento de 3 692 a 3 250 m^3 por habitante al año y en algunas regiones alcanzará niveles de escasez cercanos o incluso inferiores a 1 000 metros cúbicos por habitante al año (FCEA, 2017). El nivel de escasez de agua es un factor detonante de conflicto entre los sectores demandantes (agrícola, pecuario, industrial y urbano) del recurso.

La Comarca Lagunera, ubicada en el Norte de México, presenta problemas agudos de escasez de agua y sobre-explotación de los mantos acuíferos. El deficiente control de extracciones, la carencia de fuentes adicionales para abastecer a las ciudades, la presencia recurrente de sequías y la competencia entre los usos alternativos del agua, son problemas que se agudizan cada vez más (CONAGUA, 2012). La demanda anual de agua potable para los asentamientos humanos de los municipios de Coahuila (Torreón, Matamoros, San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero y Viesca) y Durango (Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Nazas, Rodeo, Mapimí, San Juan de Guadalupe, San Pedro del Gallo, Cuencamé, San Luis del Cordero y Simón Bolívar) que conforman la Comarca Lagunera es de 127 millones de metros cúbicos, los cuales se obtienen en su mayor parte del subsuelo.

Actualmente, la situación es crítica, debido a que se tienen que perforar 300 m o más para obtener 30 litros de agua, y muchas veces sale contaminada con arsénico, cuando antes se perforaban 30 metros para obtener 300 litros de agua (El Siglo de Torreón, 2010).

La importancia económica de esta región radica en que ocupa el primer lugar en la producción de melón, sorgo forrajero, sorgo escobero, leche de bovino y carne de ave, el segundo lugar en producción de maíz forrajero, tercer lugar en producción de algodón y huevo, cuarto lugar en nogal y alfalfa y es el quinto lugar en producción de carne de caprino. De cada 10 litros que se producen de leche en México, dos corresponden a La Laguna, por lo que se considera como la principal cuenca lechera. También destaca por su potencial de exportación de algodón, carne de ave, carne de bovino, tomate, melón, higo, sandía y nuez, productos agropecuarios que ya incursionan algunos de ellos en el mercado internacional.

La Comarca Lagunera juega un papel preponderante en el sector agropecuario, dada su ubicación geográfica, la vocación agrícola y social que ha tendido la región. Se cuenta con 44 mil productores agropecuarios que son atendidos por la SAGARPA mediante tres subdelegaciones, dos distritos de Desarrollo Rural y 16 Centros de Apoyo al Desarrollo Rural (González, 2016). En el caso del Distrito de Riego 017 Comarca Lagunera se cobra una cuota de riego de \$1 600 pesos MN ha⁻¹ sin considerar el tipo de cultivo. Esta cuota alcanza a cubrir parcialmente los costos de operación, pero no incluye los costos de mantenimiento de los canales ni de las obras principales, así como la pérdida de agua en el proceso de conducción y distribución.

Este precio oficial o precio de mercado en el distrito de riego es muy inferior a su precio sombra o de oportunidad, por lo que, si se usara dicho precio al analizar el sistema de producción no se alcanzaría nunca un óptimo económico. Para alcanzar este objetivo, suele usarse el precio sombra (Palacios y Excebio, 1989), para hacer una mejor asignación del agua a las actividades que producen el mayor beneficio económico y social (Ward and Michelsen, 2002). La definición del precio eficiente del agua es crucial para mejorar su asignación, fomentar su conservación y mejorar la eficiencia de su uso, tanto a nivel individual como social (Dinar and Subramanian, 1997). Además, el precio sombra ayuda a mejorar la administración de la demanda y a incrementar la recuperación de costos.

Es posible obtener una idea acerca de la viabilidad del costo de recuperación comparando el precio pagado por los usuarios del riego con los costos de la provisión del agua de riego. Es importante saber quiénes obtienen provecho del riego. Los consumidores, por ejemplo, se benefician del agua de riego al tener precios más bajos en los alimentos. La agricultura de riego también puede apoyar el desarrollo económico en las áreas rurales, mediante la creación de fuentes de trabajo y el apoyo a las industrias agroalimenticias en aquellas áreas que, de otra forma, llegarían a estar deshabitadas. Esto explica por qué el gobierno frecuentemente cubre parte de los costos del riego (Hellegers, 2007).

La valoración del agua en función de los costes que induce su disponibilidad debería ser, cuando menos, un punto de partida. El costo de oportunidad del agua de un bien no depende sólo de los costes que exige su disponibilidad, sino también de su utilidad y escasez. En el caso del agua, es cada vez más necesario considerar su calidad, pues la productividad en sus diversos usos (agrícola, industrial, doméstico y sanitario), dependen en gran medida de sus características físico-químicas (Arrojo, 1999).

En el caso Región Lagunera, se presenta escasez de agua debido a que la oferta del recurso no cubre la demanda, esto representa un conflicto de asignación entre los diferentes usuarios del servicio. La distribución del agua se realiza conforme a la importancia del recurso en los diferentes sectores y su asignación es una cuestión social y no se deja a las fuerzas de la oferta y de la demanda, por lo que el precio de igual manera no se comporta como lo explica la teoría económica y es afectado por los subsidios del gobierno. El agua debe tener un precio con el fin de lograr dos objetivos a saber, recuperar el costo de la prestación del servicio de agua en particular y dar una señal clara a los usuarios de que el agua es de hecho un bien escaso que debe ser utilizado con racionalidad económica.

El mercado del agua no es homogéneo ya que los diferentes sub-sectores (agricultura, industria, energía, transporte, protección contra inundaciones) tienen diferentes características. Dado que el agua es un recurso vital para la vida para el cual no hay sustituto, la única elección que hay que hacer es cómo asignar el recurso y encontrar la forma más eficiente de usarlo. La disponibilidad del agua depende de la variabilidad climática, pero también sobre el uso de la tierra y la interferencia humana. También la demanda varía con el tiempo, tanto a corto como a largo plazo debido a la estructura de la economía y a los cambios poblacionales (Van der Zaag and Savenije, 2006).

Debido a que la disponibilidad del agua y sus usos están directamente determinados por el desarrollo económico y social, es de vital importancia adoptar medidas para el uso adecuado y eficiente de los recursos hídricos e inducir un manejo integral y sostenible. La identificación de prioridades e intercambios relativos a la distribución del agua, requieren una cuidadosa y oportuna atención con miras a enfrentar una gama creciente de complicaciones tales como: sustentabilidad de los recursos hídricos, justicia, contaminación, medio ambiente, servicios básicos, desarrollo, competencia y globalización. Las políticas nacionales enfocadas al sector hídrico deben considerar estos temas, ya que, de otra manera, la tendencia a subvaluar y sobreexplotar los recursos hídricos provocará un impacto creciente y negativo sobre la economía global y la sociedad (Asad and Dinar, 2006).

No obstante que el sector agrícola es el principal consumidor de agua, existen pocos estudios que estiman la función de demanda por agua para uso agrícola, su respuesta ante variaciones en los precios y las tarifas que se deben cobrar para inducir un uso eficiente del agua. En consecuencia, los objetivos de esta investigación fueron: a) determinar el precio sombra del agua de riego en la Región Lagunera; y b) calcular las tarifas que induzcan un uso óptimo y eficiente.

Materiales y métodos

Los modelos de optimización proporcionan soluciones matemáticas a los problemas que conllevan la maximización o minimización de una función objetivo con un sistema de ecuaciones de restricción bien especificadas. Hay dos tipos de modelo de optimización: modelos de programación matemática y modelos de optimización dinámica. En el modelo de programación matemática empleado en esta investigación la función objetivo y las restricciones en desigualdades son lineales. La función objetivo consiste en la maximización de la suma de ganancias netas obtenidas en el proceso de producción de los cultivos.

El modelo está sujeto a varias restricciones de disponibilidad de recursos: agua, tierra, fuerza de trabajo y de superficie de cultivo. El modelo se resolvió en el programa de cómputo LINDO (Linear Interactive Discrete Optimization). El modelo consideró: a) 24 variables, 12 cultivos de riego superficial y 12 cultivos de riego con agua de pozo; y b) 30 restricciones, 24 restricciones de máximo y mínimo y 6 restricciones correspondientes a la disponibilidad de fuerza de trabajo, tierra y agua. Por último, se realizaron escenarios de disminución del agua disponible de riego para analizar el comportamiento de los precios. El modelo primal de la programación lineal es:

$$\text{Max } \sum_{j=1}^{n=24} c_j x_j$$

$$\text{sa: } \sum_{i=1}^{m=30} a_{ij} x_j \leq b_i, \quad x_j \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, 30, \quad j=1, 2, \dots, 24$$

Donde: x_j representa el j -ésimo cultivo del productor, los primeros 12 son cultivos de riego de bombeo y los 12 restantes de riego de gravedad; c_j representa el precio neto del j -ésimo cultivo; a_{ij} representa la cantidad del i -ésimo recurso necesario para producir una unidad del j -ésimo cultivo y b_i representa el monto disponible del i -ésimo recurso.

El problema dual correspondiente es:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^m \lambda_i b_i$$

$$\text{sa: } \sum_{i=1}^{m=30} \lambda_i a_{ij} \geq c_j, \quad \lambda_i \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, 30, \quad j=1, 2, \dots, 24$$

El Lagrangeano del problema primal es:

$$L = \sum_{j=1}^{n=24} c_j x_j + \sum_{i=1}^{m=30} \lambda_i (b_i - a_{ij} x_j), \quad x_j \geq 0, \quad \lambda_i \geq 0$$

De acuerdo con el Teorema de Khun-Tucker (Intriligator, 1991), las condiciones necesarias para la existencia de una solución óptima son:

- $(c_j - \lambda_i a_{ij}) \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, 24, \quad i=1, 2, \dots, 30$ 1)
- $(c_j - \lambda_i a_{ij}) x_j \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, 24, \quad i=1, 2, \dots, 30$ 2)
- $(b_i - a_{ij} x_j) \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, 24, \quad i=1, 2, \dots, 30$ 3)
- $(b_i - a_{ij} x_j) \lambda_i \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, 24, \quad i=1, 2, \dots, 30$ 4)
- $x_j \geq 0, \quad \lambda_i \geq 0, \quad j=1, 2, \dots, 24, \quad i=1, 2, \dots, 30$ 5)

De acuerdo con Intriligator (1991), dado que los conjuntos de factibilidad de los problemas primal y dual no son vacíos en el caso de la presente investigación, y que la función objetivo es casi-cóncava y las restricciones son convexas, porque son lineales, entonces las condiciones anteriores son necesarias y suficientes para la existencia de una solución óptima. La llamada condición complementaria de holgura requiere que se cumplan las condiciones (2) y (3).

De acuerdo a lo anterior, si alguna restricción se cumple como una estricta desigualdad, entonces la variable dual correspondiente es cero en la solución. Si la variable es positiva en la solución, entonces la restricción correspondiente se satisface como una estricta igualdad. Por otra parte:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = (b_i - a_{ij}x_j) \cdot \lambda_i \geq 0 \quad (= 0, \text{ si } \lambda_i > 0)$$

En consecuencia, los multiplicadores de Lagrange: λ_i , $i = 1, 2, \dots, 30$, representan los precios sombra de los recursos cuyas disponibilidades restringen al modelo. Las lambdas correspondientes a la restricción de la disponibilidad de agua de bombeo y de gravedad son los precio sombra del agua λ_{29} y λ_{30} y expresan en cuánto aumenta el valor óptimo de la función objetivo si la disponibilidad de agua aumenta en una unidad. Una interpretación análoga tiene los demás multiplicadores de Lagrange. El precio marginal del agua, precio sombra o costo de oportunidad, está relacionado con un cambio en el valor total de un producto, asociado con varios niveles de aplicación de agua; es decir, el precio marginal del agua es un precio económico de una unidad extra de agua en el punto óptimo (Samarawickrema y Kulshreshtha, 2009; Tang, 2004).

Los modelos de programación matemática frecuentemente son utilizados para determinar el precio económico del agua de riego y de las aguas subterráneas. El modelo anterior está diseñado para servir como una herramienta para la toma de decisiones que son responsabilidad de los planificadores de la producción agrícola a nivel de distrito de riego. La solución del modelo es un conjunto de actividades o cultivos que maximizan la suma de las ganancias de la producción agrícola (Amir and Fisher, 1999). Esa combinación de cultivos representa la asignación óptima del agua y de otros recursos de la producción, usando como función objetivo la maximización de las ganancias totales o agregadas, sujeta a las restricciones de disponibilidad de los recursos y a las restricciones institucionales (Pérez, 2003).

La validez del modelo requiere de productores que maximicen el ingreso y empleen insumos productivos hasta el punto en que el producto marginal es igual al costo de oportunidad (FAO, 2004). Los cultivos analizados fueron: alfalfa (*Medicago sativa* L.), avena forrajera (*Avena sativa* L.), algodón (*Gossypium hirsutum* L.), sorgo forrajero (*Sorghum vulgare*), maíz forrajero (*Zea mays* L.), melón (*Cucumis melo*), sandía (*Citrullus lanatus*), jitomate (*Solanum lycopersicum*), chile (*Capsicum annum* L.), maíz grano (*Zea mays* L.), sorgo escobero (*Sorghum vulgare*) y nuez (*Juglans regia*), los cuales representan los principales cultivos de la región de estudio.

Los datos utilizados en el modelo comprenden al año agrícola 2015-2016. La información se obtuvo de SAGARPA-DRL (2016); Soto *et al.* (2016); DOF (2016); CONAGUA e IMTA (2016); SAGARPA (2015); CONAGUA (2017). El precio neto se obtuvo de los ingresos por hectárea menos los costos de producción sin incluir los salarios por el uso de fuerza de trabajo, renta de la tierra y precio del agua (Cuadro 1). Todos los valores monetarios se expresan en MN de México.

Cuadro 1. Precios netos empleados en el modelo.

Cultivo	Variable	Precio neto	Variable	Cultivo	Precio neto
		miles de \$ MN			miles de \$ MN
		Gravedad			Bombeo
Alfalfa	X ₁	74 430.17	X ₁₃	Alfalfa	588 042.38
Avena forrajera	X ₂	1 278.31	X ₁₄	Avena forrajera	91 277.87
Algodón	X ₃	381 115.42	X ₁₅	Algodón	27 299.32
Sorgo forrajero	X ₄	17 005.67	X ₁₆	Sorgo forrajero	32 933.64
Maíz forrajero	X ₅	179 317.68	X ₁₇	Maíz forrajero	392 272.76
Melón	X ₆	29 575.9	X ₁₈	Melón	187 197.52
Sandía	X ₇	11 371.81	X ₁₉	Sandía	7 039.5
Tomate	X ₈	325.45	X ₂₀	Tomate	58 275.37
Chile	X ₉	13 265.62	X ₂₁	Chile	11 902.77
Maíz grano	X ₁₀	9 066.66	X ₂₂	Maíz grano	1 073.36
Sorgo escobero	X ₁₁	2 568.81	X ₂₃	Sorgo escobero	505.16
Nuez	X ₁₂	20 4005.61	X ₂₄	Nuez	174 499.47

Elaborado a partir de los datos de SAGARPA-DRL (2016).

Los recursos restrictivos del año agrícola fueron: a) tierra: comprende la mayor superficie sembrada en los últimos seis años y es de 103 793.53 ha regadas por gravedad y 71 570.45 ha regadas con agua de bombeo. La restricción del máximo se aplicó a la alfalfa, a la avena forrajera, maíz forrajero, sorgo forrajero, al sorgo escobero, al algodón y a la nuez correspondiendo con la máxima superficie sembrada del periodo 2011-2016, mientras que la restricción de mínimo comprende la superficie mínima sembrada en los últimos cinco años de los cultivos restantes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Restricciones de máximo y mínimo de los cultivos del modelo.

Variable	Cultivo (riego con agua de pozo)	Hectáreas	Variable	Cultivo (riego con agua superficial)	Hectáreas
X ₁	Alfalfa	34 363.2	X ₁₃	Alfalfa	5 901.15
X ₂	Avena forrajera	17 551.2	X ₁₄	Avena forrajera	838
X ₃	Algodón	1 446.08	X ₁₅	Algodón	24 835.47
X ₄	Sorgo forrajero	14 422.4	X ₁₆	Sorgo forrajero	17 335.78
X ₅	Maíz forrajero	32 679.16	X ₁₇	Maíz forrajero	17 027.56
X ₆	Melón	3 771	X ₁₈	Melón	765.3
X ₇	Sandía	244	X ₁₉	Sandía	333.65
X ₈	Tomate rojo (jitomate)	656	X ₂₀	Tomate rojo (jitomate)	7
X ₉	Chile verde	221	X ₂₁	Chile verde	169.4
X ₁₀	Maíz grano	168	X ₂₂	Maíz grano	724.5
X ₁₁	Sorgo escobero	604	X ₂₃	Sorgo escobero	2 142.7
X ₁₂	Nuez	4 301.75	X ₂₄	Nuez	4 899.65

Elaborado a partir de los datos de SAGARPA-DRL (2016).

b) fuerza de trabajo: comprende la sumatoria del número de obreros totales obtenidos por cultivo y modalidad, 2 803 287 jornales para riego por bombeo y 1 385 330 jornales para riego por gravedad. c) agua: la restricción de disponibilidad de agua de riego comprende 398.51 millones de m³ de agua subterránea (Soto *et al.*, 2016) que corresponde al volumen de extracción para uso agrícola del ciclo 2015-2016 y 799.62 millones de m³ de agua superficial obtenido del informe de distribución de aguas de CONAGUA (2016) y representa el volumen distribuido para riego del ciclo 2015-2016. Los volúmenes de agua de riego por cultivo incluidos en el modelo se obtuvieron de las láminas de riego aplicadas en el Distrito de Riego 017 (CONAGUA, 2017).

Resultados y discusión

Los resultados del modelo base 1 de programación lineal indican que: a) el patrón óptimo de cultivos es de 51 831.08 ha, de las cuales 31.8% son de riego por bombeo y 68.3%, de gravedad; b) producción nula para los cultivos de alfalfa, avena forrajera, sorgo forrajero, maíz forrajero y sorgo escobero, debido a que esos cultivos son grandes consumidores de agua y a que su relación ingreso-costo es menor en comparación con la de los demás cultivos (Cuadro 3); c) se indica un incremento de la superficie sembrada de algodón, ya que genera mayores ganancias; y d) otro cultivo que genera ganancias considerables son las plantaciones de nuez, las cuales se consideraron como una restricción de máximo. Si se hubiesen considerado como mínimo la mayor parte de la superficie se habría destinado a este cultivo.

Cuadro 3. Patrón óptimo de cultivos.

Cultivo	Gravedad (ha)	(%)	Bombeo (ha)	(%)
Alfalfa	0	0	0	0
Avena forrajera	0	0	0	0
Algodón	24835.47	47.9	1446.08	2.8
Sorgo forrajero	0	0	0	0
Maíz forrajero	0	0	0	0
Melón	765.3	1.5	3771	7.3
Sandía	333.65	0.6	244	0.5
Tomate rojo (jitomate)	3633.02	7	6 318.26	12.2
Chile verde	169.4	0.3	221	0.4
Maíz grano	724.5	1.4	168	0.3
Sorgo escobero	0	0	0	0
Nuez	4 899.65	9.5	4 301.75	8.3
Total	35 360.99	68.2	16 470.09	31.8

Elaborado con los datos obtenidos de la estimación del modelo.

El valor de la función objetivo que maximización las ganancias totales en el modelo base 1 es de 1 743 millones de pesos MN. Los resultados muestran que el precio sombra del agua de riego por bombeo es \$1.56 m⁻³ MN y el de riego por gravedad es \$0.91 m⁻³ MN, lo que indica que, ante un aumento de un metro cúbico en la cantidad disponible de agua, la función objetivo se incrementa en \$1.56 y \$0.91 MN respectivamente. El multiplicador de Lagrange (precio sombra) correspondiente al agua de bombeo es mayor, ya que los cultivos con riego por bombeo tienen una mayor productividad; es decir, requieren de menos agua por unidad de producción y tienen un menor índice de pérdida de agua que los cultivos con riego por gravedad (Cuadro 4).

Cuadro 4. Precio sombra del agua.

Disminución en la disponibilidad de agua (%)	Valor de la función objetivo (millones de pesos MN)	Precio sombra (\$ m ⁻³) MN	
		Bombeo	Gravedad
0	1743	1.56	0.91
1	1729	1.56	0.91
2	1716	1.56	0.91
12	1581	1.56	0.91
14	1554	1.56	0.91
16	1527	1.56	1.23
20	1463	1.56	1.23

Elaborado a partir de los resultados del modelo.

En el escenario 2, se analizó una disminución de la disponibilidad del agua en 1%, con el objeto de ver su comportamiento en relación con el escenario base 1. Los resultados indican que, al disminuir la disponibilidad de agua, el valor de la función objetivo obtenida es de 1 729 millones de pesos MN; es decir, disminuye en 0.8% con relación al escenario base 1. En relación con la superficie cultivada, ésta tuvo una disminución de 0.7%. El precio sombra se mantuvo constante.

En los escenarios donde el agua disponible disminuye de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14% el precio sombra se mantiene constante en \$1.56 m⁻³ MN para bombeo y en \$0.91 m⁻³ MN para gravedad. En el escenario donde la cantidad disponible disminuye 16%, el precio sombra del agua de riego por gravedad que se obtiene es de \$1.23 m⁻³ MN mientras que el de bombeo sigue siendo de \$1.56 m⁻³ MN. El valor de la función objetivo es de 1 527 millones de pesos; es decir, 12.39% menor con relación al escenario base 1.

Con el fin de comparar el precio sombra obtenido con la tarifa actual fue necesario estimar la magnitud de esa tarifa, debido a que, al igual que en muchos distritos de riego en México, no se cobra el agua por volumen, sino por hectárea. La tarifa media pagada se obtuvo mediante la división del costo (cuota) ha⁻¹ entre el volumen medio ha⁻¹. Dado que la cuota de riego que pagan en la Región Lagunera es \$1 600.00 ha⁻¹ MN y tomando en cuenta el volumen de riego (m⁻³ ha⁻¹) promedio de los principales cultivos, entonces el costo promedio sería \$0.09 m⁻³ MN para riego por gravedad (Cuadro 5) en los principales productos agrícolas de la región.

Los resultados anteriores permiten hacer una comparación entre la tarifa promedio pagada (\$0.09 m⁻³ MN) y la tarifa estimada con el modelo (\$0.91 m⁻³ MN), lo que demuestra que la tarifa pagada por unidad de agua de riego de gravedad es 9.06 veces menor al precio sombra obtenido con el modelo. Esto indica que las tarifas que se pagan en la Región Lagunera no corresponden con el precio sombra del agua aquí obtenido, por lo que se concluye que se está haciendo un uso ineficiente del agua.

Cuadro 5. Costo del agua de los cultivos considerando una cuota de agua de \$1 600.00 ha⁻¹ MN.

Cultivo	Precio (\$ m ⁻³) MN
Alfalfa	0.14
Avena forrajera	0.1
Algodón	0.1
Sorgo forrajero	0.09
Maíz forrajero	0.1
Melón	0.07
Sandía	0.07
Tomate	0.06
Chile	0.1
Maíz grano	0.14
Sorgo escobero	0.06
Nuez	0.11

Elaborado a partir del volumen de riego y de la cuota de riego.

Aunque Godínez *et al.* (2007) también excluyen del patrón óptimo a la producción de cultivos forrajeros y muestran que la tarifa pagada es considerablemente menor a la tarifa estimada, los precios sombra que estimaron fueron \$0.65 m⁻³ MN de agua de bombeo y \$0.58 m⁻³ MN de agua de gravedad, los cuales son considerablemente inferiores a los aquí obtenidos. Además, no consideraron los mismos cultivos en las dos modalidades de riego. Zetina *et al.* (2013); Escobar y Gómez (2007) coinciden en que las cuotas que pagan o que están dispuestos a pagar los productores por riego son menores que el precio sombra de este recurso.

Debido que el agua de riego es suministrada por agencias públicas que le dan un precio en función de su costo promedio de entrega o de mantenimiento, en la mayoría de los casos ese costo, no representa su precio económico (Young y Loomis, 2014). Es por ello, que los precios sombra deberían utilizarse como indicadores para establecer tarifas que propician un uso racional del agua.

Conclusiones

El patrón de cultivos de la Comarca Lagunera es ineficiente y carente de racionalidad económica. El patrón óptimo de cultivos obtenido con el modelo señala claramente que no se deberían sembrar en la región cultivos forrajeros, como la alfalfa, sorgo y maíz, ya que son de bajo precio y densidad económica y, sin embargo, requieren de mucha agua para su producción. Después de comparar los precios sombra del agua con el precio promedio que se cobra por el agua de riego por gravedad, se concluye que las cuotas de riego que se pagan en la región son considerablemente menores que el costo de oportunidad social o precio sombra del agua.

El precio tan bajo que pagan en la región por el agua de riego es en realidad una transferencia injustificada de la sociedad, a través del gobierno. El agua es un insumo muy escaso y de vital importancia para el desarrollo económico de la región y para sus principales actividades económicas: la agricultura y la ganadería y debería usarse más racional y eficientemente. Se recomienda que el precio sombra o de eficiencia obtenido con el modelo puede ser empleado como un indicador para establecer tarifas para el consumo eficiente de agua en el sector agrícola de la Región Lagunera.

También se recomienda que se lleven a cabo otras investigaciones como ésta en las que se incorporen todas las actividades productivas de la región (ganadería, acuacultura entre otras), con el fin de ver la estabilidad de los indicadores de eficiencia en el uso del agua. Las tarifas deben ser definidas con base en el precio sombra del agua y se deben ajustar de acuerdo con los cambios en el nivel de escasez del recurso, ya que la cantidad de agua disponible afecta a todos los sectores demandantes: el industrial, el urbano y el agropecuario.

Literatura citada

- Amir, I. and Fisher, F. M. 1999. Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model. *Agric. Systems*. 1(61):45-56.
- Arrojo, A. P. 1999. Valor económico del agua. *Afers Internacionals*. 145-167 pp.
- Asad, M. and Dinar, A. 2006. The role of water policy in Mexico. El rol de la política del agua en México - consideraciones sobre sustentabilidad, equidad y crecimiento económico). En *breve*. No. 95. World Bank. Washington, DC. 1-4 pp.
- CONAGUA. 2012. Comisión Nacional del Agua (Atlas del agua en México. México. 139 p.
- CONAGUA. 2014. Comisión Nacional del Agua (Atlas Digital del Agua México. 133 p.
- CONAGUA. 2017. Comisión Nacional del Agua. Informe de distribución de aguas del distrito de riego 017 Región Lagunera ciclo agrícola 2015-2016. México, DF. 10 p.
- CONAGUA-IMTA. 2016. Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. México. <http://www.edistritos.com/DR/estadisticaHidrometrica/distrito.php>.
- Dinar, A. and Subramanian, A. 1997. Water pricing experiences. An international perspective. *In: water pricing experiences. An international perspective*. The World Bank. Washington, DC. 164 p.
- DOF. 2016. Diario Oficial de la Federación. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea. Acuífero (0523) Principal-Región Lagunera. 21 de junio. México. 10 p. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5441871&fecha=21/06/2016.
- El Siglo de Torreón. 2010. Escasez de agua y arsénico afectan a la Comarca Lagunera. *El Siglo de Torreón*. 22 de marzo de 2010. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/509965.escasez-de-agua-y-arsenico-afectan-a-la-comarca-lagunera.html>.
- Escobar-Jaramillo, L. y Gómez-Olaya, Á. 2007. El valor económico del agua para riego un estudio de valoración contingente. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*. 6(6):16-32.
- FAO. 2004. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Economic valuation of water resources in agriculture. From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. Rome. 187 p.
- FCEA. 2017. Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. Agua en México. Un prontuario para la correcta toma de decisiones. FCEA. México. 47 p.
- Garduño, H. 2003. Administración de derechos de agua. Experiencias, asuntos relevantes y lineamientos. Roma, Italia. FAO. 38 p.
- Godínez, M. L.; García, S. J. A.; Fortis, H. M.; Mora, F. J. S.; Martínez, D. M. Á.; Valdivia, A. R. y Hernández, M. J. 2007. Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera. *Terra Latinoam*. 25(1):51-59.
- González, D. 2016. La Laguna destaca en producción agrícola. *El Siglo de Torreón*. 6 de julio de 2016. México. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1241023.la-laguna-destaca-en-produccion-agricola.html?oprd=1firefoxhtml\shell\open\command>.

- Hellegers, J. G. J. P. 2007. La importancia de conocer el valor del agua de riego. *In*: Morales, N. J. A. y Rodríguez, T. L. Economía del agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas. (Ed). Porrúa. México. 93-101 pp. <http://webdelprofesor.ula.ve/cidiat/prjose/investigaciones/ponencia%20definitiva.pdf>.
- Intriligator, M. D. 1991. Mathematical optimization and economic theory. Prentice-Hall. Englewood, NJ. 486 p.
- Kahil, T.; Dinar, A. and Albiac, J. 2015. Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation climate change in arid and semiarid regions. *J. Hydrol.* (522):95-109.
- Morales, N. J. A. y Rodríguez, T. L. 2007. Retos y perspectivas de una gestión no sustentable del agua en el Área Metropolitana del Valle de México. *In*: Morales, N. J. A. y Rodríguez, T. L. Economía del agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas. Porrúa. México. 15-68 pp.
- Palacios, V. E. y Excebio, G. A. 1989. Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 482 p.
- Pérez, R. J. A. 2003. Valoración económica del agua. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Caracas, Venezuela. 45 p.
- SAGARPA. 2015. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Agenda Técnica Agrícola de Coahuila. Segunda edición. México, DF. 175 p.
- SAGARPA-DRL. 2016. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación Delegación Región Lagunera. Avances de siembras y cosechas, en la región lagunera 2011-2016. Cd. Lerdo, Durango, México.
- Samarawickrema, A. and Kulshreshtha, S. 2009. Marginal value of irrigation water uses in the South Saskatchewan River Basin, Canada. *Great Plains Res.* 19(1):73-88.
- Soto, B. J.; Gómez, G. M. M; Silva, L. W. L. y Valdés, G. J. A. 2016. Derechos de agua y distribución social de los recursos hídricos subterráneos en el registro público de derechos de agua de la Región Lagunera de Coahuila y Durango. *CienciAcierta.* 45 p. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2016/03/20/derechos-de-agua-y-distribucion-social-de-los-recursos-hidricos-subterraneos-en-el-registro-publico-de-derechos-de-agua-de-la-region-lagunera-de-coahuila-y-durango/#-ftnref3>.
- Tang, S. L. 2004. Linear optimization in applications. Hong Kong University Press. 164 p.
- Van der Zaag, P. and Savenije, H. 2006. Water as an economic good: the value of pricing and the failure of markets. *IWRA, Water International.* 27(19):98-104.
- Villholth, G. K. 2009. Water and ethics in food production and provision-how to ensure water and food security and equity into the 21st century? *In*: Llamas, M. R.; Martínez, C. L. and Mukherji, A. Water ethics: Marcelino Botín Water Forum 2007. CRC Press. London. 81-94 pp.
- Ward, F. and Michelsen, A. 2002. The economic value of water in agriculture: concepts and policy applications. *Water Policy.* 4(5):423-446.
- Young, R. A. and Loomis, J. B. 2014. Determining the economic value of water: concepts and methods. 2 (Ed.). Resources for the future press. Washington, DC. 358 p.
- Zetina-Espinosa, A. M.; Mora-Flores, J. S.; Martínez-Damián, M. Á.; Cruz-Jiménez, J. y Téllez-Delgado, R. 2013. Valor económico del agua en el distrito de riego 044, Jilotepec, Estado de México. *Agric. Soc. Des.* 10(2):139-156.