

VALOR ECONÓMICO DEL AGUA EN EL DISTRITO DE RIEGO 044, JILOTEPEC, ESTADO DE MÉXICO

ECONOMIC VALUE OF WATER IN IRRIGATION DISTRICT 044, JILOTEPEC, ESTADO DE MÉXICO

Ana M. Zetina-Espinosa, José S. Mora-Flores*, Miguel Á. Martínez-Damián,
Joaquín Cruz-Jiménez, Ricardo Téllez-Delgado

Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco. Km. 36.5.
Montecillo, Estado de México. 56230. (saturnmf@colpos.mx).

RESUMEN

La importancia del agua no puede exagerarse: ésta puede encontrarse en muchas partes de la Tierra: océanos y mares, ríos y lagos, lagunas, etcétera. El objetivo de este trabajo fue proponer un esquema óptimo para el patrón de cultivos en el Distrito de Riego 044 (DR044) en Jilotepec, Estado de México, y estimar el valor económico del agua en siete diferentes escenarios, de acuerdo con el patrón de cultivo de los últimos diez ciclos agrícolas. En la optimización del ingreso y la cuantificación del valor del producto marginal del agua se instrumentó un modelo de programación lineal, tomando 37 actividades agrícolas cíclicas y perennes; introduciendo 62 restricciones. Los resultados mostraron una diferencia de 2.2 millones de pesos entre la situación actual y el óptimo económico. Bajo un escenario de asignación óptima sin restricción de superficie, el maíz (cultivo principal), será reemplazado por trigo y frutales. El valor estimado del producto marginal del agua estuvo entre 0.96 y 5.72 pesos por m^3 en el ciclo Otoño-Invierno, y entre 0.03 y 0.21 pesos por m^3 en Primavera-Verano; en todos los casos esos precios económicos del agua son superiores a las cuotas pagadas por los usuarios del DR044; por tanto, un incremento gradual de las cuotas podrá optimizar el uso y mitigar el desperdicio.

Palabras clave: escasez de agua, óptimo económico, programación lineal.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural que ha cobrado especial importancia económica en las últimas décadas, debido a su escasez en el planeta. De la superficie de la tierra 70 % está cubierto de agua:

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: octubre, 2012. Aprobado: marzo, 2013.

Publicado como ARTÍCULO en ASyD 10: 139-156. 2013.

ABSTRACT

The importance of water cannot be exaggerated; water can be found in many parts of Earth: oceans and seas, rivers and lakes, lagoons, etc. The objective of this study was to propose an optimal scheme for the crop pattern in Irrigation District 044 (DR044) in Jilotepec, Estado de México, and to estimate the economic value of water under seven different scenarios, according to the cultivation pattern of the last ten agricultural cycles. A linear programming model was used for the optimization of income and the quantification of the marginal product value of water, taking 37 cyclic and perennial agricultural activities and introducing 62 restrictions. Results showed a difference of 2.2 million pesos between the current situation and the economic ideal. Under a scenario of optimal allotment without surface restriction, maize (the main crop) would be replaced by wheat and fruit trees. The estimated value of the marginal product of water was between 0.96 and 5.72 pesos per m^3 in the Fall-Winter cycle and between 0.03 and 0.21 pesos per m^3 in Spring-Summer. In every case, these economic prices of water are higher than the fees paid by users in the DR044; therefore, a gradual increase of fees could optimize the use and mitigate the waste.

Key words: water scarcity, economic ideal, linear programming.

INTRODUCTION

Water is a natural resource that has acquired special economic importance in recent decades, due to its scarcity on the planet. Out of the Earth's surface, 70 % is covered in water: 97.5 % (1,365 Mkm³) is salt water and 2.5 % (35 Mkm³) is fresh; out of the latter, 68.9 % is stored in glaciers, 30.8 % is contained in the ground, and 0.3 % in lakes and rivers. In the end, only 0.26 % is

97.5 % (1365 Mkm³) es salada y 2.5 % (35 Mkm³) es dulce; de esta última, 68.9 % está almacenado en los glaciares, 30.8 % contenida en el suelo y 0.3 en lagos y ríos. Al final, sólo 0.26 % es agua dulce accesible para el consumo humano y se localiza en ríos, lagos y acuíferos a poca profundidad (CONAGUA, 2009a). Así pues, estudiar el agua desde el punto de vista económico permite la toma de decisiones en lo referente a su suministro a los distintos sectores productivos y no productivos. El cálculo del valor económico del líquido implica obtener el valor del producto marginal, es decir, su contribución al valor total de la producción. El beneficio marginal equivale a la cantidad máxima que el usuario estaría dispuesto a pagar por el agua (su disposición al pago), lo que da una medida de su demanda y el valor que se obtendría en una condición de escasez (Garrido *et al.*, 2007).

El porcentaje de agua dulce disponible para el consumo humano se debe distribuir entre las actividades humanas que la demandan: doméstica, agropecuaria e industrial (Caballer y Guadalajara, 1998). De estos sectores, la agricultura es el que consume más agua, representando globalmente alrededor de 69 % de toda la extracción, el consumo doméstico alcanza aproximadamente 10 % y la industria 21 % (FAO, 2002; UNESCO, 2003).

A pesar de que la agricultura es el sector que consume más agua en el mundo, en términos de volumen; el uso del agua es de bajo valor económico, poco eficiente y subvencionado. Los estudios realizados a lo largo de los años ochenta revelan que los derechos que se pagan por el riego representan menos de 8 % del valor de los beneficios que la agricultura aporta (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005).

El principal uso del agua en México es el agrícola. El problema del país estriba en que en las organizaciones oficiales y las de productores dirigidas a promover el uso eficiente del agua de riego, no fomentan su uso óptimo en zonas donde hay escasez; aún menos en aquellos distritos de riego con superficie de cultivo pequeña, donde la actividad económica principal no es la agricultura y la escasez está latente.

El DR044 tiene una superficie de 13 250 ha, ubicadas al norte del estado de México, y forma parte de la Cuenca Alta del Río Pánuco, subcuenca del Río Tula. La mayor parte (70.62 %), se ubica en el estado de México y comprende los municipios de Jilotepec y San Francisco Soyaniquilpan, y 29.38 %, en el municipio de Tepeji del Río, Hidalgo. Este distrito se

fresh water that is accessible to human consumption and it is located in rivers, lakes and aquifers at low depth (CONAGUA, 2009a). Thus, studying water from the economic point of view allows decision making with regards to the supply for different productive and non-productive sectors. Calculating the economic value of the liquid implies obtaining the marginal product value, that is, its contribution to the total value of production. The marginal benefit is equivalent to the maximum amount that the user would be willing to pay for the water (his/her willingness to pay), which is a measure of its demand and the value that would be obtained under a condition of scarcity (Garrido *et al.*, 2007).

The percentage of fresh water available for human consumption should be distributed between the human activities that demand it: domestic, agricultural/livestock and industrial (Caballer and Guadalajara, 1998). Of these sectors, agriculture is the one that consumes more water, representing globally around 69 % of all the extraction; domestic consumption reaches approximately 10 % and industry 21 % (FAO, 2002; UNESCO, 2003).

Although agriculture is the sector that consumes more water in the world, in terms of volume; the use of water is of low economic value, not efficient and subsidized. Studies carried out throughout the 1980s reveal that the rights that are paid for irrigation represent less than 8 % of the value of the benefits that agriculture provides (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005).

The principal use of water in México is agricultural. The problem in the country resides in the fact that the official organizations and those of producers devoted to promoting the efficient use of irrigation water do not foster their optimal use in areas where there is scarcity; even less so in those irrigation districts with small cultivation surfaces, where the main economic activity is not agriculture and scarcity is latent.

The DR044 has a surface of 13 250 ha, located North of Estado de México, and it is part of the River Pánuco High Basin, sub-basin of the Tula River. The greater part (70.62 %) is located in Estado de México and covers the municipalities of Jilotepec and San Francisco Soyaniquilpan, and 29.38 % covers the municipality of Tepeji del Río, in the state of Hidalgo. This district is considered small as compared with others in the country, and due to its low water

considera pequeño comparado con otros del país, y por su baja extracción de agua, las actividades agrícolas y pecuarias no representan la principal fuente de ingresos de las familias de esta región.

En el DR044 se observa un problema en la forma de establecer las cuotas por uso del agua, cuotas que se cobran por cultivo/riego, y con las que sólo se intenta cubrir el costo de entregar el agua en las parcelas y el mantenimiento precario de la red de distribución de riego por gravedad. Estas cuotas, en pesos por hectárea por riego son de \$80.50 para maíz, \$161 para frutales, \$100 para trigo, avena forrajera o pradera y \$287.5 por mil metros cúbicos (mm^3) para abrevadero. De acuerdo con el volumen de agua extraído mensualmente y las cuotas recabadas por la misma, estos valores arrojan un precio cobrado por mm^3 entre 1.11 y 60.23 pesos, dependiendo de los meses del año agrícola, con un promedio de 5.11 pesos; su equivalente en metros cúbicos (m^3) es 0.0011 a 0.0602 pesos (CONAGUA, 2009b).

Existe un control deficiente del agua en la distribución y aplicación a las actividades agrícolas, debido a que los productores pueden disponer del agua que consideren necesaria para sus actividades, con el único requisito de cubrir su cuota. Además, las actividades agrícolas del Distrito carecen de planeación y optimización económica, lo que ha llevado a un problema de desperdicio, debido a la no asignación del valor económico del agua, bajo la creencia de que el recurso aparentemente es abundante en este Distrito (CONAGUA 2009b).

Las fuentes de abastecimiento de agua del DR044 son las aguas superficiales que escurren por el cauce del Río Coscomate y sus afluentes, los ríos Chapa de Mota y Las Monjas, que son almacenadas en la presa Danxho, cuyo volumen de almacenamiento promedio es de 31 000 mm^3 a nivel de presa, y el nivel de extracción ha sido de 17 000 mm^3 en promedio en los últimos diez ciclos agrícolas (CONAGUA, 2009b).

Diversos autores (Liu *et al.*, 2007; Jabeen *et al.*, 2006; Godínez *et al.*, 2007; Florencio *et al.*, 2002; Garrido *et al.*, 2007) señalan el uso de modelos de programación lineal para obtener una valoración económica del agua. Con esta metodología se han realizado diversos estudios en relación con la valoración del agua de riego. Tal es el caso del agua en China, analizado por Liu *et al.*, (2007), quienes realizaron un estudio para estimar y predecir el precio

extraction, agricultural and livestock activities do not represent the primary source of income for families in the region.

A problem is observed in the DR044 in the way that fees for water use are established, as well as the fees charged per crop/irrigation, and those which attempt only to cover the cost of delivering water to the parcels and the precarious maintenance of the distribution network for irrigation based on gravity. These fees, in pesos per hectare for irrigation, are \$80.50 for maize, \$161 for fruit trees, \$100 for wheat, fodder oats or pasture, and \$287.5 for one thousand cubic meters (mm^3) of water trough. Based on the volume of water extracted monthly and the fees charged for it, these values result in a price charged per mm^3 of between 1.11 and 60.23 pesos, depending on the months of the agricultural year, with an average of 5.11 pesos; its equivalent in cubic meters (m^3) is 0.0011 to 0.0602 pesos (CONAGUA, 2009b).

There is a deficient control of water in the distribution and application for agricultural activities, since producers can have access to the water that they deem necessary for their activities, with the sole requisite of covering their fees. Also, agricultural activities in the District lack planning and economic optimization, which has led to a problem of waste, because the economic value of water is not assigned, under the belief that the resource is apparently abundant in this District (CONAGUA, 2009b).

The sources of water supply in the DR044 are superficial waters that run off the basin of the Coscomate River and its tributaries, rivers Chapa de Mota and Las Monjas, which are stored in the Danxhó dam, whose average storage volume is 31 000 mm^3 at the level of the dam, and the extraction level has been 17 000 mm^3 in average during the past ten agricultural cycles (CONAGUA, 2009b).

Various authors (Liu *et al.*, 2007; Jabeen *et al.*, 2006; Godínez *et al.*, 2007; Florencio *et al.*, 2002; Garrido *et al.*, 2007) point to the use of linear programming models to obtain an economic valuation of water. With this methodology, diverse studies have been performed with regards to the valuation of irrigation water. Such is the case of water in China, analyzed by Liu *et al.* (2007), who carried out a study to estimate and predict the economic price of water of industrial and productive use in the years 2020 and 2030. Their results are that the

económico del agua de uso industrial y productivo en los años 2020 y 2030. Sus resultados son que el valor del agua va desde 0.02 hasta 0.725 dólares por m^3 para el agua industrial y de 0.06 a 0.331 para el uso agrícola. Sin embargo, los precios reales cobrados a la industria oscilan entre 0.020 y 0.212 dólares por m^3 . El precio del agua predicho para 2020 oscila entre 0.270 y 1.132 dólares por m^3 , y para el agua de uso agrícola va de 0.072 a 0.519. Para 2030 el uso industrial oscila entre 0.396 y 1.412 y el agrícola entre 0.110 y 0.629 dólares por m^3 . Con lo anterior se demuestra que un mayor precio refleja mayor escasez a largo plazo.

Jabeen *et al.*, (2006) publicaron un estudio con el objetivo de estimar el valor marginal del agua de riego a partir de tres modelos lineales para granjas pequeñas, medianas y grandes. Obtuvieron un precio económico que va de 0.0689 a 0.2006 pesos por m^3 en pequeñas granjas, 0.1317 a 0.2511 en medianas y 0.1454 a 0.2817 en grandes; y concluyeron que la escasez de agua afecta la intensidad del cultivo y la ganancia neta de las granjas.

El trabajo realizado por Florencio *et al.* (2002) estimó el valor económico del agua superficial y de pozo en el Distrito de Riego del Alto Río Lerma. Su hipótesis es que las tarifas pagadas por concepto de agua en el área de estudio no reflejan su verdadero valor de escasez. Florencio modeló escenarios con programación lineal, simulando reducciones de agua en 18 y 24 %, y tomó precios netos de 1999 y estimaciones para 2010. El precio económico del agua obtenido osciló entre 0.54 y 2.28 pesos por m^3 del agua superficial, y entre 0.66 y 1.25 de agua subterránea, valores superiores a los precios pagados.

En el D044 es necesario proporcionar criterios de decisión para la planeación del Distrito a mediano y largo plazo, y sentar las bases para replantear el esquema actual de cobros del recurso, el cual se considera que no refleja su valor de escasez. Así pues, el objetivo de este trabajo fue optimizar el patrón óptimo de cultivos en el Distrito de Riego 044, ubicado en Jilotepec, estado de México, y estimar el valor económico del agua ante diferentes escenarios, de acuerdo con el patrón de cultivos de los últimos diez años (2000-2009). La hipótesis de la investigación es que en el desarrollo de las actividades agrícolas en el DR044 los recursos están subutilizados, se pueden escalar a niveles más altos de operación (optimización), y es posible valorar económicamente el agua como un recurso escaso.

value of water is 0.02 to 0.725 dollars per m^3 for industrial water and 0.06 to 0.331 for agricultural use. However, the real prices charged to the industry vary between 0.020 and 0.212 dollars per m^3 . The water price predicted for 2020 varies between 0.270 and 1.132 dollars per m^3 , and for agricultural use from 0.072 to 0.519. For 2030, the industrial use varies between 0.396 and 1.412, and agricultural use between 0.110 and 0.629 dollars per m^3 . This shows that a higher price reflects higher scarcity in the long term.

Jabeen *et al.* (2006) published a study with the objective of estimating the marginal value of irrigation water from three linear models for small, medium and large farms. They obtained an economic price that ranges from 0.0689 to 0.2006 pesos per m^3 in small farms, 0.1317 to 0.2511 in medium ones, and 0.1454 to 0.2817 in large ones; and they concluded that water scarcity affects the intensity of cultivation and the net gain of farms.

The research carried out by Florencio *et al.* (2002) estimated the economic value and well water in the Irrigation District in Alto Río Lerma. Their hypothesis was that fees paid per water concept in the study area do not reflect its true value in scarcity. Florencio *et al.* modeled scenarios with linear programming, simulating water reductions in 18 and 24 %, and they took net prices from 1999 and estimations for 2010. The economic price of water obtained varied between 0.54 and 2.28 pesos per m^3 for superficial water, and between 0.66 and 1.25 for underground water, values that are higher than the prices paid.

In the D044 it is necessary to provide decision criteria for planning in the District in the medium and long term, and to set the bases to reconsider the current fee scheme for the resource, which it is considered does not reflect its value in scarcity. Thus, the objective of this study was to optimize the optimal crop pattern in Irrigation District 044, located in Jilotepec, Estado de México, and to estimate the economic value of water under different scenarios, based on the crop pattern in the past ten years (2000-2009). The research hypothesis is that in the development of agricultural activities in the DR044 resources are underutilized, they can be escalated to higher levels of operation (optimization), and it is possible to value water economically as a scarce resource.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló con información del Distrito de Riego 044, Jilotepec (DR044), para el año agrícola 2008-2009. Se usó información estadística del distrito proporcionada por las autoridades oficiales de la jefatura del Distrito de Riego 044 “Jilotepec” perteneciente a la Dirección Local del Estado de México de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de la Delegación Regional Jilotepec de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de México y el Módulo Único de Riego. Con esta información se diseñó un modelo de programación lineal (MPL) cuyos resultados permiten contrastar las hipótesis y lograr los objetivos planteados.

De acuerdo con Garrido *et al.* (2007), algunos métodos de valoración del recurso agua consisten en un análisis residual, el cual asigna un valor económico al agua, derivado de la diferencia entre el ingreso y los costos asociados a los factores de producción distintos al agua; así como la asignación de precios hedónicos, que consisten en el valor del agua en un medio recreativo; funciones de producción, que utilizan la cantidad total de agua aplicada al cultivo como variable explicativa o independiente, y determinación del valor marginal del agua; valoración contingente, que se basa en la disposición a pagar de los usuarios de agua; y la programación matemática que permite obtener el valor marginal del agua en sistemas de riego con más de un cultivo. Debido a las características del DR044, la programación lineal es la metodología que puede definir distintos escenarios, asignar superficies óptimas de cultivo y determinar el valor marginal del agua en los diferentes escenarios.

La solución matemática de los modelos de programación lineal aplicados a la optimización de una serie de actividades económicas arroja dos resultados principales: a) la solución primal optimiza una función objetivo, en este caso maximiza el ingreso neto de las actividades agrícolas sujetas a las restricciones de recursos y; b) la solución dual cuantifica los valores marginales de los escasos recursos involucrados en la optimización –entre ellos el agua– (Chiang, 1993). Así pues, el precio económico de los recursos, o precio sombra, constituye el valor marginal de esos recursos, y se calcula con la técnica de programación

MATERIALS AND METHODS

The study was performed with information from Irrigation District 044, Jilotepec (DR044), for agricultural year 2008-2009. Statistical information about the district was used, provided by official authorities from the central office of Irrigation District 044 “Jilotepec” that belongs to the Estado de México Local Direction of the National Water Commission (*Comisión Nacional del Agua*, CONAGUA), from the Regional Jilotepec Delegation of the Agriculture, Livestock Production, Rural Development, Fishery and Food Ministry (*Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación*, SAGARPA), the Agricultural/Livestock Development Ministry of Estado de México, and the Unique Irrigation Module. With this information, a linear programming model (LPM) was performed, whose results allow contrasting the hypothesis and achieving the objectives set out.

According to Garrido *et al.* (2007), some valuation methods for the water resource consist in a residual analysis, which assigns an economic value to water derived from the difference between income and costs associated to production factors different from water; also, the assignment of hedonic prices, which consist in the value of water in a recreational medium; production functions that use the total amount of water applied to the crop as an explicative or independent variable, and determination of the marginal water value; contingent valuation, which is based on the willingness to pay by water users; and mathematical programming that allows obtaining the marginal value of water in irrigation systems with more than one crop. Due to the characteristics of the DR044, linear programming is the methodology that can define different scenarios, assign optimal surfaces for cultivation and determine the marginal value of water in the different scenarios.

The mathematical solution of the linear programming models applied to the optimization of a series of economic activities has two main results: a) the primal solution optimizes the objective function, in this case maximizing the net income of agricultural activities subject to resource restrictions; and, b) the dual solution quantifies the marginal values of the scarce resources involved in optimization – among them water– (Chiang, 1993). Therefore, the economic price of resources, or shadow price,

lineal. Una ventaja de la programación lineal es que determina el patrón óptimo de cultivos que maximiza el ingreso de los productores, y con él se calcula el precio económico del agua: los resultados son tan confiables como lo sea la información utilizada (Florencio *et al.*, 2002). Otra forma de medir el precio económico de los recursos lo constituye la productividad marginal de éstos; para ello, se establece una relación funcional del beneficio neto (variable explicada), y el volumen del recurso (variable explicativa); la derivada parcial de la relación funcional beneficio neto, con respecto a la cantidad del recurso utilizado, es la productividad marginal de este recurso (Godínez *et al.*, 2007).

El modelo de programación lineal aplicado al trabajo tiene como función objetivo maximizar el ingreso neto total (INT) de los productores del DR044 sujeto a la disponibilidad de tierra cultivable, agua de riego, mano de obra y restricciones de máximos y mínimos por cultivo, y otros usos no agrícolas como abrevadero y uso doméstico.

Se incluyeron en el modelo 37 actividades (Cuadro 1) y 62 restricciones (11 de tierra cultivable disponible por mes durante el año, 11 de agua disponible por mes, 11 de mano de obra disponible por mes, siete de superficie máxima sembrada por cultivo cíclico y perenes y 22 restricciones de uso del agua para

constitutes the marginal value of these resources and is calculated with the linear programming technique. An advantage of linear programming is that it determines the optimal pattern of crops that maximizes producers' income, and with it, the economic price of water is calculated: the results are as reliable as the information used (Florencio *et al.*, 2002). Another way to measure the economic price of resources is their marginal productivity; for that purpose, a functional relationship of the net benefit (explained variable) and the resource volume (explicative variable) is established; the partial derivative of the net benefit functional relationship, with regards to the amount of the resource used, is the marginal productivity of this resource (Godínez *et al.*, 2007).

The linear programming model applied to the study has the target function of maximizing the total net income (TNI) of producers in the DR044 subject to the availability of arable land, irrigation water, workforce and maximum and minimum restrictions per crop, and other non-agricultural uses such as the water trough and domestic use.

In the model, 37 activities were included (Table 1) and 62 restrictions (11 of available arable land per month during the year, 11 of water available per month, 11 of workforce available per month, seven

Cuadro 1. Actividades del modelo de programación lineal, por ciclo y por plantas perenes.

Table 1. Activities in the linear programming model, per cycle and per perennial plants.

Ciclo	Actividades
Otoño – Invierno	Cultivo y cosecha de avena de noviembre
	Cultivo y cosecha de avena de diciembre
	Cultivo y cosecha de avena de enero
	Cultivo y cosecha de maíz de febrero
	Cultivo y cosecha de trigo de noviembre
Primavera – Verano	Cultivo y cosecha de avena de marzo
	Cultivo y cosecha de avena de abril
	Cultivo y cosecha de avena de mayo
	Cultivo y cosecha de trigo de abril
	Cultivo y cosecha de maíz de marzo
	Cultivo y cosecha de maíz de abril
	Cultivo y cosecha de maíz de mayo
Perenes	Cultivo y cosecha de pasto y pradera de noviembre
	Cultivo y cosecha de pasto y pradera de diciembre
	Cultivo y cosecha de frutales

Fuente: elaboración propia con información del MPL. ♦ Source: authors' elaboration with information from the MPL.

finos no agrícolas, que incluyen abrevadero y uso doméstico). Las actividades de cultivo y cosecha son 15 y 22 los de uso de agua no agrícola. De las primeras, 12 corresponden a cultivos cíclicos y tres a perennes. Con estas actividades y restricciones se construyó un modelo base (MPLBase) que valida y optimiza el patrón real de cultivos durante el año agrícola 2008-2009.

El modelo incluye j (1,2,..., j) actividades productivas para el ciclo O-I, k (1,2,..., k) para el ciclo P-V y l (1,2,..., l) para cultivos perennes; más m (1,2,..., m) actividades de disposición de agua para fines no agrícolas de abrevadero (A), y n (1,2,..., n) actividades de disposición de agua para fines no agrícolas: consumo doméstico (B). La función objetivo maximiza el Ingreso Neto Total (INT) de los productores del DR044, y es igual a la sumatoria de la contribución total de cada actividad incluida en el modelo por cada ciclo productivo, más cultivos perennes, más la contribución de las actividades de disposición no agrícolas. Con la metodología de Programación Lineal (Hillier y Lieberman, 1997; Hillier y Lieberman, 2002; Beneke y Winterboer, 1984; Bronson, 1993; Taha, 2004), el modelo matemático definido es:

$$\begin{aligned} \text{MaxINT}_{DR044} &= \sum_{j=1}^J O-I c_j x_j + \sum_{k=1}^K P-V c_k x_k + \\ &\sum_{l=1}^L PER c_l x_l + \sum_{m=1}^M NAA c_m x_m + \sum_{n=1}^N NAB c_n x_n \end{aligned} \quad (1)$$

Está sujeta a:

$$\sum_{j=1}^J a_j x_j + \sum_{k=1}^K a_k x_k + \sum_{l=1}^L a_l x_l \leq A_t \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J b_j x_j + \sum_{k=1}^K b_k x_k + \sum_{l=1}^L b_l x_l \leq B_t \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J d_j x_j + \sum_{k=1}^K d_k x_k + \sum_{l=1}^L d_l x_l \leq D_t \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j x_j \leq A_{O-I} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K a_k x_k \leq A_{P-V} \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^L a_l x_l \leq A_{PER} \quad (7)$$

of maximum surface sown per cyclic and perennial crop, and 22 restrictions of water use for non-agricultural purposes, including water trough and domestic use). There are 15 cultivation and harvest activities, and 22 non-agricultural water uses. Of the first, 12 correspond to cyclic crops and three to perennial. With these activities and restrictions, a base model (MPLBase) was constructed that validates and optimizes the real crop pattern during the agricultural year of 2008-2009.

The model includes j (1,2,..., j) productive activities for cycle O-I, k (1,2,..., k) for cycle P-V and l (1,2,..., l) for perennial crops; plus m (1,2,..., m) activities of water use for non-agricultural purposes like water trough (A), and n (1,2,..., n) activities of water use for non-agricultural purposes like domestic consumption (B). The target function maximizes the Total Net Income (TNI) of producers in the DR044, and is equal to the addition of the total contribution of each activity included in the model for each productive cycle, plus perennial crops, plus the contribution of activities for non-agricultural use. With the Linear Programming methodology (Hillier and Lieberman, 1997; Hillier and Lieberman, 2002; Beneke and Winterboer, 1984; Bronson, 1993; Taha, 2004), the mathematical model defined is:

$$\text{MaxINT}_{DR044} = \sum_{j=1}^J O-I c_j x_j + \sum_{k=1}^K P-V c_k x_k + \sum_{l=1}^L PER c_l x_l + \sum_{m=1}^M NAA c_m x_m + \sum_{n=1}^N NAB c_n x_n \quad (1)$$

$$\sum_{l=1}^L PER c_l x_l + \sum_{m=1}^M NAA c_m x_m + \sum_{n=1}^N NAB c_n x_n$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^J a_j x_j + \sum_{k=1}^K a_k x_k + \sum_{l=1}^L a_l x_l \leq A_t \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J b_j x_j + \sum_{k=1}^K b_k x_k + \sum_{l=1}^L b_l x_l \leq B_t \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J d_j x_j + \sum_{k=1}^K d_k x_k + \sum_{l=1}^L d_l x_l \leq D_t \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j x_j \leq A_{O-I} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^K a_k x_k \leq A_{P-V} \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M e_m x_m = E_t \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N f_n x_n = F_t \quad (9)$$

$$x_j, x_k, x_p, x_m, x_n \geq 0 \quad (10)$$

La función objetivo (ecuación 1) maximiza el ingreso neto total del DR044 a partir de la contribución individual de cada una de las actividades, j, k, l, m y n ; donde c_j, c_k, c_p, c_m, c_n representan el ingreso neto de dichas actividades, $y, x_j, x_k, x_p, x_m, x_n$ las cantidades óptimas en superficie o volumen para cada actividad.

Las ecuaciones 2, 3 y 4 establecen las restricciones de tierra, agua y mano de obra. A_t, B_t, D_t son las disponibilidades totales mensual de cada recurso; a_j, b_j, c_j son los coeficientes de tierra (a), agua (b) y mano de obra (c) para los cultivos de Otoño-Invierno (O-I) y a_p, b_p, c_p para los cultivos de Primavera-Verano (P-V) y a_r, b_r, c_r para los perennes.

Las ecuaciones 5, 6 y 7 establecen las restricciones de máximos de superficie por cultivo en cada ciclo y perenne; $A_{O-I}, A_{P-V}, A_{PER}$ es la superficie máxima cultivable por cultivo cíclico y perenne.

Las ecuaciones 8 y 9 son las restricciones de agua para fines no agrícola; e_m, f_n son los coeficientes de consumo de agua en actividades no agrícolas, abrevadero (e) y doméstico (f), y E_t, F_t son los volúmenes mensuales de agua requeridos para dichas actividades.

Los cultivos analizados corresponden al patrón histórico de los últimos diez años agrícolas en el Distrito, los cuales son: maíz grano, avena forrajera, trigo grano y perennes (pasto-pradera y frutales), considerando diferentes fechas de siembra para el maíz grano, avena forrajera y trigo grano. Los ingresos netos de las actividades se obtuvieron como la diferencia entre el ingreso bruto (tomando precios medios rurales de 2009 (SIAP-SAGARPA, 2009; SAGARPA, 2008)) menos los costos de producción (con precios de insumos de 2009) sin incluir los costos de agua, tierra y mano de obra. Los coeficientes de tierra, agua y mano de obra para los cultivos se obtuvieron de instituciones relacionadas con el sector agropecuario como SAGARPA, CONAGUA y SEMARNAT. Las

$$\sum_{l=1}^L a_l x_l \leq A_{PER} \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^M e_m x_m = E_t \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N f_n x_n = F_t \quad (9)$$

$$x_j, x_k, x_p, x_m, x_n \geq 0 \quad (10)$$

The objective function (equation 1) maximizes the net total income of the DR044 from the individual contribution of each one of the activities, j, k, l, m and n , where c_j, c_k, c_p, c_m, c_n represent the net income of those activities, and x_j, x_k, x_p, x_m, x_n the optimal amounts in surface or volume for each activity.

Equations 2, 3, and 4 establish the land, water and workforce restrictions. A_t, B_t, D_t are the total monthly availabilities of each resource; a_j, b_j, c_j are the land (a), water (b) and workforce (c) coefficients for Fall-Winter (O-I) crops, a_p, b_p, c_p for Spring-Summer crops (P-V), and a_r, b_r, c_r for perennials.

Equations 5, 6, and 7 establish the restrictions for maximum surface per crop in each cycle and perennial; $A_{O-I}, A_{P-V}, A_{PER}$ is the maximum arable surface per cyclic and perennial crop.

Equations 8 and 9 are the water restrictions for non-agricultural water uses; e_m, f_n are the water consumption coefficients in non-agricultural activities, water trough (e) and domestic (f), and E_t, F_t are the monthly volumes of water required for those activities.

The crops analyzed correspond to the historical pattern in the last ten agricultural years of the District, which are: maize in grain, fodder oats, wheat in grain and perennials (grass-pasture and fruit trees), taking into account different sowing dates for maize in grain, fodder oats and wheat in grain. The net incomes of activities were obtained as the difference between the gross income (taking average rural prices from 2009 (SIAP-SAGARPA, 2009; SAGARPA, 2008)) minus the costs of production (with input prices from 2009) without including water, land and workforce costs. The land, water and workforce coefficients for crops were obtained from institutions related with the agricultural/livestock sector such as SAGARPA, CONAGUA and SEMARNAT. The maximum

restricciones de máximos y mínimos se definieron a partir del patrón histórico que se ha llevado en los diez últimos ciclos en el distrito. La disponibilidad de agua en el modelo correspondió al volumen bruto extraído y consumido por mes en el año agrícola 2008-2009, como se muestra en la figura 1.

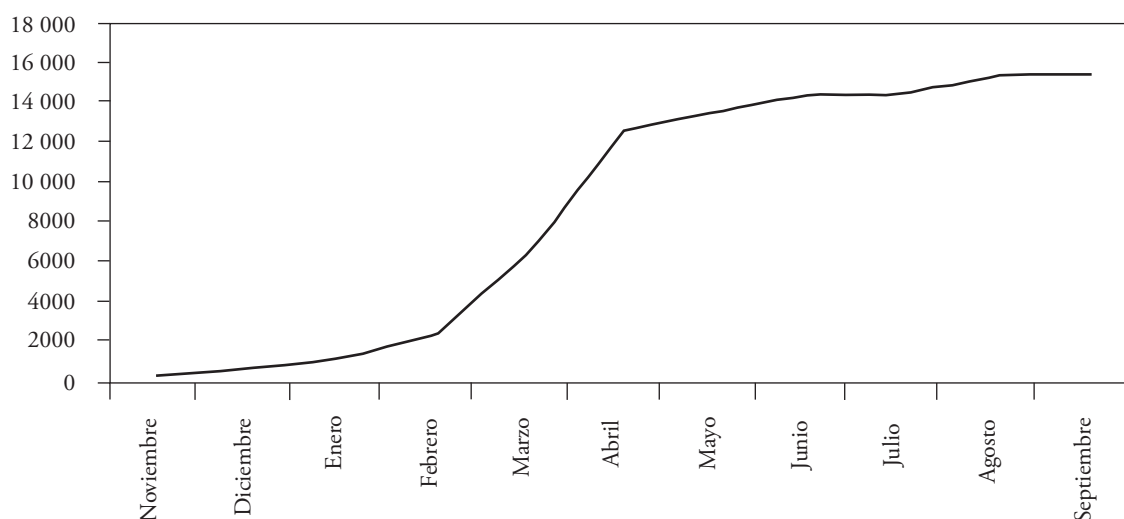
Se plantearon siete escenarios, tomando como punto de partida el modelo base. El escenario MPL01 simula disponibilidad mensual constante de agua en 17.918 millones de m³ debido a que es la extracción promedio anual de la presa de almacenamiento (Danxhó) del distrito en los últimos 10 ciclos agrícolas; MPL02 duplica la superficie destinada a cultivos perennes, los cuales resultaron los más rentables en la optimización del Distrito; MPL03 disminuye 10 % el agua en el ciclo primavera-verano, donde la disponibilidad de agua es mayor; MPL04 incrementa en 10 % el agua en el ciclo otoño-invierno, meses en los que hay escasez de agua; MPL05 disminuye 20 % la superficie de tierra cultivable y el volumen de agua total, y aumenta en la misma proporción el agua para uso doméstico, simulando con esto el crecimiento urbano en la región; MPL06 incrementa 20 % los costos de producción, y MPL07 elimina las restricciones de máximos por cultivo, permitiendo que el modelo asigne la superficie con base en el ingreso neto.

El software utilizado en la estimación del modelo fue para Win Quantitative System Business (WinQSB) 2009. Ver. 2.0.

and minimum restrictions were defined from the historical pattern that has been recorded during the last ten cycles in the district. Water availability in the model corresponded to the gross volume extracted and consumed per month in the agricultural year 2008-2009, as shown in Figure 1.

Seven scenarios were set out, taking as a starting point the base model. The MPL01 scenario simulates constant water monthly availability at 17.918 million m³, because it is the annual average extraction from the storage dam (Danxhó) in the district for the past 10 agricultural cycles; MPL02 duplicates the surface destined to perennial crops, which were the most profitable in the District optimization; MPL03 decreases water in 10 % during the Spring-Summer cycle, when water availability is greater; MPL04 increases water in 10 % during the Fall-Winter cycle, months when there is water scarcity; MPL05 decreases arable land surface and total water volume in 20 %, and increases water for domestic use in the same proportion, thus simulating urban growth in the region; MPL06 increases by 20 % the production costs; and MPL07 eliminates the restrictions over maximums per crop, allowing the model to assign the surface based on the net income.

The software used in estimating the model was Win Quantitative System Business (WinQSB) 2009. Ver. 2.0.



Fuente: elaboración propia con información de la Jefatura del Distrito de Jilotepec. (CONAGUA, 2009a).

Figura 1. Consumo total de agua por mes en el año agrícola 2008 – 2009. (volumen en millares de m³).

Figure 1. Total water consumption per month in the 2008 – 2009 agricultural year (volume in thousands of m³).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Distrito de Desarrollo Rural DR044 se sembraron, en el ciclo 2008-2009, los cultivos de maíz para grano, avena forrajera, trigo para grano, pastopradera y frutales; estos cultivos generaron en dicho ciclo un valor de la producción de 4.8 millones en el escenario real; con una superficie cultivada aproximada de 1735 ha. De acuerdo con los resultados del modelo de programación lineal base (MPLBase), los recursos del escenario real aún no están bien asignados, debido a que la superficie cultivada se puede incrementar a 3749.44 ha, y generar un valor de la producción de 6.0 millones de pesos. Los cultivos que incrementan sustancialmente la superficie sembrada son maíz grano, avena forrajera, trigo y los frutales (Cuadro 2). Los resultados anteriores concuerdan con los encontrados por Godínez *et al.* (2007) para la Comarca Lagunera, en donde con una asignación óptima de los recursos en los cultivos el ingreso de los productores aumenta 17.0 %; al pasar de 1179 a 1426 millones de pesos.

En el análisis de los escenarios establecidos por cultivo, se tiene que, para el maíz, en el escenario real se cultivan 1123.25 ha en el ciclo P-V (siembra en marzo o abril); esta superficie se incrementará hasta 2754.21 ha en el módulo base de programación lineal (MPLBase). Si se considera una disponibilidad de agua uniforme en todos los meses (de 17.92 mm³: escenario MPL01), el maíz ocuparía la superficie total disponible de hasta 4128.29 ha. En el escenario MPL02, que simula una disminución de 10.00 % en

RESULTS AND DISCUSSION

In the Rural Development District DR044, the crops sown in the cycle 2008-2009 were maize for grain, fodder oats, wheat in grain, grass-pasture and fruit trees; these crops generated a production value of 4.8 million during that cycle in the real scenario, with an approximate cultivated surface of 1735 ha. According to results from the linear programming model base (MPLBase), resources from the real scenario had not been well assigned yet, because the cultivated surface can be increased to 3749.44 ha, and generate a production value of 6.0 million pesos. The crops that increased substantially the surface sown are maize in grain, fodder oats, wheat and fruit trees (Table 2). These results coincide with those found by Godínez *et al.* (2007) for the Comarca Lagunera zone, where with an optimal allotment of resources in crops, the producers' income increases 17.0 %, from 1179 to 1426 million pesos.

In the analysis of scenarios established per crop, results are that, for maize, 1123.25 ha are cultivated in the real scenario during the PV cycle (sowing in March or April); this surface increases to 2754.21 ha in the base module for linear programming (MPLBase). If uniform water availability is considered for all the months (of 17.92 mm³: scenario MPL01), maize would occupy the total available surface of up to 4128.29 ha. In the MPL02 scenario, which simulates a decrease of 10.00 % in water availability during the PV cycle, the surface cultivated with maize would decrease to 2420.99 ha. In the MPL07 scenario,

Cuadro 2. Superficie asignada a las actividades agrícolas, real y simulaciones. (superficie en hectáreas).

Table 2. Surface assigned to agricultural activities, real and simulations (surface in hectares).

Cultivos	2009 real	MPLBase	MPL01	MPL02	MPL03	MPL04	MPL05	MPL06	MPL07
Avena ene	80.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	—
Avena mar	80.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	—
Trigo nov	0.75	48.99	80.00	—	48.99	73.52	—	80.00	—
Trigo abr	0.75	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	3968.55
Maíz abr	1123.25	2754.21	4128.29	2724.85	2420.99	2737.12	2121.70	—	—
Maíz may	270.50	316.24	102.58	282.16	286.38	333.32	222.40	—	—
Pasto nov	30.00	20.65	150.00	37.73	20.65	16.48	28.23	9.83	—
Pasto dic	120.00	129.35	—	157.33	129.35	133.52	119.78	111.64	—
Frutales	30.00	50.00	50.00	100.00	50.00	50.00	50.00	50.00	714.96
Total	1735.25	3749.44	4940.87	3732.07	3386.36	3773.96	2972.11	681.47	4683.51

Fuente: elaborado con información de las salidas de los MPL en WinQSB (2009). ♦ Source: elaborated with information from the MPL results in WinQSB (2009).

la disponibilidad de agua en el ciclo P-V, la superficie cultivada con maíz disminuiría a 2420.99 ha. En el escenario MPL07, en el cual el modelo determina el valor óptimo del patrón de cultivos sin restricciones de superficies máximas a asignar; en este caso, debido a que el maíz aporta un ingreso neto menor al productor, este cultivo es excluido de la solución óptima (Cuadro 2). Los resultados concuerdan con los obtenidos por Florencio *et al.* (2002), quienes indican que ante una reducción en la disponibilidad de agua, los cultivos con baja rentabilidad y alto consumo de agua reducirán su superficie cultivada.

En el año agrícola 2009, en ambos ciclos (PV y OI), se sembraron únicamente 0.75 ha de trigo. En el programa óptimo base, la superficie cultivada con trigo aumentó a 49 en OI y a 80 ha en PV. Los resultados anteriores se mantienen en el ciclo PV en los distintos escenarios, y se incrementa a 73.52 ha en el ciclo OI en el escenario MPL04 (con 10 % de incremento en la disponibilidad de agua). Sin embargo, el escenario MPL07 es el que permite que el modelo asigne la superficie a las mejores alternativas con el ingreso neto, la superficie cultivada con trigo en P-V se incrementa a 3968.00 ha; eliminando del plan de producción a los cultivos de maíz, avena y pastos. Los resultados anteriores contrastan con los de Salazar *et al.* (2012), en donde la asignación óptima de cultivos deja fuera al trigo en la Costa de Hermosillo, por otros cultivos de mayor utilidad económica, como la vid, la nuez y la calabaza; situación similar reportan Florencio *et al.* (2002) en el Distrito de Riego Alto Río Lerma, donde cultivos como el trigo, maíz, sorgo y cebada reducen la superficie cultivada ante una situación de escasez de agua. El incremento en la superficie sembrada con trigo en el DR044 obedece a que el agua es un recurso subutilizado, ya que, de acuerdo con las autoridades que operan el distrito, apenas se utiliza 50 % del agua almacenada en la presa Danxhó, y al realizar un plan óptimo, este cultivo de mayor densidad económica sustituye a otros de menor rentabilidad.

El cultivo de la avena forrajera en PV y OI es de 31.5 y 80.0 ha respectivamente en el plan real del año 2009 (Cuadro 2). Sin embargo, este cultivo incrementa la superficie cultivada a 150.0 ha en PV y 200.0 ha en OI en el plan óptimo, y dichas superficies se mantienen invariantes en los cuatro primeros escenarios; salvo en el escenario MPL07, el cual permite que el modelo PL asigne libremente los recursos a las

where the model determines the optimal value of the crop pattern without restrictions of maximum surfaces to be assigned, this crop is excluded from the optimal solution (Table 2), in this case because maize contributes a lower net income to the producer. The results agree with those obtained by Florencio *et al.* (2002), who indicate that in face of a reduction in water availability, crops with low profitability and high water consumption would reduce their cultivated surface.

During the 2009 agricultural year, in both cycles (PV and OI), only 0.75 ha of wheat were sown. In the optimal base program, the surface cultivated with wheat increased to 49 ha in OI and 80 in PV. These results are maintained during the PV cycle under different scenarios, and are increased to 73.52 ha in the OI cycle under scenario MPL04 (with 10 % of increase in water availability). However, the MPL07 scenario is the one that allows the model to assign the surface to the best alternatives with the net income, and the surface cultivated with wheat in PV increases to 3968.00 ha, eliminating maize, oats and grass crops from the production plan. These results contrast those by Salazar *et al.* (2012), where the optimal allotment of crops does not include wheat in the coast of Hermosillo, in exchange for other crops of greater economic utility such as grapevine, walnut and squash; a similar situation is reported by Florencio *et al.* (2002) in the Alto Río Lerma Irrigation District, where crops such as wheat, maize, sorghum and barley reduce the surface cultivated when there is a situation of water scarcity. The increase in the surface sown with wheat in DR044 is due to the fact that water is an under-utilized resource, since, according to the authorities that operate the district, barely 50 % of the water stored in the Danxhó dam is used, and when carrying out an optimal plan, this crop of greater economic density substitutes others of less profitability.

Cultivation of fodder oats in PV and OI is 31.5 and 80.0 ha, respectively, in the real plan for year 2009 (Table 2). However, this crop increases the surface cultivated to 150.0 ha in PV and 200.0 ha in OI in the optimal plan, and these surfaces are maintained without variation in the first four scenarios; with the exception of scenario MPL07, which allows the PL model to assign resources freely to the more profitable economic alternatives; cultivation of fodder oats is excluded in both cycles of the ideal plan. The

alternativas económicamente más rentables; el cultivo de la avena forrajera es excluido en ambos ciclos del plan óptimo. Los resultados anteriores son congruentes con los encontrados por Salazar *et al.* (2012) y Florencio *et al.* (2002), quienes indican que cultivos con menor rentabilidad (ingreso neto menor) y mayor consumo de agua quedarán fuera del plan óptimo ante una asignación: en ese caso se encuentran cultivos como maíz (*Zea mays*), sorgo (*Sorghum vulgare*), cebada (*Hordeum vulgare*) y trigo (*Triticum aestivum*); en este caso la avena forrajera (*Avena sativa*) estará en esa situación, por la semejanza de su proceso de producción con la cebada.

Para los cultivos perennes, en este caso durazno (*Prunus persica*), la superficie cultivada en el DR044 en 2009 fue de 50.0 ha (Cuadro 2), superficie que se mantiene tanto en el plan óptimo como en los seis primeros escenarios. Sin embargo, en el escenario 7 (MPL07), el que asigna los recursos de manera libre a la mejor alternativa económica de rentabilidad, la superficie cultivada con durazno se incrementa hasta 714.96 ha. Este resultado es congruente con los encontrados por Salazar *et al.* (2012), quienes para la Costa de Hermosillo encontraron que en las asignaciones óptimas ante escenarios de reducción del agua disponible se incrementa el cultivo de uva (*Vitis vinifera*) y nuez (*Juglans regia*) [además de la calabaza (*Cucurbita pepo*)], por ser cultivos de mayor ingreso neto e incluso son cultivos para la exportación.

Precio económico o precio sombra del agua

El precio económico o precio sombra representa el valor en que se incrementaría el ingreso neto si se dispusiera de una unidad adicional de agua, siempre y cuando se lleve a cabo el patrón de cultivos propuestos por el modelo. Este toma el valor de cero cuando el agua no se emplea en su totalidad, es decir, que el agua para riego sobrante habrá de considerarse como una mercancía gratis. En este trabajo el precio sombra del agua se utiliza como un estimador de su precio (Godínez *et al.*, 2007).

En el Cuadro 3 se muestran los precios económicos del agua por mil metros cúbicos (mm^3); el valor de estos precios se obtuvo con la estimación del valor del producto marginal de este recurso (VPM_e), el cual tiene su base en el ingreso neto de los cultivos, es decir, a mayor ingreso neto será mayor el VPM_e

previous results agree with those found by Salazar *et al.* (2012) and Florencio *et al.* (2002), who indicate that crops with less profitability (lower net income) and higher water consumption would be outside the optimal plan when allotted: crops like maize (*Zea mays*), sorghum (*Sorghum vulgare*), barley (*Hordeum vulgare*) and oats (*Triticum aestivum*) are such a case; in this case, fodder oats (*Avena sativa*) will be in this situation, because of the similarity of its production process with barley.

For perennial crops, in this case peach (*Prunus persica*), the surface cultivated in the DR044 in 2009 was 50.0 ha (Table 2), a surface that is both in the ideal plan and in the first six scenarios. However, in scenario 7 (MPL07), which assigns resources freely to the best economic alternative for profitability, the surface cultivated with peach increases to 714.96 ha. This result agrees with those found by Salazar *et al.* (2012), who for the coast of Hermosillo found that in optimal allotments with a reduction of available water, the cultivation of grape (*Vitis vinifera*) and walnut (*Juglans regia*) [in addition to squash (*Cucurbita pepo*)] increases, because these are crops of higher net income and are even crops for export.

Economic price or shadow price of water

The economic price or shadow price represents the value at which the net income would increase if there was an additional unit of water available, as long as the crop pattern proposed by the model is used. This takes into account the value of zero when water is not used in its totality; that is, the excess irrigation water should be considered as free merchandise. In this study, the shadow price of water is used as an estimator of its price (Godínez *et al.*, 2007).

Table 3 shows the economic prices of water per one thousand cubic meters (mm^3); the value of these prices was obtained with the estimation of the marginal product value of this resource (VPM_e), which has its basis in the net income of crops, that is, the VPM_e of water will be higher as the net income is greater, and therefore, the willingness to pay for the resource will be higher.

Thus, it was observed that in the months of December, February, April and May positive economic prices were obtained (Table 3); they are higher during the month of December, when there is some scarcity of the resource combined with the

Cuadro 3. Precios económicos del agua en las simulaciones realizadas (precio en pesos por 1000 m³).
Table 3. Economic prices of water in the simulations performed (price in pesos per 1000 m³).

Mes	MPLBase	MPL01	MPL02	MPL03	MPL04	MPL05	MPL06	MPL07
Agua diciembre	2535.31	–	2890.92	2535.31	2535.31	2890.92	959.48	–
Agua febrero	–	–	–	–	–	–	–	5716.94
Agua abril	27.87	27.87	27.87	27.87	27.87	27.87	–	1581.84
Agua mayo	211.31	211.31	211.31	211.31	211.31	211.31	–	792.53

Fuente: elaborado con información de las salidas de los MPL en WinQSB (2009). ♦ Source: elaborated with information from the MPL results in WinQSB (2009).

del agua y, por tanto, será mayor la disponibilidad a pagar por el recurso.

Así, se observó que en los meses de diciembre, febrero, abril, y mayo se obtuvieron precios económicos positivos (Cuadro 3); siendo mayores en el mes de diciembre, cuando se presenta cierta escasez del recurso combinado con las necesidades de riego en cultivos de invierno y perennes (avena, trigo y frutales). El mayor precio económico se alcanzó en febrero (\$5716.94 por mm³), cuando se deja que el modelo asigne las superficies de acuerdo con el ingreso neto. Los resultados anteriores coinciden con los encontrados por Florencio *et al.* (2002) para el Distrito de Riego del Alto Río Lerma, quienes encontraron que el agua tuvo precios sombra positivos para los meses de enero, abril, mayo y junio.

Al desagregar el precio económico del MPLBase, y haciendo la asignación a los cultivos por ciclo y mes, se tienen los siguientes resultados: a) en el ciclo Otoño-Invierno (diciembre) sobresalen los cultivos de pasto-pradera y trigo; el primero de ellos con un VPMg del agua de riego que oscila entre 1452.88 y 4169.75 pesos/ha/riego; b) en diciembre el VPMg del agua de riego es de 4169.75 asignado a pradera, toma este valor dado que en este mes el modelo asigna la mayor superficie al cultivo de pasto y pradera (129.35 ha) y además, este cultivo compite por el agua con el trigo que también tiene un precio neto relativamente alto, y asigna toda la superficie de tierra disponible para su cultivo; c) en contraste, la cuota por ha/riego para pradera es de 100 pesos y se encuentran por debajo del VPMg obtenido, ésta no refleja el valor real de escasez del agua en el ciclo otoño-invierno, y en particular en diciembre. Al trigo para grano se le atribuye 1338.38 pesos/ha/riego, por arriba de los 100 pesos/ha/riego establecido como la cuota

irrigation needs for Winter and perennial crops (oats, wheat and fruit trees). The highest economic price was reached in February (\$5716.94 per mm³), when the model is allowed to assign surfaces according to the net income. These results coincide with those found by Florencio *et al.* (2002) for the Alto Río Lerma Irrigation District, who found that water had positive shadow prices for the months of January, April, May and June.

When disaggregating the economic price of the MPLBase, and performing the allotment of crops per cycle and month, the following results are obtained: a) in the Fall-Winter cycle (December) the grass-pasture and wheat crops stand out; the first with a VPMg of irrigation water that ranges between 1452.88 and 4169.75 pesos/ha/irrigation; b) in December the VPMg of irrigation water is 4169.75 assigned to pasture, taking this value since for this month the model assigns the greatest surface to cultivation of grass and pasture (129.5 ha) and, in addition, this crop competes for water with wheat that also has a relatively high net price and assigns all the land surface available to its cultivation; c) in contrast, the quota per ha/irrigation for pasture is 100 pesos and is found under the VPMg obtained, it does not reflect the real value of water scarcity during the Fall-Winter cycle, and particularly in December. Wheat in grain is attributed with 1338.38 pesos/ha/irrigation, above the 100 pesos/ha/irrigation established as the user fee (Table 4). These results agree with those found by Salazar *et al.* (2012) in the coast of Hermosillo, where economic prices of water are almost three times higher than those charged in the real scenario.

For February, the economic price is 5315.27 pesos per mm³, number that is attributed primarily to the cultivation of fruit trees. Under this scenario peach cultivation has a payment capacity of up to 17

Cuadro 4. Distribución del precio económico del agua del MPLBase en el ciclo otoño-invierno por cultivos (precio en pesos)
Table 4. Distribution of the economic price of water for the MPLBase during the Fall-Winter cycle per crop (price in pesos).

Cultivo	Demanda de agua (%)	Precio por mm ³	Precio por m ³	Precio por ha por riego	Cuotas cobradas
Diciembre [§]					
Pradera noviembre	9.15	231.92	0.2319	665.62	100.00
Pradera diciembre	57.31	1452.88	1.4529	4169.75	100.00
Trigo noviembre	20.00	506.96	0.5070	1338.38	100.00
Febrero ^{§§}					
Frutales	92.97	5315.27	5.3153	17 274.64	161.00

Notas: mes de diciembre: [§]mes de diciembre: cálculos sobre el VPMg de 2535.31. ^{§§}mes de febrero: cálculos sobre el VPMg de 5716.94 del MPL07. ♦ Notes: month of December: [§]month of December: calculations on the VPMg of 2535.31. ^{§§}month of February: calculations on the VPMg of 5716.94 from the MPL07.

Fuente: elaborado con información de las salidas de los MPL en WinQSB (2009). ♦ Source: elaborated with information from the MPL results in WinQSB (2009).

a los usuarios. (Cuadro 4). Los resultados anteriores coinciden con los encontrados por Salazar *et al.* (2012) en la Costa de Hermosillo, donde los precios económicos del agua son casi tres veces superiores a los cobrados en el escenario real.

Para febrero, el precio económico es de 5315.27 pesos por mm³, cifra que se atribuye principalmente al cultivo de frutales. Bajo este escenario el cultivo del durazno tiene una capacidad de pago hasta de 17 724.64 pesos/ha/riego, debido a que el agua está limitada a 2499.08 mm³, y dicho cultivo demanda 92.97 % de este total utilizando el resto para los demás usos (doméstico y abrevadero). El cultivo de frutales tiene un precio neto relativamente alto, 24 816.67 pesos/ha, lo que explica el alto valor marginal que se le da al agua escasa en este mes en particular (Cuadro 4). Los resultados anteriores son coincidentes con los encontrados por Florencio *et al.* (2002) para el Distrito del Alto Río Lerma, donde el precio del agua en septiembre es excesivamente elevado, debido a la restricción del recurso en el cultivo de la fresa, cuyo ingreso neto es elevado (\$236 000 por ha), lo que origina que el precio sombra se eleve.

En el ciclo primavera-verano, el precio económico del agua de riego en abril fue de 27.87 pesos por mm³ (Cuadro 3), en todos los escenarios propuestos, a excepción del MPL07, en el que su escasez llevó a un precio económico de 1581.84 pesos por mm³. En ese mes el cultivo sobresaliente fue maíz grano, que en el MPLBase ocupó 2754.21 ha y 82.65 % del agua para riego extraída, y tiene un precio económico de 23.03 pesos por mm³, lo cual a su vez lleva a un precio de 87.30 pesos/ha/riego, cifra por arriba de las cuota de

724.64 pesos/ha/irrigation, because water is limited to 2499.08 mm³ and this crop demands 92.97 % of the total, using the remainder for the other uses (domestic and water trough). The cultivation of fruit trees has a relatively high net price, 24 816.67 pesos/ha, which explains the high marginal value that scarce water is given in this month in particular (Table 4). These results coincide with those found by Florencio *et al.* (2002) for the Alto Río Lerma District, where the water price in September is extremely high, due to the restriction of the resource for strawberry production, whose net income is high (\$236 000 per ha), which makes the shadow price increase.

During the Spring-Summer cycle, the economic price of irrigation water in April was 27.87 pesos per mm³ (Table 3), under all scenarios proposed with the exception of MPL07, where its scarcity led to an economic price of 1581.84 pesos per mm³. In this month the outstanding crop was maize in grain, which in the MPLBase occupied 2754.21 ha and 82.65 % of the water for irrigation extracted, and it has an economic price of 23.03 pesos per mm³, which in its turn leads to a price of 87.30 pesos/ha/irrigation, number above the fee of 80.50 pesos/ha/irrigation (Table 5); thus, the resource is undervalued. For this month, the surfaces destined to other crops are relatively low in comparison with maize, and given their low contribution to the value of the program, they have a reduced economic price (Table 5).

In May, the economic price of irrigation water is higher than the price in April, given the greater scarcity of this resource and its use in competitive

80.50 peso/ha/riego (Cuadro 5), subvalorando así el recurso. En este mes las superficies destinadas a otros cultivos son relativamente bajas en comparación con el maíz, y dada su baja contribución al valor del programa, tienen un precio económico reducido (Cuadro 5).

En mayo, el precio económico del agua de riego es superior al precio de abril, dada la mayor escasez de este recurso y su empleo en cultivos competitivos. El cultivo de mayor demanda agua es el maíz cultivado en abril, al cual se le atribuye un VPMg del agua de riego por 160.31 pesos por mm^3 ; seguido por el maíz cultivado en mayo, con 18.41 pesos por mm^3 . En el primer caso, debido a que, la mayor parte de la superficie asignada a maíz, el MPL la establece en abril, aunque existen otros cultivos establecidos en otros meses que también demandan agua de riego, las superficies asignadas son relativamente bajas en relación con el maíz. De estos valores se deriva que en el caso para maíz en abril, su precio económico por ha/riego es de 607.57 pesos, y en mayo de 68.84 pesos;

The crop of highest water demand is maize cultivated in April, to which a VPMg of irrigation water of 160.31 pesos per mm^3 is attributed, followed by maize cultivated in May, with 18.41 pesos per mm^3 . In the first case, because the greater part of the surface assigned to maize is established by the MPL in April, although there are other crops established in other months that also demand irrigation water, but the surfaces assigned are relatively low in comparison to maize. From these values the result is that in the case of maize in April, its economic price per ha/irrigation is 607.57 pesos, and in May 68.84 pesos; this is because the fee paid by producers, of 80.50 pesos/ha/month, is below this value attributed to water used in maize during this month (Table 5). The marginal product value of water for the maize crop is higher than the fee paid by producers, which indicates that this crop has a higher capacity for payment for the water it consumes, since it is more important in terms of surface cultivated. These results follow the same behavior pattern described

Cuadro 5. Distribución del precio económico del agua del MPLBase en el ciclo primavera-verano por cultivos (precio en pesos).
Table 5. Distribution of the economic price of water for the MPLBase during the Spring-Summer cycle per crop (price in pesos).

Cultivo	Demanda de agua (%)	Precio por mm^3	Precio por m^3	Precio por ha por riego	Cuota cobradas
Abril [§]					
Avena Ene	3.71	1.03	0.0010	3.22	100.00
Avena Mar	4.94	1.38	0.0014	4.30	100.00
Trigo Nov	1.02	0.29	0.0003	0.75	100.00
Trigo Abr.	1.67	0.47	0.0005	1.23	100.00
Maíz Abr.	82.65	23.03	0.0230	87.30	80.50
Pradera Nov	0.39	0.11	0.0001	0.26	100.00
Pradera Dic.	2.47	0.69	0.0007	1.66	100.00
Frutales	1.05	0.29	0.0003	0.77	161.00
Mayo ^{§§}					
Avena Ene	3.45	7.28	0.0073	22.72	100.00
Avena Mar	4.60	9.71	0.0097	30.30	100.00
Trigo Abr.	1.56	3.29	0.0033	8.68	100.00
Maíz Abr.	75.87	160.31	0.1603	607.57	80.50
Maíz May.	8.71	18.41	0.0184	68.84	80.50
Pradera Nov	0.36	0.76	0.0008	1.82	100.00
Pradera Dic.	2.26	4.78	0.0048	11.38	100.00
Frutales	0.96	2.02	0.0020	5.25	161.00

Notas: [§]mes de abril: Cálculos sobre el VPMg de 27.87. ^{§§}mes de mayo: cálculos sobre el VPMg de 211.31. ♦ Notes: [§]month of April: calculations on the VPMg of 27.87. ^{§§}month of May: calculations on the VPMg of 211.31.

Fuente: elaborado con información de las salidas de los MPL en WinQSB (2009). ♦ Source: elaborated with information from the MPL results in WinQSB (2009).

resultado de que la cuota pagada por los productores, de 80.50 pesos por hectárea por mes, se encuentra por debajo de este valor atribuido al agua utilizada en maíz en este mes (Cuadro 5). El valor del producto marginal del agua en el cultivo de maíz es superior a la cuota pagada por los productores, lo que indica que dicho cultivo, al ser más importante en cuanto a superficie cultivada, tiene una mayor capacidad de pago por el agua que consume. Los resultados anteriores siguen el mismo patrón de comportamiento esbozado por Florencio *et al.* (2002), quienes encontraron que para el Distrito de Riego del Alto Río Lerma, los precios económicos del agua aplicada al cultivo de granos (maíz y trigo), son relativamente menores que los correspondientes a hortalizas [brócoli (*Brassica oleracea*) y fresa (*Fragaria vesca*)], aunque aún siguen siendo mayores que los precios efectivamente pagados por el riego por gravedad o bombeo.

Valor del programa

En relación con el valor del programa, la asignación de recursos disponibles en el Distrito de Riego 044 en el año agrícola 2008-2009 llevó a un ingreso neto total del distrito por debajo del óptimo económico, de acuerdo con el resultado del MPL. Una asignación óptima en el modelo base (MPLBase) llevaría a un valor neto total del Distrito de siete millones de pesos, en contraste con 4.8 millones en el escenario real. Se observó que aún con la total disponibilidad de agua (MPL01), el valor del programa aumentaría en aproximadamente 1.2 millones en relación al modelo base. Una proporción similar se obtiene al simular un aumento de 100 % en la superficie destinada a perennes (MPL02), lo que indica el impacto positivo de los perennes en el valor óptimo. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Godínez *et al.* (2007) quienes para la Comarca Lagunera encontraron que con una asignación óptima de cultivos mediante la programación lineal, el patrón óptimo arroja un ingreso de 17.0 % mayor que el del escenario real.

Aumentando la disponibilidad de agua en 10 % en el ciclo otoño-invierno (MPL04), el aumento en el valor óptimo es poco significativo en relación con el modelo base. En contraste, una disminución de 10 % del agua en el ciclo primavera-verano, cuando se cultiva el grueso de la superficie, tiene un impacto de aproximadamente un millón de pesos con relación

by Florencio *et al.* (2002), who found that for the Alto Río Lerma Irrigation District the economic prices of water applied to the cultivation of grains (maize and wheat) are relatively lower than those for vegetables [broccoli (*Brassica oleracea*)] and for strawberry (*Fragaria vesca*), although they are still higher than the prices effectively paid for gravity or pump irrigation.

Program value

With regards to the program value, the allotment of available resources in Irrigation District 044 during the 2008-2009 agricultural year led to a total net income for the district below the economic optimal, according to results from the MPL. An optimal allotment in the base model (MPLBase) would lead to a total net value of the District of seven million pesos, in contrast with the 4.8 million in the real scenario. It was observed that even with total water availability (MPL01), the value of the program would increase approximately 1.2 million with regards to the base model. A similar proportion is obtained when simulating an increase of 100 % on the surface destined to perennials (MPL02), which indicates the positive impact of perennials on the ideal value. These results agree with those obtained by Godínez *et al.* (2007) who, for the Comarca Lagunera, found that with an optimal allotment of crops through linear programming, the optimal pattern results in an income 17.0 % higher than the real scenario.

Increasing the water availability in 10 % during the Fall-Winter cycle (MPL04), the increase in the optimal value is slightly significant with regards to the base model. In contrast, a decrease of 10 % in water during the Spring-Summer cycle, when the bulk of the surface is cultivated, has an impact of approximately one million pesos compared to the base model. It is observed that the increase in production costs of 20 % (MPL06) has a relatively high impact on the ideal value, decreasing it to 2.8 million.

Only under the ideal scenario (MPL07), where distribution and allotment of land is done through the MPL, the program value would increase to 43.3 million pesos; however, this would imply a productive reconversion, eliminating maize and substituting it for wheat and increasing the surface of fruit trees.

a el modelo base. Se observa que el aumento en los costos de producción en 20 % (MPL06), tiene un impacto relativamente grande sobre el valor óptimo, disminuyéndolo a 2.8 millones.

Sólo bajo el escenario ideal (MPL07), donde la distribución y asignación de la tierra se hace a través del MPL, el valor del programa crecería a 43.3 millones de pesos; sin embargo, esto implicaría una reconversión productiva, eliminar el maíz y sustituirlo por trigo y aumentar la superficie de frutales.

En el escenario real el ingreso neto *per cápita* es de 1657 pesos, y en el escenario óptimo de 2400 pesos. El ingreso se incrementa bajo el supuesto de mayor extracción de agua o bajo el supuesto de incrementar la superficie destinada a perennes, MPL01 y MPL03, respectivamente. Un incremento sustancial se daría con reconversión productiva hacia los cultivos de frutales y trigo, alcanzando un ingreso *per cápita* de aproximadamente 14 800 pesos.

Los resultados de este análisis, utilizando la programación lineal, muestran que los recursos productivos están subutilizados en el DDR 044 de Jilotepec, estado de México. Una asignación óptima de recursos y cultivos harían crecer sustancialmente la superficie cultivada, el ingreso neto de los productores, y la disponibilidad a incrementar el pago del recurso agua.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de programación lineal, los recursos productivos (tierra, agua y mano de obra) están subutilizados en el DDR 044 de Jilotepec, Estado de México. Una asignación óptima incrementaría 100 % la superficie cultivada, en 30 % el ingreso de los productores, y en casi 300 % la disponibilidad a pagar el agua de riego.

De acuerdo con la rentabilidad de los cultivos (ingreso neto), una asignación óptima de los recursos sin restricciones, excluiría del plan de producción aquellos cultivos menos rentables (avena, maíz, pastos y praderas), e incrementaría los de mayor rentabilidad (trigo y frutales).

Los precios económicos del agua obtenidos en el análisis, mostraron que las cuotas pagadas por los productores por riego son menores que los precios sombra de este recurso, por lo que se recomienda incrementar gradualmente las cuotas del agua, con el fin de darle un manejo más sustentable a este vital líquido.

Under the real scenario, the net income *per cápita* is 1657 pesos, and in the optimal scenario, 2400 pesos. The income increases under the assumption of greater water extraction or under the assumption of increasing the surface destined to perennials, MPL01 and MPL03, respectively. A substantial increase would occur with productive reconversion to fruit trees and wheat crops, reaching a *per cápita* income of approximately 14 800 pesos.

The results of this analysis, using linear programming, show that productive resources are underutilized in the DDR 044, in Jilotepec, Estado de México. An optimal allotment of resources and crops would make the surface cultivated increase substantially, as well as the net income for producers, and the willingness to increase payment for the water resource.

CONCLUSIONS

According to the linear programming analysis, productive resources (land, water and workforce) are underutilized in DDR 044 in Jilotepec, Estado de México. An optimal allotment would increase the cultivated surface in 100 %, the producers' income in 30 %, and the willingness to pay irrigation water in almost 300 %.

Based on the profitability of crops (net income), an optimal allotment of resources without restrictions would exclude from the production plan those crops that are less profitable (oats, maize, grass and pastures), and would increase those of higher profitability (wheat and fruit trees).

The economic prices of water obtained from the analysis showed that the fees paid by irrigation producers are lower than the shadow prices for this resource, which is why gradually increasing the water fees is recommended, with the goal of having a more sustainable management of this vital liquid.

- End of the English version -

LITERATURA CITADA

- Beneke, R. R., y R. Winterboer. 1984. Programación lineal. Aplicación a la agricultura. Traductor Pares, O. J. Ed. Aedos-Barcelona. España. 222 p.
- Bronson, R. 1993. Investigación de Operaciones. Traducción Fournier G. M. L. Ed. Mc Graw Hill, México. 324 p.

- Caballer, V., y N. Guadalajara. 1998. Valoración económica del agua de riego. Ed. Mundi-prensa. España. p.193.
- Chiang A. C. 1993. Métodos fundamentales de economía matemática. Ed. Mc Graw Hill 3^{er} edición.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2009a. Avance del Plan de Riegos por mes. Jefatura del Distrito de Riego Jilotepec. México. (Documento de circulación interna).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2009b. Régimen de almacenamiento y extracciones de la presa Danxho. Jefatura del Distrito de Riego de Jilotepec. México. (Documento de circulación interna).
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Agua y cultivos: logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. <http://www.fao.org/docrep/005/Y3918S/y3918s00.htm> (abril 2009).
- Florencio, C. V., A. R. Valdivia, y C. A. Scott. 2002. Productividad del agua en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma. *Agrociencia*. 36-004:483-493.
- Garrido, C. A., E. Palacios V., J. Calatrava L., J. Chávez M., y A. Exebio G. 2004. La importancia del valor, costo y precios de los recursos hídricos en su gestión. Proyecto Regional de Cooperación Técnica para la formación de Economía y Políticas Agrarias y de Desarrollo Rural en América Latina. FODEPAL. Colaboración de Universidad Politécnica de Madrid - Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas - Universidad Politécnica de Cartagena. 49 p.
- Godínez, M. L., J. A. García S., M. Fortis H., J. S. Mora F., M. A. Martínez D., R. Valdivia, A., y J. Hernández J. 2007. Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*. Vol. 25, Núm.1. pp: 51-59.
- Hillier, F. S., y J. Lieberman G. 1997. Introducción a la investigación de operaciones. Traducción González O. M. A. 6a edición. Ed. Mc Graw-Hill Interamericana Editores S.A. de C. V. México. 998 p.
- Hillier, F. S., y J. Lieberman G. 2002. Investigación de operaciones. 7a ed. Ed. McGraw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V. México. 925 p.
- Jabeen, S., M. Ashfaq, and B. Ahmad I. 2006. Linear program modeling for determining the value of irrigation water. *J. Agric. Social Sci.* 2-2:101-105.
- Liu, X., X. Chen, and S. Wang. 2007. Evaluating and predicting shadow prices of water resources in China and its nine major river basins. *Water Resource Manage.* Ed. Springer Science.. 23:1467-1478
- Martín de Santa Olalla, M. F., P. López F., y A. Calera B. 2005. Agua y agronomía. Ed. Mundi-prensa. España. 310 p.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2008. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). www.siap.sagarpa.gob.mx/sistemas/siacon (Noviembre 2009).
- Salazar, A. A., L. J. Moreno V., y A. N. Lutz L. 2012. Agricultura y manejo sustentable del acuífero de la Costa de Hermosillo. *Región y Sociedad*. No. 3. pp: 155 – 179.
- SIAP-SAGARPA (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2009 Avance de siembras y cosechas. www.siap.sagarpa.gob.mx (Octubre 2009).
- Taha, H., A. 2004. Investigación de operaciones. Séptima edición. Ed. Pearson, Prentice Hall. University of Arkansas, Fayetteville. México. 848 p.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 2003. Informe de las Naciones Unidas sobre Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Agua para todos. Agua para la vida. unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s (abril 2009).
- Win Quantitative System Business (WinQSB) 2009. Ver. 2.0.