

# A CALIBRATED AGRICULTURAL WATER DEMAND MODEL FOR THREE REGIONS IN NORTHERN BAJA CALIFORNIA

## UN MODELO CALIBRADO DE DEMANDA DE AGUA PARA USO AGRÍCOLA PARA TRES REGIONES EN EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA

Josué Medellín-Azuara<sup>1\*</sup>, Richard E. Howitt<sup>2</sup>, Cynthia Waller-Barrera<sup>3</sup>, Leopoldo G. Mendoza-Espinosa<sup>3</sup>, Jay R. Lund<sup>1</sup>, Joseph E. Taylor<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering. (josuemedellin@gmail.com), (jrlund@ucdavis.edu). <sup>2</sup>Agricultural and Resource Economics. (rehowitt@ucdavis.edu), (jetaylor@ucdavis.edu). University of California, Davis, One Shields Avenue Davis, CA, 95616 USA. <sup>3</sup>Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California. Km. 107 Carretera Ensenada-Tijuana, Ensenada, Baja California, México (lmendoza@uabc.mx).

### ABSTRACT

Irrigated agriculture is the largest water user in many regions, and agricultural water use efficiency and consumption has been studied by several authors. This paper provides a framework and application of economic valuation of water for agriculture in three regions in northern Baja California, Mexico, namely Guadalupe, Maneadero and Mexicali Valleys. Positive mathematical programming (PMP), a deductive valuation technique, was the framework used for this estimation using water delivery data reported by the National Water Commission in Mexicali, production costs and cultivated area, production factors use from the Agriculture Ministry (SAGARPA); and other data from previous studies. Analysis of the results shows that marginal economic water value in Mexicali is at least 2.6 times the water price paid by farmers. Guadalupe and Maneadero with higher value agriculture, have higher marginal economic values of water than Mexicali, albeit closer to their water costs. Small shortages increase this economic value for farmers. Estimated price elasticities of irrigation water for each turn-out are inelastic for all regions and within the range of most previous studies. Policies aimed to reduce water consumption by decreasing current pumping subsidies are encouraged.

**Key words:** Mathematical programming, Baja California, economic water valuation.

### INTRODUCTION

Estimating economic water demand for irrigation has increasing importance for both policymakers and stakeholders. Without knowing the economic value of irrigation water use, water pricing policies can give inappropriate incentives and foster overexploitation of the resource (Tsur *et al.*, 2004). In this paper the economic value of water for irrigation in Baja California, México, is estimated and discussed

\*Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: February, 2008. Aproved: January, 2009.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 43: 83-96. 2009.

### RESUMEN

La agricultura de riego es la actividad que más agua usa en muchas regiones, y la eficiencia y consumo del uso agrícola del agua ha sido estudiada por varios autores. Este estudio provee un marco conceptual y la aplicación de la valoración económica del agua para uso agrícola en tres regiones del norte de Baja California, México, a saber, los valles de Guadalupe, Maneadero y Mexicali. El marco de referencia usado para esta estimación fue la programación matemática positiva (PMP), una técnica de valoración deductiva usando datos del suministro de agua reportados por la Comisión Nacional del Agua en Mexicali, costos de producción y área cultivada, uso de factores de producción de la Secretaría de Agricultura (SAGARPA), y otros datos de estudios anteriores. El análisis de los resultados muestra que el valor económico marginal del agua en Mexicali es al menos 2.6 veces el precio del agua que pagan los agricultores. Guadalupe y Maneadero, que tienen un mayor valor de producción agrícola, tienen valores económicos marginales del agua mayores que Mexicali, aunque más cercanos a sus costos de agua. Pequeños déficits de agua aumentan este valor económico para los agricultores. Las elasticidades precio del agua estimadas para irrigación de cada resultado son inelásticas para todas las regiones y dentro del rango de la mayoría de los estudios previos. Se recomiendan las políticas dirigidas a reducir el consumo de agua al disminuir los subsidios actuales para la extracción.

**Palabras clave:** Programación matemática, Baja California, valoración económica del agua.

### INTRODUCCIÓN

Estimar la demanda económica del agua para irrigación tiene una creciente importancia tanto para funcionarios o responsables de políticas como para los grupos e individuos interesados. Sin conocimiento del valor económico del agua para irrigación, las políticas que establecen los precios del agua pueden dar incentivos inadecuados y promover la sobreexplotación del recurso (Tsur *et al.*, 2004). En

using an empirically calibrated deductive valuation technique called positive mathematical programming or PMP (Howitt, 1995). In this setting, farms or groups of similar farms use irrigation water to maximize profit. For profit-seeking farmers, the marginal economic value of water use exceeds the current water cost. This application of PMP extends the Statewide Wide Agricultural Production model (SWAP) for USA, California. SWAP is used to provide economic penalty functions for the California-wide hydro-economic model CALVIN (Jenkins *et al.*, 2004).

The agricultural regions of Guadalupe, Maneadero and Mexicali are presented as case studies, using data on water deliveries. This application of PMP offers improvements over previous models used in México (Florencio-Cruz *et al.*, 2002; Howitt and Medellín-Azuara, 2008; Tsur *et al.*, 2004), with a less restrictive production function and greater spatial disaggregation. Results contrast agricultural water value among these three agricultural regions. The irrigation delivery valuation model developed here supports the more recent hydro-economic model Baja CALVIN<sup>[4]</sup>.

### Irrigation water valuation techniques

Economic valuation of irrigation water has been studied since the 1960s (e.g. Moore and Hedges, 1963). In inductive approaches water is a variable input, whereas in the deductive approaches water is hypothesized as a limiting factor (Young, 2005). New approaches using generalized maximum entropy claim to establish a continuum between those two broad valuation categories (Heckelei and Wolff, 2003).

In a meta-analysis of irrigation water demand literature, Scheierling *et al.* (2006) found that price-elasticities of demand for irrigation water averaged  $-0.48$  with a median of  $-0.16$ , both in the inelastic range. Compared to inductive techniques, deductive techniques have been reported to give higher estimates of economic water value (Scheierling *et al.*, 2006; Young, 2005). The deductive PMP technique (Howitt, 1995), used in this study, has several advantages over traditional econometric (inductive) methods to estimate economic values of water. First, the PMP cost function calibrates exactly to observed values of production output and factor use, which provides a more deductive and production-theoretic model structure. Second, PMP adds flexibility to the profit function by relaxing the restrictive linear cost assumption. Finally, PMP does not require large datasets as many econometric methods, and thus enables price variability among disaggregated estimates.

este trabajo, se estima y discute el valor económico del agua para irrigación en Baja California, México, usando una técnica de valoración deductiva calibrada empíricamente denominada programación matemática positiva o PMP (Howitt, 1995). En este entorno, las granjas o grupos de granjas similares usan el agua para irrigación para maximizar sus ganancias. Para los agricultores que buscan utilidades, el valor económico marginal del agua excede el costo actual del agua. Esta aplicación de la PMP extiende el modelo de Producción Agrícola del estado de California, EE.UU. (SWAP, por sus siglas en inglés). El SWAP se usa para proporcionar funciones de penalización económicas para el modelo hidro-económico CALVIN empleado en todo el estado de California (Jenkins *et al.*, 2004).

Las regiones agrícolas de Guadalupe, Maneadero y Mexicali se presentan como estudios de caso, usando datos de suministro de agua. Esta aplicación de la PMP ofrece mejoras sobre modelos previamente utilizados en México (Florencio-Cruz *et al.*, 2002; Howitt y Medellín-Azuara, 2008; Tsur *et al.*, 2004), con una función de producción menos restrictiva y mayor desagregación espacial. Los resultados contrastan el valor agrícola del agua entre estas tres regiones agrícolas. El modelo de valoración de suministro de agua aquí desarrollado apoya el modelo hidro-económico más reciente, Baja CALVIN<sup>[4]</sup>.

### Técnicas de valoración del agua para irrigación

La valoración del agua para irrigación ha sido estudiada desde los años 1960 (Moore y Hedges, 1963). En enfoques inductivos, el agua es un dato variable, mientras que en los enfoques deductivos se entiende hipotéticamente al agua como un factor limitante (Young, 2005). Nuevos enfoques que usan la máxima entropía generalizada dicen establecer un continuo entre estas dos amplias categorías de valoración (Heckelei y Wolff, 2003).

En un meta-análisis de la literatura sobre la demanda del agua para irrigación, Scheierling *et al.* (2006) encontraron que las elasticidades precio de la demanda del agua para irrigación tuvieron un promedio de  $-0.48$  con una mediana de  $-0.16$ , ambos en el rango de inelasticidad. En comparación con las técnicas inductivas, se ha reportado que las técnicas deductivas arrojan estimaciones más altas del valor económico del agua (Scheierling *et al.*, 2006; Young, 2005). La técnica deductiva de PMP (Howitt, 1995), usada en este estudio, tiene varias ventajas sobre los métodos econométricos

<sup>4</sup> Viewed 31 January 2008 ❖ Consultado el 31 de enero, 2008 en: <<http://cee.engr.ucdavis.edu/BajaCALVIN>> .

## MATERIALS AND METHODS

PMP is a self-calibrating three-step procedure (Howitt, 1995). First, a linear program for profit maximization is solved. In addition to traditional resource and non-negativity constraints, calibration constraints restrict land use and crop mix to observed values. The second step solves for the parameters of a quadratic cost function using Lagrange multipliers from calibration constraints from the first step, and the production function from first order conditions. Derivations and mathematical formulations of these parameters are presented in Medellín-Azuara *et al.* (2007). The third step incorporates the recently calibrated functions into a non-linear profit maximization program, with constraints on resource use. Economic values of water are obtained by restricting water availability for each region. A multi-region and multi-crop program, for a profit maximizing representative farmer, is assumed for each crop and group of farms. Heterogeneity in production is addressed for both crops and farm groups. The unit of analysis is a group of farm producers with similar production characteristics in a region.

The production function is represented by the Constant Elasticity of Substitution (CES) functional form shown in equation (1):

$$Y_{gi} = \tau_{gi} \left[ \sum_j \beta_{gij} X_{gij}^{-\rho} \right]^{-1/\rho} \quad (1)$$

where sub-index  $g$  corresponds to the agricultural region,  $i$  refers to crop type, and  $j$  to production factors or inputs. The model inputs are land, labor, water and supplies.  $Y_{gi}$  is the output for crop  $i$  in region or group  $g$ . The scale parameter of the CES production function is  $\tau_{gi}$ , and share parameters for the resources for each crop are given by  $\beta_{gij}$ . The decision variable  $X_{gij}$  denotes use of factor  $j$  in production of crop  $i$  of region  $g$ . The elasticity of substitution  $\sigma$  is given by  $\sigma = 1/(1+\rho)$ . For this model, the elasticity of substitution is the same for all crops and all farm groups.

### First step: linear program

The linear program with calibration constraints is as follows:

$$\text{Max} \prod_{x_{gj,land} \geq 0} = \sum_g \sum_j (v_{gj} y_{ld_{gj}} - \sum_i \omega_{gji} a_{gji}) x_{gi,land} \quad (2)$$

$$\sum_i a_{gij} x_{gi,land} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (3)$$

$$x_{gi,land} \leq \tilde{x}_{gi,land} + \varepsilon \quad (4)$$

$$x_{gi,land} \geq \tilde{x}_{gi,land} - \varepsilon \quad (5)$$

Equation (2) is the objective function. Decision variables are  $x_{gi,land}$ , planted hectares for region or group  $g$  and crop  $i$ . The marginal revenue of crop  $i$  in region  $g$  is  $v_{gi}$ . Average yields and average variable costs are given by  $y_{ld_{gj}}$  and  $\omega_{gji}$ . Leontief

(inductivos) tradicionales usados para estimar los valores económicos del agua. Primero, la función de costo de PMP se calibra exactamente a los valores observados de producción agrícola y el uso de factores productivos, lo cual proporciona una estructura del modelo más deductiva y mejor ajustada a la teoría de funciones de producción. Segundo, la PMP añade flexibilidad a la función de utilidad agrícola al relajar el restrictivo supuesto de una función de costo lineal. Finalmente, la PMP no requiere de juegos de datos muy grandes, como muchos métodos econométricos, y así permite la variabilidad de precios entre las estimaciones desagregadas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La PMP es un procedimiento auto-calibrado en tres etapas (Howitt, 1995). Primero, se soluciona un programa lineal para la maximización de utilidades. Además de los tradicionales restricciones en los recursos o factores de producción y las de no-negatividad, las restricciones de calibración restringen el uso de la tierra y la mezcla de cultivos a los valores observados. En la segunda etapa se soluciona para los parámetros de una función cuadrática de costo, usando multiplicadores Lagrange a partir de las restricciones de calibración obtenidas en la primera etapa, y de la función de producción a partir de las condiciones de primer orden. Las derivaciones y formulaciones matemáticas de estos parámetros se presentan en Medellín-Azuara *et al.* (2007). El tercer paso incorpora las funciones recientemente calibradas en un programa no lineal de maximización de utilidades, con restricciones en el uso de recursos. Los valores económicos del agua se obtienen al restringir la disponibilidad del agua para cada región. Se asume el uso de un programa de multi-región y multi-cultivo, para un agricultor representativo que maximiza ganancias, para cada cultivo y grupo de granjas. Se considera a la heterogeneidad en la producción tanto para cultivos como para grupos de fincas. La unidad de análisis es un grupo de productores agrícolas con características de producción similares en una región.

La función de producción es representada por la forma funcional del tipo Elasticidad Constante de Substitución (ECS) que se muestra en la ecuación (1):

$$Y_{gi} = \tau_{gi} \left[ \sum_j \beta_{gij} X_{gij}^{-\rho} \right]^{-1/\rho} \quad (1)$$

donde el subíndice  $g$  corresponde a la región agrícola,  $i$  se refiere al tipo de cultivo, y  $j$  a los factores o insumos de producción. Los insumos para el modelo son tierra, mano de obra, agua e insumos varios.  $Y_{gi}$  es el output para el cultivo  $i$  en la región o grupo  $g$ . El parámetro de escala de la función de producción ECS es  $\tau_{gi}$ , y los parámetros compartidos para los recursos de cada cultivo están dados por  $\beta_{gij}$ . La variable de decisión  $X_{gij}$  denota el uso del factor  $j$  en la producción del cultivo  $i$  de la región  $g$ . La elasticidad de

coefficients  $a_{gij}$  are given by the ratio of total input usage to land. For this step, production inputs are normalized to land.

The resource constraint is given by (3), in which production factors  $j$  are limited by the parameter  $b_{gj}$  in every region. Sets (4) and (5) represent upper and lower bounds of calibration, and the  $\tilde{x}$  is the observed value of resources usage, whereas  $\varepsilon$  is a small tolerance for decoupling.

**Second step: parameterization of a non-linear cost function**

The cost function is given by (6):

$$TC_{gi}(x_{gi,land}) = \alpha_{gi}x_{gi,land} - 1/2\gamma_{gi}x_{gi,land}^2 \quad (6)$$

where  $\alpha_{gi}$  and  $\gamma_{gi}$  are the intercept and the slope of a linear marginal cost function for crop  $i$  in region  $g$ . Since average costs  $\omega_{gij}$  in the objective function (2) are variable, and assuming marginal revenue equals marginal cost,  $\gamma_{gi} = \frac{v_{gi}yld_{gi}}{\eta_{gi}\tilde{x}_{gi,land}}$ , where  $\eta_{gi}$  is the price-elasticity of supply for crop  $i$  in region  $g$ . Average cost is given by  $AC_{gi}(x_{gi,land}) = \alpha_{gi} - 1/2\gamma_{gi}\tilde{x}_{gi,land}$ ,  $\forall g$  and  $i$ , where  $AC_{gi} = \omega_{gi,land}$ . So,  $\alpha_{gi} = \omega_{gi,land} + \lambda_{2,gi,land} + \gamma_{gi}\tilde{x}_{gi,land}$ ,  $\forall g$  and  $i$ , where  $\lambda_{2,gi,land}$  is the dual value of the binding calibration constraints set in (4) and (5).

**Third step: non-linear program**

This step is to solve a non-linear constrained profit maximization program. The objective function is:

$$Max_{x \geq 0} \prod = \sum_g \sum_i v_{gi}Y_{gi} - \sum_g \sum_i (\alpha_{ig}x_{gi,land} + \gamma_{gi}x_{gi,land}^2) - \sum_g \sum_i \sum_{j \neq land} (\omega_{igj}x_{gij}) \quad (7)$$

subject to:  $\sum_i a_{gij}x_{gij,land} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (8)$

$$xm_{gm} \leq \sum_i met_{gim}x_{gi,water} \quad \forall g, m \quad (9)$$

$$\sum_m xm_{gm} \leq Avail \cdot b_{water,g} \quad \forall g \quad (10)$$

$Y_{gi}$  is defined by the production function in equation (1) with parameters  $\tau_{gi}$  and  $\beta_{gij}$  derived in Medellín-Azuara *et al.*, (2007). The second term is the PMP calibrated cost function. Constraint set (8) is as in (3) with all  $J$  resources (not just subset  $K$ ). A new constraint set on monthly water use is included. Variable  $xm_{gm}$  in (9) is monthly water use in region  $g$  in month  $m$ .

Three underlying assumptions are worth discussing. First, water is interchangeable among crops within a region. Second, a farm group (or region) maximizes annual profits and water is allocated across the growing season to equalize its monthly marginal

substitución  $\sigma$  está dada por  $\sigma = 1/(1+\rho)$ . Para este modelo, la elasticidad de sustitución es la misma para todos los cultivos y todos los grupos de granjas.

**Primera etapa: programa lineal**

El programa lineal con restricciones de calibración es el siguiente:

$$Max_{x_{gi,land} \geq 0} \prod = \sum_g \sum_j (v_{gj}yld_{gj} - \sum_i \omega_{gij}a_{gij})x_{gi,land} \quad (2)$$

$$\sum_i a_{gij}x_{gi,land} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (3)$$

$$x_{gi,land} \leq \tilde{x}_{gi,land} + \varepsilon \quad (4)$$

$$x_{gi,land} \geq \tilde{x}_{gi,land} - \varepsilon \quad (5)$$

La ecuación (2) es la función objetivo. La variable de decisión es  $x_{gi,land}$ , que se refiere a las hectáreas plantadas por región o grupo  $g$  y el cultivo  $i$ . El ingreso marginal del cultivo  $i$  en la región  $g$  es  $v_{gi}$ . Los rendimientos promedio y los costos variables promedio están dados por  $yld_{gj}$  y  $\omega_{gij}$ . Los coeficientes de Leontieff  $a_{gij}$  están dados por la razón del uso total de factores de producción con respecto al área de tierra cultivada. Para esta etapa, todos los factores de producción se normalizan con respecto a tierra cultivada.

La restricción de los factores de recursos (o factores de producción) está dada por (3) donde los factores de producción  $j$  están limitados por el parámetro  $b_{gj}$  en todas las regiones. Los grupos (4) y (5) representan los límites superiores e inferiores de calibración, y la  $\tilde{x}$  es el valor observado de utilización de recursos, mientras que  $\varepsilon$  es una pequeña tolerancia al desacoplamiento.

**Segunda etapa: parametrización de una función no lineal de costo**

La función de costo está dada por (6):

$$TC_{gi}(x_{gi,land}) = \alpha_{gi}x_{gi,land} - 1/2\gamma_{gi}x_{gi,land}^2 \quad (6)$$

donde,  $\alpha_{gi}$  y  $\gamma_{gi}$  son el intercepto y la pendiente de una función lineal marginal de costo para el cultivo  $i$  en la región  $g$ . Dado que los costos promedios  $\omega_{gij}$  en la función objetivo (2) son variables, y suponiendo que el ingreso marginal es igual al costo,  $\gamma_{gi} = \frac{v_{gi}yld_{gi}}{\eta_{gi}\tilde{x}_{gi,land}}$ , donde  $\eta_{gi}$  es la elasticidad precio del suministro para el cultivo  $i$  en la región  $g$ . El costo promedio está dado por  $AC_{gi}(x_{gi,land}) = \alpha_{gi} - 1/2\gamma_{gi}\tilde{x}_{gi,land}$ ,  $\forall g$  e  $i$ , donde  $AC_{gi} = \omega_{gi,land}$ . Por lo tanto,  $\alpha_{gi} = \omega_{gi,land} + \lambda_{2,gi,land} + \gamma_{gi}\tilde{x}_{gi,land}$ ,  $\forall g$  e  $i$ , donde  $\lambda_{2,gi,land}$  es el valor dual de las restricciones de calibración activas establecidas en (4) y (5).

products. Third, a region picks the crop mix that maximizes profits. This assumes sufficient water storage and internal water distribution capacity. In constraint set (10)  $b_{water,g}$  corresponds to  $b_{gj}$  for water in 98(8). The parameter  $Avail_g$  is used to obtain shadow values of water by varying  $0 < Avail_g \leq 1$ . Constraint set (10) assumes that yearly water is available in a limited amount for every region or group. Less realistically, it also implies that water is not re-traded across groups or regions under the basic calibration assumptions.

#### Dataset for the Positive Mathematical Programming application

The model requires several datasets on planted hectares, factor usage, and market prices of products and factors in the study region. Datasets for this model were assembled using data from SAGARPA (2006) for Guadalupe and Maneadero and previous work by Medellín-Azuara *et al.* (2007) for Mexicali from digital sources and reports from SAGARPA, CNA and Baja California State agencies. Production factors were land, water, labor and supplies.

For 2000 to 2005, the Agriculture Ministry (SAGARPA<sup>[5]</sup>) database provides information on planted land by crop, yields, mean rural price, and production value by municipality. CNA water delivery reports in Irrigation District 014 (ID 014) complemented the database.

The municipality of Mexicali covers most of ID 014. Part of ID 014 is in San Luis Río Colorado, Sonora. The valleys of Guadalupe and Maneadero, in the Ensenada subregion, rely entirely on groundwater and are composites of irrigation units. In Guadalupe, from 28 to 32 million cubic meters (Mm<sup>3</sup>) of water are extracted yearly from the Guadalupe aquifer. About a third of this water is for urban uses in Ensenada and the rest for agriculture (Daesslé *et al.*, 2006).

Cost and production information for the Guadalupe and Maneadero was provided by the regional offices of SAGARPA and CNA. Three years of observations on cultivated land, yields, water, labor, supplies and prices were used. The crop mix in each region is summarized in Table 1. The crop mixes for both agricultural regions account for roughly 82 % of the total water use, so regional water demand functions have to be scaled up to represent total use. The rationale for this assumption is that the highest productive uses of water are well represented by the available crop mixes and should not be part of the remaining 18% of water.

#### Selection of representative crops in Guadalupe and Maneadero

The crops (Table 1) amount to slightly more than 80% of total production, cultivated surface and water consumption. Water consumption was calculated using average water surface applications for each crop and its cultivated surface. Average production costs for Maneadero and Guadalupe are included for 2002-2004. Green onion, vine tomato, flowers and organic tomato have the highest average production costs. Labor required by each type of crop is also included. Labor cost for 2002 and 2003 was US \$9.1 d<sup>-1</sup> and

#### Tercera etapa: programa no lineal

Esta etapa es para solucionar un programa de maximización de ganancias no lineal con restricciones. La función objetivo es:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x \geq 0} \Pi = & \sum_g \sum_i v_{gi} Y_{gi} - \sum_g \sum_i (\alpha_{ig} x_{gi,land} + \gamma_{gi} x_{gi,land}^2) \\ & - \sum_g \sum_i \sum_{j \neq land} (\omega_{igj} x_{gij}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{sujeta a:} \quad \sum_i a_{gji} x_{gi,land} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (8)$$

$$x_{m_{gm}} \leq \sum_i \text{met}_{gim} x_{gi,water} \quad \forall g, m \quad (9)$$

$$\sum_m x_{m_{gm}} \leq \text{Avail} \cdot b_{water,g} \quad \forall g \quad (10)$$

$Y_{gi}$  se define por la función de producción en la ecuación (1) con los parámetros  $\tau_{gi}$  y  $\beta_{gij}$  derivados como en Medellín-Azuara *et al.* (2007). El segundo término es la función de costo calibrada por la PMP. El conjunto de restricciones (8) es como en (3) con todos los recursos  $J$  (no sólo el subconjunto  $K$ ). Se incluye un nuevo conjunto de limitaciones para el uso de agua mensual. La variable  $x_{m_{gm}}$  en (9) es el uso mensual de agua en la región  $g$  durante el mes  $m$ .

Vale la pena discutir tres supuestos fundamentales. Primero, el agua es intercambiable entre los cultivos de una región. Segundo, en un grupo de granjas (o una región) se maximizan las ganancias anuales y el agua se asigna a lo largo de la temporada de cultivo para igualar sus productos marginales mensuales. Tercero, una región elige la mezcla de cultivos que maximiza ganancias. Esto supone suficiente almacenaje de agua y capacidad interna de distribución del agua. En el conjunto de limitaciones (10),  $b_{water,g}$  corresponde a  $b_{gj}$  para el agua en (8). El parámetro  $Avail_g$  se usa para obtener valores sombra del agua al variar  $0 < Avail_g \leq 1$ . El conjunto de limitaciones (10) supone que el agua anual está disponible en cantidad limitada para cada región o grupo de fincas. Siendo menos realistas, también se implica en el modelo que el agua no se vuelve a comerciar entre grupos o regiones bajo los supuestos básicos de calibración.

#### Conjunto de datos para la aplicación de la Programación Matemática Positiva

El modelo requiere varios juegos de datos de hectáreas plantadas, uso de factores y precios de mercado de productos y factores en la región de estudio. Los juegos de datos para este modelo se recopilaron usando las bases de datos de SAGARPA (2006) para Guadalupe y Maneadero y del trabajo anterior realizado por Medellín-Azuara *et al.* (2007) para Mexicali a partir de fuentes digitales y reportes de SAGARPA, CNA y agencias estatales de

<sup>5</sup> Viewed 31 January 2008 ❖ Consultado el 31 de enero, 2008, en: <<http://siap.sagarpa.gob.mx>> .



**Table 1. Land use, production costs, and labor for the selected crop mix in the Maneadero and Guadalupe Valleys.**  
**Cuadro 1. Uso del suelo, costos de producción y mano de obra para la mezcla de cultivos seleccionada en los valles de Maneadero y Guadalupe.**

Crop	Maneadero			Guadalupe		
	Land, ha	Avg. production costs (US\$ ha <sup>-1</sup> )	Labor (jornal ha <sup>-1</sup> )	Land, ha	Avg. production costs (US\$ ha <sup>-1</sup> )	Labor use (jornal ha <sup>-1</sup> )
Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	163	3.66	13	259	4.18	13
Asparagus ( <i>Asparagus officinalis</i> )	64	14.70	71			
Broccoli ( <i>Brassica oleracea</i> )	72	62.16	90			
Flowers (sunflower, daisies, aster) ( <i>Helianthus annuus</i> , <i>Anthemis tinctoria</i> , <i>Aster</i> sp.)	211	76.8	85	47	787.88	90
Grape ( <i>Vitis vinifera</i> )				1403	21.87	50
Green onion ( <i>Allium fistulosum</i> )	104	146.27	104			
Olive ( <i>Olea europaea</i> )	279	14.24	10	981	14.24	10
Pea ( <i>Pisum sativum</i> )	254	40.34	218			
Pepper ( <i>Capsicum</i> sp.)	58	50.45	40	37	50.45	40
Radish ( <i>Raphanus sativus</i> )	84	53.77	70			
Tomato ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	450	112.02	108	216	72.35	150
Zucchini ( <i>Cucurbita pepo</i> )	112	85.40	82	43	85.40	41
Total	1850			2984		2984

US \$10.0 d<sup>-1</sup> for the year 2004 for both agricultural areas. Water extraction cost averaged \$0.14 US m<sup>-3</sup> from SAGARPA, including energy for pumping.

Cumulative values (2004) for the representative crops in each Ensenada region are shown in Tables 2 and 3. For Maneadero, tomatoes cover the most area, followed by olive trees and flowers. Tomatoes provide by far the largest production volume, followed by flowers and onions. Tomatoes have the largest production value, followed by peas and flowers.

**Production costs for Guadalupe and Maneadero**

Variable costs for Guadalupe and Maneadero were calculated using SAGARPA data on costs of soil preparation, sowing, harvest,

Baja California. Los factores de producción fueron tierra, agua, mano de obra y provisiones.

De 2000 a 2005, la base de datos de la Secretaría de Agricultura (SAGARPA<sup>[5]</sup>) provee información sobre la tierra plantada por cultivo, rendimientos, precio promedio rural, y valor de producción por municipio. Se complementó la base de datos con reportes de suministro de agua de la CNA en el Distrito de Riego 014 (DR 014).

El municipio de Mexicali cubre la mayor parte del DR 014. Parte del DR 014 está en San Luis Río Colorado, Sonora. Los valles de Guadalupe y Maneadero, en la subregión de Ensenada, dependen totalmente del agua subterránea y están conformados por unidades de irrigación. En Guadalupe, de 28 a 32 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>) de agua se extraen anualmente del acuífero con el mismo

**Table 2. Selected crops for Maneadero.**  
**Cuadro 2. Cultivos seleccionados para Maneadero.**

Crop	Land use, ha	Production, t	Value US\$1000	Water (1000 m <sup>3</sup> )
Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	489	4453	533	4213 <sup>†</sup>
Broccoli ( <i>Brassica oleracea</i> )	215	2654	1173	1118
Zucchini ( <i>Cucurbita pepo</i> )	336	4158	1424	2080
Green onions ( <i>Allium fistulosum</i> )	312	6163	3940	2122
Peas ( <i>Pisum sativum</i> )	761	5653	6918	4947
Green chili ( <i>Capsicum</i> sp.)	173	3197	1588	1211
Asparagus ( <i>Asparagus officinalis</i> )	193	1047	2769	3551
Flowers (sunflower, daisies, aster) ( <i>Helianthus annuus</i> , <i>Anthemis tinctoria</i> , <i>Aster</i> sp.)	633	6341	4688	2532
Tomato ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	1349	46 126	7858	9170
Olive ( <i>Olea europaea</i> ) trees	837	1080	271	3138
Radish ( <i>Raphanus sativus</i> )	252	3757	1369	1008
Sample total	5546	84 630	32 531	35 089
Production (3-yr)	6526	98 658	41 179	40 976
% Represented	85	86	79	86

<sup>†</sup> This value is low compared to the statewide average applied water for alfalfa.

**Table 3. Selected crops for Guadalupe valley.**  
**Cuadro 3. Cultivos seleccionados para el Valle de Guadalupe.**

Crop	Land use, ha	Production, t	Value US\$1000	Water (1000 m <sup>3</sup> )
Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	777	5952	695	6690 <sup>†</sup>
Zucchini ( <i>Cucurbita pepo</i> )	128	1639	903	818
Green chili ( <i>Capsicum</i> sp.)	110	987	1663	770
Perennial flower (rose, carnation chrysanthemus, arum lily) ( <i>Rosa</i> sp., <i>Dianthus caryophyllus</i> , <i>Chrysanthemum</i> sp., <i>Zantedeschia aethiopica</i> )	141	2849	6817	1015
Tomato (vine) ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	488	5612	10 186	2549
Tomato roma ( <i>Solanum</i> sp.)	82	1181	7175	537
Tomato (organic) ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	77	2000	399	576
Olive ( <i>Olea europaea</i> )	2942	942	286	11 033
Grapes ( <i>Vitis vinifera</i> )	4208	30 206	10 405	22 680
Sample total	8953	51 367	38 530	46 668
Production (3-yr)	10 154	64 273	44 439	56 912
% Represented	82.54	83	79	79

<sup>†</sup> This value is low compared to the statewide average applied water for alfalfa.

pesticide application, technical assistance, etc. This information was used to calculate, according to labor, cost per hectare and supply cost per hectare for each crop. The estimated yearly land rental cost, provided by SAGARPA staff, varied between \$1500 and \$1200 dollars ha<sup>-1</sup> for Guadalupe and Maneadero.

#### Crop mix and costs for Mexicali

The crop mix selected for Mexicali was based on the proportion of total cultivated land (Medellín-Azuara *et al.*, 2007). Water years 2000-2005 had estimated water deliveries. The crop mix for Mexicali (Table 4) covered 182 030 irrigated ha in 2005 (CNA, 2006) and a volume of 1982 MCM yr<sup>-1</sup>. In Table 4 it is shown that crop mix covers roughly 85% of the cultivated land and slightly more than 83% of the water delivered for Mexicali Valley irrigation. Most land and water use data is from the Office of Statistics of Irrigation District 014, through their annual Water Use Report or Informes de Distribución de Aguas. Electronic databases provided information on planted hectares, and monthly water deliveries per crop group and module and water source (surface or groundwater). Monthly water deliveries establish a seasonal water use pattern for the Mexicali valley for each irrigation module.

**Table 4. Crop mix for Mexicali Valley, adapted from Medellín-Azuara *et al.* (2007).**  
**Cuadro 4. Mezcla de cultivos para el Valle de Mexicali, adaptado de Medellín-Azuara *et al.* (2007).**

Crop name	Land use, ha	Yields (t ha <sup>-1</sup> )	Water (1000 m <sup>3</sup> )
Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	28 426	75.5	436 785
Asparagus ( <i>Asparagus officinalis</i> )	2039	4.95	38 645
Canola ( <i>Brassica campestris</i> )	3403	3.4	15 180
Cotton ( <i>Gossypium</i> sp.)	21 917	3.6	266 126
Green onion ( <i>Allium fistulosum</i> )	4488	11.99	33 672
Rye grass ( <i>Lolium</i> sp.)	4763	41.86	38 831
Sorghum grain ( <i>Sorghum</i> sp.)	3224	12.25	27 302
Wheat ( <i>Triticum</i> sp.)	85 775	5.04	792 167
Total	154 035		1 648 708

nombre. Cerca de un tercio de esta agua es para usos urbanos en Ensenada y el resto para fines agrícolas (Daesslé *et al.*, 2006).

La información sobre costo y producción para Guadalupe y Maneadero fue proporcionada por las oficinas regionales de SAGARPA y la CNA. Se usaron tres años de observaciones sobre tierras cultivadas, rendimientos, agua, mano de obra, provisiones y precios. La mezcla de cultivos en cada región se resume en el Cuadro 1. Las mezclas de cultivos para ambas regiones agrícolas representan alrededor de 82 % del total de agua usada, de tal forma que las funciones de demanda de agua regional deben ampliarse en escala para representar el uso total. El fundamento para esta suposición es que los usos más productivos del agua están bien representados por los patrones de cultivo disponibles y no deben ser parte del 18 % restante de agua.

#### Selección de cultivos representativos en Guadalupe y Maneadero

Los cultivos (Cuadro 1) representan poco más de 80 % de la producción total, superficie cultivada y consumo de agua. El consumo de agua se calculó usando el promedio de aplicación superficial de agua para cada cultivo y su área cultivada. Los costos de producción promedio para Maneadero y Guadalupe se incluyen

Factor use and cost information were available from the ID 014, the state office of SAGARPA, and a study on the All American Canal lining (Sosa-Gordillo and Sánchez-López, 2007). Average production costs and mean rural product prices were available for some water years from 2000-2005. Detailed cost information was available only for some crops; however, data for the crop mix for our study (Table 4) was reasonably consistent among state and federal agencies including mean rural prices for the crop output in the base year (SAGARPA, 2006).

The Mean Rural Price for Mexicali and factor usage are summarized in Table 5. Labor is as in Table 1. Water price from 2001 to 2005 averaged US \$7.00/1000 m<sup>3</sup> in Mexicali. Supplies costs (not itemized) are an aggregation of the remaining variable costs. These were approximated from the SAGARPA's total variable cost not related to water, labor or land rental.

The 22 modules for the Mexicali Valley were aggregated into four groups based on geographical location, land quality and primary water sources. The groups were named, East of the Colorado River, Main Valley, West Valley and Groundwater. Details on module aggregation appear in Medellín-Azuara *et al.* (2007). The East group modules are in the state of Sonora. The economic value of water for this group is expected to be higher than average for the district, with high value crops such as asparagus and green onion.

A second group of modules has higher use of groundwater, including modules near the USA-Mexico border with Arizona where at least 22 % of their crop area is cotton. Wheat is the most common crop in ID 014 in terms of land share, but the groundwater group has less than the district's average of 56 %.

The Main Valley group contains seven modules which make higher use of surface water, for alfalfa and wheat. Asparagus and green onion are less common in this group. Finally, the West side group has lower value crops, relative water surplus, a higher share of lower quality land, and are usually considered water sellers. Cultivated land follows about the same pattern as for the Main Valley group and even higher value crops have more area than in the center of the valley. Forages are next in importance after the three main crops.

## RESULTS AND DISCUSSION

To obtain economic marginal values of water for each location, water availability was reduced from

para 2002-2004. El cebollín, el tomate de vaina, las flores y el jitomate orgánico tienen los costos de producción promedio más altos. La mano de obra requerida para cada tipo de cultivo también se incluye. El costo de mano de obra para 2002 y 2003 fue US \$9.1 d<sup>-1</sup> y US \$10.0 d<sup>-1</sup> para el 2004, para ambas regiones agrícolas. Los costos de extracción del agua promediaron US \$0.14 m<sup>-3</sup> para la SAGARPA, e incluyen la energía utilizada para extraer el recurso.

Los valores acumulados (2004) para los cultivos representativos en cada región de Ensenada se muestran en los Cuadros 2 y 3. Para Maneadero, los jitomates cubren la mayor parte del área, seguidos de árboles de olivo y flores. Los jitomates proporcionan por mucho el mayor volumen de producción, seguidos de flores y cebollas. Los jitomates tienen el mayor valor de producción, seguidos de guisantes y flores.

### Costos de producción para Guadalupe y Maneadero

Los costos variables para Guadalupe y Maneadero se calcularon usando datos de SAGARPA sobre los costos de preparación de la tierra, siembra, cosecha, aplicación de pesticidas, asistencia técnica, etc. Esta información se usó para calcular, según el trabajo, el costo por hectárea y el costo de provisión por hectárea para cada cultivo. El costo de renta de la tierra anual estimado, proporcionado por personal de SAGARPA, varió entre \$1500 y \$1200 dólares ha<sup>-1</sup> para Guadalupe y Maneadero.

### Mezcla de cultivos y costos para Mexicali

La mezcla de cultivos seleccionada para Mexicali se basó en la proporción de tierra cultivada total (Medellín-Azuara *et al.*, 2007). Los años hídricos 2000-2005 presentaban estimaciones para entregas de agua. La mezcla de cultivos para Mexicali (Cuadro 4) cubrió 182,030 ha en 2005 (CNA, 2006) y un volumen de 1982 MCM año<sup>-1</sup>. En el Cuadro 4 se muestra que la mezcla de cultivos cubre alrededor de 85 % de la tierra cultivable y un poco más de 83 % del agua suministrada para la irrigación del Valle de Mexicali. La mayoría de los datos del uso de tierra y agua son de la Oficina de Estadística del Distrito de Riego 014, a través de sus Informes de Distribución de Aguas. Las bases de datos electrónicas proporcionan información sobre las hectáreas plantadas, y sobre las entregas mensuales de agua por grupo de cultivo y módulo, y la fuente del

**Table 5. Mean Rural Price, labor and supplies per hectare in Mexicali adapted from Medellín-Azuara *et al.* (2007).**

**Cuadro 5. Precio rural promedio, trabajo y provisiones por hectárea en Mexicali, adaptado de Medellín-Azuara *et al.* (2007).**

Crop	Price (US \$ t <sup>-1</sup> )	Labor (jornal ha <sup>-1</sup> )	Supplies (US \$1 ha <sup>-1</sup> )
Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	21.8	13	14.6
Asparagus ( <i>Asparagus officinalis</i> )	3600.0	71	130.0
Canola ( <i>Brassica campestris</i> )	172.7	6	27.3
Cotton ( <i>Gossypium</i> sp.)	510.5	38	74.8
Green onion ( <i>Allium fistulosum</i> )	622.3	310	157.2
Rye grass ( <i>Lolium</i> sp.)	18.0	7	36.9
Sorghum grain ( <i>Sorghum</i> sp.)	81.8	8	56.9
Wheat ( <i>Triticum</i> sp.)	164.1	6	55.7



100 % to 60 % in ten percent steps. The water availability constraint (10) is regional, permitting transfers of water among crops within a region. It is assumed that marginal revenue product of the optimized crop mix equals its marginal cost. The programs and parameters in equations (1) to (10) were solved using GAMS™ (General Algebraic Modeling System, 2008).

Calibration of the model to observed values occurred in the first and third steps. The criteria were first, difference in input use and second, difference in output for all regions and all crops with respect to observed values. In most cases the percent difference of input use was on the order of  $10^{-6}$ , for both stages.

### Model results for Guadalupe and Maneadero

SWAP results provide economic value of agricultural water use in Guadalupe and Maneadero. In Figure 1 it is shown the marginal economic value of water, that is what the farmer is willing to pay for having an additional thousand cubic meters of water at each availability level. Although applied water varies by month, the model assumes similar marginal values of water across months due to profit-maximizing behavior by farmers.

At current water availability, the shadow values of water for agricultural uses in Guadalupe and Maneadero are 72 and 126 dollars per thousand cubic meters ( $\text{US}1000 \text{ m}^{-3}$ ). With water shortages of 60 %, this shadow value increases to 290  $\text{US}1000 \text{ m}^{-3}$ . The Maneadero shadow value compares to that of some irrigation subdistricts in the Mexicali Valley

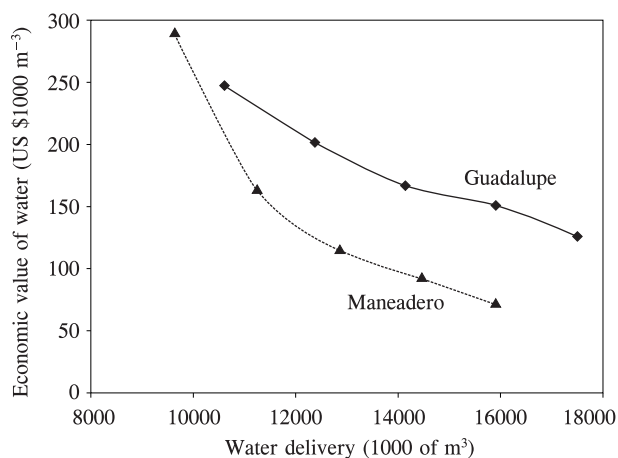


Figure 1. Shadow values of water in agriculture for Guadalupe and Maneadero.

Figura 1. Valores sombra del agua agrícola para Guadalupe y Maneadero.

agua (superficie o subterránea). Las entregas mensuales de agua establecen un patrón de uso estacional para el Valle de Mexicali, para cada módulo de irrigación.

Se encontraban disponibles datos sobre el uso de factores y costos para el DR 014, en la oficina de SAGARPA estatal, y en un estudio sobre el revestimiento del Canal Todo Americano (Sosa-Gordillo y Sánchez-López, 2007). Los costos de producción promedio y los precios de productos rurales promedio estaban disponibles para algunos años hídricos de 2000-2005. Información detallada sobre costos estuvo disponible sólo para algunos cultivos; sin embargo, los datos para la mezcla de cultivos de nuestro estudio (Cuadro 4) eran razonablemente consistentes entre agencias estatales y federales, incluyendo los precios rurales promedio para la producción total de los cultivos en el año base (SAGARPA, 2006).

El Precio Medio Rural para Mexicali y el uso de factores se resumen en el Cuadro 5. El trabajo sigue el formato del Cuadro 1. El precio del agua de 2001 a 2005 tuvo un promedio de  $\text{US } \$7.00/1000 \text{ m}^3$  en Mexicali. Los costos de las provisiones (sin desglosar) son un agregado de los costos variables adicionales. Éstos se aproximaron a partir del costo variable de SAGARPA no relacionado con el agua, la mano de obra o la renta de la tierra.

Los 22 módulos para el Valle de Mexicali se agregaron en cuatro grupos con base en la ubicación geográfica, la calidad de la tierra y las fuentes de agua primarias. Estos grupos se llamaron Este del Río Colorado, Valle Principal, Valle Oeste y Agua Subterránea. Los detalles de la agregación de módulos aparecen en Medellín-Azuara *et al.* (2007). La mayoría de los módulos del grupo Este están en el estado de Sonora. Se espera que el valor económico del agua para este grupo sea mayor al promedio para el distrito, ya que cuenta con cultivos de alto valor como espárrago y cebollín.

Un segundo grupo de módulos tiene mayor uso del agua subterránea, incluyendo módulos cerca de la frontera EE.UU.-México con Arizona donde al menos 22 % de su área de cultivo es algodón. El trigo es el cultivo más común en el DR 014 en términos de la porción de tierra, pero el grupo de agua subterránea tiene menos del promedio del distrito de 56 %.

El grupo Valle Principal contiene siete módulos que hacen mayor uso del agua superficial para alfalfa y trigo. Espárrago y cebollín son menos comunes en este grupo. Finalmente, el grupo del lado Oeste tiene cultivos de menor valor, un excedente relativo de agua, una mayor porción de tierra de menor calidad, y por lo general estos módulos se consideran vendedores de agua. La tierra cultivada sigue aproximadamente el mismo patrón que para el grupo Valle Principal, e incluso los cultivos de mayor valor tienen más área que en el centro del valle. Los forrajes son los siguientes en importancia después de los tres cultivos principales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para obtener los valores marginales económicos del agua para cada localidad, la disponibilidad de agua se redujo del 100 % al 60 % en pasos de diez por

(see below). However, the shadow value of water for Guadalupe is consistently higher.

Economic values in Maneadero span a wider water range than that for Guadalupe because Maneadero has a larger price-elasticity of demand for water at all levels of delivered water studied. Average price elasticities are  $-0.56$  and  $-0.31$ , within the range of Scheierling *et al.* (2006) meta-analysis for irrigation water demand. At 100 % of current water availability in Guadalupe, marginal economic value of water is US \$126 1000  $m^{-3}$ , roughly the average pumping cost. With a 20 % shortage, the willingness to pay for additional water increases about 1.3 times.

### Results for Mexicali

For Mexicali, results of the water availability parametric runs appear in Figure 2. Overall, agriculture in the West of the Mexicali Valley has the lowest shadow value of irrigation water when availability drops below 80 %. The Main Valley group has the highest economic values whereas the East side keeps the same value just in the average of the four regions. Groundwater follows a steepest pattern in Figure 2, beginning as the lowest water value at current availability and passing valuation in other two regions at the lowest level of availability.

Also compares annual regional water demands were also compared (Figure 2). The shadow value of water is the lowest at full availability for groundwater agriculture. A value of 16.9 US \$1000  $m^{-3}$  is 2.67 times the fee paid for 2005 of 6.27 US \$1000  $m^{-3}$  (CNA, 2005). Officials at ID 014 indicated that market price for water is about \$65 US \$  $ha^{-1}$ . Currently, a hectare has an average allocation of about 100 cm

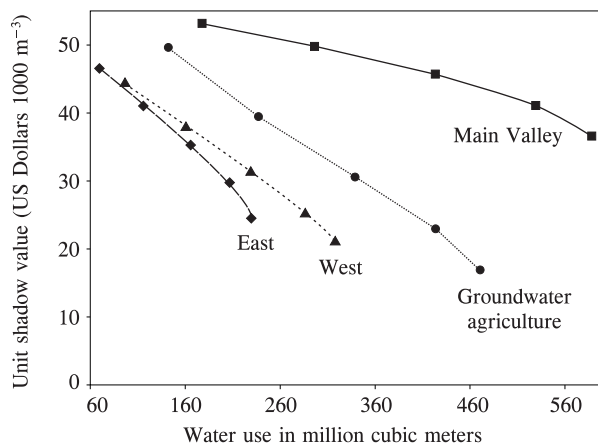


Figure 2. Shadow value of water in Mexicali, adapted from Medellín-Azuara *et al.* (2007).

Figura 2. Valor sombra del agua en Mexicali, adaptado de Medellín-Azuara *et al.* (2007).

ciento. La restricción de disponibilidad del agua (10) es regional, permitiendo transferencias de agua entre los cultivos dentro de una región. Se asume que el producto de ganancia marginal de la mezcla de cultivos es igual a su costo marginal. Los programas y parámetros en las ecuaciones (1) a (10) se solucionaron usando GAMSTM (General Algebraic Modeling System, 2008).

La calibración del modelo respecto a los valores observados ocurrió en los pasos primero y tercero. Los criterios fueron, primero, la diferencia en el uso de insumos y segundo, la diferencia en output para todas las regiones y todos los cultivos respecto a los valores observados. En la mayoría de los casos, el porcentaje de diferencia entre el uso de insumos fue del orden de  $10^{-6}$ , para ambas etapas.

### Resultados del modelo para Guadalupe y Maneadero

Los resultados de SWAP dan valor económico al uso de agua agrícola en Guadalupe y Maneadero. En la Figura 1 se muestra el valor económico marginal del agua, es decir, lo que el agricultor está dispuesto a pagar por tener mil metros cúbicos adicionales de agua en cada nivel de disponibilidad. Aunque el agua aplicada varía por mes, el modelo supone valores marginales similares del agua en todos los meses debido al comportamiento de los agricultores para maximizar sus ganancias o utilidades.

Con la disponibilidad actual del agua, el valor sombra del agua para usos agrícolas en Guadalupe y Maneadero es de 72 y 126 dólares, por mil metros cúbicos (\$US1000  $m^{-3}$ ). Con escasez del agua de 60 %, este valor sombra aumenta a 290 \$US1000  $m^{-3}$ . El valor sombra de Maneadero es comparable con el de algunos sub-districtos de riego en el Valle de Mexicali (véase abajo). Sin embargo, el valor sombra del agua para Guadalupe es consistentemente mayor.

Los valores económicos en Maneadero abarcan un rango más amplio que para Guadalupe; porque Maneadero tiene una mayor elasticidad precio para la demanda del agua en todos los niveles de distribución estudiados. Las elasticidades precio promedio son  $-0.56$  y  $-0.31$ , dentro del rango del meta-análisis de Scheierling *et al.* (2006) para la demanda del agua para irrigación. Al 100 % de la disponibilidad actual de agua en Guadalupe, el valor económico marginal del agua en es \$126 dólares1000  $m^{-3}$ , aproximadamente el costo promedio de extracción. Con una escasez de 20 %, la disposición de pago por agua adicional aumenta alrededor de 1.3 veces el costo del agua.

which yields  $10\,000\text{ m}^{-3}$ , resulting in a price of US \$6.4  $1000\text{ m}^{-3}$ . Thus, apparently the spot market price for water is similar to the water fee paid. Extreme conditions of scarcity (60 %) increase the ratio of current value to price from 2.67 to 7.86, the second highest of the four regions. An argument for such a drastic change in water value relative to other regions is that water use intensity (as volume per hectare) is higher due to water intense crops. However, group has the highest yield factor of 1.16 (Medellín-Azuara *et al.*, 2007). As water becomes scarce, the high marginal product of water for this high-yield group increases the shadow value more relative to other regions.

East side agriculture economic value of water is surprising, with shadow values roughly the average of the valley at all levels of availability. One explanation is that a large module within the East group has a high proportion of low quality soils. This may ultimately affect water valuation with greater scarcity. Valuation of waters in Main Valley agriculture is higher than expected, as highly subsidized crops such as alfalfa, wheat and cotton are well represented.

Finally, West side agriculture is likely to sell water to other regions or urban uses. Low value crops and poor quality land reduce the marginal product of water. However, this does not seem to be the case for water scarcities below 20 %, for which the groundwater region would seem a better candidate to sell water. This is unlikely. Historically, regions close to the Colorado River purchase supplemental water for irrigation (Medellín-Azuara *et al.*, 2007). One explanation for this erratic behavior is that price-elasticity of supply ( $\eta_{gi}$ ) is assumed to be the same for all crops and all regions. As better information on this parameter is obtained from econometric studies in the valley, a better response estimate would be obtained. Regions with a higher value crop mix would respond more drastically to even small shortages.

Medellín-Azuara *et al.* (2007) indicated that water price elasticity in the Mexicali Valley ranged from  $-0.50$  for conditions of relative abundance, to  $-0.66$  at 60 % water availability. Estimated price-elasticities seem to fall within the range of most values at observed levels of production (Scheierling *et al.*, 2006). For irrigation with groundwater, reducing pumping subsidies may decrease overpumping and increase the marginal economic value of water.

### Model limitations and extensions

Some limitations of this model are reviewed here and detailed by Medellín-Azuara *et al.* (2007). Disaggregated production models usually require

### Resultados para Mexicali

Para Mexicali, los resultados de las soluciones para los parámetros de disponibilidad de agua aparecen en la Figura 2. En general, la agricultura en el Oeste del Valle de Mexicali tiene el valor sombra más bajo del agua para irrigación cuando la disponibilidad cae a menos de 80 %. El grupo del Valle Principal tiene los valores económicos más altos mientras que el lado Este mantiene el mismo valor justo en el promedio de las cuatro regiones. El agua subterránea sigue el patrón más marcado de la Figura 2, iniciando como el valor hídrico más bajo en la disponibilidad actual y pasando la valoración en otras dos regiones al nivel más bajo de disponibilidad.

Las demandas regionales anuales de agua también se compararon (Figura 2). El valor sombra del agua es el más bajo en la disponibilidad total para la agricultura de agua subterránea. Un valor de  $16.9\text{ US}\$1000\text{ m}^{-3}$  es 2.67 veces la cuota que se pagó en 2005, de  $6.27\text{ US}\$1000\text{ m}^{-3}$  (CNA, 2005). Funcionarios en el DR 014 indicaron que el precio de mercado para el agua es aproximadamente  $\$65\text{ US } \$\text{ ha}^{-1}$ . Actualmente una hectárea tiene una asignación promedio de unos 100 cm que rinden  $10,000\text{ m}^{-3}$ , resultando en un precio de  $\text{US}\$6.4\text{ } 1000\text{ m}^{-3}$ . Por ende, aparentemente el precio de mercado del agua es similar a la cuota pagada por el agua. Las condiciones extremas de escasez (60 %) incrementan la proporción del valor actual al precio de 2.67 a 7.86, el segundo más alto en las cuatro regiones. Un argumento para un cambio tan drástico en el valor del agua en relación con otras regiones es que la intensidad de uso del agua (como volumen por hectárea) es debido a cultivos con mayor intensidad en el uso de agua. Sin embargo, el grupo tiene el factor de rendimiento más alto, de 1.16 (Medellín-Azuara *et al.*, 2007). Conforme el agua se vuelve escasa, el alto producto marginal del agua para este grupo de alto rendimiento incrementa más el valor sombra en relación con otras regiones.

El valor económico del agua agrícola en el lado Este es sorprendente, con valores sombra de aproximadamente el promedio del valle en todos los niveles de disponibilidad. Una explicación es que un módulo grande dentro del grupo Este tiene una proporción alta de suelos de baja calidad. Esto puede en última instancia afectar la valoración del agua con mayor escasez. La valoración de aguas en la agricultura del Valle Principal es mayor que lo esperado, ya que cultivos altamente subsidiados como alfalfa, trigo y algodón están bien representados.

Finalmente, la agricultura del lado Oeste tiene posibilidades de vender agua a otras regiones para usos urbanos. Los cultivos de valor bajo y la tierra de baja

more time and data. However, they have proved to be effective in modeling with higher precision policy changes in some rural economies (Taylor *et al.*, 2005). The underlying assumption is that farmer reactions within an agricultural region are similar. Although there will often be small and large agricultural production units. The Guadalupe, Maneadero, and Mexicali areas are commercial agriculture with commercial reasons for farmers to behave similarly.

Data limitations on production costs present difficulties for economic water value estimates, as average costs are used for Ensenada and Mexicali. This is not a problem for costs that remain more or less static and homogeneous for all users such as water and labor costs. Land rental prices are mostly based on land quality characteristics. Nevertheless, supplies and resource use may vary from farmer to farmer depending on particular characteristics of the production units. Furthermore, consolidating land use and cost information from different agencies may introduce some bias in the economic marginal value estimations. In general, underestimated costs or factors usage may produce higher marginal economic values of water. One of the advantages of these models is that these concerns can be addressed easily as more data becomes available. Hopefully, the availability of models of this type will motivate development of better data.

## CONCLUSIONS

This paper offers a method to estimate economic water demand and value for irrigation even with minimum datasets. The Baja California regions of Guadalupe, Maneadero and Mexicali offer an excellent case study to value water in irrigated agriculture. This uniqueness is characterized by the absence of rain-fed agriculture, a relatively homogenous topography, a high proportion of high quality soils, and in the case of Mexicali, a lower bound for water availability.

The ratio of the marginal economic value to the water fee for current water supply conditions ranged from 1.3 to 5.9. The estimated price-elasticity of irrigation water falls within the average reported by meta-analysis literature on the field. Low-value crops, or those in poor-land quality agricultural regions are the likely sellers of water with increasing water scarcity. However, water pricing policies alone without markets, other rationing, or restrictions on sales could lead to unintended and undesirable income distribution effects.

Finally, results using mathematical programming techniques call for caution on interpretation of results, as some omitted costs may decrease water marginal

calidad reducen el producto marginal del agua. No obstante, esto no parece ser el caso para la escasez de agua de menos del 20 %, para lo que la región de agua subterránea pareciera un mejor candidato para la venta de agua. Esto es poco probable. Históricamente, las regiones cercanas al Río Colorado compran agua complementaria para la irrigación (Medellín-Azuara *et al.*, 2007). Una explicación para este comportamiento errático es que se asume que la elasticidad precio de la oferta ( $\eta_{gi}$ ) es la misma para todos los cultivos en todas las regiones. Conforme se obtenga mejor información sobre este parámetro a partir de estudios económicos en el valle, se logrará una estimación de respuesta mejor. Las regiones con una mezcla de cultivos de mayor valor responderían más drásticamente incluso a pequeñas escaseces.

Medellín-Azuara *et al.* (2007) indicaron que la elasticidad precio del agua en el Valle de Mexicali tenía un rango de  $-0.50$  para condiciones de abundancia relativa, a  $-0.66$  al 60 % de disponibilidad del agua. Las elasticidades precio estimadas parecen caer dentro del rango de la mayoría de los valores en niveles de producción observados (Scheierling *et al.*, 2006). Para la irrigación con agua subterránea, reducir los subsidios para extracción puede disminuir la extracción excesiva e incrementar el valor económico marginal del agua.

## Limitaciones y extensiones del modelo

Algunas limitaciones de este modelo se revisan aquí y se detallan en Medellín-Azuara *et al.* (2007). Los modelos de producción desagregados usualmente requieren de más tiempo y datos. Sin embargo, han comprobado ser efectivos para modelar con mayor precisión cambios de políticas en algunas economías rurales (Taylor *et al.*, 2005). El supuesto fundamental es que las reacciones de los agricultores dentro de una región agrícola son similares. Aunque frecuentemente habrá unidades de producción pequeñas y grandes, las zonas de Guadalupe, Maneadero y Mexicali son de agricultura comercial con motivos comerciales para que los agricultores se comporten de forma similar.

Las limitaciones de los datos sobre costos de producción presentan dificultades para las estimaciones del valor económico del agua, ya que se usan costos promedio para Ensenada y Mexicali. Éste no es un problema para los costos que permanecen relativamente estáticos y homogéneos para todos los usuarios, como son los costos del agua y la mano de obra. Los precios de renta de las tierras se basan generalmente en las características de calidad de la tierra. No obstante, los insumos y el uso de recursos pueden variar de



economic value. The same would occur if water use from the base dataset is underestimated. Thus, marginal economic value estimations from this study can be taken as a solid average upper bound for irrigation water value in Baja California.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

We are thankful for funding provided by CONACYT-UCMEXUS and the California Environmental Protection Agency (CALEPA). We are indebted to agencies and institutions that provided data: CNA, SAGARPA and UABC-Mexicali.

#### LITERATURE CITED

- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2005. Reporte Histórico de Ingresos. Jefatura del Distrito de Riego 014. Mexicali, México. CD-ROM.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2006. Informes de Distribución de Aguas 2000-2006. Anexos II. Jefatura del Distrito de Riego 014, Río Colorado, Mexicali, Baja California, México. CD-ROM.
- Daesslé, L. W., L. G. Mendoza-Espinosa, V. F. Camacho-Ibar, W. Rozier, O. Morton, L. Van Dorso, K. C. Lugo-Ibarra, A. L. Quintanilla-Montoya and A. Rodríguez-Pinal. 2006. The hydrogeochemistry of a heavily used aquifer in the Mexican wine-producing Guadalupe Valley, Baja California. *Environ. Geol.* 51: 151-159.
- Florencio-Cruz, V., R. Valdivia-Alcalá, and C. A. Scott. 2002. Water productivity in the Alto Rio Lerma (011) Irrigation District. *Agrociencia* 36(4): 483-493.
- Heckelei, T., and H. Wolff. 2003. Estimation of constrained optimisation models for agricultural supply analysis based on generalised maximum entropy. *European Rev. Agric. Econ.* 30(1): 27-50.
- Howitt R. E. 1995. "Positive Mathematical Programming". *American Journal of Agricultural Economics*, 77: 329-342.
- Howitt, R. E., and J. Medellín-Azuara. 2008. "Un Modelo Regional Agrícola de Equilibrio Parcial: El Caso de la Cuenca del Río Bravo in Guerrero-García-Rojas, H. R., A. Yúnez-Naude, and J. Medellín-Azuara (eds.) *El Agua en México: Consecuencias de las políticas de intervención en el sector. Lecturas El Trimestre Económico* 100. Fondo de Cultura Económica. México, D. F. 222 p.
- Jenkins, M. W., J. R. Lund, R. E. Howitt, A. J. Draper, S. M. Msangi, S. K. Tanaka, R. S. Ritzema, and G. F. Marques. 2004. "Optimization of California's water supply system: Results and insights." *J. Water Resources Planning and Manag.-ASCE* 130(4): 271-280.
- Medellín-Azuara, J., J. R. Lund, and R. E. Howitt. 2007. "Water Supply Analysis for Restoring the Colorado River Delta, Mexico." *J. Water Resources Planning and Manag.* 133(5): 462-471.
- Moore, C. V., and T. R. Hedges. 1963. A method for estimating the demand for irrigation water. *Agric. Econ. Res.* 15(4): 131-135.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2006. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Viewed June 2006 <<http://www.siap.sagarpa.gob.mx/>> .
- Scheierling, S. M., J. B. Loomis, and R. A. Young. 2006. Irrigation water demand: A meta-analysis of price elasticities. *Water Resources Res.* 42(1), W01411, doi:10.1029/2005WR004009.

agricultor a agricultor dependiendo de características particulares de las unidades de producción. Más aún, consolidar la información del uso de suelo y el costo de la tierra a partir de varias agencias puede introducir algo de sesgo en las estimaciones del valor económico marginal. En general, los costos calculados en menos de lo que corresponde o el uso de factores pueden producir valores marginales económicos del agua más altos. Una de las ventajas de estos modelos es que estas preocupaciones se pueden atender fácilmente a medida que más datos se encuentren disponibles. Con un poco de suerte, la disponibilidad de modelos de este tipo motivará el desarrollo de mejores datos.

#### CONCLUSIONES

Este artículo ofrece un método para estimar la demanda económica del agua y el valor para la irrigación incluso con juegos de datos mínimos. Las regiones de Baja California de Guadalupe, Maneadero y Mexicali ofrecen un estudio de caso excelente para calcular el valor del agua en agricultura con irrigación. Esta situación única se caracteriza por la ausencia de agricultura de temporal, con una topografía relativamente homogénea, una alta proporción de suelos de alta calidad, y en el caso de Mexicali, un límite menor de disponibilidad del agua.

La razón del valor económico marginal respecto a la cuota del agua para las condiciones actuales de suministro tuvo un rango de 1.3 a 5.9. La elasticidad precio estimada del agua para irrigación cae dentro del promedio reportado por el meta-análisis de la literatura en campo. Los cultivos de bajo valor, o aquellos en regiones agrícolas con tierras de baja calidad son los probables vendedores de agua al incrementarse la escasez de agua. Sin embargo, las políticas para establecer precios del agua por sí solas, sin mercados, otros tipos de racionamiento o restricciones sobre las ventas podrían llevar a efectos no intencionados y no deseados de distribución del ingreso.

Finalmente, los resultados que se obtienen usando técnicas de programación matemática requieren cautela al interpretar los resultados, ya que algunos costos omitidos pueden disminuir el valor económico marginal. Lo mismo sucedería si se calcula un uso del agua menor del que correspondería, a partir del juego de datos. Por ende, las estimaciones del valor económico marginal de este estudio se pueden tomar como un límite superior robusto del valor del agua promedio para irrigación en Baja California.

—Fin de la versión en Español—





- Sosa-Gordillo, J. F., and E. Sánchez-López. 2007. Estudio de los efectos socio-económicos en el Valle de Mexicali provocados por el revestimiento del Canal Todo Americano. *Revista Mexicana de Agronegocios* 21(2): 18.
- Taylor, J. E., G. A. Dyer, and A. Yúnez-Naude. 2005. Disaggregated rural economywide models for policy analysis. *World Develop.* 33(10): 1671-1688.
- Tsur, Y., T. Roe, A. Dinar, and M. Doukkali. 2004. Pricing Irrigation Water: Principles and Cases from Developing Countries, *Resources for the Future*. Washington, D.C. 319 p.
- Young, R. A. 2005. Determining the Economic Value of Water: Concepts and Methods, *Resources for the Future*. Washington, D.C. 374 p.