

## **Uso del Análisis Envolvente de Datos (DEA) para evaluar la eficiencia de riego en los Módulos del Distrito de Riego No. 041, Río Yaqui (Sonora, México)**

### **Use of the Data Envelopment Analysis (DEA) to evaluate the efficiency of irrigation in the modules of the irrigation of District No. 041, Rio Yaqui (Sonora, Mexico)**

Víctor Manuel Olmedo Vázquez <sup>1,3</sup>, José Luis Minjares Lugo <sup>2</sup>, Emilio Camacho Poyato <sup>1</sup>, María Leticia Hernández Hernández <sup>3</sup>, Juan Antonio Rodríguez Díaz <sup>1</sup>

Originales: *Recepción: 28/04/2016 - Aceptación: 04/10/2016*

#### **RESUMEN**

El Distrito de Riego 041, Río Yaqui, en el noroeste de México, fue afectado por una fuerte sequía que colapsó el sistema hidroagrícola en el ciclo agrícola 2002-2003, donde se estableció únicamente el 29% de la superficie regable. La gestión del manejo de los recursos hídricos en el distrito de riego se ha basado tomando en cuenta la eficiencia del manejo del agua, por lo anterior, en el presente trabajo, se evalúa la eficiencia de riego en los módulos de riego, usando la metodología de Análisis Envolvente de Datos (DEA). El objetivo de la investigación fue identificar la gestión eficiente de riego y conocer hacia dónde canalizar las adecuaciones pertinentes en los próximos años agrícolas en la región de estudio, a través de sus desviaciones en relación con los módulos de riego más eficientes. Las comparaciones agronómicas e hidráulicas, se incluyeron en el software Frontier Analyst Professional; con el propósito de precisar la frontera de posibilidades que permite aumentar o igualar a los más eficientes (100%). Los resultados determinaron que el ciclo agrícola más homogéneo en cuanto a eficiencia fue el 2012-2013, oscilando su rango de 86,72% al 100%, indicando que la frontera de posibilidades está inmediata para la mayoría de los módulos de riego. El ciclo agrícola 2010-2011, fue más heterogéneo en eficiencia, ya que los rangos fluctúan del 62,21% al 100% lo que hace más complejo alcanzar la frontera de posibilidades.

#### **Palabras clave**

eficiencia • riego • análisis envolvente de datos • distrito de riego 041 • río Yaqui

- 
- 1 Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes. Departamento de Agronomía. De Campus Rabanales. Edificio Leonardo da Vinci. Universidad de Córdoba. 14071 Córdoba, España. olmedovazquez@gmail.com
  - 2 Comisión Nacional de Agua (Conagua). Calle Sinaloa 611, Norte, Urb. No. 4. Colonia Centro, 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México. jose.minjares@conagua.gob.mx
  - 3 Centro Regional Universitario del Noroeste (CRUNO), Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Colima 163 Norte, colonia Centro, 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México. hernandez.leticia710@gmail.com

## ABSTRACT

The 041 irrigation district, Yaqui River, in Northwestern Mexico, was affected by a severe drought in the 2002-2003 irrigation season and only 29% of the total area was irrigated due to the limited water resources available. In this work, the water management in the irrigation district was evaluated taking into account the efficiency in the irrigation water use of all the irrigation modules using Data Envelopment Analysis (DEA) techniques. The aim of the research was to identify the efficient management of irrigation and to know where to channel appropriate adjustments in the next agricultural years in the studied region, through its deviations regarding with the most efficient irrigation modules. Agronomic and hydraulic comparisons were included in the Frontier Analyst Professional Software; in order to define the border of possibilities that allow to increase or even the most efficient (100%). The results determined that the most homogeneous in efficiency was the 2012-2013 agricultural cycle, ranging its rank from 86.72% to 100%, indicating that the border of possibilities is immediate for the most irrigation modules. The agricultural cycle 2010-2011 was more heterogeneous in efficiency since the ranges fluctuate from 62.21% to 100%, which makes it more complex to reach the border of possibilities.

### Keywords

efficiency • irrigation • data envelopment analysis • irrigation district 041 • river Yaqui

## INTRODUCCIÓN

La mayoría de los sistemas de riego del mundo están funcionando por debajo de su capacidad y no se ajustan a las necesidades de la agricultura actual. El bajo nivel de productividad del agua asociado a la gestión de estos sistemas conlleva menores oportunidades de usar eficazmente los recursos y obtener rendimientos económicos. En la actualidad, muchas regiones con escasez de agua tienen dificultades para aumentar el suministro para riego (16). FAO (2013) menciona que, de todos los sectores de la economía, la agricultura es el más sensible a la escasez de agua. La adecuada gestión del riego es la que determina cuándo y cuánto regar, sobre la base de las necesidades de agua de los cultivos, las características del suelo y las condiciones climáticas del entorno, para optimizar la calidad y cantidad de la

producción (25).

En los Distritos de Riego en México, la eficiencia de conducción en canales, se ha estimado en el orden del 65% y a nivel parcelario en un 52,5%. Para obtener la eficiencia global, se considera la eficiencia de conducción multiplicada por la eficiencia a nivel parcelario; la cual da como resultado un 34,1%; es decir, de cada 1,000 litros de agua para riego, el cultivo aprovecha únicamente 341 litros. Si bien la disminución del volumen de agua de riego impacta a todos los tipos de productores, ciertos condicionantes delimitan el nivel concreto del impacto de la falta del recurso (26).

El Distrito de Riego No. 041, Río Yaqui, en el noroeste de México, es una región que en los últimos años ha sido afectada por un desarrollo agrícola no sustentable.

El establecimiento de una agricultura intensiva aunado a una prolongada sequía, colapsaron el sistema de presas y, por consecuencia, la actividad agrícola del distrito en el año agrícola 2002-2003. Durante este período de sequía, tanto el sistema de presas del río Yaqui como los acuíferos del Valle del Yaqui y Cocoraque mostraron ser extremadamente vulnerables, por lo que es necesario tomar medidas para incrementar la eficiencia en el manejo y la operación de los recursos hidráulicos y, de esta manera, lograr el uso sustentable del agua y de las actividades que dependen de ella (24). El agua es un recurso primordial en las zonas áridas y semiáridas de México, en tanto que su aporte limita la producción de la agricultura (31).

La optimización del agua de riego, ha sido uno de los temas centrales del distrito, a través de los 42 módulos de riego que lo conforman, los cuales han desarrollado acciones para reducir las pérdidas de conducción, tanto en la red de canales principales como en la de los canales secundarios; y actualmente en parcela mediante el programa de Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT).

La eficiencia de riego implica aprovechar de la mejor manera posible el volumen de agua asignada para cada cultivo, dándole la cantidad necesaria en el momento oportuno; con el propósito de obtener mayores ingresos en la producción agrícola; además, de lograr una sustentabilidad socialmente justa, económicamente rentable y ecológicamente amigable con el medio ambiente; para las generaciones futuras a nivel mundial.

La mayoría de los estudios coinciden en que hoy -en el mundo- hay suficientes recursos hídricos para satisfacer la demanda de alimentos, aunque con disponibilidad geográfica desigual (1).

Con el propósito de coadyuvar a conocer la eficiencia de este distrito, se planteó el Análisis Envolvente de Datos (Data Envelopment Analysis o DEA), el cual es una metodología utilizada para la evaluación de la eficiencia relativa de un conjunto de unidades productivas, utilizando un procedimiento no paramétrico que maneja una técnica de programación lineal. Con una serie de entradas (inputs) y salidas (outputs) para cada módulo de riego; con la finalidad de alcanzar la optimización de sus recursos y con el propósito de conocer objetivamente su realidad, y considerar las medidas a tomar para corregir ineficiencias en los módulos de riego que lo presenten.

La metodología para la aplicación de las técnicas DEA fue planteada por Charnes *et al.* (1978), dentro del modelo conocido como CCR según las iniciales de sus autores (Charnes, Cooper y Rhodes), basándose en el trabajo teórico de Farrell (1957). Otro modelo frecuentemente usado es el BCC (1984) (6).

El primero de estos modelos, CCR, supone rendimientos constantes a escala, lo que significa que, si los recursos utilizados aumentan en determinada proporción, el rendimiento obtenido aumenta exactamente en la misma proporción. En tanto que el segundo, BCC, supone rendimientos variables a escala, significan que se tienen rendimientos (outputs) crecientes y/o decrecientes. En el primer caso el rendimiento se incrementa en mayor proporción que los recursos (inputs) utilizados y en el segundo caso, el incremento en rendimiento es menor, que el incremento porcentual de los recursos.

El análisis de frontera no paramétrica no requiere asumir una función de costo o beneficio. Se basa en un procedimiento básico, fundamentado en técnicas de optimización lineal, que consiste en

el cálculo de una envoltura convexa alrededor de los puntos que representan en el espacio de producción, insumos y costos. Donde la envoltura se asimila a la frontera eficiente.

El conjunto de posibilidades de producción o de requerimientos de inputs son idóneos cuando se utilizan técnicas de programación matemáticas como es el conocido DEA, que se apoya en relaciones de desigualdad (30).

DEA ha abierto posibilidades para el uso en los casos que han sido resistentes a otros métodos, debido a la compleja naturaleza (a menudo desconocida) de las relaciones entre las múltiples entradas y salidas que participan en muchas de estas actividades (14). García y Coll (2003), indican que los métodos paramétricos requieren la especificación de una distribución para la población de interés; al contrario de los métodos no paramétricos, donde no se necesita se especifique la forma de distribución de la misma población de interés. Ayaviri y Alarcón (2005), mencionan que el DEA tiene como objetivo medir la eficiencia de una unidad productiva DMU (Decision Making Unit).

La particularidad del DEA sobre cualquiera otro ratio de eficiencia, radica en que los pesos asignados vienen determinados por la resolución del modelo.

Recientemente se han desarrollado diversas investigaciones relacionadas con la metodología del Análisis Envoltente de Datos (DEA); entre ellas, Ayvar Campos *et al.* (2015) estudiaron la eficiencia en la generación de bienestar social de 38 economías latinoamericanas durante el período 1990-2014. Usando el Análisis Envoltente de Datos (DEA), tomando como referencia los indicadores socio-económicos del desarrollo humano.

El análisis de resultados arrojó que fueron las economías de Aruba, Brasil, Chile,

Costa Rica, Dominica, Islas Turcas y Caicos, Saint Kitts y Nevis, y Sint Maarten las más eficientes en la generación de bienestar social. Situación que refleja que no son necesariamente los países con más recursos socioeconómicos los más eficientes en la generación de bienestar social.

Por su parte, Navarro Chávez *et al.* (2016), utilizaron Análisis Envoltente de Datos (DEA) con badoutputs; donde el objetivo fue determinar el nivel de eficiencia de 24 países latinoamericanos en la generación de desarrollo económico y en la disminución del volumen internacional de migrantes entre 1980 y 2013.

Los resultados mostraron que solo Bahamas, Barbados, Belice y Guyana fueron eficientes en la generación de desarrollo económico y en la reducción del volumen internacional de migrantes, y Visbal *et al.* (2016) realizó un estudio de eficiencia de las instituciones de educación superior (IES) públicas de Colombia durante el año 2011, mediante la metodología de análisis envoltente de datos utilizando el modelo de Charnes, Cooper y Rhodes (CCR), el modelo de Banker, Charnes y Cooper (BCC) y el modelo basado en holguras Slack Based Measure (SBM), orientados a salidas para determinar las eficiencias técnicas, puramente técnica, de escala y de mezcla, respectivamente.

En el análisis de resultados se determinó la magnitud en que deben ser mejorados los productos de las IES ineficientes.

En los últimos años, el DEA ha sido aplicado a diversos sectores, en lo que se refiere al tema de eficiencia; por ejemplo, Guang *et al.* (2013), estudian la eficiencia en explotaciones mineras, eligiendo ocho empresas de carbón diferentes en China como unidades de toma de decisiones.

Se aplicó el DEA para evaluar y optimizar la eficiencia operativa de las empresas. Elhendy y Alkahtani (2013), usan técnicas DEA para evaluar la gestión de las explotaciones de recursos de forma convencional y ecológica de los agricultores sauditas usando 126 y 94 datos de campesinos en explotaciones convencionales y ecológicas respectivamente.

Algunas investigaciones que referencian el DEA desarrollado por Rodríguez Díaz (2003), y que es planteado como base para este estudio, toma como salida el valor total de la producción agrícola (€) y como entradas, tres factores como son la superficie puesta en riego (ha), la mano de obra empleada (UTA) y el volumen total de agua aplicada en el área de riego ( $\text{hm}^3$ ). Se concluye que DEA es una herramienta de gran utilidad para la detección de ineficiencias locales, así como de posibilidades de mejora para las zonas con mayor potencial de crecimiento.

Amores y Contreras (2009), proponen un sistema de asignación de subsidios con 2000 criterios de acuerdo con la eficiencia agrícola, que se calcula mediante la descomposición general del DEA, a través de la internalización de las externalidades positivas y negativas de la actividad agrícola.

El trabajo analiza el tipo de eficiencia del sector oleícola andaluz (Sur de España) mediante el uso de los índices propuestos sobre una muestra de 3000 parcelas, tomados de la base de datos de subvenciones.

Ntontos y Karpouzou (2010), analizan en la llanura Tesalónica de Grecia, un marco de referencia para la evaluación de desempeño de sistemas de riego. En primer lugar, el DEA se aplica para medir la eficiencia técnica de sistemas de riego. Este método, basado en programación lineal, tiene como objetivo determinar un ranking de eficiencia constante de sistemas

de riego en que entradas conocidas, tales como volumen de agua suministrado y área irrigada y como salida el valor total de la producción. Banaeian *et al.* (2010), usaron DEA para clasificar a los agricultores de nuez eficientes e ineficientes en la provincia de Hamadan, Irán, en base al uso de fertilización.

Los resultados revelaron que la mayor parte del ahorro energético potencial reside en el uso de los fertilizantes (69% de nitrógeno), a través de la elaboración de un paquete de dosis de fertilización. Phandis y Kulsrestha (2012), usan DEA para evaluar la cantidad y calidad de los recursos hídricos disponibles que han sido reconocidas limitantes en el desarrollo de la mayoría de las regiones áridas y semiáridas en la India; el objetivo fue evaluar la eficiencia, para las Asociaciones de Usuarios de Agua (WUA), teniendo como resultados que la mayoría de WUA según el modelo tenía eficacia por debajo de 70%.

Mahdhi (2013), utiliza para evaluar la eficiencia de las Asociaciones de Usuarios de Agua (AUA) y para evaluar las eficiencias de gestión e ingeniería a través de una modificación matemática del modelo inicial del DEA. Los resultados muestran que las ineficiencias de la gestión y mantenimiento son mayores que la ineficiencia general.

La eficiencia de la administración media es alrededor del 80,6% mientras que el rendimiento promedio de ingeniería es de 82,3% lo que indica que la gestión y los gastos de mantenimiento se podrían reducir en aproximadamente el 19% si las asociaciones de usuarios de agua (WUA) funcionaran de una manera adecuada.

Para el caso de México y más cercano al tema agrícola, se puede citar el estudio sobre la eficiencia técnica del sector agropecuario, quienes aplican la metodología del DEA, e incluyen actividades de agricultura, cría y

explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza (7). El producto está representado por la Producción Bruta Total (PBT) en miles de pesos, la inversión mediante la Formación Bruta de Capital Fijo (FBCF) en miles de pesos, y el empleo hace referencia al personal ocupado total (PO) en las unidades económicas del sector privado y paraestatal.

El análisis centra la atención en las medidas de eficiencia técnica de 31 entidades federativas orientadas al producto, que responden a la pregunta acerca de cuánto se puede expandir la producción sin alterar la cantidad de insumos necesaria; concluyendo en una clasificación de tres estratos, estableciendo grupos de entidades federativas atendiendo a sus niveles de eficiencia.

Otro estudio también en México, una primera aproximación a las condiciones de Eficiencia Técnica Relativa (ETR) que prevalecen en 57 ingenios azucareros del país, con el apoyo de una función de producción empírica (9). Con este propósito, se lleva a cabo un examen de la ETR de la agroindustria azucarera nacional con base en las técnicas DEA.

El enfoque tomado en cuenta tiene una orientación a los insumos y se estiman los coeficientes de ETR con una tecnología de rendimientos variables a escala (RVE). En el modelo, se emplean 4 insumos y 2 productos.

Las variables de los insumos son 1) la superficie industrializada medida en hectáreas (SUPIN), 2) la caña molida neta considerada en toneladas (CAMOL), 3) la duración de la zafra medida en días (DURZA) y 4) los costos de producción en millones de pesos (COPRO).

Las variables de los productos están consideradas por 1) azúcar total producido medido en toneladas (AZPRO) y 2) utilidad neta obtenida proporcionada en millones de pesos (UTINE).

Los resultados obtenidos apuntan hacia una quinta parte, aproximadamente, de los ingenios azucareros son eficientes; tal conclusión lleva a la consideración de políticas económicas que incidan directamente sobre un mayor nivel de ETR con base en una asignación óptima de los insumos disponibles.

El propósito de este trabajo fue desarrollar una metodología que permita analizar la eficiencia del riego a nivel módulo y que pueda ser aplicada en otras zonas regables a escala global. En este trabajo se usó el Análisis Envolvente de Datos (DEA) para analizar la eficiencia en los módulos del Distrito de Riego 041, Rio Yaqui. Se plantea como hipótesis que: el modelo de producción en el área agrícola estudiada presenta aspectos de desvinculación de actores y recursos que disminuyen su eficiencia y competitividad en el uso de agua de riego.

## Objetivos

Identificar la gestión eficiente de riego existente mediante las técnicas de fronteras no paramétricas, en los 42 módulos de riego que componen el distrito.

Conocer hacia dónde canalizar sus adecuaciones para los próximos años agrícolas.

## METODOLOGÍA

### Planteamiento del problema y zona de estudio

La región del Distrito de Riego 041, Río Yaqui se localiza al sureste del estado de Sonora, México. Cuenta con una superficie de 227,224 hectáreas de riego que representa el 34% de la superficie irrigada del estado de Sonora. Esta región se ubica entre los paralelos 26°45' y 27°40' Latitud Norte y entre los meridianos 109°37' y 110°37' Longitud Oeste del Meridiano de Greenwich. Limitando al Norte con el río Yaqui y al Sur con el río Mayo, al Este limita con la serranía del Técali y Baroyeca y al Oeste con el Golfo de California.

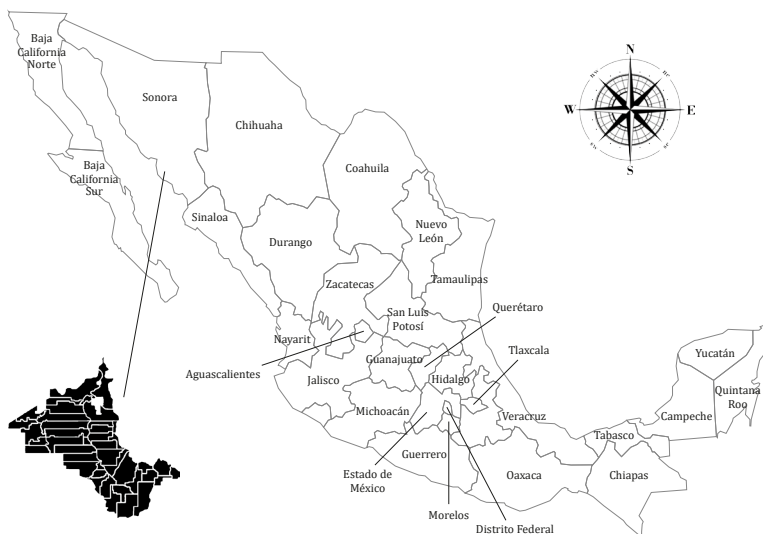
El clima predominante es de climas muy secos, subtipos BW(h')hw muy cálido, cálido, con lluvias de verano.

La temperatura media anual es de 20,03°C, se tiene una precipitación media anual 281,6 mm/año y una evaporación potencial de 2061,51 mm (13).

En el estudio se tomaron en cuenta 3 entradas (inputs) siendo: 1) superficie regada (ha), 2) volumen de agua total para la superficie regada (Millones m<sup>3</sup>) y 3) costos de producción (miles de pesos); así como una salida (output) que fue: 1) valor total de la producción (miles de pesos), con el propósito de determinar la eficiencia de aplicación de agua, en cada uno de los módulos de riego del distrito, utilizando los datos estadísticos de los años agrícolas (2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 y 2013-2014).

El sistema agrícola del distrito depende tanto del volumen de agua almacenado en sus presas como de la capacidad de bombeo de su acuífero.

La operación eficiente de su sistema hidráulico es de suma importancia para las actividades económicas, políticas y sociales. Este distrito es un sistema agrícola que produce principalmente trigo, cártamo, hortalizas, maíz, sorgo, algodón, garbanzo, alfalfa y frutales.



**Figura 1.** Ubicación del Valle del Yaqui en el sureste del Estado de Sonora, México.

**Figure 1.** The Yaqui Valley location in the southeast of Sonora, Mexico.

Los métodos y técnicas empleados, estuvieron determinados por la información aportada principalmente por el Distrito de Riego No. 041, Río Yaqui de la Comisión Nacional de Agua (Conagua), el Patronato para la Investigación y Experimentación Agrícola del Estado de Sonora (PIEAES); así como por la propia naturaleza de cada una de las variables seleccionadas.

Considerando las entradas (inputs) y la salida (output) propuestas, se determinó que el modelo DEA que más se ajusta a los objetivos planteados, es el de retornos variables (BCC), tomando una orientación a inputs. Se busca, dado el nivel de output, la máxima reducción proporcional en el vector de inputs mientras permanece en la frontera de posibilidades de producción. Esta frontera de producción permite conocer hasta dónde se puede producir con los recursos con que se dispone, dejando conocer con precisión la eficiencia o ineficiencia de cada uno de los módulos de riego. Además, la frontera de posibilidades permite saber cuáles módulos de riego son eficientes (aprovechando los recursos disponibles), los módulos de riego que están dentro de la frontera de posibilidades (que están desaprovechando oportunidades) y por último los que están fuera de la frontera de posibilidades (inalcanzables).

El DEA ayuda a determinar de mejor manera los procesos de producción en el módulo de riego; para lo cual el Software utilizado fue Frontier Analyst Professional, Version 3.2.2 (7).

### Data Envelopment Analysis

Farrell (1957), escribió por primera vez, sobre eficiencia en términos aproximados (relativos) y no concretos (absolutos), lo que permitió medir una unidad, con respecto a un conjunto de unidades y conocer la eficiencia generada de cada una de ellas, a

través de sus desviaciones en relación con las eficientes. Así, en cuanto al principio de eficiencia; planteó 2 formas de eficiencia: eficiencia técnica y eficiencia asignativa.

En el primer caso, se evalúa la capacidad de cualquier empresa, institución y/o individuo para obtener el máximo volumen de producción (output) con las entradas disponibles (input), siendo el denominado modelo orientado a outputs o la capacidad de mantener la misma capacidad de producción usando un mínimo de entradas, hablando entonces del modelo orientado a inputs, (33).

En el segundo caso se da una combinación de entradas (inputs), y se refiere a la capacidad de la empresa de usar los recursos en proporciones óptimas, esto implica obtener el mismo nivel de producción, pero con un menor costo o en el caso contrario obtener el mayor nivel de producción posible con un mismo costo.

El primer modelo de DEA fue el CCR (10), en el cual se consideran retornos constantes a escala. Básicamente esto indica que, para una DMU u organización con capacidad para la toma de decisiones, que emplee una cantidad X de input para producir una cantidad Y de output, la posibilidad de producir  $\alpha Y$  empleando  $\alpha X$  cantidad de input (siendo  $\alpha$  un escalar) es factible. Para intentar medir la eficiencia relativa de una DMU<sub>0</sub> basándose en una serie de n DMU<sub>s</sub> (siendo n el número total de unidades que entran en el estudio) (29). Este modelo plantea el siguiente problema de programación lineal:

$$\begin{aligned} &\text{maximizand}o\ u, v: \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_r 0}{\sum_{i=1}^m v_i x_i 0} \\ &\text{su}jeto\ a: \frac{\sum_{r=1}^s u_r y_r j}{\sum_{i=1}^m v_i x_i j} \leq 1 \\ &u_r, v_r \geq 0; \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \tag{1}$$



donde:

$n$  = número de DMUs que entran en la comparación

$s$  = número de outputs

$m$  = número de inputs

$u_r$  = peso que obtiene en la comparación el input  $y_r$

$v_i$  = peso que obtendría el input  $x_i$

$y_{rj}$  y  $x_{ij}$  = valores de los outputs e inputs  $y_r$  y  $x_i$ , para la DMUj

En la realidad, para resolver este problema se recurre a su sistema dual, el cual se muestra en el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } \theta, \lambda: \theta & (2) \\ \text{Sujeto a: } & -y_i + Y\lambda \geq 0, \\ & \theta X_i - X\lambda \geq 0, \\ & \lambda \geq 0 \end{aligned}$$

donde:

$\theta$  = eficiencia técnica global (ETG) y, por tanto, el porcentaje de reducción radial al que debería ser sometido cada uno de los inputs

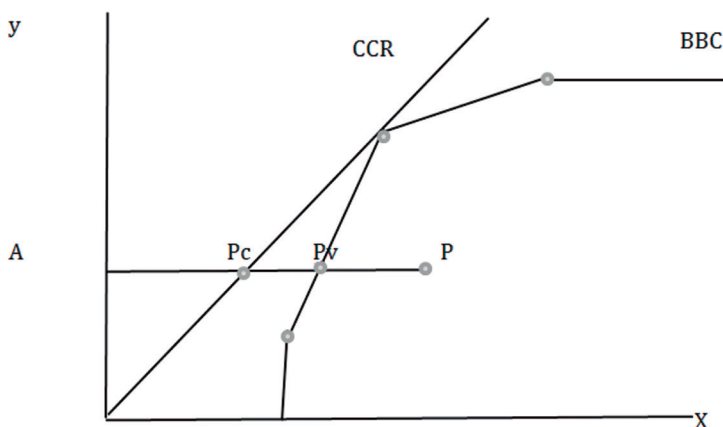
$\lambda \geq 0$  = vector de  $n$  elementos que representa la influencia que cada DMU tiene en la determinación de la eficiencia de la DMUo

$Y$  = vector de output de la DMUo en estudio y  $X$  el de inputs de esa misma DMUo.

El conjunto de DMUs cuyo valor de  $\lambda$  sea positivo, será a ser el conjunto de referencia de la DMU en estudio, una combinación lineal de estas unidades, formará la situación objetivo a la que debe tender para llegar a ser eficiente.

En cuanto a las causas de la ineficiencia estimada a través del modelo CCR pueden ser debidas a problemas estrictamente técnicos, lo que se denomina eficiencia técnica pura, o bien a problemas de dimensión, la eficiencia de escala, (20).

La figura 2 muestra visualmente la diferencia entre el modelo CCR y el BCC para un caso simple, donde se emplea un solo input ( $x$ ) para producir un único output ( $y$ ).



**Figura 2.** Eficiencia de escala (Coelli, 1996).

**Figure 2.** Efficiency of scale (Coelli, 1996).

En el ejemplo de la figura 2, mientras que la frontera CCR emplea un único punto, por lo que solo una DMU es eficiente, el modelo BCC que se utiliza para este estudio, ofrece 3 soluciones eficientes, que van a definir la curva de producción óptima, pero adaptándose mejor a las condiciones reales del mercado. Por tanto, se puede afirmar que el modelo de retornos variables va a envolver más datos y de aquí se deduce que la eficiencia técnica pura siempre va a ser menor o igual que la eficiencia técnica global (30). Así, el valor de la eficiencia técnica global sería como se muestra en la ecuación 3:

$$ETG = \frac{APc}{AP} \quad (3)$$

El de la Eficiencia Técnica Pura (ETP) vendría dado por la ecuación 4:

$$ETP = \frac{APv}{AP} \quad (4)$$

Y la Eficiencia de Escala (SE), va a indicar numéricamente cómo de cercana se encuentra la DMU<sub>o</sub> a la situación de producción a retornos constantes, será el cociente entre las dos eficiencias, como se muestra en la ecuación 5:

$$SE = \frac{ETP}{ETG} \quad (5)$$

Una vez obtenidos los valores de eficiencia (ya sea a retornos constantes o variables) y de holguras de cada uno de los inputs y outputs, obtener numéricamente cuál debe ser la cantidad de inputs y de outputs para el caso de DEA orientado a inputs es bastante simple. Si  $x_o$  e  $y_o$  representan la cantidad de cada input y de cada output que está produciendo actualmente la DMU<sub>o</sub>, los valores objetivo a los que debería tender la gestión de dicha unidad para llegar a ser eficiente vendrían dado por la ecuación 6.

$$\begin{aligned} x &= \theta \cdot x_o x - s^- \\ y &= y_o + s^+ \end{aligned} \quad (6)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Valores de las intensidades ( $\lambda_j$ ) en el modelo DEA en forma envolvente

En la tabla 1 (pág. 137), se muestra el orden de cada uno de los módulos de riego en los distintos años agrícolas analizados, de acuerdo con su eficiencia técnica pura (DEA-BCC), orientada a inputs (minimizando los inputs para producir la misma cantidad de output). Los módulos que obtienen 100 puntos son los que forman la frontera de producción eficiente; los que se encuentran por debajo de estos, son ineficientes y están produciendo por debajo de ella.

Se puede decir que entre más lejos se encuentre un módulo de riego de los que cuentan con 100 puntos, su ineficiencia es mayor como se aprecia en cada uno de los años agrícolas analizados. Lo ideal sea que todos los módulos de riego alcancen la mayor eficiencia posible, en el menor tiempo potencial.

Para el año agrícola 2010-2011, 3 módulos de riego fueron eficientes K-73,5, K-63 y 4-P-8 (siendo este último módulo de riego ineficiente los 3 años agrícolas siguientes); por lo que no necesitaron ningún tipo de mejora potencial. En el año agrícola 2011-2012 los módulos de riego eficientes fueron: K-73,5, K-63, Módulo 06, Módulo 02, K-73,8, K-68, Catorce, Módulo 10 y K-79.

Para el año agrícola 2012-2013, los módulos de riego eficientes fueron: K-73,5, K-63, K-64, K-66, Módulo 02, Módulo 11, K-73,8, Catorce, DOS-B, Cuatro, Módulo 10 y Diez. En el último año agrícola analizado, los módulos de riego eficientes fueron: K-63, K-73,5, K-79, Cuatro, K-73,8, Módulo 02 y Catorce.

**Tabla 1.** Puntuación interanual en 42 módulos de riego.

**Table 1.** Interannual score in 42 irrigation modules.

Módulo de Riego	Eficiencia 2010-2011	Eficiencia 2011-2012	Eficiencia 2012-2013	Eficiencia 2013-2014	Rendimientos a Escala
K-73,5	100,00	100,00	100,00	100,00	Constante
K-63	100,00	100,00	100,00	100,00	Constante
4-P-8	100,00	89,02	90,85	79,17	Creciente
P10-Sur	92,25	94,93	99,21	86,18	Decreciente
4-P-10	85,88	91,18	93,17	91,87	Decreciente
K-95	85,12	95,05	93,46	89,00	Decreciente
K-105	84,93	98,08	89,84	84,41	Decreciente
K-70	84,39	93,29	96,50	76,60	Decreciente
Santini II	83,70	93,30	97,20	71,56	Decreciente
K-68	82,85	100,00	95,12	92,27	Decreciente
Veinte	82,80	97,52	99,06	89,70	Decreciente
K-64	82,01	91,31	100,00	93,28	Decreciente
Dieciocho	81,54	88,08	95,44	84,73	Decreciente
K-73,8	80,60	100,00	100,00	100,00	Constante
K-79	80,42	100,00	99,80	100,00	Constante
Catorce	79,34	100,00	100,00	100,00	Constante
Veintidós	79,25	98,69	98,52	85,03	Decreciente
K-66	78,79	97,96	100,00	89,18	Decreciente
Santini I	78,61	93,95	92,96	75,72	Decreciente
K-91 Sur	77,92	98,31	97,99	76,84	Decreciente
K-88,5	77,90	93,19	91,03	87,51	Decreciente
C.M.D.	77,70	90,91	90,15	89,08	Decreciente
Náinari	77,40	85,10	90,40	83,13	Decreciente
Módulo 02	77,21	100,00	100,00	100,00	Constante
K-91 Norte	77,02	81,03	87,64	81,48	Decreciente
Seis	76,94	93,78	94,50	88,98	Creciente
Dieciséis	76,83	85,90	96,74	98,35	Creciente
Bacame	75,71	87,14	91,11	73,63	Decreciente
Diecinueve	75,55	91,25	94,12	80,03	Decreciente
4-P-4	75,43	86,29	97,27	85,15	Decreciente
Módulo 10	74,95	100,00	100,00	86,37	Decreciente
Diez	74,59	98,58	100,00	94,57	Creciente
Doce	74,50	84,88	87,84	82,13	Creciente
4-P-6	74,35	98,13	91,11	82,96	Decreciente
4-P-12	74,31	77,25	86,72	80,21	Decreciente
Dos-B	74,08	79,53	100,00	83,07	Decreciente
Dos	74,04	83,15	93,09	85,37	Creciente
Ocho	71,46	83,18	93,39	77,60	Creciente
Módulo 11	71,32	79,00	100,00	82,98	Creciente
Cuatro	69,75	95,90	100,00	100,00	Constante
Módulo 06	69,40	100,00	93,53	82,46	Decreciente
Módulo 01	62,21	74,89	98,80	82,60	Creciente

En la misma tabla 1 (pág. 137), se muestran los tipos de retorno a escala de cada uno de los módulos de riego analizados. Los módulos eficientes presentan retornos constantes a escala, lo que indica que, si se realiza o no un cambio, su escala no se ve afectada.

Aunque es importante señalar que cuando presentan rendimientos decrecientes, indica que se deberán reducir las dimensiones de las variables de los inputs (entradas) para que su productividad promedio del output (salida) aumente. Es decir, los rendimientos a escala expresan cómo varía la cantidad producida de un módulo de riego a medida que varía el uso de todos los factores que intervienen en el proceso de producción agrícola de la misma proporción. Así, un rendimiento a escala constante se caracteriza en la medida que aumenta la capacidad instalada de los módulos de riego por el lado de la producción; aumentando en la misma proporción.

Por otra parte, al incrementar la producción con los mismos recursos disponibles se puede afirmar que se está dando un rendimiento a escala creciente y cuando aumentar todos los factores de producción, la cantidad producida aumenta en una proporción menor; se denomina rendimiento a escala decreciente.

### **Propiedades y tipo de suelo en el Distrito de Riego 041, Río Yaqui**

En el Distrito de Riego 041, Río Yaqui, se encuentran 5 tipos de suelos, clasificados en aluvión ligero (5,7%), aluvión pesado (39,0%), barrial profundo (38,2%), barrial compactado (8,1%) y barrial pedregoso (9,0%).

Un elemento fundamental es la textura, la cual se refiere a la proporción de arena, limo y arcilla que contiene un suelo y dependiendo de la cantidad de cada uno de los componentes recibe su nombre (22).

Un suelo de textura arcillosa (conocidos en la región como suelos de Barrial) son los que retienen mayor humedad y la contraparte serían los suelos arenosos. Los suelos medios son los que contienen una proporción más o menos equitativa de arena, limo y arcilla (en la región se le llaman suelos de Aluvión Pesado).

La textura del suelo debe ser tomada en cuenta para hacer una programación de riegos, cuánta agua y con qué frecuencia se van a aplicar los riegos, y qué tipo de cultivo se va a sembrar a nivel parcela.

El módulo de riego 01, presentó ineficiencia todo el período analizado, debido a que se encuentra en suelos de barrial pedregoso, cuyas características presentan arena-limo-arcilla, además de piedras que oscilan entre 0,5 y tres centímetros de diámetro, permitiendo mayor infiltración y pérdida de agua.

Los módulos de riego que se encuentran al margen del río Yaqui presentan suelos de aluvión ligero; tal es el caso del módulo 11 donde se han utilizado hasta 20 millares de  $m^3/ha$ ; cuando la dotación es de 7,5 millares de  $m^3/ha$  (75 cm de lámina de riego), lo cual hace que sea ineficiente. El módulo 4-P-4, 4-P-6, 4-P-10 y 4-P-12 presentan ineficiencia, debido a las mismas condiciones al contar con suelos de aluvión ligero.

La mayoría de los módulos de riego utilizan agua en exceso, debido a la heterogeneidad de los suelos, por esta razón se consideró la variable volumen de agua total para la superficie regada (ha) en los inputs para cada módulo con el propósito de cuantificar la eficiencia de agua de riego a punto de control de los módulos.

### **Eficiencia técnica pura (DEA-BCC).**

Las puntuaciones de eficiencia (en %) de los resultados obtenidos en el año agrícola 2010-2011, el cual fue el más ineficiente de los cuatro años agrícolas analizados; por lo que solo tres módulos de riego son técnicamente eficientes: el módulo de riego K-73,5, K-63 y 4-P-8 (100%). Los dos primeros módulos de riego cuentan con una superficie pequeña en función de la mayoría de los demás módulos, además que en su totalidad se encuentran sembrados de trigo, lo cual permite homogenizar sus costos de producción y aprovechar mejor los recursos con los que disponen.

El Módulo 4-P-8 que presenta una eficiencia del 100%, debido al supuesto de que en el 89% de su superficie estuvo sembrada por cultivos más rentables, como son las hortalizas para exportación; lo cual permitió que estos módulos determinaran la frontera eficiente para este ciclo. El resto de los módulos de riego son calificados como ineficientes, al obtener una puntuación de eficiencia inferior al 100% (figura 3a, pág. 140).

Para el año agrícola 2011/2012 los módulos K-73,5, K-63, K-79, Módulo 06, Módulo 02, K-73,8, K-68, Catorce y Módulo 10 fueron técnicamente eficientes (100%), lo cual permite reafirmar la capacidad de los módulos de riego al producir con el mínimo nivel de recursos potenciales.

En este año agrícola, se sembraron cultivos de mayor valor económico (hortalizas), provocando que seis módulos de riego llegasen a ser eficientes; aprovechando los recursos disponibles. Además de que los módulos K-73,5 y K-63 presentaron nuevamente para este año una eficiencia del 100%, por las mismas condiciones que el año agrícola anterior. Es decir, este módulo de riego cuenta con una superficie pequeña, además de que el 99,2% de su superficie estuvo

sembrada con trigo y el 0,8% con cultivos de alto valor económico, lo cual permitió homogenizar sus costos de producción y aprovechar mejor los recursos disponibles.

El módulo K-63 cuenta con una superficie pequeña y el 14,77% de esa superficie se encuentra sembrada con cultivos de alto valor económico.

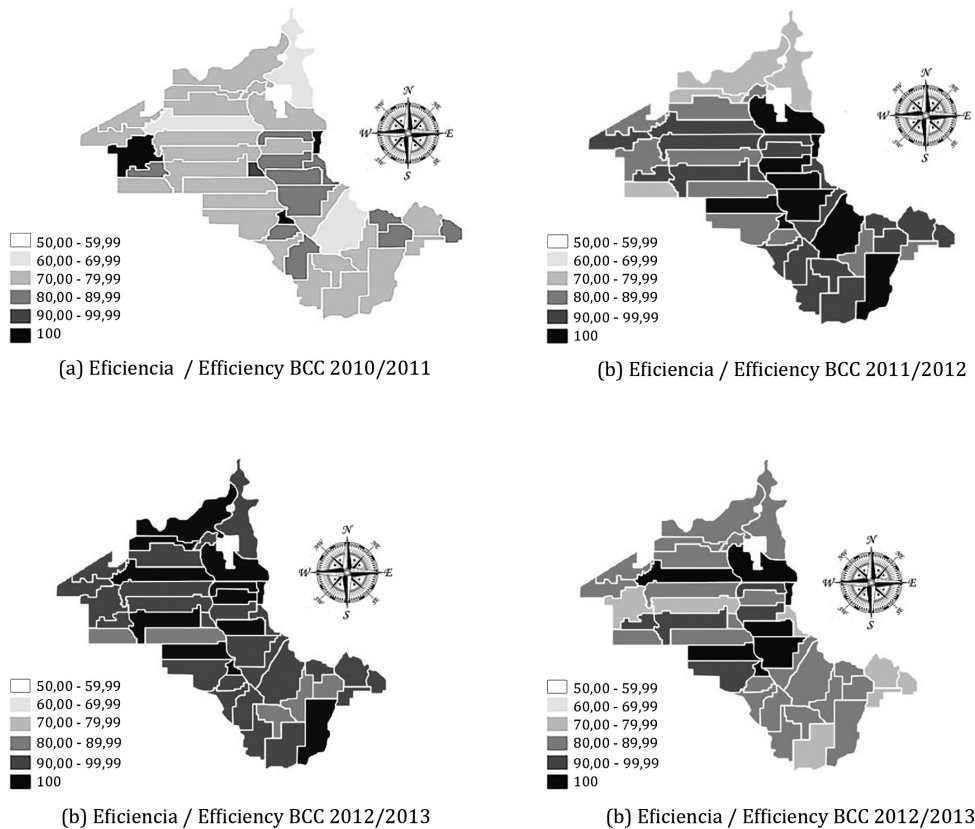
El módulo 4-P-8 decreció a un 89,02% con relación al primer año agrícola, cuando obtuvo un 100% de eficiencia; debido al cambio de padrón de cultivos, de cambiar de hortalizas a trigo.

El resto de los módulos eficientes aprovecharon sus recursos adecuadamente, como se aprecia en la figura 3b (pág. 140), lo cual se analiza en el tema de mejoras potenciales.

Para el año agrícola 2012-2013, los módulos de riego técnicamente eficientes fueron: K-73,5, K-63, K-64, K-66, Módulo 11, Módulo 02, K-73,8, Catorce, dos B, Cuatro, Módulo 10 y Diez con 100%.

Los módulos K-73,5 y K-63 nuevamente figuran entre los más eficientes, y aunque en este año agrícola sembraron cultivos tradicionales (trigo), han aprovechado los recursos disponibles; al igual que los demás módulos que presentaron eficiencia en este ciclo. Este año agrícola fue el más homogéneo en cuanto a la eficiencia, en base a los porcentajes obtenidos en análisis realizado, que oscilan de un rango de 86,72% al 100% lo cual indica que la frontera de posibilidades está inmediata para la mayoría de los módulos de riego, como se aprecia en la figura 3c (pág. 140).

El último año agrícola examinado fue 2013-2014, los módulos de riego técnicamente eficientes fueron: K-63, K-73,5, Cuatro, K-73,8, Módulo 02, K-79 y Catorce. Los módulos de riego que resultaron ser eficientes durante los cuatro años agrícolas analizados fueron: K-63 y K-73,5. En este último año se señala que la totalidad de hectáreas sembradas fue con trigo.



**Figura 3.** Eficiencia BCC para cada módulo de riego en los 4 años agrícolas analizados.  
**Figure 3.** BCC efficiency for each irrigation module in the 4 agricultural years analyzed.

Los módulos K-79, cuatro, K-73,8, Módulo 02, K-79 y Catorce aprovecharon los recursos disponibles para llegar a ser eficientes, como se aprecia en la figura 3d.

**Conjuntos de referencia**

Una de las exigencias del DEA es que las unidades a evaluar sean homogéneas. Para que el análisis pueda ser utilizado para identificar cuáles son las organizaciones que hacen una mejor utilización de sus recursos es necesario eliminar el efecto, de que factores externos que

puedan causar en el nivel de eficiencia que cada organización consigue (20). En este contexto, se considera al número de «Peers Decision Making Units»; el cual indica el número de módulos de riego eficientes que forman parte del conjunto de referencia de los módulos de riego ineficientes.

En el análisis interanual (4 años agrícolas), se puede señalar que solo 16 módulos de riego fueron eficientes: K-73,5, K-63, 4-P-8; K-79, Módulo 06, Módulo 02, K-73,8, K-68, Catorce, Módulo 10, K-64, K-66. Módulo 11, dos B, Cuatro y Diez, y

solamente 12 constituyeron el conjunto de referencia de los módulos de riego que fueron ineficientes.

Los módulos de riego que fueron eficientes en determinado ciclo agrícola; pasaron a ser ineficientes en otros, por lo que dejaron de ser parte del conjunto de referencia y evidentemente al ser ineficientes nunca pueden formar parte del conjunto de referencia de otro módulo ineficiente.

Una peculiaridad de este análisis, es que a pesar de que algunos módulos de riego sean eficientes, pueden no ser "peer" de ningún otro módulo de riego ineficiente. Como ejemplo, se observa que en el ciclo agrícola 2010-2011 donde el Módulo K-73,5 fue eficiente y no fue peer de ningún otro. Por último, se puede decir; que lo que no puede suceder es que una unidad calificada como eficiente presente Peers, (12).

En el año agrícola 2010-2011, los módulos de riego que constituyeron el conjunto de referencia 39 veces y que fueron Peer de otros módulos son: K-63 y 4-P-8. En el año agrícola 2011-2012 los módulos de referencia y el número de veces que el módulo de riego fue referencia de otro son: K-73,5 (1), K-63 (20), K-79 (1), Módulo 06 (2), Módulo 02 (2), K-73,8 (22), K-68 (14) y Catorce (6).

En el año agrícola 2012-2013 los módulos de referencia se clasificaron de la siguiente manera: K-73,5 (1), K-63 (19), K-64 (1), K-66 (2), Módulo 11 (1), Módulo 02 (2), K-73,8 (4), Catorce (2), Dos B (24), Cuatro (3), Módulo 10 (6) y Diez (13). En el último año agrícola 2013-2014 los módulos de referencia fueron: K-63 (27), K-73,5 (4), K-73,8 (30), K-79 (2) y Catorce (9).

La tabla 2 (pág. 142), muestra el promedio de la eficacia de BCC, la superficie regada en hectáreas, los costos de producción, el volumen total de agua aplicada y el valor de la producción agrícola en millones de pesos para los

42 módulos de riego del distrito en 4 años agrícolas analizados.

### **Principales cultivos en módulos eficientes**

En virtud de contar con una serie de datos extensa para los 4 años agrícolas analizados, se tomaron aquellos módulos de riego que pasaron de ser ineficientes a eficientes y viceversa, (a excepción del módulo K-73,5 y K-63 que fueron eficientes durante los cuatro años). Con la finalidad de observar el comportamiento de los principales cultivos establecidos como se muestra en la tabla 3 (pág. 143), determinando el porcentaje promedio para cada cultivo, lo cual ayuda a conocer la tendencia de su eficiencia.

La distribución de los módulos de riego que fueron eficientes por lo menos un año agrícola de los años analizados, se muestran en la figura 4 (pág. 144).

### **Análisis de las mejoras potenciales por módulo de riego eficiente**

En este apartado se describen las mejoras potenciales que cada uno de los módulos de riego debe realizar para ser eficientes; es decir, en cuánto deberían reducir sus inputs cada uno de los módulos (en %).

En cuanto a los Módulos K-73,5 y K-63 que son ejemplos de éxito, en virtud de que se pudo comprobar en 3 años agrícolas, que fueron los únicos que presentaron eficiencia al 100% y sirvieron de referencia para el resto de los módulos al aprovechar adecuadamente sus recursos, para las diversas variables. En cuanto a los valores observados y los valores objetivos fueron idénticos en las diferentes variables y análisis realizados por el modelo DEA, situándose siempre en la frontera eficiente.

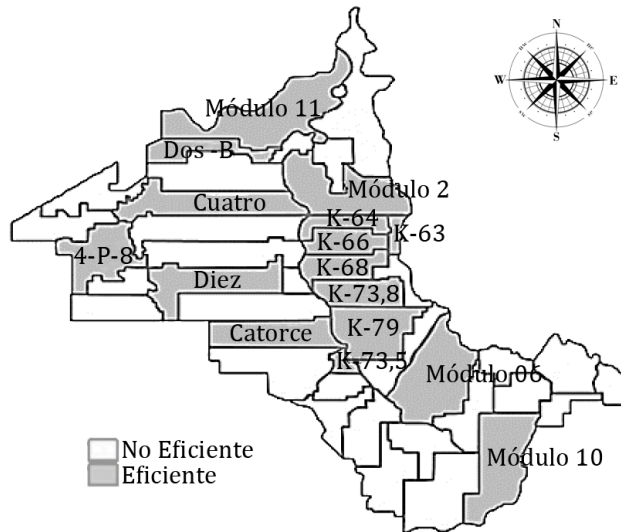
**Tabla 2.** Estudio promedio para 4 años agrícolas en 42 módulos de riego.  
**Table 2.** Farming 4 years average studio in 42 irrigation modules.

Módulo de Riego	Banker, Charnes, and Cooper Eficiencia	Superficie (ha)	Costos (millones) \$	Volumen (Millones m <sup>3</sup> )	Producción (millones \$)
K-73,5	1	846	16,03	4189,91	20,60
K-63	1	1019	23,98	5121,00	98,24
K-73,8	0,952	4255	100,75	24056,54	167,19
K-79	0,951	7763	197,22	51138,82	292,52
Catorce	0,948	7287	171,13	42672,24	269,23
Módulo 02	0,943	8818	174,05	37338,67	250,58
P10-Sur	0,931	2924	87,42	8316,81	92,96
K-68	0,926	4039	99,38	23405,25	151,64
Veinte	0,923	4640	100,66	23476,60	172,91
Diez	0,919	8030	172,23	44167,69	267,95
K-64	0,917	2644	61,77	15247,84	93,05
K-66	0,915	3315	74,70	19840,54	114,47
Cuatro	0,914	9201	213,59	57778,16	305,82
K-95	0,907	2610	52,09	19954,58	80,24
4-P-10	0,905	1899	44,029	12508,00	68,17
Veintidós	0,904	4129	82,17	32074,63	119,87
Módulo 10	0,903	9632	181,00	56089,69	268,40
4-P-8	0,898	6513	161,06	45646,33	248,62
Dieciséis	0,895	8672	187,92	48430,51	280,98
K-105	0,893	3514	71,08	24494,87	107,03
SEIS	0,886	7859	176,81	52001,36	259,33
K-91 Sur	0,878	7388	137,35	30845,24	201,82
K-70	0,877	1877	34,12	11498,35	48,34
Dieciocho	0,874	2156	41,11	12313,22	59,04
K-88,5	0,874	5597	111,74	33874,26	168,00
C.M.D.	0,870	4402	92,22	27631,08	137,98
4-P-6	0,866	4669	99,30	32971,02	143,73
Santini II	0,864	2557	43,03	16760,53	61,14
Módulo 06	0,863	10332	196,96	61801,03	275,94
4-P-4	0,860	4941	106,15	40029,07	153,67
Santini I	0,853	5053	87,02	29482,31	123,73
Diecinueve	0,852	3615	64,85	19579,14	92,54
Dos-B	0,842	4911	97,62	31579,53	140,20
Náinari	0,840	1298	24,92	8540,01	31,77
Dos	0,839	6605	131,88	39888,41	191,22
Módulo 11	0,833	9636	193,72	49561,34	271,58
Doce	0,823	6797	147,19	43224,60	204,80
Bacame	0,819	4235	75,11	24689,52	104,00
K-91 Norte	0,818	4614	89,68	28860,02	125,26
Ocho	0,814	7650	149,75	48661,32	206,73
Módulo 01	0,796	7652	156,44	29017,37	188,86
4-P-12	0,796	4552	96,59	25989,27	131,34
<b>Promedio</b>	<b>0,885</b>	<b>220139</b>	<b>110,14</b>	<b>30827,30</b>	<b>161,70</b>



**Tabla 3.** Cultivos establecidos en los módulos de riego que fueron eficientes por lo menos un año agrícola.  
**Table 3.** Established crops in the irrigation modules which were efficient at least on an agricultural year.

Módulo de riego	Trigo grano (%)	Maíz (%)	Cártamo (%)	Garbanzo (%)	Otros cultivos (%)	Algodón (%)	Sorgo (%)	Alfalfa (%)	Frutales (%)	Total (%)
K-73.5	80,08	5,10	0,00	0,28	2,41	0,96	0,00	2,94	8,24	100
K-63	78,05	4,60	0,00	0,00	13,90	0,96	0,00	2,49	0,00	100
4-P-8	52,25	12,41	6,81	1,74	20,84	0,89	0,26	3,72	1,08	100
K-68	59,09	4,22	5,77	2,16	16,00	1,86	0,53	4,81	5,56	100
K-64	69,16	7,16	1,17	0,45	11,66	3,89	1,41	3,23	1,88	100
K-73,8	72,83	3,13	3,29	1,26	14,13	4,73	0,06	0,58	0,00	100
K-79	60,46	5,75	2,18	2,70	15,52	2,93	0,30	0,98	9,20	100
Catorce	67,49	4,08	6,67	0,77	13,70	2,58	0,22	1,97	2,54	100
K-66	73,50	6,60	1,54	0,00	11,20	5,20	0,42	0,72	0,82	100
Módulo 02	71,52	11,95	0,83	0,05	6,37	7,98	0,19	1,07	0,05	100
Módulo 10	86,97	3,41	1,17	0,13	6,00	1,99	0,19	0,15	0,00	100
Diez	75,84	5,04	4,66	0,03	9,89	1,20	0,20	1,51	1,63	100
Dos-B	43,49	6,68	4,97	32,07	6,80	0,00	0,29	3,97	1,73	100
Módulo 11	53,80	10,39	5,50	14,31	5,50	0,08	0,15	6,49	3,77	100
Cuatro	61,95	6,95	4,94	1,76	11,12	4,72	0,18	1,95	6,42	100
Módulo 06	79,30	3,92	2,58	2,05	4,10	2,96	0,00	0,89	4,22	100
<b>Promedio</b>	<b>67,86</b>	<b>6,34</b>	<b>3,25</b>	<b>3,74</b>	<b>10,57</b>	<b>2,68</b>	<b>0,28</b>	<b>2,34</b>	<b>2,95</b>	<b>100</b>



**Figura 4.** Distribución de módulos de riego que fueron eficientes por lo menos un año del período analizado.

**Figure 4.** Distribution of irrigation modules which were efficient at least on a year of the analyzed period.

Los comportamientos en las mejoras potenciales para superficie regada, costos de producción y volumen de agua para los módulos de riego que fueron eficientes por lo menos en un año agrícola, durante el período analizado; se determinan en la tabla 4 (pág. 146), y permite conocer en cuánto deberán reducir sus inputs cada uno de los módulos (en %) en base a 1,0%.

El análisis del resumen de mejora, muestra la distribución de las mejoras potenciales, en las cuales se observan los módulos de riego para las distintas variables, por lo que, para ser eficientes, deberá haber una reducción de cada uno de los inputs analizados.

## CONCLUSIONES

La metodología Data Envelopment Analysis (DEA), aplicada en el distrito permitió conocer las ineficiencias en cada uno de los módulos de riego estudiados; así como la posibilidad de incrementar su eficiencia, reduciendo los inputs según sea el caso. El estudio determinó las tendencias y variaciones anuales e interanuales de eficiencias; como un aporte a los productores para la toma de decisiones que les permita minimizar las ineficiencias presentadas.

El DEA mostró el margen de mejora para cada módulo de riego ineficiente para lograr la frontera de eficiencia y por lo tanto lograr contar con módulos de riego eficientes.

El ciclo agrícola más homogéneo en cuanto a la eficiencia fue el 2012-2013 determinado en función de los porcen-

tajes obtenidos en el análisis realizado, que oscilan entre un rango de 86,72% al 100%, lo cual indica que la frontera de posibilidades está inmediata para la mayoría de los módulos de riego, con un margen del 13,28%. Además, es donde mayor número de módulos de riego eficientes hubo, llegando a ser 12 de los 42 existentes, esto debido al aprovechamiento de sus recursos con los que cuentan y al buen manejo de sus entradas (inputs). En cambio, en el ciclo agrícola 2010-2011 es el más heterogéneo en cuanto a eficiencia, debido al mal aprovechamiento de sus entradas (inputs), ya que los rangos oscilan del 62,21% al 100% lo que hace más complejo alcanzar la frontera de posibilidades con respecto a los módulos de riego más eficientes, con un rango de mejora mayor (37,79%); además de que únicamente 3 módulos de riego fueron eficientes técnicamente.

Existe en cada ciclo agrícola una variabilidad de mejora diferente en los inputs, lo que permite diseñar estrategias para cada variable analizada que propicien alcanzar la frontera de posibilidades en los próximos años agrícolas; y facilite a los directivos de cada módulo de riego, tomar las decisiones más correctas, en función de las mejoras potenciales con las que cuenta cada módulo de riego, en cuanto a reducir superficie sembrada, disminuir volumen de agua, y/o mejorar los costos de producción.

Al considerar los costos de producción totales para cada uno de los cultivos analizados (trigo grano, cártamo, garbanzo y otros cultivos de mayor valor económico), se puede percibir que existe influencia de algún insumo de producción que esté opacando la eficiencia técnica pura del input (costos de producción); por lo que se recomienda que en futuros estudios se realice a mayor detalle el análisis de este input.

Por otra parte, se puede considerar que las eficiencias de conducción de agua,

se podrán incrementar en los módulos de riego, por las inversiones que se realicen a través de obras de revestimientos en los diversos canales de la red mayor, menor y a nivel parcela. Además de adoptar tecnologías de producción más sustentables, como pueden ser: evitar el monocultivo, desprotección de los suelos durante más de 6 meses y una continua capacitación y supervisión en la manera de regar. Una de las opciones que tendrían los módulos de riego para ser más eficientes, sería la de establecer en la mayoría de ellos prácticas agrícolas comunes y supervisión más estricta en los riegos realizados por los productores; así como economías de escala a través de sus organizaciones y empresas de servicios. Además de disminuir el volumen de agua otorgada a los usuarios con un acuerdo previo en beneficio de ellos mismos y de la permanencia de la actividad agrícola en la región.

Haber considerado como input los costos de producción, permitió contar con la información de cada uno de los insumos utilizados en los distintos procesos de producción agrícola, incluyendo el costo del agua, aunque se podría proponer realizar un DEA para los conceptos más importantes con los que cuenta cada sistema de producción y conocer a detalle, alguna o algunas variables que influyan en la eficiencia a nivel parcela.

Conocer la eficiencia, a través de la metodología DEA en los módulos de riego permitirá realizar un estudio más detallado usando indicadores de gestión en módulos de riego en el valle del Yaqui, Sonora México, aplicando la metodología de las técnicas de benchmarking, con el propósito de mostrar las mejores prácticas y adaptarlas a los módulos más desfavorecidos, con el propósito de mejorar los rendimientos productivos y por ende económicos de la agricultura en la zona de estudio.

**Tabla 4.** Mejoras potenciales para los módulos de riego eficientes por los menos un año agrícola.  
**Table 4.** Potential improvements for the irrigation modules which were efficient at least on an agricultural year.

Módulo de Riego	2010-2011			2011-2012			2012-2013		
	Superficie regada	Costos	Volumen de agua	Superficie regada	Costos	Volumen de agua	Superficie regada	Costos	Volumen de agua
K-73,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K-63	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-P-8	0	0	0	0,25	0,11	0,11	0,12	0,11	0
K-73,8	0,49	0,19	0,47	0	0	0	0	0	0
Módulo 02	0,59	0,24	0,54	0	0	0	0	0	0
K-68	0,44	0,18	0,44	0	0	0	0,05	0,05	0
Catorce	0,55	0,21	0,54	0	0	0	0	0	0
Módulo 10	0,64	0,30	0,63	0	0	0	0	0	0
Diez	0,60	0,25	0,55	0,04	0,01	0,01	0	0	0
K-66	0,48	0,21	0,54	0,03	0,03	0,10	0	0	0
Módulo 11	0,59	0,29	0,56	0,25	0,21	0,21	0	0	0
Des-B	0,56	0,26	0,51	0,32	0,21	0,30	0	0	0
Cuatro	0,62	0,30	0,58	0,08	0,14	0,35	0	0	0
K-79	0,50	0,20	0,56	0,23	0,14	0,16	0,09	0,09	0
Módulo 06	0,65	0,31	0,71	0	0	0	0,06	0,25	0
K-64	0,40	0,19	0,41	0,10	0,02	0,21	0	0	0

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alvarez, A.; Morábito, J. A.; Schilardi, C. 2016. Huellas hídricas verde y azul del cultivo de maíz (*Zea mays*) en provincias del centro y noreste argentino. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.* 48(1): 161-177.
2. Amores, A. F.; Contreras, I. 2009. New approach for the assignment of new European agricultural subsidies using scores from data envelopment analysis: Application to olive-growing farms in Andalusia (Spain). *European Journal of Operational Research.* 193(3): 718-729.
3. Ayaviri, N. D.; Alarcón, L. S. 2005. El Análisis Envolvente de Datos aplicado en la medición y evaluación de la eficiencia de los Municipios de Bolivia. *Universidad Técnica de Oruro, Bolivia.* 38 p.
4. Ayvar Campos, F. J.; Navarro Chávez, J. C L.; Giménez, V. M. 2015. El bienestar social en América Latina, 1990-2014: 8 un análisis DEA a partir de las dimensiones del desarrollo humano. *Revista Nicolaita de Estudios Económicos.* 10(2).
5. Banaeian, N.; Zangeneh, M.; Omid M. 2010. Energy use efficiency for walnut producers using Date Envelopment Analysis (DEA). *AJCS.* 4(5): 359-362.
6. Banker, R. D.; Charnes, A.; Cooper W. W. 1984. Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science.* 30(9): 1078-1092.
7. Banxia Software Ltd®. 2003. *Frontier Analyst. Version 3.2.2 Professional Edition.* ©Copyright 1995-2003 Banxia®.
8. Becerril, O.; Rodríguez, G.; Ramírez J. 2011. Eficiencia técnica del sector agropecuario de México: Una perspectiva de análisis envolvente de datos. *Economía.* 35(31):85-110.
9. Celso, A.; Cortés, F. 2010. Análisis de la eficiencia técnica relativa de la agroindustria azucarera: el caso de México. *Revista Mexicana de Agronegocios. Quinta Época.* 14(26).
10. Charnes, A.; Cooper, W. W.; Rhodes, E. 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research.* 2: 429-444.
11. Coelli, T. 1996. A guide to DEAP Version 2.1: A Data Envelopment Analysis (Computer) Program. *CEPA Working Paper 96/08.*
12. Coll, S. V.; Blasco, B. O. 2006. *Frontier Analyst Una herramienta para medir la eficiencia.* Eumed.net. Universidad de Málaga, España. 100 p.
13. Comisión Nacional de Agua. 2003. Determinación de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero valle del Yaqui, estado de Sonora. *Subdirección General Técnica.*
14. Cooper, W. W.; Seiford, L. M.; Tone, K. 2000. *Data Envelopment Analysis. A comprehensive text with models, applications, references and DEA-Solver software.* Kluwer Academic Publishers. 213 p.
15. Elhendy, A. M.; Alkahtani, S. H. 2013. The resource use efficiency of conventional and organic date farms in Saudi Arabia: A date envelopment analysis approach. *The Journal of Animal & Plant Sciences.* 23(2): 596-602.
16. FAO. 2011. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma. Mundi-Prensa, Madrid.*
17. FAO. 2013. Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. FAO Roma.*
18. Farrell, M. J. 1957. The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General).* 120(3): 253-290.
19. García, J.; Coll, V. 2003. Competitividad y eficiencia. *Estudios de Economía Aplicada.* 21: 3.
20. Goñi, L. S. 1998. El análisis envolvente de datos como sistema de evaluación de la eficiencia técnica de las organizaciones del sector público: Aplicación en los equipos de atención primaria. *Revista Española de Financiación y Contabilidad.* 27(97): 979-1004.
21. Guang, Yu; Huang, Q.; Zhao, X. J.; Wang, W. S. 2013. Efficiency evaluation and optimization of green mining for coal enterprises based on DEA. *Applied Mechanics and Materials, Vols. 295-298: 2864-2868.*

22. INIFAP. 2009. Seminario de tecnología para la producción de trigo. Centro de Investigación Regional del Noroeste Campo Experimental Valle del Yaqui Cd. Obregón, Sonora, México. 74 p.
23. Mahdhi, N.; Sghaier, M.; Smida Z. 2013. Efficiency of the irrigation water user association in the Zeuss-Koutine region, south-eastern Tunisia. Institut des Régions Arides de Médénine (IRA) Tunisie. New Medid No 2. 9 p.
24. Minjares-Lugo, J. L.; Valdés, J. B.; Salmón-Castelo, R. F.; Oroz-Ramos, L. A.; López-Zavalar. 2010. Sustainable planning, management, and evaluation of water resources in irrigation District No. 041, Río Yaqui, Mexico. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic Engineering in Mexico. 1(1): 137-151.
25. Morábito, J.; Salatino, S.; Hernández, R.; Schilardi, C.; Álvarez, A.; Rodríguez Palmieri, P. 2015. Distribución espacial de la evapotranspiración del cultivo de referencia y de la precipitación efectiva para las provincias del centro-noreste de Argentina. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 47(1): 109-125.
26. Mussetta, P.; Barrientos, M. J. 2015. Vulnerabilidad de productores rurales de Mendoza ante el Cambio Ambiental Global: clima, agua, economía y sociedad. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 47(2): 145-170.
27. Navarro Chávez, J. C. L.; Ayvar Campos, F. J.; Zamora Torres A. I. 2016. Desarrollo económico y migración en América Latina, 1980-2013: Un estudio a partir del Análisis Envolvente de Datos. Trace 70. págs. 149-164.
28. Ntontos, P. N.; Karpouzou, D. K. 2010. Application of data envelopment analysis and performance indicators to irrigation systems in Thessaloniki Plain (Greece). International Journal of Engineering. 4(10): 714-720.
29. Phadnis, S. S.; Kulshrestha, M. 2012. Evaluation of irrigation efficiencies for water users' associations in a major irrigation project in India by DEA. Benchmarking: An International Journal. 19(2): 193-218.
30. Pinilla, A. A.; Arias S. C.; Orea S. L. 2001. Introducción al análisis empírico de la producción. Universidad de Oviedo, España. 150 p.
31. Ríos Flores, J. L.; Torres Moreno, M.; Castro Franco, R.; Torres Moreno, M. A.; Ruiz Torres, J. 2015. Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 47(1): 93-107.
32. Rodríguez Díaz, J. A. 2003. Estudio de la gestión del agua de riego y aplicación de las técnicas de benchmarking a las zonas regables de Andalucía. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, departamento de Agronomía. Córdoba, España. 364 p.
33. Rodríguez Díaz, J. A.; Camacho Poyato, E.; López Luque, R. 2004. Application of Data Envelopment Analysis to Studies of Irrigation Efficiency in Andalusia. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 130: 175-183.
34. Visbal, C. D.; Mendoza, M. A.; Causado, R. E. 2016. Eficiencia en las instituciones de educación superior públicas colombianas: una aplicación del análisis envolvente de datos. Universidad Sergio Arboleda. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11232/687>

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Ing. María Guadalupe Chávez Espinoza (†), por la información proporcionada a través del Distrito de Riego N° 041, Río Yaqui y a Kevin Olascoaga Olmedo nuestro más sincero reconocimiento.