

PLANEACIÓN, MANEJO Y EVALUACIÓN SUSTENTABLE DE LOS RECURSOS HIDRÁULICOS EN EL DISTRITO DE RIEGO 041, RÍO YAQUI, MÉXICO

• José Luis Minjares-Lugo •
Comisión Nacional del Agua, México

• Juan B. Valdés •
The University of Arizona, USA

• Roberto F. Salmón-Castelo •
Comisión Internacional de Límites y Aguas

• Lucas A. Oroz-Ramos • Raúl López-Zavala •
Comisión Nacional del Agua, México

Resumen

El Distrito de Riego 041, Río Yaqui, en el noroeste de México, ha sido afectado en los últimos años por un desarrollo agrícola no sustentable debido al establecimiento de una agricultura intensiva que, aunado a una prolongada sequía, colapsó al sistema en el año 2003. El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo interanual de simulación-optimización que permita crear una metodología cuantitativa y transferible que promueva el impulso de mejores prácticas sustentables en las actividades del distrito. También se pretende definir índices que expliquen los principales atributos sustentables del sistema y, con los resultados del estudio, se espera determinar en cada nivel de decisión quién y cómo llevarán a cabo dichas prácticas sustentables. El modelo anual de simulación-optimización hidrológico-agronómico-económico desarrollado por Minjares *et al.* (2008) fue utilizado y luego extendido a un modelo interanual por medio de la conexión de los modelos anuales, incluyendo en la función objetivo criterios sustentables como productividad, confiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad y equidad, para controlar la relación entre las decisiones tomadas en el presente y sus consecuencias a largo plazo. De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo puede ser usado para la elaboración del plan de riegos del distrito bajo diferentes escenarios de manejo a largo plazo, e identificar prácticas o decisiones que pongan en riesgo el desarrollo sustentable del sistema. Asimismo, el modelo puede usarse para evaluar políticas de manejo y decisiones que se han tomado en el pasado y posibles conflictos por el agua en el futuro.

Palabras clave: sustentabilidad del agua, escenarios de manejo, Distrito de Riego 041, cuenca del Yaqui.

Introducción

El Distrito de Riego 041, Río Yaqui, en el noroeste de México (figura 1), 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 de riego en el año agrícola 2002-2003. Durante este periodo 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

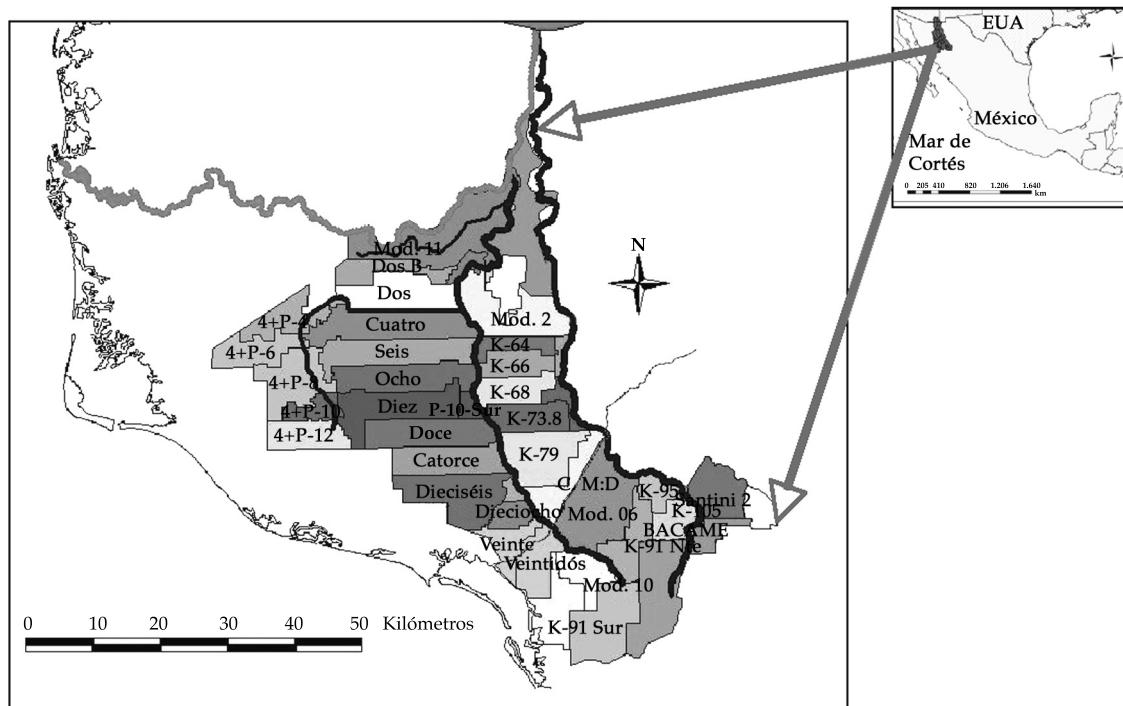


Figura 1. Localización del Distrito de Riego 041.

manera, lograr el uso sustentable del agua y de las actividades que dependen de ella.

A pesar de lo anterior, cuando se ha intentado establecer el concepto de sustentabilidad en el Distrito de Riego 041, se ha encontrado que el concepto tiene diferente significado para distintas personas e incluso para diversas instituciones; y cuando se quiere hacer sustentable una parte del proceso del desarrollo del distrito, otra parte del mismo proceso se ve afectada, restando fuerza al concepto mismo. Parecería entonces que no existe una definición precisa del concepto de sustentabilidad ni claridad en los fines que se persiguen en el distrito; sin embargo, cuando el debate de lo que significa exactamente sustentabilidad continúa, y cuando las preguntas de qué, para quién y por cuánto tiempo se va a sostener, puedan quedar sin respuesta, no se deben posponer los intentos de trabajar en la búsqueda de un distrito de riego más sustentable, un distrito que puedan servir

mejor a las futuras generaciones y, al mismo tiempo, cumplir con las metas y demandas de la presente generación.

En el mundo, la discusión sobre sustentabilidad y desarrollo sustentable es muy amplia y compleja. Masera *et al.* (2000) mencionan que una de las principales dificultades que enfrentan quienes intentan un análisis riguroso de estos dos conceptos es que ambos se han convertido en clichés, y tienden a ser usados y definidos de manera totalmente inconsistente. La Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo (Brundtland, WECD, 1987) define sustentabilidad como: "El desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades".

Un sinnúmero de definiciones han sido propuestas en la literatura mundial. Hathaway (2002), Loucks (2000), Dubourg (1997) y Pereira *et al.* (1996) mencionan que los sistemas de

recursos hidráulicos sustentables son aquellos diseñados y manejados para contribuir con los objetivos de la sociedad tanto en el presente como en el futuro, manteniendo íntegro el medio ambiente, la ecología y su sistema hidrológico.

Por lo anteriormente expuesto y considerando que el concepto de sustentabilidad es un término muy genérico, para el desarrollo de la presente investigación ha sido necesario definir el significado de sustentabilidad y sus principales atributos, en el contexto del Distrito de Riego 041, el donde se consideran aspectos hidrológicos, económicos, agrícolas, sociales y ambientales.

Se puede definir que el Distrito de Riego 041, Río Yaqui, será sustentable si al operarlo mantiene su productividad, confiabilidad y resiliencia a cambios inesperados; si es capaz de funcionar efectivamente bajo condiciones de cambios en las aportaciones y las demandas de agua, así como ante los cambios en los objetivos de los productores agrícolas, manteniendo una agricultura segura y rentable a largo plazo, que no degrade el agua, el suelo y otros recursos naturales, de tal manera que las futuras generaciones tengan la misma oportunidad de usarlos de la misma o mejor forma de la que se utilizan hoy en día, manteniendo la equidad en cuanto a la distribución de los costos y utilidades generados en el Distrito. Como muchos otros sistemas, el distrito de riego puede fallar, pero cuando esta falla ocurra debe ser capaz de recuperarse de manera inmediata para operar de manera apropiada, sin costos excesivos para los usuarios del distrito y la sociedad en general.

Objetivo

El objetivo de esta investigación es desarrollar un modelo de simulación-optimización a largo plazo, que permita crear una metodología cuantitativa y transferible, que promueva el impulso de mejores prácticas sustentables en las actividades del distrito de riego, en

beneficio de todos los usuarios del agua y de la sociedad en general. Asimismo, se pretenden definir índices que expliquen los principales atributos sustentables del sistema; con los resultados que arroje este estudio, se espera que el Comité Hidráulico del Distrito de Riego, el órgano colegiado de concertación en el Distrito para el manejo adecuado de agua, lleve a cabo dichas prácticas sustentables.

Metodología

En esta investigación se utilizó el modelo anual de simulación-optimización hidrológico, agronómico y económico desarrollado por Minjares *et al.* (2008), para posteriormente extenderlo a un modelo interanual por medio de la conexión de los modelos anuales, incluyendo criterios sustentables para controlar la relación entre las decisiones tomadas en el presente y sus consecuencias a largo plazo. La escala de tiempo de 15 años utilizada en el presente modelo fue desarrollada siguiendo las consideraciones propuestas por Gleick, (1986), Cai *et al.* (2001) y Biswas, (1994).

Diferentes investigadores han propuesto una gran cantidad de criterios para el análisis de la sustentabilidad en la planeación y el manejo de los recursos hidráulicos; por ejemplo, Turner (1993), Matheson (1997) y Hashimoto *et al.* (1982) propusieron criterios sustentables para evaluar el desarrollo de sistemas de recursos hidráulicos basados en criterios de riesgo, como vulnerabilidad, incertidumbre y resiliencia.

El plan de investigación incluye explorar preguntas acerca de la estabilidad y riesgo del sistema de presas del río Yaqui y determinar de una manera cuantitativa los atributos sustentables de productividad, riesgo (confiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad) y equidad del Distrito de Riego 041, bajo diferentes escenarios de manejo, su relación con las actividades agrícolas, sus beneficios económicos y desarrollar las bases para la asignación del volumen anual de agua a los diferentes módulos de riego del distrito.

Productividad anual del agua de riego

La productividad del agua de riego es la capacidad del distrito para brindar el nivel necesario de bienes y servicios de manera equitativa a todos los usuarios mediante el servicio del riego. Para la estimación de la productividad del agua en el distrito de riego se ha utilizado la metodología propuesta por Minjares *et al.* (2009), donde señalan que existe un valor de la productividad promedio por metro cúbico de agua de cada uno de los cultivos establecidos, el cual está asociado con los beneficios económicos generados por el cultivo k , en el año agrícola t , representado por BA_k y el volumen asignado a este cultivo a nivel módulo, representado por VA_k . Adaptando esta propuesta en la presente investigación, tenemos que la productividad anual del agua PAA_t es la relación de las utilidades anuales del sector agrícola y el volumen anual de agua utilizado para la irrigación de los diferentes cultivos a nivel punto de control de módulo, la cual podemos expresar de la siguiente manera:

$$PAA_t = \frac{\sum BA_k}{\sum VA_k} \quad (1)$$

Criterios propuestos para medir el riesgo en el distrito de riego

La cuenca del río Yaqui está localizada en una región semiárida, que regularmente enfrenta periodos críticos de bajas precipitaciones. Con el fin de proteger al distrito de riego contra riesgos de escasez de agua durante estos periodos críticos, se proponen medidas cuantitativas para medir tales criterios de riesgo, basados en términos de cambios en la cantidad de la superficie sembrada cada año agrícola, y por el nivel de confiabilidad con el cual el sistema de presas y el acuífero puedan proporcionar el agua requerida para el establecimiento de los diferentes cultivos.

Confiabilidad del sistema hidroagrícola

La proporción de la superficie de riego sembrada anualmente en el distrito o índice de siembra (IS_t) es definida como la relación entre la superficie total sembrada con diferentes cultivos k cada año agrícola t (S_k) y la superficie total regable del distrito de riego (STR). Para la interpretación del índice de siembra se define como primeros cultivos a la superficie regable del distrito de riego que se siembra con el cultivo k_1 por primera vez en el año agrícola t , considerando que el año agrícola t inicia el 1º de octubre de un año y termina el 30 de septiembre del siguiente. Asimismo, se define como segundos cultivos a la superficie regable del distrito de riego que se siembra por segunda ocasión con el cultivo k_2 en la misma superficie que se sembró el cultivo k_1 , una vez que éste ha sido cosechado dentro del mismo año agrícola t .

Si el valor del índice de siembra es igual a 1.0, significa que el 100% de la superficie regable será sembrada con primeros cultivos en ese año agrícola; pero si el valor del índice es mayor que 1.0, significa que se podrán sembrar primeros y segundos cultivos; y si el valor del índice es menor que 1.0, significa que en ese año agrícola en particular, en una parte del distrito no se sembrará ningún cultivo por falta en la disponibilidad de agua. Expresado en forma matemática, el índice de siembra quedaría de la siguiente forma:

$$IS_t = \left(\frac{\sum_k S_k}{STR} \right) \quad (2)$$

En este caso, la confiabilidad promedio de siembra del Distrito de Riego en el periodo de estudio (CS) está dada por la relación de la suma de los índices de siembra anuales (IS_t) entre el número total de años (T) considerados en el horizonte de planeación del modelo, la cual se define como:

$$CS = \frac{\sum_{t=1}^T IS_t}{T} \quad (3)$$

Por otro lado, el volumen anual de agua disponible para riego a nivel punto de control de módulo o índice de disponibilidad de agua (IDA_t) se define como la relación entre el volumen de agua disponible en el sistema de presas al día 1º de octubre más el bombeo del acuífero (VAD_t), que puede ser suministrado a los módulos para el riego de los cultivos a establecer cada año agrícola, y el volumen de agua requerido por los módulos de riego para el establecimiento de los primeros cultivos en el total de la superficie regable (VAR_{k1t}) cada año agrícola.

$$IDA_t = \left(\frac{VAD_t}{VAR_{k1t}} \right) \quad (4)$$

La confiabilidad promedio de proporcionar el volumen requerido por los módulos de riego (CV) está dada por la relación entre la suma de los índices anuales de disponibilidad de agua (IDA_t) y el número total de años (T) considerados en el horizonte de planeación del modelo:

$$CV = \frac{\sum_{t=1}^T IDA_t}{T} \quad (5)$$

Resiliencia del sistema hidroagrícola

La resiliencia describe la rapidez con que el distrito de riego se recupera de una falla, en la cual el sistema de presas y el acuífero no pueden suministrar el volumen de agua requerido para el 100% de la superficie bajo riego en un año agrícola. En esta investigación se propone una forma para medir la resiliencia del sistema, la cual se establece como la relación del número máximo de años consecutivos en que el sistema se encuentra en déficit entre el número total de años considerados en el periodo de planeación.

Cuando este valor tiende a cero, indica que el sistema muestra más resiliencia a posibles fallas.

La resiliencia de la superficie sembrada, RSS , se define como la relación entre el número consecutivos de años FS en que el índice de siembra IS_t es menor que 1.0 y el número total de años T considerados en el horizonte de planeación; la resiliencia del volumen disponible para riego, RVD , se define como la relación entre el número consecutivos de años FVD en que el índice de disponibilidad de agua IDA_t es menor que 1.0 y el número total de años considerados en el horizonte de planeación T , las cuales matemáticamente pueden ser representadas como:

$$RSS = \frac{FS}{T} \quad (6)$$

$$RVD = \frac{FVD}{T} \quad (7)$$

Vulnerabilidad del sistema hidroagrícola

La vulnerabilidad tanto de la superficie sembrada (VSS) como del volumen disponible para riego (VVD) representa la severidad o magnitud de la falla del sistema y están representadas por el mayor déficit durante el horizonte de planeación; se definen como los valores mínimos de IS_t e IDA_t .

$$VSS = \min_t IS_t \quad (8)$$

$$VVD = \min_t IDA_t \quad (9)$$

Criterios para estimar la equidad

Equidad interanual

Se incluye el término de equidad interanual, con el fin de asegurar que los usuarios del agua de diferentes años tengan la misma oportunidad de acceso al agua para uso agrícola, y a los beneficios económicos, sociales y culturales de

esta actividad. Para el cálculo de la equidad interanual se considera primeramente el cambio proporcional del volumen de agua disponible a nivel punto de control de módulo (VAD_t) entre el año t y el año $t-1$, el cual se representa matemáticamente como:

$$\Delta VAD_t = \frac{VAD_t - VAD_{t-1}}{VAD_t} \quad (10)$$

Adaptando la propuesta de Cai *et al.* (2002) a las condiciones del Distrito de Riego 041, el índice de equidad interanual del volumen de agua disponible se representa matemáticamente como la desviación estándar de ΔVAD_t :

$$IEVAD = \sqrt{\frac{\sum_{t=2}^T (\Delta VAD_t - \overline{\Delta VAD_t})^2}{T-2}} \quad (11)$$

Donde:

$$\overline{\Delta VAD_t} = \frac{\sum_t VAD_t}{T-1}$$

El valor óptimo del $IEVAD$ es cero, el cual corresponde a un valor constante del volumen disponible de agua año tras año, lo que resultaría en un proceso de planeación y manejo del agua más equitativo y sustentable.

Equidad anual

Minjares *et al.* (2009) mencionan que los usuarios de riego, al conocer el volumen de agua disponible cada año agrícola, inmediatamente transforman su dotación individual de agua en productos agrícolas que esperan convertir en beneficios económicos. Asimismo, definen el costo por déficit de agua (CDA_t) en el distrito de riego como los beneficios económicos derivados por el uso del agua en la agricultura que deja de percibir un productor cuando el $IS_t < 1$, como resultado de un déficit en la disponibilidad de agua para riego.

De esta manera, se considera que existe equidad anual en cuanto a la distribución del uso del agua y la distribución de las utilidades económicas del sector agrícola, cuando el valor del costo por déficit de agua en un año agrícola en particular es cero ($CDA_t=0$), o cuando éste, si existe, sea cubierto de manera total o parcial mediante subsidios o fondos de emergencia. En esta investigación se propone el costo por déficit de agua como el indicador de equidad anual y es el valor obtenido de multiplicar la superficie total que no se siembra en determinado año agrícola por un déficit en la disponibilidad de agua para riego por los beneficios económicos esperados por hectárea en ese año con el cultivo de trigo, que es el cultivo que más se siembra en el distrito de riego.

Función objetivo del modelo a largo plazo

La función objetivo del modelo a largo plazo es un problema de optimización con objetivos múltiples, la cual maximiza las utilidades económicas del sector agrícola y la confiabilidad, minimizando el costo por déficit de agua, la vulnerabilidad, resiliencia y equidad. La función objetivo es representada como:

$$MAX S_s = w_1 BA_t + w_2 Conf - w_3 Res - w_4 Vul - w_5 Eq \quad (12)$$

Donde S_s es la sustentabilidad del sistema; BA_t , las utilidades económicas en el sector agrícola, donde está incluido el costo por déficit de agua; $Conf$, la confiabilidad; Res , la resiliencia; Vul , la vulnerabilidad; Eq , la equidad del sistema, y w_n es la preferencia que el tomador de decisiones da a cada parámetro de decisión y cuyo criterio de uso se explica en detalle en Minjares (2004).

Aplicación del modelo y resultados obtenidos

El análisis fue aplicado al Distrito de Riego 041, Río Yaqui, considerando conveniente analizar

el periodo 1993-2008, con el fin de tener un punto de referencia, comparar y verificar si los resultados obtenidos con el modelo son confiables. En esta sección se presentan los resultados obtenidos con los datos históricos (*Escenario Real*), y los escenarios sustentables modelados (*Modelo1*) y (*Modelo2*). Los valores del escurrimiento mensual esperado de entrada a cada una de las presas utilizados en el modelo, así como la precipitación mensual sobre el vaso de cada una de ellas, se estimó usando la metodología propuesta por Minjares et al. (2008) y cuyos valores se muestran en el cuadro 1.

El volumen de agua del acuífero representa aproximadamente el 27% del volumen total anual disponible en el nivel módulo de riego, considerando la capacidad de bombeo instalada actualmente. La diferencia del manejo entre los dos escenarios modelados es que en el escenario *Modelo1* se toma en cuenta el volumen anual a extraer del acuífero igual al volumen anual histórico bombeado y en el escenario *Modelo2*, el volumen anual a extraer del acuífero se incrementa al volumen anual máximo extraído históricamente con la capacidad de bombeo instalada actualmente de 416.7 hm³, que representa el 65% de la recarga anual del acuífero. No se incluyó en esta investigación un escenario considerando extraer el 100% de la recarga, ya que actualmente no se cuenta con la infraestructura instalada para llevar a cabo dicha actividad.

Estimación de los atributos sustentables del sistema

Productividad del agua

La figura 2 muestra cómo los valores de la productividad anual del agua obtenidos con el *Escenario Real* son menores que los obtenidos tanto con el *Modelo1* como con el *Modelo2*, excepto en el año 2003-2004, donde en el *Escenario Real* se utilizaron solamente 499 hm³, mayormente para la irrigación de hortalizas, las cuales son los cultivos más rentables que se siembran en el distrito; mientras que con los escenarios *Modelo1* y *Modelo2*, en este mismo año agrícola se logró suministrar el 100% del volumen requerido para el establecimiento de todo el patrón de cultivos del distrito.

Por otro lado, los valores superiores de productividad anual del agua, obtenidos con los escenarios *Modelo1* y *Modelo2*, se deben a que el modelo maximiza las utilidades agrícolas, seleccionando los cultivos más rentables. Este atributo de sustentabilidad del sistema nos da una idea de cuándo estamos utilizando el agua con mayor eficiencia y sustentabilidad económica, y es la base para determinar el índice para el manejo interanual del agua propuesto por Minjares et al. (2009).

Confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad de la superficie regable

El Distrito de Riego 041 tiene una superficie con derecho a riego de 227 224 hectáreas, de

Cuadro 1. Índice de confiabilidad anual de siembra (IS_i) durante el periodo de estudio.

	Año 93/94	Año 94/95	Año 95/96	Año 96/97	Año 97/98	Año 98/99	Año 99/00	Año 00/01	Año 01/02	Año 02/03	Año 03/04	Año 04/05	Año 05/06	Año 06/07	Año 07/08
	Escurrimiento esperado hm ³														
Escenario	2663	3766	2663	1905	2663	2269	1550	2663	1550	1125	1352	4193	2663	2889	4193
Modelo 1	1.23	1.15	1.17	1.11	1.01	1.00	1.03	1.02	1.01	1.03	0.99	0.98	0.95	1.02	1.11
Modelo 2	1.30	1.29	1.17	1.13	1.11	1.06	1.03	1.01	1.01	1.03	1.00	1.01	1.00	1.10	1.10
Real	1.57	1.11	1.39	1.16	1.03	1.02	0.99	0.95	0.98	0.90	0.35	0.72	0.83	0.96	0.91

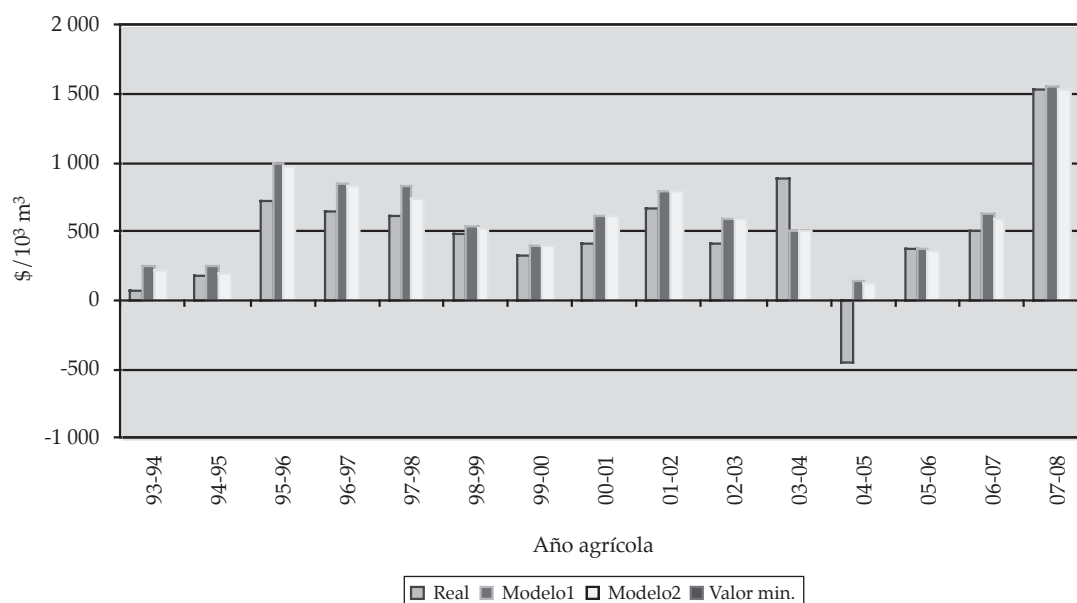


Figura 2. Productividad anual del agua de riego en $\$/10^3 \text{ m}^3$.

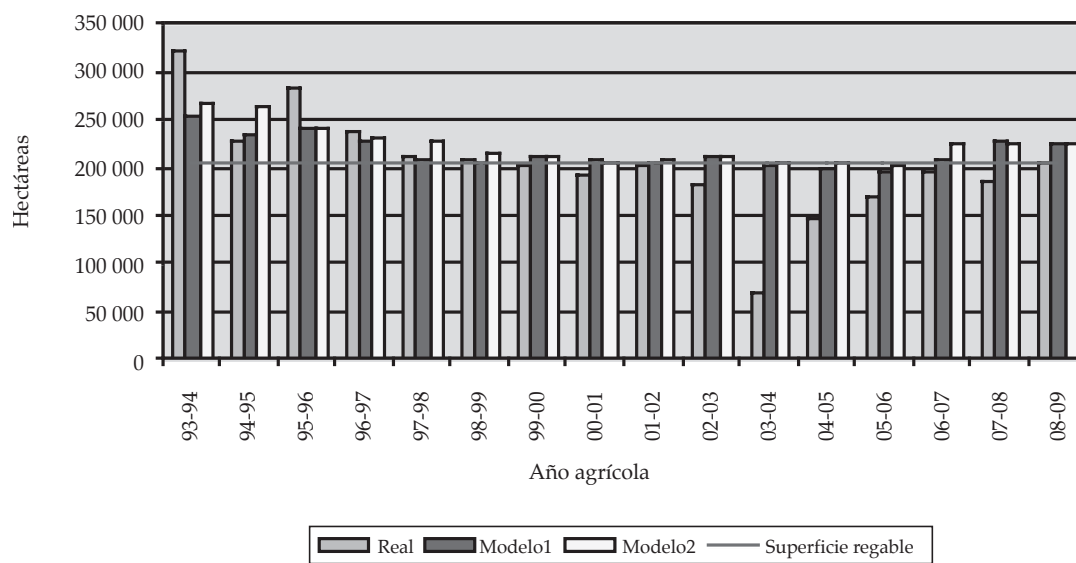


Figura 3. Superficie sembrada bajo diferentes escenarios en hectáreas.

las cuales, actualmente 206 000 hectáreas son regables. En la figura 3 se observa cómo la superficie anual sembrada en el *Modelo2* es

sostenida con al menos primeros cultivos en todo el horizonte de planeación; el *Modelo1* presenta fallas mínimas del año 2003 al 2006,

cuando la sequía fue más evidente; mientras que en el *Escenario Real*, la superficie anual sembrada fue disminuyendo paulatinamente cuando se presentó la sequía, colapsando de manera dramática en el año agrícola 2003-2004.

El cuadro 1 muestra los índices anuales de confiabilidad de siembra (IS_s), observándose en el escenario *Modelo1* tres años de fallas mínimas (valores menores de 1.0), siendo en el año agrícola 2005-2006 donde se observa el valor mínimo de 0.95, obteniéndose un índice promedio de seguridad de siembra en el periodo de 1.05. Al incrementar el volumen de agua bombeada del acuífero en el *Modelo2* no se observa ningún año de falla y se pudo sembrar el 100% de la superficie, al menos con primeros cultivos en todos los años, lográndose un índice de seguridad de siembra promedio en el periodo de 1.09. Mientras que en el *Escenario Real*, la falla se observa desde el año agrícola 1999-2000 y el valor mínimo del índice de siembra de 0.35 se obtuvo en el año agrícola 2003-2004, obteniendo un valor del índice de siembra promedio en el periodo de 0.99, valor menor que los obtenidos en ambos escenarios modelados.

La resiliencia de la superficie sembrada (RSS) indica el número consecutivo de años en los cuales la superficie sembrada en el distrito de riego está bajo condiciones de falla. Los resultados plasmados en el cuadro 1 muestran que en el escenario *Modelo1* hay tres años consecutivos de falla mínima durante la sequía, iniciando en el año agrícola 2003-2004, restableciendo las condiciones normales a partir del año agrícola 2006-2007. En el escenario *Modelo2* no hay ningún año de falla, mientras

que en el *Escenario Real* se observan nueve años de falla consecutiva durante la sequía.

El cuadro 1 también muestra que, bajo el *Escenario Real*, el mayor déficit se registra en el año agrícola 2003-2004, donde el valor del índice de vulnerabilidad obtenido es de 0.35 y es equivalente a sembrar únicamente 71 511 hectáreas. Cuando se compara el *Escenario Real* con los otros dos escenarios modelados, se observa que el *Escenario Real* presenta las condiciones más vulnerables. En el caso de los dos escenarios modelados, el escenario más vulnerable se observa en el año agrícola 2005-2006, donde se obtuvo un índice de vulnerabilidad de 0.95 para el escenario *Modelo1* y de 1.00 para el escenario *Modelo2*, lo que es equivalente a sembrar 196 697 y 206 636 hectáreas, respectivamente.

El cuadro 2 muestra los índices sustentables de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad de la superficie sembrada promedio durante todo el periodo de estudio. Bajo el *Escenario Real*, 99.0% de la superficie regable es sostenida en promedio en el horizonte de planeación, lo que significa que en promedio sólo se lograron establecer 203 940 hectáreas cada año agrícola. Se observan además nueve años consecutivos de fallas durante el periodo de sequía, representando el 60.0% de los años con falla, registrándose el mayor riesgo (más vulnerable) en el año agrícola 2003-2004, donde se sembró únicamente el 35% de la superficie regable.

En el escenario *Modelo1*, 105% de la superficie regable es sostenida durante el periodo de estudio. Esto significa que, en promedio, 206 000 hectáreas se sembraron cada año con primeros cultivos y 10 300 hectáreas con segundos

Cuadro 2. Índices de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad promedio de siembra del periodo de estudio.

Escenario	Índice de confiabilidad	Índice de resiliencia (años consecutivos de falla)	Índice de vulnerabilidad
Real	0.99	0.600	0.35
Modelo 1	1.05	0.200	0.95
Modelo 2	1.09	0.000	1.00

cultivos. Durante el horizonte de planeación sólo se registraron tres años consecutivos con falla durante la sequía, y el máximo riesgo se registró en el año agrícola 2005-2006, donde se sembró el 95% de la superficie regable. En el escenario *Modelo2*, el 109% de la superficie regable es sostenida en promedio en los 15 años de estudio, donde no se registró ningún año de falla.

Confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad del volumen disponible para riego

El cuadro 3 muestra los índices anuales de confiabilidad (IDA_i) de proporcionar el volumen requerido por el sistema agrícola bajo los tres escenarios de manejo. En el escenario *Modelo1*, el volumen requerido por los cultivos se pudo proporcionar durante todo el periodo de estudio, con mínimas fallas en los años agrícolas 2004-2005 y 2005-2006, donde el volumen necesario se redujo sólo el 2 y 1%, respectivamente. En el escenario *Modelo2*, el volumen requerido se sostiene sin ninguna falla durante todos los años considerados en

el horizonte de planeación, proporcionando el volumen de agua necesario para sembrar al menos el 100% de la superficie regable con primeros cultivos y en casi todos los años; también se logra abastecer una cantidad de agua para segundos cultivos. Sin embargo, con el *Escenario Real* se tienen fallas en cuatro de los quince años, observándose que en el año 2003-2004 sólo se logró proporcionar el 32% del volumen requerido para establecer los primeros cultivos y el siguiente año sólo el 71%.

También se puede observar que la resiliencia del volumen disponible (RVD) del escenario *Modelo1* muestra dos años consecutivos de fallas mínimas; el escenario *Modelo2* no muestra falla, y el *Escenario Real* muestra tres años de fallas consecutivas. El mismo cuadro 3 muestra que el *Escenario Real* presenta la mayor vulnerabilidad, ya que en el año agrícola 2003-2004 se pudo proporcionar sólo el 32% del volumen necesario para la irrigación del 100% de la superficie bajo riego, poniendo al sistema en una condición realmente no sustentable.

Cuadro 3. Índice de confiabilidad anual de la disponibilidad del agua (IDA_i) durante el periodo de estudio.

	Año 93/94	Año 94/95	Año 95/96	Año 96/97	Año 97/98	Año 98/99	Año 99/00	Año 00/01	Año 01/02	Año 02/03	Año 03/04	Año 04/05	Año 05/06	Año 06/07	Año 07/08
	Esgurrimento esperado hm ³														
Escenario	2663	3766	2663	1905	2663	2269	1550	2663	1550	1125	1352	4193	2663	2889	4193
Modelo 1	1.29	1.20	1.22	1.16	1.04	1.06	1.11	1.10	1.04	1.08	1.03	0.98	0.99	1.08	1.17
Modelo 2	1.47	1.45	1.24	1.20	1.18	1.13	1.11	1.09	1.05	1.08	1.04	1.02	1.03	1.19	1.18
Real	1.86	1.48	1.50	1.37	1.20	1.05	1.08	0.96	1.04	0.92	0.32	0.71	1.01	1.04	1.08

Cuadro 4. Índices de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad del volumen requerido obtenidos en el periodo de estudio.

Escenario	Índice de confiabilidad	Índice de resiliencia (años consecutivos de falla)	Índice de vulnerabilidad
Real	1.11	0.200	0.32
Modelo 1	1.10	0.133	0.98
Modelo 2	1.16	0.000	1.02

El cuadro 4 contiene los índices promedio de confiabilidad, resiliencia y vulnerabilidad del volumen disponible para riego obtenidos en el periodo de estudio. Para el *Escenario Real*, a pesar de haber generado un índice de confiabilidad de 1.11, el índice de resiliencia muestra que hubo tres años consecutivos de falla y el índice de vulnerabilidad fue de 0.32. Lo anterior indica que en años anteriores a la mayor falla en el año 2003-2004, se utilizó agua en exceso, como sucedió en los años de 1993-1994 a 1996-1997; especialmente, en el año 1993-1994 se utilizó casi el doble del volumen de agua requerido para primeros cultivos, como lo indica el índice de confiabilidad obtenido de 1.86; sin embargo, en la figura 2 se observa que la productividad del agua en este año fue muy baja, lo que significa que el agua en exceso se utilizó en cultivos poco rentables o incluso en cultivos no rentables.

Con el escenario *Modelo1*, el índice de confiabilidad es de 1.10, muy similar al obtenido con el *Escenario Real*; sin embargo, con este escenario sólo se obtuvo un año de falla, con

un índice de vulnerabilidad igual a 0.98. En el escenario *Modelo2*, el índice de confiabilidad obtenido de 1.16 es superior a los otros dos escenarios; en este caso no se tuvo ningún año de falla y el índice de vulnerabilidad obtenido fue de 1.02.

Estimación de la equidad del sistema

Equidad interanual

La figura 4 presenta el índice de variación anual del agua entregada a los módulos de riego o índice de equidad interanual durante los 15 años considerados. Los resultados del análisis de equidad interanual muestran cómo en el *Escenario Real*, la equidad disminuye en el año 2003-2004; mientras que con los escenarios *Modelo1* y *Modelo2*, la equidad se mantiene en todo el horizonte de planeación. En este estudio no se considera el efecto económico multiplicador que ocasiona dicho problema en las personas que dependen directamente de esta actividad, como jornaleros, regadores,

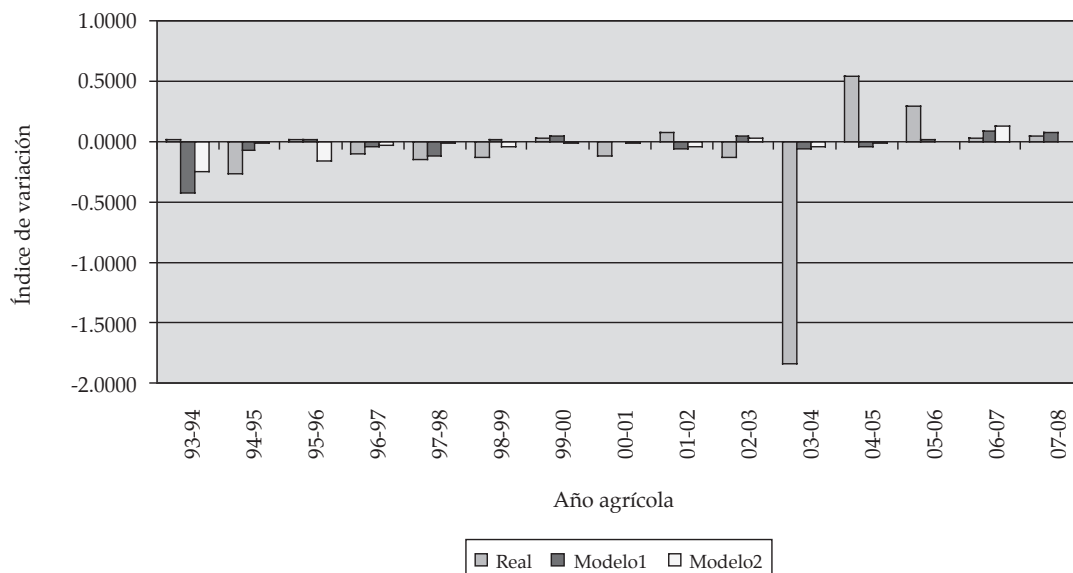


Figura 4. Índice de variación o equidad interanual de agua.

operadores de maquinaria, y prestadores de servicios, entre otros.

Al comparar los escenarios modelados *Modelo1* y *Modelo2* con el *Escenario Real*, se observa que el índice de variación del volumen entregado o índice de equidad interanual es similar en los dos escenarios modelados durante el periodo de estudio, variando los valores entre -0.4 a 0.1; mientras que en el *Escenario Real*, en el año 2003-2004, el índice de variación fue de -1.8. Este valor se obtuvo debido a que el volumen de agua cambia de 1 419 hm³ entregados en el año 2002-2003 a sólo 499 hm³ entregados en el año 2003-2004. En el cuadro 3 se puede demostrar cómo en el *Escenario Real* los usuarios del agua utilizaron un volumen excesivo de agua del año 1993 al año 1997, inclusive en cultivos poco rentables, como se observa en la figura 2, minimizando las posibilidades de poder mitigar los efectos de la sequía en los años posteriores, colapsando al sistema y haciéndolo más vulnerable.

El valor del índice promedio de equidad interanual durante el horizonte de planeación bajo el *Escenario Real* fue igual a 0.07, mientras

que en los escenarios modelados *Modelo1* y *Modelo2*, los valores obtenidos fueron 0.04 y 0.01, respectivamente. Con los resultados anteriores se determina que el escenario *Modelo2* fue el más equitativo en cuanto a la distribución del agua entre años agrícolas, ya que su valor es el más cercano a cero, lo que significa que hay menor desviación entre los valores del volumen de agua entregado cada año agrícola. Por otro lado, se observa que el escenario menos equitativo es el *Escenario Real*, debido principalmente a la reducción del volumen entregado durante los años 2003-2004, 2004-2005 y 2005-2006.

Equidad anual

Como se mencionó anteriormente, la equidad anual en el distrito de riego se alcanza cuando en un año agrícola en particular se logra establecer al menos el 100% de primeros cultivos y todos los usuarios del distrito reciben el volumen de agua necesario en cantidad y calidad suficientes como para establecer el cultivo que tengan proyectado sembrar y, de esta manera, recibir los beneficios económicos, sociales y culturales derivados

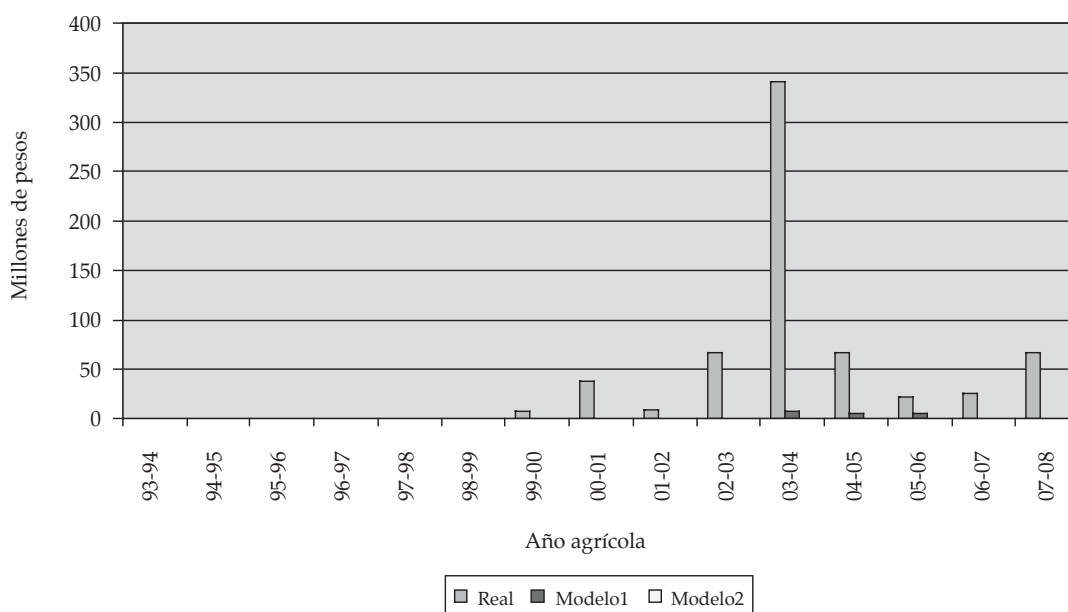


Figura 5. Indicador de equidad anual (costo anual por déficit de agua).

de la actividad agrícola. Por otro lado, si no se logra establecer en un año agrícola el 100% de la superficie regable y algunos agricultores no obtienen los beneficios esperados de la actividad agrícola, se considera que el distrito no es equitativo y, por lo tanto, esta inequidad tiene un costo por déficit de agua, el cual se ha propuesto como un indicador de equidad, en cuanto a la distribución del agua en el mismo año agrícola.

La figura 5 muestra cómo en el *Escenario Real*, el indicador de equidad anual o costo por déficit de agua se empieza a manifestar desde el año 1999-2000, haciendo crisis en el año 2003-2004, donde en este periodo no se logró sembrar el 100% de la superficie anual regable con primeros cultivos, reduciendo la derrama económica derivada de la actividad agrícola. El escenario *Modelo1* muestra que del año 2003-2004 al 2005-2006 se tuvo un pequeño déficit, como lo muestra el costo por déficit de agua con valores de 7, 5 y 6 millones de pesos en cada año, respectivamente. En el escenario *Modelo2*, el valor del costo por déficit de agua en todos los años del periodo analizado fue cero (óptimo), ya que en todos los años se lograron sembrar más de 206 000 hectáreas. Del análisis anterior se puede afirmar que el escenario que tuvo mayor costo por déficit de agua en todo el periodo fue el *Escenario Real*, considerando que no hubo equidad en algunos años agrícolas en la distribución de los beneficios derivados de la agricultura, sobre todo en el año 2003-2004; por el contrario, el escenario más equitativo fue el *Modelo2*.

Conclusiones y recomendaciones

Al evaluar el periodo de operación 1993-2008 y de acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que bajo las condiciones prevalecientes en el *Escenario Real*, los recursos hidráulicos disponibles se usaron de una manera no sustentable antes de que colapsara el sistema de presas en el año agrícola 2003-2004; sobre todo los primeros tres años del periodo de observación, las extracciones de

agua del sistema de presas fueron muy altas, obteniendo una productividad del agua muy baja, ya que ésta se utilizó incluso en cultivos poco rentables o no rentables. Después de este año tan crítico y con la experiencia tan adversa que se tuvo, los tomadores de decisiones y los mismos usuarios han sido más cautelosos para la extracción del agua del sistema de presas, incluso si se tienen niveles de almacenamiento muy favorables.

Al analizar los escenarios modelados, se concluye que el manejo de los recursos hidráulicos se puede realizar de una manera sustentable, asegurando primero cada año agrícola el agua necesaria para el establecimiento de toda la superficie regable con primeros cultivos y cuándo es factible usar sólo el agua disponible para segundos cultivos. De esta manera se concluye que los escenarios de manejo modelados permitieron mitigar y hacer frente de manera eficiente a la sequía presentada, reduciendo de manera significativa los efectos nocivos que ocasiona este fenómeno. El escenario de manejo *Modelo2* fue el que mostró los atributos sustentables más favorables, debido a que en este escenario no se tuvo ningún año de falla, ya que en todos los años se logró sembrar el 100% de la superficie regable con primeros cultivos y el 9% de la superficie con segundos cultivos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones, a ser consideradas por el Comité Hidráulico del Distrito de Riego 041, Río Yaqui, órgano responsable de tomar las decisiones en el distrito de riego:

1. Al inicio de cada año agrícola (1° de octubre), invariablemente la asignación anual para riego a nivel punto de control de módulo no debe ser superior al volumen requerido para la irrigación de 206 000 hectáreas de primeros cultivos. En esa fecha no se debe asignar ningún volumen para la irrigación de segundos cultivos.
2. Asignar un volumen para segundos cultivos sólo si al final del periodo vegetativo de los

primeros cultivos establecidos (mes de abril), el sistema de presas muestra niveles de almacenamiento superiores a los necesarios para el establecimiento de los primeros cultivos del próximo año. El volumen asignado para riego de los segundos cultivos será aquel que se encuentre por arriba de los 3 400 hm³ de almacenamiento en el sistema de presas a finales del mes de abril, más el volumen que se permita extraer del acuífero de acuerdo con las extracciones previas realizadas durante el año agrícola vigente.

3. Para garantizar la sustentabilidad del distrito de riego, se recomienda utilizar cada año agrícola al menos 420 hm³ de los acuíferos del Valle del Yaqui y Cocoraque, ya que este volumen es parte de la disponibilidad hídrica del sistema. Se recomienda bombear este volumen incluso en años húmedos.
4. Dado que la productividad del agua en el sector agrícola es muy baja, se recomienda experimentar con cultivos más rentables, explorar nuevos mercados y tratar de dar un valor agregado a los productos agrícolas para mantener la sustentabilidad socioeconómica del distrito.

Recibido: 22/12/2008

Aprobado: 09/05/2009

Referencias

- BISWAS, A.K. Sustainable water resources development: some personal thought. *Journal of Water Resources Development*. Vol. 10, no. 12, 1994, pp. 109-116.
- CAI, X., MCKINNEY, D.C. and LASDON, L.S. Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach. *Journal of Advances in Water Resources*. Vol. 24, 2001, pp. 667-676.
- CAI, X., MCKINNEY, D.C. and LASDON, L.S. A framework for sustainability analysis in water resources management and application to the Syr Darya Basin. *Journal of Water Resources Research*. Vol. 38, no. 10, 2002, pp. 197-208.
- DUBOURG, W.R. Reflections on the meaning of sustainable development in the water sector. *National Research Forum*. Vol. 21, no. 3, 1997, pp. 191-200.
- HASHIMOTO, T., STEDINGER, J.R. and D.P. LOUCKS. Reliability, resilience, and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation. *Journal of Water Resources Research*. Vol. 18, no. 1, 1982, pp. 14-20.
- HATHAWAY, D. Myths of sustainable water management: A hydrologist perspective. *Allocating and Managing Water for a Sustainable Future: Lessons from around the world*. Boulder, USA: University of Colorado School of Law, 2002.
- LOUCKS, D.P. Sustainable water resources management. *Journal of Water Resources Research*. Vol. 25, no. 1, 2000, pp. 3-11.
- MASERA, O.R., ASTIER, M. y LÓPEZ, S. *Sustentabilidad y manejo de recursos naturales: el marco de evaluación MESMIS*. Pátzcuaro, México: Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C., 2000.
- MATHESON, S. *Distributive fairness criteria for sustainable project selection*. M.Sc. thesis. Winnipeg, Canada: Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, 1997, pp. 63-85.
- MINJARES, J.L. *Sustainable Operation of the Yaqui River Multiple Reservoir System*, Ph.D. dissertation. Las Cruces, USA: New Mexico State University, 2004, pp. 51-64.
- MINJARES, J.L., SALMON, R.F., OROZ, L.A. y CRUZ, R.I. Modelo hidrológico-agronómico-económico para la operación óptima del sistema de presas del río Yaqui usando algoritmos genéticos. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIII, no. 3, 2008, pp. 37-48.
- MINJARES, J.L., SALMON, R.F., VALDÉS, J., OROZ, L. A. y LÓPEZ, R. Índice económico para el manejo interanual del agua: caso del distrito de riego No. 041, Río Yaqui. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XXIV, no. 1, 2009, pp. 41-53.
- PEREIRA, L.S. Research agenda on sustainability of irrigated agriculture. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol. 122, no. 3, 1996, pp. 172-177.
- TURNER, R.K. *Sustainability: Principles and Practices in Sustainable Environmental Economics and Managements*. London: R.K Turner, Belhaven, 1993.
- WECD. *Our Common Future*. The Brundtland Report. Oxford: World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, 1987, 383 pp.

Abstract

MINJARES-LUGO, J.L., VALDÉS, J.B., SALMÓN-CASTELO, R.F., OROZ-RAMOS, L.A. & LÓPEZ-ZAVALA, R. 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 (in Spanish). Vol. I, no. 1, January-March, 2010, pp. 137-151.

Irrigation District No. 041, Río Yaqui, in Northwestern Mexico, has been affected by an unsustainable agricultural development due to intensive agricultural practices that combined, with an extreme drought, collapsed the system in 2003. The objective of this research is to develop a multiyear simulation-optimization model that allows for the creation of a quantitative and transferable methodology that promotes and impulses better and sustainable practices in the activities of the irrigation district. Furthermore, it attempts to define indices that explain the most important sustainable attributes of the system, and as a result of this study it is determined at each decision level, how these sustainable practices will be performed and by whom. In this research, the annual hydrologic-agronomic-economic simulation-optimization model developed by Minjares et al. (2008) was used and extended to a multiyear model connecting the annual models. In the long-term model, sustainable criteria like productivity, reliability, resilience, vulnerability and equity, to control the relationship between the decisions taken in the present and their long term consequences are included. The results indicate that the model can be used for developing the annual irrigation plan for the irrigation district, under different management scenarios in the long-term framework, and to identify possible practices or decisions that can put the sustainability of the system at risk. In addition, the model can be used to evaluate water management practices and decisions that have been taken in the past and possible conflicts for water in the future.

Keywords: water sustainability, management scenarios, Irrigation District No. 041, Yaqui River basin.

Dirección institucional de los autores

Dr. José Luis Minjares-Lugo

Visiting Research Scholar
The University of Arizona
845 N. Park Ave 5th floor
Tucson, Arizona, 85721-0158
Civil Engineering and Engineering Mechanics
telephone: + (00) (520) 6218 787
jose.minjares@conagua.gob.mx

Dr. Juan B. Valdés

Director
The University of Arizona
845 N. Park Ave 5th floor
Tucson, Arizona, 85721-0158
Sustainability of semi-Arid Hydrology and Riparian Areas
(SAHRA) NSF Center
telephone: + (00) (520) 621-8787
jvaldes@u.arizona.edu

Roberto F. Salmón-Castelo

Director General
Comisionado de la Sección Mexicana de la CILA MEX/EUA

Comisión Internacional de Límites y Aguas (CILA/IBWC)
Avenida Universidad 2180, Zona El Chamizal
32310 Ciudad Juárez, Chihuahua, México
teléfono: + (52) (656) 6397 959
rsalmon@cila.gob.mx

M.C. Lucas Antonio Oroz-Ramos

Director Técnico
Comisión Nacional del Agua
Paseo de la Cultura y Blvd. Comonfort
Edificio México, Colonia Villa de Seris
83000 Hermosillo, Sonora, México
teléfono: + (52) (622) 130 420
lucas.oroz@conagua.gob.mx

M.C. Raúl López-Zavala

Jefe de Sistemas Administrativos
Departamento de Operación
Comisión Nacional del Agua
Hidalgo y Sinaloa, colonia Centro
85000 Ciudad Obregón, Sonora, México
teléfono: + (52) (644) 4140385
lopezavala_raul@hotmail.com