

MODELO DE GESTIÓN DE AGUA PARA EL PLAN DE CULTIVOS DEL CANAL M7-1 DEL SISTEMA DE RIEGO COJEDES-SARARE, ESTADO PORTUGUESA*

Water management model for M7-1 channel plan crop at Cojedes-Sarare irrigation system, Portuguesa State

Anolaima Delgado¹, Yelitza García², Belkis Gutiérrez³, Jenny Torrealba⁴ y Samuel Herrera¹

RESUMEN

Con el fin de disponer de herramientas que ayuden a la toma de decisiones ante posibles contingencias por escasez de agua de riego proveniente del embalse Las Majaguas, se desarrolló un modelo de gestión de agua para el plan de cultivos de parcelas abastecidas por el canal M7-1, del Sistema de Riego Cojedes-Sarare, estado Portuguesa. La información se obtuvo a través de 81 encuestas aplicadas a productores que sembraron con riego en el ciclo norte verano 2012-2013 y estadísticas llevadas por los hidrómetros que laboran en el sistema. El modelo matemático fue normativo, determinístico y estático, de programación lineal, ejecutado con el programa GAMS. Como resultados se determinaron los cultivos y la superficie óptima por finca con dos objetivos diferentes en el modelo: maximizar las ganancias del productor y minimizar el uso del agua. Por medio de la simulación se obtuvieron resultados productivos ante posibles escenarios de disminución de 80; 60 y 40% del agua disponible en el sistema, esto aporta posibles soluciones a fin de formular políticas efectivas y recomendaciones técnicas para optimizar el uso del recurso y aumentar la producción en la zona bajo estudio.

Palabras clave: riego, programación lineal, plan de cultivo, ahorro de agua

ABSTRACT

In order to have tools that help decision making for possible contingencies concerning shortage of irrigation water from the reservoir Las Majaguas, a model water management for plan crop of plots supplied by the channel M7-1 from the Irrigation System-Sarare Cojedes, Portuguesa was developed. The information was obtained through surveys of 81 farmers who planted under irrigation in northern summer cycle 2012-2013 and statistics carried by hydrometrics working in the system. The mathematical model was normative, deterministic and static, linear programming, executed with the GAMS program. As a result, crops and optimum surface per farm with two different goals in the model were determined: maximize profits and minimize producer water use. Through simulation production results were obtained for possible scenarios of 80; 60 and 40% reduction of available water in the system, this provides possible solutions to formulate effective policies and technical recommendations to optimize resource use and increase production in the area under study.

Key words: irrigation, linear programming, cultivation plan, saving water.

(*) Recibido: 27-11-2015

Aceptado: 27-06-2016

¹Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado" UCLA, Departamento de Ciencias Sociales, Cabudare-Lara. Venezuela. Apartado postal 400. anolaimadelgado@ucla.edu.ve.

²Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado" UCLA, Departamento de Ingeniería Agrícola, Cabudare-Lara. Venezuela. Apartado postal 400. yelitzagarcia@ucla.edu.ve.

³Construproy Portuguesa 07. Acarigua- Portuguesa. E-mail: lisgeomaj@gmail.com.

⁴Universidad Fermín Toro, Escuela de Computación Cabudare-Lara. yens131@gmail.com.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de Riego Cojedes-Sarare se encuentra ubicado en el estado Portuguesa, constituye un parcelamiento de reforma agraria que data de 1963, se abastece del Embalse Las Majaguas y cuenta con canales primarios, secundarios y terciarios para distribuir el agua de riego a 14.000 ha y a 550 productores agrarios que siembran arroz, caña de azúcar, pastos para ganadería y tomate. El área sembrada de arroz y caña es predominante en el sistema de riego, el pasto en las últimas temporadas se ha incrementado, se siembran otros cultivos, pero en muy pequeñas áreas como tomate y maíz, este último relevante dentro del sistema en época de secano (INDER y MPPAT 2013).

Con más de 50 años de funcionamiento el sistema ha mostrado dificultades, según González y Salazar (2005), se evidencia disminución de la cantidad de agua del embalse debido al azolve, además de problemas en la distribución de agua por el deterioro de los canales, por lo que muchos productores carecen del agua para el riego de manera oportuna y permanente.

Por otra parte, la forma de producción trae consigo un uso agotador del agua, en cultivos como el arroz, en el cual persisten prácticas como riego por gravedad, nivelación tradicional y el batido del barro. Las limitaciones de un productor para sembrar son: suministro oportuno del agua por parte del hidrómetro (fecha de inicio), que el vecino permita la entrada de agua según su posición en el canal y los cortes programados de agua, que corresponden a número de días sin agua y con agua según el cronograma previsto por la empresa de riego (Delgado *et al.* 2015).

El cultivo de arroz posee las mayores demandas de agua del sistema de riego las Majaguas, consume más de 72% del agua disponible para riego. En este aspecto se debe mencionar que más de 22% de esa agua es utilizada para el “batido de barro”, sin que esto sea considerado como uso consuntivo del cultivo. El agua disponible en el embalse es suficiente para regar un total de aproximadamente 14.000 ha

siempre y cuando se disponga una eficiencia total en 45%. De aumentar la eficiencia del sistema a 55% se podría regar hasta unas 15.800 ha. En un escenario optimista de “no batido de barro” y eficiencia de 55% esta cifra se elevaría a 18.600 ha. Ello implicaría la adopción de nueva tecnología para la siembra de arroz y la organización de usuarios de riego que garantice la aplicación de las láminas de riego de una forma justa, oportuna y con principio de equidad (Baldayo y Bolívar 2001).

Según OLMECA-INDER (2010), en el año 2008, el Gobierno de la República Bolivariana de Venezuela otorgó potestad al Instituto Nacional de Desarrollo Rural (INDER) para llevar a cabo el mantenimiento del sistema de forma temporal, para este fin se creó la Empresa Socialista de Riego Las Majaguas (ESRLM).

Según el INDER y MPPAT (2013), en su Informe de Gestión de las Majaguas entre los años 1999-2013, la temporada con mayor área regada (12.115 ha) fue la del norte verano 2008 – 2009, y la mínima (7.020 ha) en 2009-2010. En la temporada 2008 – 2009, hubo mayor extracción de agua del embalse con $263,49 \times 10^6 \text{ m}^3$. En la temporada 2004–2005, se realizó la mayor entrega de agua, y en 2009-2010 se produjo la menor entrega de agua para los diferentes cultivos.

El motivo de esa menor entrega de agua fue la sequía consecuencia del Fenómeno del Niño, que ocasionó reducción de los niveles de agua del embalse, para este año se disminuyó el área de siembra. La toma de decisiones en la reducción del área a sembrar ante estos eventos inesperados se torna difícil, por la existencia de pequeños agricultores necesitados del ingreso proveniente de la venta de su cosecha para mantener a sus familias.

Las consecuencias de la disminución de la cantidad de agua disponible en el embalse por la sedimentación del embalse Las Majaguas y demás problemas que se presentan pueden ser minimizados, si existe el estudio de alternativas de cultivos ahorradores de agua que contribuyan a distribuir mejor el recurso.

La planificación de los cultivos a irrigarse en sistemas de riego es importante para seleccionar la mejor combinación, existen varias metodologías, entre ellas las basadas en la programación matemática, en las cuales a través de una función objetivo y restricciones se resuelven problemas complejos en búsqueda de una solución óptima. Se considera como plan de cultivos la combinación de actividades en cada finca y la superficie a sembrar que elige el modelo para cumplir con la función objetivo planteada.

La incorporación de las restricciones de agua en los modelos de selección de cultivos ha sido ampliamente tratada en países como España, haciendo énfasis en el cálculo de tarifas de agua. Tal es el caso de la obtención de una curva de demanda de agua de riego con la propuesta de un sistema de tarificación elaborado por Cañas *et al.* (2000). Jiménez *et al.* (2001) analizaron la toma de decisiones de los agricultores ante cambios en el precio del agua usando un modelo multicriterio, posteriormente Pujol (2002) usó la programación por metas ponderadas para la maximización del excedente del agua del regante, junto con la minimización de la mano de obra y el riesgo.

Martínez y Gómez-Limón (2004) propusieron un modelo de programación matemática que simula el equilibrio del mercado para diferentes escenarios de dotación de agua, costos de transacción y tarifa de agua, cuantificaron para cada caso, los beneficios económicos (incrementos de eficiencia) y sociales (impacto sobre el empleo agrario) que generaría la aplicación efectiva del mercado de agua, emplearon además simulaciones para calcular la disponibilidad de agua por transferencias incorporando una restricción de necesidades hídricas del cultivo y la compra de agua por parte del productor.

Riesgo y Gómez-Limón (2005) diseñaron un enfoque metodológico para el análisis de presiones e impactos de la aplicación conjunta de diferentes escenarios de política agraria y de tarificación del agua de riego, utilizaron modelos de programación matemática basados en la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT), de modo de simular el comportamiento de los agricultores en el futuro.

Los resultados obtenidos evidenciaron la utilidad de este enfoque metodológico para evaluar los efectos derivados de la aplicación conjunta de políticas.

Villavicencio *et al.* (2011) para determinar el uso más eficiente del agua en zonas de secano, utilizaron el modelo de optimización no lineal ejecutado mediante el software GAMS-MINOS 2.25, que usa funciones agua-producción para diversos cultivos, costos de producción y de construcción de embalses y determinan el patrón de cultivos que optimiza el uso del agua utilizando una restricción física de disponibilidad de agua, la cual no puede ser mayor que el agua envasada.

Calatrava y Martínez-Granados (2012) emplearon un modelo de programación matemática no lineal que asigna los recursos hídricos y la superficie regable entre los cultivos de cada unidad de demanda agraria, el modelo permitió analizar el impacto de los diferentes escenarios de disponibilidad de agua.

Dada la aplicabilidad metodológica de la programación matemática para aportar soluciones que contribuyan a una mejor toma de decisiones con respecto a la sección de un plan de cultivo ahorrador de agua, se propuso desarrollar un modelo de gestión de agua para el plan de cultivos del canal M7-1 del Sistema de Riego Cojedes-Sarare, estado Portuguesa.

ÁREA DE ESTUDIO

El Sistema de Riego Cojedes-Sarare, más conocido como Las Majaguas, se localiza en la región Centroccidental de Venezuela, al Noreste del estado Portuguesa y límites con el estado Cojedes en jurisdicción de los municipios San Rafael de Onoto, Agua Blanca y Páez. Por su parte, el canal de riego M7-1 representa el 12,79% del total del sistema de riego, cuenta con una superficie de 4.213 ha, 23 parcelas de entre 10 a 15 ha, 213 productores registrados, de los cuales sólo 110 pertenecen al Consejo Comunal Canal M7-1. Los canales de distribución poseen 36 km de longitud entre canal piloto y canal secundario y 40,25 km de canales terciarios (color azul en la Figura 1).

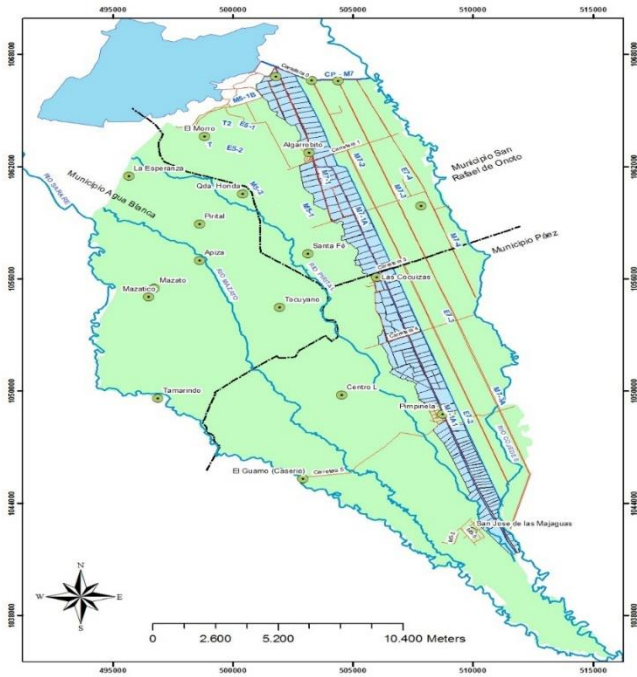


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.
Fuente: MPPAT y ESRLM (2013)

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la obtención de datos utilizados en el desarrollo del modelo, se diseñó y validó una encuesta técnica. La encuesta se aplicó en el periodo de mayo a octubre de 2013, a 81 productores agrarios de 110 (73,64%) que conforman el Consejo Comunal Canal M7-1 y sembraron durante el ciclo 2012-2013. Los datos correspondientes a la tecnología y otras interrogantes de las encuestas fueron procesados en Excel, seguidamente se estimaron los costos de producción de cada cultivo y finca. Los rendimientos de los cultivos fueron calculados tomando el promedio de todas las fincas. El cálculo de la dotación de agua se obtuvo a partir de la información aportada por los hidrómetros y validada por la medición de los canales.

Los cultivos que sembraron fueron arroz bajo dos tecnologías: barro batido (que es la forma tradicional donde inundan el suelo y realizan un pase de cesta), y la siembra directa y caña de azúcar. Además, se tiene ganadería de leche con pastos cultivados. Para el ciclo de invierno, algunos productores sembraron un segundo ciclo con maíz.

El agua fue usada, además del riego de los cultivos, para controlar malezas por inundación en el arroz, aplicar fertilizantes a través de fertirrigación y pregerminar la semilla. El riego se aplicó por gravedad, lo que permite ahorro en infraestructura de riego y mano de obra, pero causa importantes pérdidas en infiltración y evaporación.

Para el cálculo de la cantidad de agua requerida por los cultivos, se usó el programa CROPWAT versión 8, al cual se cargaron los datos de evapotranspiración del cultivo de referencia obtenidos mediante la ecuación de Hargreaves modificado por Samani (FAO 2006), la cual ha sido ampliamente usada y estudiada en la última década debido a su simplicidad, confiabilidad, mínimos requerimientos climáticos. Esta ecuación utiliza solamente datos de temperatura (Rivano y Jara 2005).

$$ET_0 = 0,0023 \times R_a \times (TD)^{0,5} + (T+17,8)$$

Donde:

ET_0 : evapotranspiración del cultivo de referencia en $mm\ d^{-1}$

R_a : radiación extraterrestre en $mm\ d^{-1}$

TD : diferencia de temperatura diaria de rango de variación máxima menos la mínima ($^{\circ}C$)

T : temperatura media en $^{\circ}C$

Para la determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia se utilizaron los datos históricos obtenidos de la estación de Estación agroclimática del Sistema de Riego Cojedes-Sarare. Este dato no se obtiene directamente del programa CROPWAT debido a que las ecuaciones del programa (Penman-Monteith) necesitan una gran cantidad de datos climáticos (radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento), que no se poseen en las estaciones convencionales.

Al programa CROPWAT se le carga la información referente a los cultivos, como: duración de la etapa de crecimiento (inicial, desarrollo, y final en días), coeficiente de cultivo K_c (Doorenbos y Pruitt 1980), profundidad de raíces, factor de reducción de rendimiento K_y

(Doorenbos y Kassam 1980) y las fechas de siembra de los cultivos. Adicionalmente se cargó información referente al suelo: textura, humedad total utilizable del suelo (HTU), nivel de agotamiento de la humedad, agotamiento inicial de la humedad del suelo, humedad inicial en el suelo y tasa máxima de infiltración de la precipitación en el suelo, se tomó como referencia la clasificación de los suelos realizado por OLMECA-INDER (2010).

Se diseñó un modelo normativo, determinístico y estático, con uso de programación matemática de la realidad, se simularon cambios en la disponibilidad del agua de riego para tener referencias para la toma de decisiones de las políticas que podrían aplicarse. El modelo de programación lineal fue resuelto a través del software GAMS.

Se tomaron datos provenientes de las encuestas aplicadas. No se incluyeron entre los costos a las depreciaciones por ser parcelas pequeñas con infraestructura que pasan su vida útil estimada (fueron dotadas en 1963). Como supuestos se consideró que los productores no tuvieron limitaciones de financiamiento, maquinaria, mano de obra e insumos, el productor vendió todo lo que produjo y las variables siguen el comportamiento lineal. La cantidad de agua de riego fue la aportada por la ESRLM, pues en ese dato ya se incluye la disminución de agua por los cortes o restricción por ubicación de la parcela dentro del canal terciario. Se consideraron sólo los cultivos que fueron sembrados para el momento de la investigación. Las pérdidas de drenaje no fueron incluidas.

Diseño del modelo

Las fórmulas utilizadas para establecer el plan de cultivo óptimo, fueron las siguientes:

Se utilizaron las variables: cultivos (c), fincas (e), margen bruto (MB_c).

Variables de decisión: superficie a sembrar por cada finca (X_{e,c}), cantidad de agua (A) y margen bruto (MB_c).

Cálculo del margen bruto (Bs ha⁻¹) por cultivo:

$$MB_c = Rdt_c * PC_c - Cost_c$$

Siendo: MB_c = margen bruto (Bs) por cultivo, Rdt_c = rendimiento (kg ha⁻¹), PC_c = precio del producto (Bs kg⁻¹), Cost_c = costo de producción (Bs ha⁻¹) por cultivo

Función objetivo maximizar el margen bruto

Este es el objetivo más usado al establecer un plan de cultivo, pues se busca que el agricultor obtenga mejores resultados económicos con un mayor ingreso y menor costo en la superficie programada de siembra.

La fórmula utilizada fue:

$$Z = \sum_{e=1}^{83} \sum_{c=1}^5 MB_c X_{e,c} - tm3 * \sum_{e=1}^{83} \sum_{c=1}^5 X_{e,c}$$

Siendo: Z = margen bruto total (Bs) de los productores del canal, MB_c = margen bruto (Bs) por cultivo, X_{e,c}: superficie (ha) a sembrar por finca y cultivo, tm3 = tarifa de riego (Bs) por hectárea.

Restricción de superficie: Esta restricción señala que no se puede sembrar más superficie que la disponible por cada finca.

$$\sum_{c=1}^5 X_{e,c} \leq d_{sup_e}$$

Siendo: d_{sup_e} = disponibilidad máxima de superficie (ha) por finca

Restricción de agua: En esta restricción se dispone que la superficie a sembrar según las necesidades de agua por cultivo y según la textura del suelo (por la infiltración) tiene que ser menor o igual a la disponibilidad de agua, es la cantidad de agua consumida según las necesidades del cultivo por la superficie a sembrar por finca, no pueden ser mayores a la disponibilidad de agua.

$$\sum_{c=1}^5 X_{e,c} * nag_c * tex_e \leq \sum_{c=1}^5 dag_e * X_{e,c}$$

Donde: nag_c = cantidad de agua requerida para sembrar (mm ha⁻¹) cada cultivo, X_{e,c} = superficie a sembrar por finca y cultivo, dag_e = disponibilidad de agua (mm) por el sistema de riego en lámina

entregada por finca, tex_e = Índice de retención de agua en el suelo según textura por finca (método que se explica más adelante).

Función objetivo minimizar el agua necesaria para regar la superficie.

Se planteó establecer en el modelo, un nuevo objetivo para conocer los resultados del plan de cultivos cuando se minimiza el uso del agua, se utilizó la reducción de las necesidades de agua de modo de demandar una menor cantidad de agua por superficie a fin de producir un ahorro de todo el canal de riego, para producir una buena proporción de superficie con la menor cantidad de agua. Para ello, se cambió la restricción de tierra de mayor o igual a igual, lo que obliga al modelo a incluir la superficie disponible, de otra forma la superficie a producir sería cero para minimizar el agua. El modelo eligió la superficie del cultivo a producir para un consumo de menor cantidad de agua en las condiciones de los suelos existentes en la zona.

Función objetivo minimizar el agua necesaria para regar la superficie por cultivo que elija el modelo:

$$\sum_{e=1}^{83} \sum_{c=1}^5 nag_c X_{e,c} = A$$

A= cantidad de agua total del canal para el grupo de productores

Restricción de tierra

$$\sum_{c=1}^5 X_{e,c} = d\ sup_e$$

$d\ sup_e$ = disponibilidad de superficie (ha) por finca

Simulación

Se realizó la simulación con la disminución en 80% de la disponibilidad de agua, si existe limitación en la cantidad de agua ofertada en 20%, ¿qué nuevos resultados generaría el modelo?, bajo la misma hipótesis se corrió de nuevo el modelo con 60 y 40%, tanto para el objetivo de minimización como para maximización del agua, considerando los rendimientos como una función lineal.

Se ejecutó modificando la ecuación de restricción del agua como sigue en el modelo que minimiza el agua, se coloca como ejemplo 80% de la disminución de la disponibilidad:

$$\sum_{c=1}^5 X_{e,c} * nag_c * tex_e \leq \sum_{c=1}^5 dag_e 0,8 * X_{e,c}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las encuestas aplicadas se tomó la información que se muestra en la Tabla 1.

Para introducir la variable suelo en el modelo se utilizó un índice según la textura del suelo, por ser la característica que interviene en la retención del agua a profundidad de 20 cm e influye directamente en la cantidad de agua disponible para los cultivos. Para realizar el cálculo del índice se tomó como referencia la clasificación de los suelos realizado por OLMECA-INDER (2010), y se contrastó con la textura de 34 muestras de suelo tomadas en fincas encuestada, para aproximar la textura a la clase a la que pertenecen cada una de estas unidades de producción. Así un suelo con textura franco arcillosa retiene el 90% del agua ya que escurre más rápidamente, un suelo franco el 100% pero un suelo franco arenoso el 125%. Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Precio, rendimientos, costos y necesidades de agua por cultivo.

Cultivos	Precio (Bs kg o l)	Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)	Costos de producción (Bs ha ⁻¹)	Necesidades de agua (mm ha ⁻¹)
Arroz barro batido	3,50	6.163,10	9.227,00	1.301,00
Arroz siembra directa	3,50	7.799,10	11.861,00	1.301,00
Caña de Azúcar ciclo anterior	0,15	55.000,00	7.369,00	1.018,00
Maíz	3,96	4.000,00	8.059,00	900,00
Ganadería (pastos)	4,00	7.500,00	15.754,00	1.192,00

Nota: para el caso de la ganadería el beneficio se calculó por los litros de leche vendidos.

Se aprecia que las fincas tienen textura franca en su mayoría, lo que genera ventajas al incorporar otros cultivos, es de hacer notar que existen fincas con diferentes tipos de suelo por efecto de la macro nivelación, que tuvo lugar para aplanar el terreno cuando se configuró el sistema, en estas fincas se consideró el predominante.

En relación a las necesidades de agua cabe destacar, que la técnica del barro batido utiliza más agua que la siembra directa de arroz; sin embargo,

el cultivo usa la misma cantidad de agua. Se realizó la prueba de colocar un indicador de aumento en la cantidad de agua, pero el resultado del modelo fue el mismo.

La disponibilidad de agua utilizada fue reportada por los hidrómetros en el ciclo (Tabla 3). Se evidencia que esta cantidad de agua depende de las necesidades de producción por el rubro a sembrar establecido en el contrato de riego, las fincas que aparecen en cero son aquellas que no

Tabla 2. Índice de absorción de agua por el suelo por finca según la textura.

Finca	Índice	Finca	Índice	Finca	Índice	Finca	Índice
1I-01	1,25	1I-24	0,9	1I-61	1,25	1J-21	1,25
1I-02	1,25	1I-25	0,9	1I-62	1,25	1J-22	1,25
1I-03	1,25	1I-29	0,9	1J-01	0,9	1J-23	1,25
1I-04	1,25	1I-31	0,9	1J-02	0,9	1J-24	1,25
1I-06	1,25	1I-33	0,9	1J-03	0,9	1J-25	1,25
1I-08	1,25	1I-34	0,9	1J-04	1	1J-26	1,25
1I-09	1,25	1I-36	0,9	1J-05	1	1J-27	1,25
1I-10	1,25	1I-39	0,9	1J-07	1	1J-28	1,25
1I-11	1,25	1I-42	1,25	1J-08	1	1J-31	1,25
1I-12	1,25	1I-43	1,25	1J-09	1,25	1J-32	1,25
1I-13	1,25	1I-46	1,25	1J-10	0,9	1J-33	1,25
1I-15	0,9	1I-48	1,25	1J-11	0,9	1J-34	1,25
1I-16	0,9	1I-52	0,9	1J-12	1	1J-37	1,25
1I-17	0,9	1I-53	0,9	1J-13	1	1J-38	1,25
1I-18	0,9	1I-54	0,9	1J-14	1	1J-39	1,25
1I-19	0,9	1I-55	0,9	1J-16	1	1J-40	1,25
1I-20	0,9	1I-57	0,9	1J-17	1	1J-41	1,25
1I-21	0,9	1I-58	1,25	1J-18	1	1K-02	1,25
1I-22	0,9	1I-59	1,25	1J-19	1	1K-03	1,25
1I-23	0,9	1I-60	1,25	1J-20	1,25	1K-04 y 05	1,25

Tabla 3. Disponibilidad de agua por el sistema de riego en lámina entregada por finca por ciclo.

Finca	Dag (mm)	Finca	Dag (mm)	Finca	Dag (mm)	Finca	Dag (mm)
1I-01	1300	1I-24	2420	1I-61	2130	1J-21	2660
1I-02	2570	1I-25	2520	1I-62	1980	1J-22	2300
1I-03	2090	1I-29	0	1J-01	2420	1J-23	310
1I-04	2250	1I-31	0	1J-02	2420	1J-24	2420
1I-06	0	1I-33	1680	1J-03	900	1J-25	2540
1I-08	2400	1I-34	1680	1J-04	1850	1J-26	2470
1I-09	0	1I-36	0	1J-05	1010	1J-27	2590
1I-10	0	1I-39	790	1J-07	1750	1J-28	2590
1I-11	0	1I-42	0	1J-08	3390	1J-31	1730
1I-12	2700	1I-43	3040	1J-09	2720	1J-32	2380
1I-13	0	1I-46	2250	1J-10	2180	1J-33	780
1I-15	3630	1I-48	1420	1J-11	2180	1J-34	2470
1I-16	2420	1I-52	1650	1J-12	2300	1J-37	00
1I-17	2720	1I-53	1910	1J-13	2060	1J-38	2420
1I-18	2420	1I-54	1910	1J-14	1840	1J-39	2320
1I-19	2420	1I-55	1910	1J-16	2690	1J-40	390
1I-20	2300	1I-57	1310	1J-17	560	1J-41	320
1I-21	2180	1I-58	0	1J-18	2160	1K-02	2380
1I-22	2300	1I-59	1450	1J-19	2590	1K-03	2380
1I-23	0	1I-60	1980	1J-20	2180	1K-04 y 05	2070

Dag = disponibilidad de agua por el sistema de riego en lámina entregada

solicitaron riego o no pudieron sembrar. La tarifa de agua correspondió a 50 Bs ha⁻¹ en el ciclo analizado.

Resultados del modelo

Cuando el modelo se corre con el objetivo de maximizar el margen bruto total, para toda la superficie irrigada por el canal de riego M7-1, con restricción de superficie a sembrar menor o igual a la disponible en cada finca y la restricción de cantidad de agua por finca, establecida según las necesidades del cultivo por la superficie a sembrar, los resultados obtenidos por el modelo se muestran en la Tabla 4.

El modelo eligió el arroz en siembra directa en la mayoría de las fincas, pues alcanza mayor margen bruto, seguido por la ganadería, y en los casos de la limitación de agua se seleccionó maíz. Cinco parcelas siembran más de un cultivo (maíz y pastos).

Cuando se minimiza el agua, el plan de cultivo se modifica por completo, en la Tabla 5 se aprecia la elección del modelo por cultivo de maíz y dejó el arroz en siembra directa sólo en 9 fincas.

Una disminución de agua reduce las ganancias de los agricultores. En la Figura 2 se aprecia la ubicación de las fincas por cultivo, que es muy importante para la planificación de las siembras según los resultados del modelo.

En la Tabla 6 se evidencia una reducción del margen bruto en 51,9 % cuando se minimiza el agua con respecto a la maximización del margen bruto, con los cultivos evaluados. La cantidad de agua real es superior a la de maximización del margen bruto; por tanto ese plan de cultivo propuesto es más eficiente con menos superficie a sembrar, el margen bruto total y la productividad del agua (margen bruto/cantidad de agua) son mayores. Por otra parte, cuando se minimiza el

Tabla 4. Resultados del modelo por finca en la elección del cultivo, superficie y margen bruto, al tener como función objetivo maximizar margen bruto.

Finca	Maximizar Margen Bruto (MB)			Finca	Maximizar Margen Bruto (MB)		
	Cultivo	Superficie (ha)	MB (Bs)		Cultivo	Superficie (ha)	MB (Bs)
1I-01	Maíz	10,93	85061,89	1J-01	Arroz SD	18,00	277845,30
	Ganadería	10,07	143428,72	1J-02	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-02	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-03	Maíz	9,86	76744,00
1I-03	Arroz SD	15,00	231537,75		Ganadería	5,14	73181,70
1I-04	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-04	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-08	Arroz SD	15,00	231537,75		Maíz	9,97	77599,913
1I-12	Arroz SD	18,00	277845,30	1J-05	Ganadería	6,03	85860,64
1I-15	Arroz SD	20,00	308717,00	1J-07	Arroz SD	17,00	262409,45
1I-16	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-08	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-17	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-09	Arroz SD	18,00	277845,30
1I-18	Arroz SD	18,00	277845,30	1J-10	Arroz SD	28,00	432203,80
1I-19	Arroz SD	19,00	293281,15	1J-11	Arroz SD	18,00	277845,30
1I-20	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-12	Arroz SD	18,00	277845,30
1I-21	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-13	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-22	Arroz SD	18,00	277845,30	1J-14	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-24	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-16	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-25	Arroz SD	18,00	277845,30	1J-18	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-33	Arroz SD	18,00	277845,30	1J-19	Arroz SD	14,00	216101,90
1I-34	Arroz SD	16,00	246973,60	1J-20	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-43	Arroz SD	20,27	312884,68	1J-21	Arroz SD	17,00	262409,45
1I-46	Arroz SD	18,00	277845,30	1J-22	Arroz SD	17,00	262409,45
	Maíz	4,60	35815,94	1J-24	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-48	Ganadería	19,40	276329,66	1J-25	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-52	Arroz SD	17,00	262409,45	1J-26	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-53	Arroz SD	26,00	401332,10	1J-27	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-54	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-28	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-55	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-31	Arroz SD	17,00	262409,45
1I-57	Arroz SD	37,00	571126,45	1J-32	Arroz SD	15,00	231537,75
	Maíz	1,86	14496,00	1J-34	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-59	Ganadería	15,14	215641,70	1J-38	Arroz SD	14,00	216101,90
1I-60	Arroz SD	15,00	231537,75	1J-39	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-61	Arroz SD	15,00	231537,75	1K-03	Arroz SD	15,00	231537,75
1I-62	Arroz SD	20,00	308717,00	1K-04	Arroz SD	15,00	231537,75
1K-02	Arroz SD	15,00	231537,75	1K-05	Arroz SD	15,00	231537,75

SD= siembra directa

Tabla 5. Resultados del modelo al minimizar el agua del cultivo, la superficie y el margen bruto por finca.

Finca	MINIMIZAR AGUA		Finca	MINIMIZAR AGUA			
	Cultivo	Superficie (ha)		Margen Bruto (Bs)	Cultivo	Superficie (ha)	Margen Bruto (Bs)
1I-01	Arroz SD	2,4	65.268	1J-01	Maíz	14	108.230,00
	Maíz	4,6		1J-02	Maíz	14	108.230,00
1I-02	Maíz	13,5	104.370,00	1J-03	ArrozSD-maíz	2-6	70.950,94
1I-03	Arroz SD	12	147.530,00	1J-04	Azúcar	10	462.810,00
1I-04	Maíz	14	108.230,00	1J-05	ArrozSD-azúcar	2,8-7,3	89826,55
1I-08	Maíz	13	100.500,00	1J-07	ArrozSD	12	184.630,00
1I-12	Maíz	15	115.970,00	1J-08	Maíz	20	115.970,00
1I-15	Maíz	20	154.620,00	1J-09	Maíz	15	108.230,00
1I-16	Maíz	14	108.230,00	1J-10	Maíz	14	108.230,00
1I-17	Maíz	15	115.970,00	1J-11	Maíz	14	108.230,00
1I-18	Maíz	14	108.230,00	1J-12	Maíz	14	108.230,00
1I-19	Maíz	14	108.230,00	1J-13	Maíz	14	108.230,00
1I-20	Maíz	13	100.500,00	1J-14	Maíz	14	108.230,00
1I-21	Maíz	14	108.230,00	1J-16	Maíz	13	100.500,00
1I-22	Maíz	14	108.230,00	1J-17	Maíz	9,24	6203,02
1I-24	Maíz	14	108.230,00	1J-18	Maíz	13	100.500,00
1I-25	Maíz	13	100.500,00	1J-19	Maíz	15	115.970,00
1I-31	Maíz	22	170.080,00	1J-20	Maíz	15	115.970,00
1I-33	Maíz	15	115.970,00	1J-21	Maíz	14	108.230,00
1I-34	Maíz	15	115.970,00	1J-22	Maíz	14	108.230,00
1I-39	Maíz	6	44.869,00	1J-24	Maíz	14	108.230,00
1I-43	Maíz	16	123.700,00	1J-25	Maíz	14	108.230,00
1I-46	Maíz	14	108.230,00	1J-26	Maíz	14	108.230,00
1I-48	Arroz SD	5,3	93747,313	1J-27	Maíz	14	108.230,00
	Maíz	3,7		1J-28	Maíz	14	108.230,00
1I-52	Maíz	13	100.500,00	1J-31	Arroz SD	10	153.860,00
1I-53	Maíz	14	108.230,00	1J-32	Arroz SD	12	147.530,00
1I-54	Maíz	14	108.230,00	1J-33	Maíz	10	77.310,00
1I-55	Maíz	14	108.230,00	1J-34	Maíz	14	108.230,00
1I-57	Arroz SD	5	61469,25	1J-38	Maíz	14	108.230,00
	Maíz	10	152.680,00	1J-39	Maíz	14	108.230,00
1I-59	Ganadería	9		1K-02	Maíz	15	115.970,00
1I-60	Maíz	13	100.500,00	1K-03	Maíz	15	115.970,00
1I-61	Maíz	14	108.230,00	1K-04	Maíz	15	115.970,00
1I-62	Maíz	13	100.500,00	1K-05	Maíz	15	115.970,00

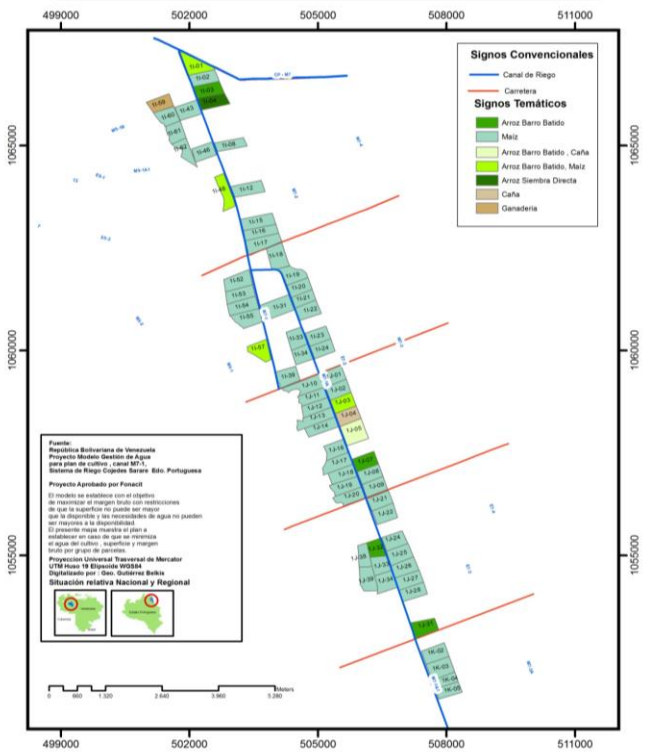


Figura 2. Mapas de resultado de cultivos a sembrar cuando se minimiza el agua.

agua, el ahorro es significativo (45,61%); pero los productores dejan de percibir 51,9% del margen bruto.

Resultados de la simulación

Con la simulación se pretende conocer el plan de cultivo óptimo, superficie, cantidad de agua y margen bruto ante la disminución de 20; 40 y 60% del agua disponible a través del sistema de riego.

Cuando se minimiza el agua, según la Tabla 7, se observa una reducción en la superficie, la cantidad de agua y en el margen bruto. El cultivo que mayormente se elige es el maíz, seguido por el arroz en barro batido y con escasa superficie de caña de azúcar, el número de parcelas a sembrar disminuye. Esto es similar a lo informado por Baldayo y Bolívar (2001), quien señaló que un ahorro de agua implicaría la potencialidad de aumentar el área de cultivo en aproximadamente algo más de 18% en caña de azúcar, hortalizas o tabaco.

Tabla 6. Comparación de los modelos cuando maximiza margen bruto y minimiza agua.

Datos	Real (según encuesta)	Maximiza MB	Minimiza Agua
Superficie a sembrar (ha)	1.102,90	1.067,30	892,50
Cantidad de agua (m ³)	1.527.215,00	1.367.509,00	830.652,00
Margen Bruto del Total encuestados (Bs)	14.423.126,40	16.069.000,00	7.729.114,90
Margen bruto/cantidad de agua	9,44	11,75	9,31
% variación del MB con respecto Max MB			-51,90
% variación cantidad de agua con respecto a la real		-10,46	-45,61

Tabla 7. Resultados de la simulación cuando minimiza la cantidad de agua.

Variables	80% disponibilidad de agua	60% disponibilidad de agua	40% disponibilidad de agua
Superficie a sembrar (ha)	892,50	892,50	857,50
Cantidad de agua (m ³)	81.923,70	79.516,10	76.392,30
Margen Bruto Total del Canal (Bs)	7.894.870,50	7.227.733,00	6.549.499,20
Superficie Maíz (ha)	830,50	864,91	857,50
Superficie Arroz barro batido (ha)	42,75	7,59	
Superficie Caña de azúcar (ha)	19,25	10,00	
Número de parcelas que sembrarían	70,00	66,00	63,00

Validación del modelo

La validación fue realizada con dos técnicos de la ESRLM, dos expertos y un productor, estuvieron de acuerdo en 100% con la importancia del modelo por lo que mostraron interés en la información aportada, señalaron que el modelo puede contribuir a formular políticas sobre uso de agua en el sistema, que aplicando las recomendaciones del modelo se puede ahorrar agua. El 80% cree que los productores no aceptarían cambiar su plan de cultivo actual por otro más eficiente, propusieron introducir al modelo variables como la nivelación y fertilización, lo cultural y social.

Si bien no es fácil introducir cambio en el patrón de cultivos, pueden promoverse campañas de concientización en el uso del agua y promover su uso racional, explicar las ventajas de la aplicación de las recomendaciones del modelo en el mediano y largo plazo para la conservación del agua del embalse, en busca de la sostenibilidad del sistema de riego.

CONCLUSIONES

El modelo de programación lineal con base en restricciones de agua es útil para planificación de los cultivos en el sistema de riego Las Majaguas, cuando se pretende ahorrar agua.

Si se coloca como objetivo maximizar el margen bruto del productor, el modelo eligió el cultivo del arroz con siembra directa. Si el objetivo fue la minimización del agua de riego se propuso sembrar el cultivo de maíz. Con la aplicación de este modelo de programación se puede optimizar la cantidad de agua para obtener un mayor margen bruto en el cultivo seleccionado.

El modelo de optimización planteado permitió estimar la superficie regable y el patrón de cultivos óptimo para diferente disponibilidad de agua.

RECOMENDACIONES

- Tratar de introducir al modelo nuevos cultivos ahorradores de agua como el ajonjolí, girasol y soya.
- Reforzar y actualizar el modelo anualmente para tener información que permita tomar decisiones.

AGRADECIMIENTO

Al FONACIT por el financiamiento de este proyecto “Modelo de gestión de agua para el plan de cultivos del canal m7-1, del sistema de riego Cojedes-Sarare, estado Portuguesa” y al CDCHT de la UCLA por su apoyo logístico.

REFERENCIAS

- Baldayo, I. y Bolívar, R. 2001. Eficiencia de operación del Sistema de Riego Cojedes Sarare. Portuguesa. Informe Técnico. Ministerio del Ambiente. San Rafael de Onoto. Estado Portuguesa.
- Calatrava, J. y Martínez-Granados, D. 2012. El valor del uso de agua en el regadío de la cuenca Segura y en zonas regables de transvase Tajo-Segura. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 12(1):5-32.
- Cañas J., López, M. y Gómez-Limón, J. 2000. Obtención de la curva de demanda de agua de riego generada por una hipotética política de tarifas sobre el agua. *Estudios Agrosociales y Pesqueros* 188: 67-92.
- Delgado, A., García, Y., Gutiérrez, B. y Torrealba, J. 2015. Plan de acción para la gestión de agua en el canal M7-1 del Sistema de Riego Cojedes-Sarare, estado Portuguesa. *Revista CICAG*. 13(1)82-112.
- Doorenbos, J. y Kassam, A. H. 1980. Efectos del agua sobre el rendimiento en los cultivos. *Estudios de riego y drenaje*. FAO. Boletín 33. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 212 p.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. 1980. Necesidades de agua de los cultivos. *Estudios de riego y drenaje*. FAO. Boletín 24. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 194 p.
- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua en los cultivos. Roma. Italia. 332 p.
- González, I. y Salazar, D. 2005. Situación actual del Embalse Las Majaguas, Incorporación del Embalse las Palmas. Estado Portuguesa. Trabajo Especial de Grado. UCV. 216 p.
- Instituto Nacional Desarrollo Rural (INDER) y Ministerio Poder Popular para la Agricultura y Tierras. (MPPAT) 2013. Informe de Gestión 2012. San Rafael de Onoto. Portuguesa. 8 pag.
- Jiménez, J., Berbel, J. y Torrico, M. 2001. Análisis de la Toma de Decisiones de los Agricultores ante Cambios en el Precio del Agua. Modelos de Decisión Multicriterio. *Revista de Estudios Agrosociales y Pesqueros* 190:65-99.
- Martínez, Y. y Gómez-Limón, J. 2004. Simulación multicriterio de mercados de agua de regadío: el caso de la cuenca del Duero. *Estudios Agrosociales y Pesqueros* 202:101-134.
- OLMECA-INDER. 2010. Estudio para la consolidación del Sistema de Riego Majaguas, municipio San Rafael de Onoto, Edo. Portuguesa. Venezuela. 681 p.
- Pujol, J. 2002. Un análisis multicriterio del impacto del nuevo marco normativo del agua en los regadíos de la zona regable del bajo Ter y del Muga (Girona). Tesis doctoral. Universidad de Córdoba. España. 290 p.
- Riesgo, L. y Gómez-Limón, J. 2005. Análisis de escenarios de políticas para la gestión pública de la agricultura de regadío. *Economía Agraria y Recursos Naturales* 5(9):81-114.
- Rivano, F. y Jara, J. (2005). Estimación de la evapotranspiración de referencia en la localidad de Remehue-Osorno, X región. *Agro sur* 33(2):49-61.
- Villavicencio, A., Arumi, J. y Holzapfel, E. 2011. Planificación de los recursos hídricos en zonas de secano usando un modelo de optimización no lineal. *Obras y Proyectos* 10: 73-80.