

Optimización de recursos en la producción de forrajes distrito de riego 028 Tulancingo

Sandra Luz Torres Suárez¹
Leonardo Tijerina Chávez^{1§}
Laura Alicia Ibáñez Castillo²
Martha Bautista Hernández¹

¹Posgrado en Hidrociencias-Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 595 9520200, ext. 1150. (luz@colpos.mx; bautistama475@gmail.com). ²Departamento de Irrigación-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 595 9521620. (libacas@gmail.com).

§Autor para correspondencia: tijerina@colpos.mx.

Resumen

La limitación de recursos en la producción de forrajes, necesaria para el desarrollo de la actividad productiva ganadera en el distrito de riego 028 Tulancingo, en el estado de Hidalgo, motivó la elaboración de un modelo de programación lineal (MPL) que los optimiza en cantidad total requerida. En dicho modelo, con el método Simplex, la función objetivo consistió en maximizar el beneficio económico neto (BN) total del distrito; a partir, de la suma del BN de cada cultivo por su superficie, generando así un patrón que cumple con el total de restricciones a las que se sujeta la función: disponibilidad de recursos y requerimientos de cada cultivo. Con base a el MPL generado, se probaron cuatro escenarios: 1) situación actual; 2) con revestimiento de la red de conducción; 3) con segundos cultivos; y 4) con revestimiento y segundos cultivos. Cada uno con cuatro variantes de disponibilidad hídrica: la registrada en el ciclo agrícola 2018-2017, las calculadas para probabilidad de excedencia de 50, 75 y 95%. La combinación de escenarios y variantes derivó en un total de 16 patrones de cultivo en los que, al reducirse el volumen ofertado, las superficies máximas que los MPL sugieren para cada cultivo se reducen también. Las acciones propuestas en los escenarios 2, 3 y 4 en todos los casos incrementaron la superficie factible al igual que el BN en comparación con la situación actual, aun presentando esta una mayor disponibilidad de agua.

Palabras clave: beneficio neto, patrón de cultivos, programación lineal.

Recibido: enero de 2020

Aceptado: marzo de 2020

Introducción

En el distrito de riego 028 las actividades principales son la agricultura de riego y la ganadería intensiva (Sánchez *et al.*, 2016), destacando de ellas la cadena productiva de lácteos (Sánchez y Terrones, 2015). Al ser la producción de cultivos forrajeros un factor indispensable en el desarrollo de la ganadería, en el Distrito se asigna 97% de su superficie a la siembra de estos (CONAGUA, 2016; SIAP, 2018), históricamente abastecidos a través de la red de canales provenientes del río Tulancingo y el volumen concesionado de extracción para uso agrícola.

Como se sabe, los recursos hídricos que se emplean más allá de su capacidad de renovación modifican las condiciones de equilibrio para su sostenibilidad y suministro necesario a largo plazo (Hanasaki *et al.*, 2010), siendo este el caso del acuífero Valle de Tulancingo (clave 1317), dentro de cuyos límites oficiales se ubica el distrito en estudio, ya que el volumen medio anual de agua subterránea disponible para el año 2013 presentaba un déficit de 6 842.2 miles m³ anuales, extraídos del almacenamiento no renovable, motivo por el cual 87% de su superficie se encuentra sujeta a las disposiciones del decreto por el que se establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo (DOF, 2013).

Para el año 2018, la actualización del balance mostró un incremento considerable, ahora de 20 117.7 miles m³ de déficit (DOF, 2018). Dado lo anterior, la planeación y programación del patrón de cultivos que año con año se establece en el distrito, considera como volumen disponible para riego únicamente el que proviene por derivación y de la presa La Esperanza, ambos conducidos por gravedad.

Finalmente, con el objeto de buscar mayores beneficios para los productores en la región, dados los recursos que dispone, una disminución en los costos unitarios; sin embargo, visto desde otra perspectiva, la maximización de beneficios a partir de la optimización de recursos, mediante programación lineal con el método Simplex, ha demostrado ser más eficiente que otros algoritmos.

Así, con ayuda de dicho método, la presente investigación tiene por objetivo brindar una propuesta de patrón de cultivos a establecer en el distrito de riego 028 Tulancingo, en el que de manera eficiente se administren los recursos disponibles, se abastezcan los requerimientos de cada cultivo, y se incremente el beneficio económico que actualmente se tiene.

Materiales y métodos

El distrito de riego 028 Tulancingo se ubica en el sureste del estado de Hidalgo, entre las coordenadas extremas 98° 24' longitud oeste 20° 10' latitud norte y 98° 20' longitud oeste 20° 3' latitud norte (Figura 1), a una altura de 2 150 msnm. El clima que predomina en la zona de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por García (2004), es BS₁kw correspondiente a seco templado semiárido con verano fresco largo, lluvias en verano e invernal entre 5 y 10% del total anual, temperatura media anual entre 12 y 18 °C.

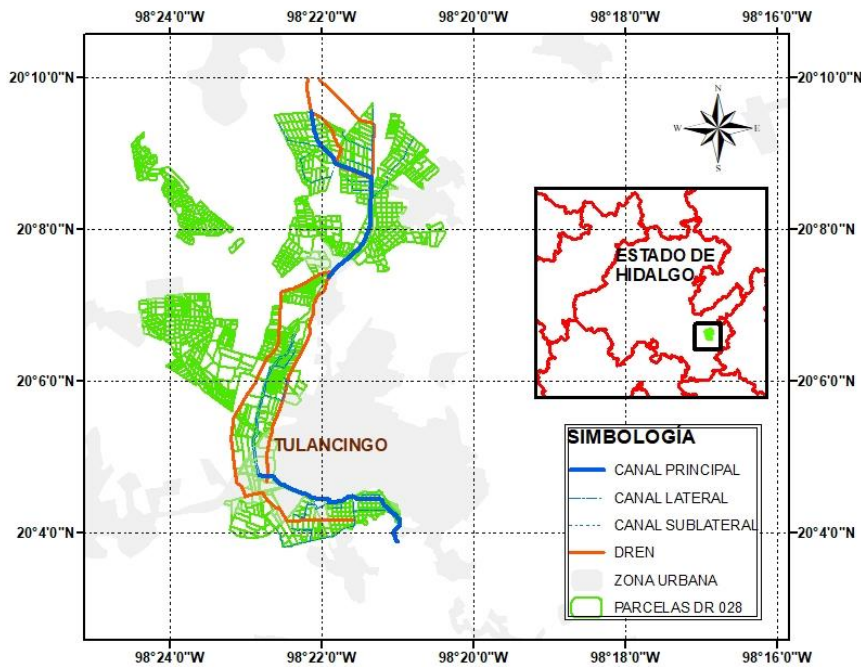


Figura 1. Ubicación del distrito de riego 028 Tulancingo en el estado de Hidalgo.

Selección de cultivos y superficies históricas

La superficie total dominada es de 987 ha, de las cuales 980 son regables, distribuidas en dos módulos: Módulo 01 ‘Aguas Blancas’ con 408 ha y Módulo 02 ‘Aguas Negras’ con 572 ha. Esta información se contrastó con la que reportan las estadísticas agrícolas de los distritos de riego publicadas por la Comisión Nacional del Agua desde el año 1997 hasta el año 2016 (CONAGUA, 1997-2016) y se complementó con los ciclos 2016-2017 y 2017-2018 registrados en la jefatura del distrito, para disponer así de un total de 21 ciclos agrícolas completos.

En el total de ciclos agrícolas de que se tuvo registro en el distrito, los cultivos forrajeros perennes presentan dominancia en superficie sembrada (87% en promedio), Figura 2. De ellos, los cultivos a considerar en el modelo de programación lineal (MPL) fueron: alfalfa verde (*Medicago sativa* L.), trébol verde (*Trifolium repens* L.) y forrajes asociados, vigentes los 10 últimos años. Como forrajes asociados se tienen: Ovillo (*Dactylis glomerata* L.), ballico perenne (*Lolium perenne* L.), trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) y festuca (*Festuca arundinacea* L.). Además de los cultivos de primavera verano: avena forrajera verde (*Avena sativa* L.), maíz forrajero verde (*Zea mays* L.) y otros pastos, como ryegrass anual (*Lolium multiflorum* L.) y trigo (*Triticum aestivum* L.). La información concerniente al rendimiento, precio medio rural, costo y beneficio neto por cultivo, presente en el Cuadro 1, corresponde al ciclo 2017-2018 y en el mismo se muestra la superficie máxima y mínima histórica que ha sido sembrada (CONAGUA, 1997-2016).

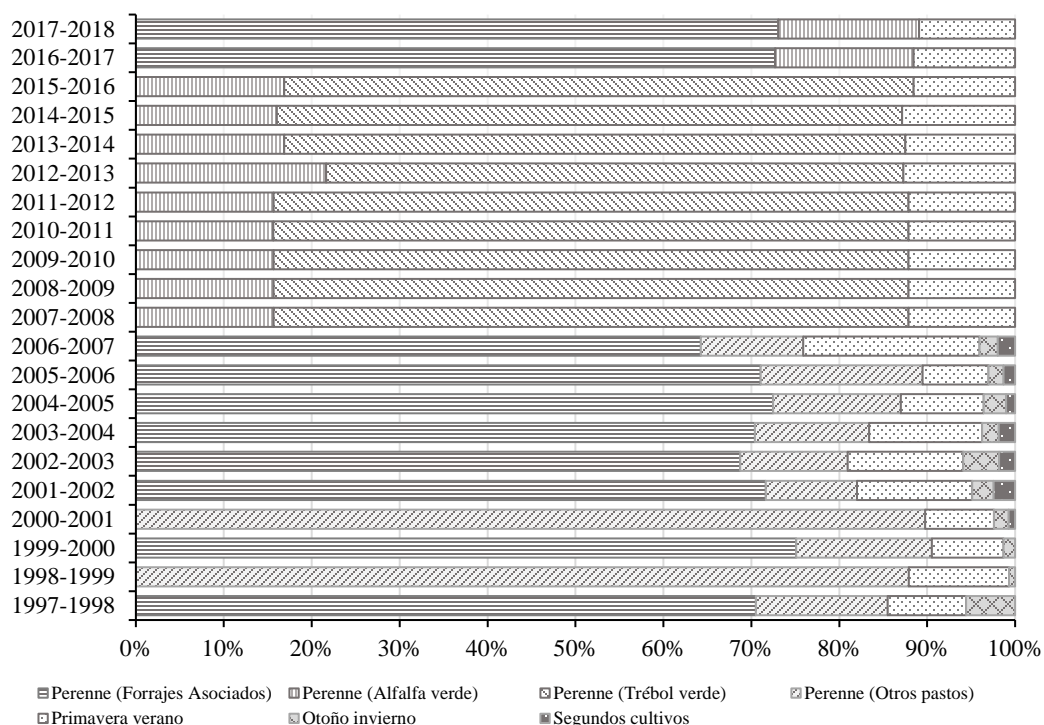


Figura 2. Distribución histórica porcentual de la superficie destinada a cada subciclo agrícola en el Distrito de Riego 028. Elaboración con las estadísticas agrícolas de los distritos de riego (CONAGUA, 1997-2016) e información proporcionada por el distrito.

Cuadro 1. Límites de superficie históricamente sembrada y valor de la producción agrícola en el distrito de riego 028 Tulancingo.

Cultivo Primavera- verano	Superficie (ha)		Rendimiento (t ha ⁻¹)	Precio medio rural (\$ t ⁻¹)	Valor de la producción (\$ ha ⁻¹)	Costo (\$ ha ⁻¹)	Beneficio neto (\$ ha ⁻¹)
	máxima	mínima					
Avena forrajera verde	21	6	22.5	510	11 475	10229.7	1 245.3
Maíz forrajero verde	68	2	42.3	500	21 150	9 792.7	11 357.3
Otros pastos <i>Perennes</i>	25	0	5.3	6 500	34 450	27043.8	7 406.2
Alfalfa verde	170	0	101	335	33 835	24652.9	9 182.1
Forrajes asociados	602	0	100	350	35 000	27268.6	7 731.4
Trébol verde	596	0	95.5	331.1	31 621.5	24118	7 503.5

\$= pesos mexicanos (MXN), al año 2017. Elaboración con las estadísticas agrícolas de los distritos de riego (CONAGUA, 1997-2016) e información proporcionada por el distrito.

Disponibilidad hídrica

La planeación del ciclo agrícola en un distrito de riego, se realiza con base en la disponibilidad hídrica esperada (Sánchez *et al.*, 2006; Minjares *et al.*, 2010; Juárez *et al.*, 2017), por ello se realizó el análisis estadístico de los volúmenes históricos disponibles (19 años), de 1998 a 2016 y 2018, donde se obtuvieron los valores para probabilidades de excedencia del 50, 75 y 95% y fueron éstas las condiciones asignadas en cada escenario para los modelos de programación lineal (MPL). El método de riego es por gravedad, abastecido por derivación y por la presa La Esperanza.

Demanda de los cultivos

El distrito tiene definidos los coeficientes unitarios de riego (CUR) por periodos de diez días, que representan el gasto de agua que requiere una hectárea de un cultivo, en función de su evapotranspiración y las eficiencias de aplicación y conducción (Pérez y Molina, 2011; FAO, 2006). Dichos valores se ingresaron de manera mensual para todos los cultivos.

Modelo de optimización

El MPL elaborado se resolvió con el algoritmo Simplex, mediante el uso de la herramienta Solver[®] en una hoja de cálculo del software Excel[®]. La función objetivo consistió en maximizar el beneficio económico neto total en el distrito, resultado de la suma del producto del beneficio neto de cada cultivo por la superficie que el modelo proponga para él.

$$\text{Max}(\text{BN}) = \sum_{c=1}^{nc} A_c (Vp_c - Cp_c) = \sum_{c=1}^{nc} A_c \text{BN}_c \quad 1)$$

Donde: A_c = es la superficie sembrada con el cultivo c (ha); Vp_c = valor de la producción del cultivo c ($\$ \text{ ha}^{-1}$); Cp_c = costo de producción del cultivo c ($\$ \text{ ha}^{-1}$); BN = beneficio neto ($\$$); c = índice para el número de cultivos; nc = número total de cultivos del distrito de riego.

Restricciones

Las restricciones consideran disponibilidades de agua y suelo, infraestructura, cultivos tradicionales y rentabilidad. Del suelo se establecieron como límites de superficie máxima para todo el distrito, las 980 ha regables, para los subciclos primavera verano (PV) y perennes (P), las superficies máximas registradas en 21 años, para los cultivos que proporcionan mayor utilidad, superficies máximas históricas a fin de evitar la propensión del modelo a su primacía (Ortega *et al.*, 2009) y para cultivos que por costumbre se siembran en la región el límite mínimo aceptable. Respecto al agua, se demarcaron los valores máximos de capacidad de conducción y disponibilidad mensuales, en correspondencia con la demanda requerida por los cultivos (CUR), así como la disponibilidad máxima anual.

Escenarios

El primer escenario ‘situación actual’, contempla 4 MPL de los que se obtuvieron patrones óptimos para cada disponibilidad. El segundo, ‘con revestimiento de la red mayor’ consideró el incremento la eficiencia de la red de conducción de 70%, recomendado para canales en tierra, a 80% sugerido para canales revestidos (FAO, 2001), incidente de manera directa sobre los CUR de cada cultivo.

En estudios como el de Reta *et al.* (2015), se ha encontrado que un patrón de cultivos alternativos puede incrementar la productividad del agua hasta 33.3% y es así como el tercer escenario ‘con segundos cultivos’, propuso retomar la siembra de segundos cultivos, excluidos hace 10 años, a fin de verificar su viabilidad a través de dos opciones: maíz de grano (*Zea mays* L.) y otros cultivos, este último agrupa: tomate (*physalis philadelphica* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), chile verde (*Capsicum annuum* L.) y calabacita (*Cucurbita pepo* L.). El cuarto, abarca las acciones del segundo y tercer escenario. Los MPL generados se resumen e identifican en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Identificador asignado a la combinación de escenarios con variantes.

Escenario	Variante			
	C ₂₀₁₇₋₂₀₁₈	Pexc50	Pexc75	Pexc95
1. Situación actual (SA)	SA C ₂₀₁₇₋₂₀₁₈	SA Pexc50	SA Pexc75	SA Pexc95
2. Con revestimiento de la red mayor (CR)	CR C ₂₀₁₇₋₂₀₁₈	CR Pexc50	CR Pexc75	CR Pexc95
3. Con segundos cultivos (SC)	SC C ₂₀₁₇₋₂₀₁₈	SC Pexc50	SC Pexc75	SC Pexc95
4. Con revestimiento de la red mayor y segundos cultivos (CRSC)	CRSC C ₂₀₁₇₋₂₀₁₈	CRSC Pexc50	CRSC Pexc75	CRSC Pexc95

C₂₀₁₇₋₂₀₁₈ = disponibilidad hídrica del ciclo agrícola 2017-2018 (13 866 miles m³); Pexc₅₀, Pexc₇₅ y Pexc₉₅ = disponibilidad hídrica para probabilidades de excedencia del 50 (12 507.16 miles m³), 75 (11 623.91 miles m³) y 95% (10 353.21 miles m³), respectivamente.

Resultados y discusión

Como primer resultado, se obtuvo el MPL propuesto para la disponibilidad del ciclo 2017-2018, a fin de compararse con el patrón de cultivos que realmente se estableció para ese periodo tiempo en el Distrito. Ambos resultados se presentan en el Cuadro 3, superficie y beneficio neto, por cultivo y total; la incorporación de 26 ha de trébol verde e incrementos en superficie total (15 ha) y beneficio neto (150.64 miles \$). De los resultados obtenidos, se deduce que el modelo ejerce bien su función de optimizar recursos, al cumplir con las restricciones impuestas y proponer un patrón de cultivos que incrementa no solo la superficie a sembrar, sino también el beneficio neto. De forma similar a trabajos como el de Osama *et al.* (2017) y el de Daghighi *et al.* (2017) donde el incremento en el BN que alcanzan con su patrón de cultivos propuesto fue de 6.4 y 8% en promedio, respectivamente.

Cuadro 3. Patrón real vs patrón propuesto por el MPL para el ciclo agrícola 2017-2018.

Cultivo	BN (miles \$ ha ⁻¹)	Patrón establecido		Patrón propuesto (MPL)	
		Superficie (ha)	BN (miles \$)	Superficie (ha)	BN (miles \$)
Primavera-verano					
Avena forrajera verde	1.25	10	12.45	14	17.46
Maíz forrajero verde	11.36	65	738.22	68	772.3
Otros pastos	7.41	15	111.09	23	173.41
<i>Perennes</i>					
Alfalfa verde	9.18	132	1 212.04	170	1 560.96

Cultivo	BN (miles \$ ha ⁻¹)	Patrón establecido		Patrón propuesto (MPL)	
		Superficie (ha)	BN (miles \$)	Superficie (ha)	BN (miles \$)
Forrajes asociados	7.73	602	4 654.31	538	4 160.58
Trébol verde	7.5	0	-	26	194.04
Total		824	6 728.12	839	6 878.76

BN= beneficio neto, pesos mexicanos (MXN) al año 2017.

Posteriormente, para cada MPL que por escenario en combinación con variante de disponibilidad fue elaborado, se obtuvieron los patrones presentes en la Figura 3 y en ella se observa como el cultivo de forrajes asociados es sugerido para dominar una mayor superficie en todos los casos, a pesar de no ser el que mayor beneficio neto proporciona. Lo anterior, se explica desde que en el modelo su requerimiento de agua se distribuyó a lo largo del año, al ser un cultivo perenne, no así con el maíz forrajero verde que, siendo el más rentable, requiere agua en la época de mayor demanda (de marzo a junio).

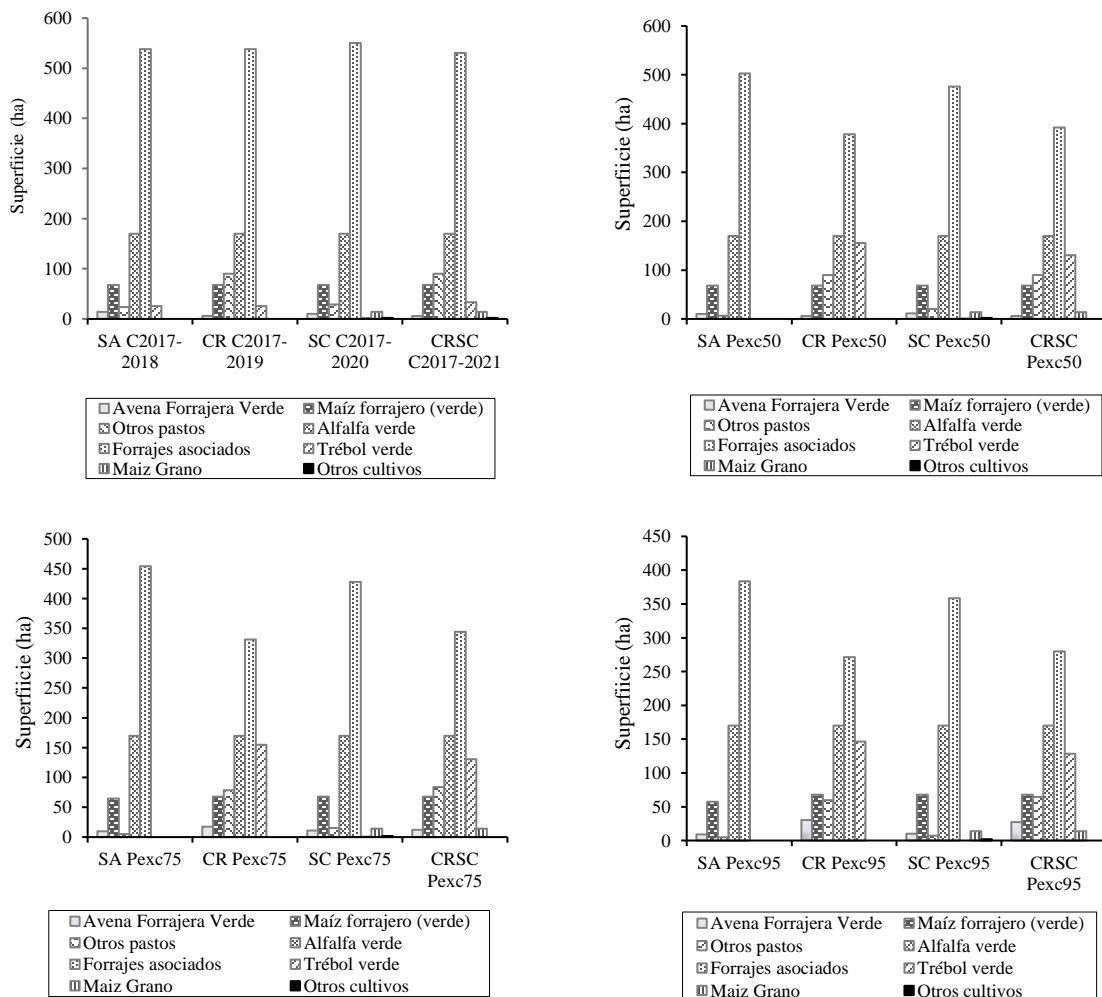


Figura 3. Patrón de cultivos obtenido por MPL para los distintos escenarios, agrupados en gráficas por disponibilidad.

Con el volumen disponible de 13 866 miles de m³ (ciclo agrícola 2017-2018), las superficies para maíz forrajero verde y alfalfa verde permanecen constantes ante los 4 escenarios, con 68 y 170 ha, respectivamente. La opción de sembrar ‘otros pastos’ se sugiere solo en caso de revestimiento y los segundos cultivos se distribuyen en 14 y 2 ha para maíz de grano y otros cultivos.

Ante un volumen con probabilidad de 50%, el escenario 2 distribuyó más las superficies entre cultivos, incrementando el área del trébol verde (nulo en SA) a 155 ha y el de otros pastos (6.7 ha en SA) a 90 ha. Los segundos cultivos sugieren, en caso del escenario 4, la siembra de 14 ha sólo para maíz de grano.

Con los volúmenes de 75 y 95% de probabilidad la tendencia fue similar al de 50%, reduciéndose todas las superficies, a excepción de la avena forrajera verde que presentó superficies máximas en ambos casos ante el escenario 2. En tal caso, la disponibilidad hídrica incide no sólo en rendimiento, sino también en la superficie factible de ser sembrada (Bredel *et al.*, 2017), por ello no es de sorprender que al disminuir el volumen ofertado (con mayor probabilidad de excedencia), las superficies máximas que los MPL sugieren para cada cultivo se redujeron también, resultado que coincide con los obtenidos en investigaciones como las de Singh *et al.* (2001), Ortega *et al.* (2009) y Mazengo *et al.* (2018), en esta última encontraron que con 10% más de agua disponible, el MPL propone la siembra de 133 ha adicionales.

Asimismo, las acciones propuestas por escenario, en todos los casos, incrementaron en mayor o menor medida la superficie factible. En el Cuadro 4 de superficies totales, se puede ver como con una disponibilidad menor y revistiendo la red de conducción, la superficie recomendada por el modelo es equiparable a aquella en situación actual con disponibilidad mayor (CRPexc95= 746.1 ha vs SAPexc50=757.9 ha) e incluso superior en algunos casos, si se compara CRPexc75>SAPexc50.

Cuadro 4. Superficie máxima total por MPL.

Escenario	Disponibilidad			
	C ₂₀₁₇₋₂₀₁₈	Pexc ₅₀	Pexc ₇₅	Pexc ₉₅
	Superficie total (ha)			
1. SA	839.4	757.9	703.4	625.2
2. CR	898	867.5	820.2	746.1
3. SC	845	763.1	708.6	629.9
4. CRSC	914	870.8	823	752

SA= situación actual; CR = con revestimiento; SC= segundos cultivos; CRSC= con revestimiento y segundos cultivos; C₂₀₁₇₋₂₀₁₈= disponibilidad hídrica del ciclo agrícola 2017-2018, Pexc₅₀, Pexc₇₅ y Pexc₉₅ = disponibilidad hídrica para probabilidades de excedencia de 50, 75 y 95%, respectivamente.

La respuesta del beneficio neto total fue notablemente parecida a la de superficies. En ese aspecto, los valores presentes en el Cuadro 5 muestran que: en comparación con la situación actual, la rentabilidad de los escenarios 2, 3 y 4 fue mayor, con menor disponibilidad de agua, la ganancia en un escenario con revestimiento es comparable con aquel de mayor volumen de oferta en situación actual y para un mismo escenario, la reducción en el volumen impacta directamente en la disminución del beneficio.

Lo anterior indica que los MPL realizaron de manera eficiente la optimización, ya que el beneficio máximo no se obtiene con cualquier patrón que sugiera sembrar una mayor superficie, sino con una distribución adecuada por cultivo, tal como ocurrió con los MPL propuestos en los trabajos de Sofi *et al.* (2015); Upadhyaya (2017), donde con ayuda del mismo método, proponen la modificación a patrones de cultivo en la India.

Cuadro 5. Beneficio neto total por MPL.

Escenario	Disponibilidad			
	C ₂₀₁₇₋₂₀₁₈	Pexc ₅₀	Pexc ₇₅	Pexc ₉₅
Beneficio neto total (miles \$)				
SA	6 878.76	6 284.33	5 854.75	5 228.93
CR	7 361.94	7 096.56	6 660.79	6 012.32
SC	6 984.05	6 345.36	5 928.6	5 328.53
CRSC	7 517.11	7 170.08	6 761.95	6 122.39

SA = Situación Actual, CR = Con revestimiento, SC= Segundos cultivos, CRSC= Con revestimiento y segundos cultivos; C₂₀₁₇₋₂₀₁₈ = disponibilidad hídrica del ciclo agrícola 2017-2018, Pexc₅₀, Pexc₇₅ y Pexc₉₅ = disponibilidad hídrica para probabilidades de excedencia del 50, 75 y 95%, respectivamente.

En la Figura 4, se exponen las diferencias de resultados totales de superficie y beneficio neto de escenarios con relación a la situación actual, a fin de verificar bajo qué situación el impacto de las acciones propuestas por los escenarios, será mayor. En la investigación realizada por Al-Nassr (2018), donde determina la combinación de cultivos y superficies óptima para la granja Rasheed/Hamorabi en Bagdad, la rotación de cultivos propuesta ofrece un beneficio neto superior en 63.9% al de su plan real para el ciclo 2015-2016, en este caso, aunque sin cambios importantes en los cultivos a considerar, la adición de segundos cultivos presenta un aumento en el beneficio neto entre 61 y 105.3 miles de pesos, con variación en la superficie de entre 4.7 y 5.6 ha, por encima de la situación actual.

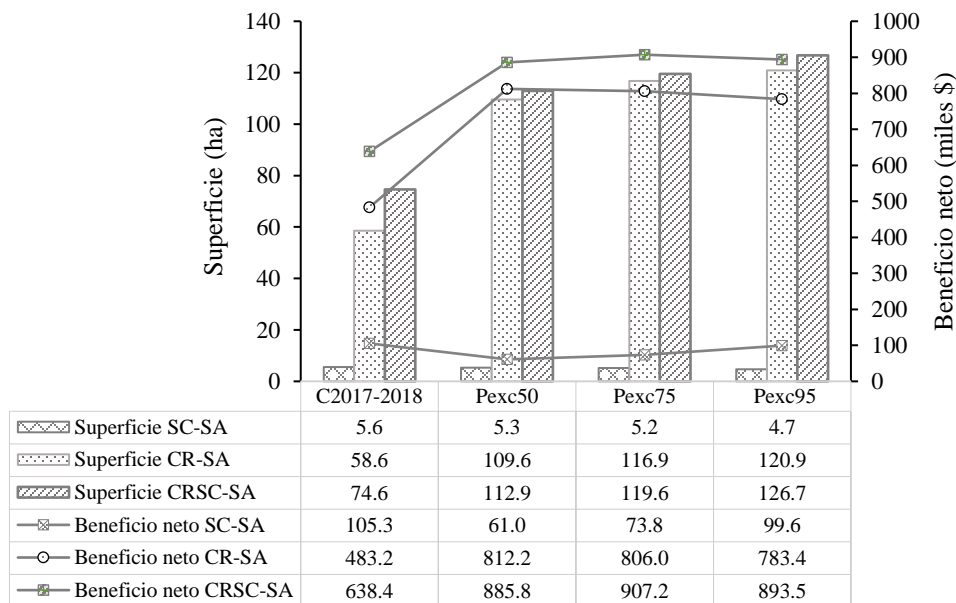


Figura 4. Diferencia entre resultados totales por escenario en relación con la situación actual.

El efecto del revestimiento (CR-SA) sobre la superficie total es mayor conforme la disponibilidad se reduce, sin embargo, la diferencia máxima en beneficio neto se alcanza con la disponibilidad de Pexc50 (812.2 miles de pesos). Con ambas opciones, incorporar segundos cultivos y realizar el revestimiento de la red de conducción (CRSC) se tienen las diferencias más altas, sin embargo, el mayor impacto en superficie (126.7 ha) no coincide con el de BN (907.2 miles de pesos) en situación de disponibilidad: el primero es para una Pexc95 y el segundo para una Pexc75.

Conclusiones

Los MPL elaborados optimizaron de eficientemente los recursos, al cumplir con las restricciones impuestas y proponer un patrón de cultivos que incrementa no solo la superficie a sembrar, sino también el beneficio neto. En ellos, al disminuir el volumen ofertado (con mayor probabilidad de excedencia), las superficies máximas que los MPL sugieren para cada cultivo se reducen también. Las acciones propuestas de revestimiento de la red de conducción (escenario 2), incorporación de segundos cultivos (escenario 3) o ambas (escenario 4), en todos los casos incrementaron en mayor o menor medida la superficie factible, así como su beneficio neto, en comparación con la situación actual, aun en casos donde esta presentaba una mayor disponibilidad de agua.

Una recomendación en favor de la mejora de MPL elaborados, es incorporar nuevas restricciones que tengan que ver con el recurso humano (jornales), maquinaria e insumos disponibles; aspectos importantes de la producción, con los que se pueden enriquecer aún más los modelos.

Agradecimientos

Al Ing. Juan F. Acevedo Zapata, jefe del Distrito de Riego 028, por la información amablemente compartida.

Literatura citada

- Al-Nassr, R. and Sh, M. 2018. The optimal crop rotation of Al-Rasheed District farms using linear programming technique. *Iraqi J. Agric. Sci.* 50(Special Issue):113-127.
- Bredel, A. S.; Bohn, V. Y. y Piccolo, M. C. 2017. Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos.* 78(282):7-29.
- CONAGUA. 1997-2016. Estadísticas agrícolas de los Distritos de Riego. Publicación por ciclo agrícola, desde 1997 hasta 2016. Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola, Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México.
- Daghighi, A.; Nahvi, A. and Kim, U. 2017. Optimal cultivation pattern to increase revenue and reduce water use: application of linear programming to arjan plain in fars province. *Agriculture.* 7(9):73-84.
- DOF. 2013. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de aguas nacionales del acuífero Valle de Tulancingo, clave 1317, en el estado de Hidalgo, Región Hidrológico Administrativa Golfo Norte y se dan a conocer los estudios del mismo acuífero. *Diario Oficial de la Federación.* México. <http://www.dof.gob.mx/nota-detalle.php?codigo=5320583&fecha=04/11/2013>.

- DOF. 2018. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación. México. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018.
- FAO. 2001. Manual de riego parcelario. Desarrollo de tierras y aguas. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe. Santiago, Chile.
- FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje 56. Roma, Italia.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ª. (Ed.). Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México. 90 p.
- Hanasaki, N.; Inuzuka, T.; Kanae, S. and Oki, T. 2010. An estimation of global virtual water flow and sources of water withdrawal for major crops and livestock products using a global hydrological model. *J. Hydrology*. 384(3-4):232-244.
- Juárez, T. M.; Sánchez, A. L and Vedenov, D. 2017. Weather derivatives and water management in developing countries: an application for an irrigation district in Central Mexico. *J. Agric. Res. Econ.* 42(2):146-163.
- Mazengo, R. T.; Goyal, V. C. and Poswal, D. 2018. Crop income optimization analysis under crop diversification scenarios in a village near Roorkee: District Haridwar, India. *Inter. J. Agron. Agric. Res.* 13(2):177-184.
- Minjares, L. J. L.; Valdés, J. B.; Salmón, C. R. F.; Oroz, R. L. A. y López, Z. R. 2010. Planeación, manejo y evaluación sustentable de los recursos hidráulicos en el Distrito de Riego 041, río Yaqui, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 1(1):137-151.
- Ortega, G. D.; Mejía, S. E.; Palacios, V. E.; Rendón, P. L. y Exebio, G. A. 2009. Modelo de Optimización de recursos para un Distrito de Riego. *Terra Latinoam.* 27(3):219-226.
- Osama, S.; Elkholy, M. and Kansoh, R. M. 2017. Optimization of cropping pattern in Egypt. *Alexandria Eng. J.* 56(4):557-566.
- Pérez, M. G. B. y Molina, A. J. P. 2011. Obras hidráulicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Hidráulica. 22-40 pp.
- Reta, S. D. G.; Figueroa, V. U.; Serrato, C. J. S.; Quiroga, G. H. M.; Gaytán, M. A. y Cueto, W. J. A. 2015. Potencial forrajero y productividad del agua en patrones de cultivo alternativos. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 6(2):173-170.
- Sánchez, C. I.; Macías, R. H.; Heilman, P.; González, C. G.; Mendoza, M. S. F.; Inzunza, M. A. y Estrada, A. J. 2006. Planeación multiobjetivo en los distritos de riego de México. Aplicación de un sistema de auxilio para la toma de decisiones. 21(3):101-111.
- Sánchez, H. M. A.; Hernández, A. E.; Acevedo, D. C.; Uribe, G. M.; Díaz, V. P. y Lara, B. A. 2016. Sistema agroforestal coquia-mezquite establecido en suelos del Distrito de Riego Tulancingo, Hidalgo, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7:3207-3217.
- Sánchez, T. Y. y Terrones, C. A. 2015. Estrategias participativas para el desarrollo integral de la producción forraje-leche en la región de Tulancingo (México). *Gestión y Análisis de Políticas Públicas*. 1(13):1-16.
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. México. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.
- Singh, D. K.; Jaiswal, C. S.; Reddy, K. S.; Singh, R. M. and Bhandarkar, D. M. 2001. Optimal cropping pattern in a canal command area. *Agric. Water Manag.* 50(1):1-8.
- Sofi, N. A.; Ahmed, A.; Ahmad, M. and Ahmad, B. B. 2015. Decision Making in Agriculture: A Linear Programming Approach. *Inter. J. Modern Mathematical Sci.* 13(2):160-169.
- Upadhyaya, A. 2017. Application of optimization technique for crop planning at Institute farm of ICAR RCER, Patna. *J. AgriSearch*. 4(1):68-70.