

Optimización de flujo de red en la formulación de proyecto de inversión en Tecamachalco, Puebla

Gonzalo Medel-Chávez¹
Oscar Antonio Arana-Coronado^{1§}
Roberto Carlos García-Sánchez¹
Ramón Valdivia-Alcalá²

¹Posgrado en Socioeconomía, Estadística e Informática-Economía-Colegio de Postgraduados. Carretera Federal México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. (gonzalomedelchavez@gmail.com; rcgarcia@colpos.mx). ²División de Ciencias Económico-Administrativas-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Federal México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, México. CP. 56230. (ramvaldi@gmail.com).

§Autor para correspondencia: aranaosc@colpos.mx.

Resumen

Utilizando programación lineal se formuló un modelo de flujo de redes para optimizar el uso de la tierra de pequeños productores en la zona del valle de Tecamachalco, Puebla, México. Se estimó el patrón de cultivos óptimo con el propósito de incrementar los beneficios netos a lo largo de un horizonte de producción y obtener los indicadores financieros como VAN, TIR y R B/C. Estos valores se compararon con la metodología tradicional de la evaluación de proyectos. El horizonte de producción fue de cinco años para cinco cultivos hortícolas: cebolla, jitomate, pimiento morrón, pepino y calabacita. Los resultados indicaron que el patrón de cultivos óptimo fue producir jitomate en primavera-verano (p-v) y pimiento morrón en otoño-invierno (o-i). Se obtuvo un VAN de \$295 229.84 pesos, TIR de 68.64% y una relación B/C de 1.52. El beneficio neto del plan de producción fue de \$7 422 367.00 pesos, siendo superior entre 15 y 45% con respecto a la producción de forma individual de cada cultivo. Para los cultivos seleccionados se calcularon ganancias de \$6 254 668.49 y \$6 339 146.18 pesos para jitomate y pimiento morrón respectivamente.

Palabras clave: flujo de redes, hortalizas, optimización, programación lineal, proyectos.

Recibido: junio de 2022

Aceptado: agosto de 2022

Introducción

La agricultura en México, como en la mayoría de las economías en desarrollo, es una fuente importante de empleos e ingresos. El 13.3% de la población participa en actividades primarias, que representan 7.1 millones de personas económicamente activas (INEGI, 2018). En 2019 en el sector agrícola, se destinaron 20 664 554.08 ha para actividades de producción agrícola, 68% de esta superficie se distribuyó en unidades de producción con abastecimiento de agua de riego 4 175 356.45 ha y de temporal 9 833 626.38 ha (SIAP, 2019). En cuanto al valor de la producción, el principal cultivo es el maíz grano el cual genera un valor por \$106 245 747.07 pesos, en una superficie de 7 157 586.88 ha.

En contraste con el valor de toda la producción hortícola, que genera un ingreso por \$89 269 654.01 pesos, en una superficie de 524 984.14 ha, la producción hortícola representa 7.3% de la superficie cultivada y genera 84% del valor de la producción, con respecto al cultivo de maíz grano (SIAP, 2019). La producción hortícola bajo agricultura protegida representa 0.5% de toda la producción nacional, y tiene un valor de la producción de \$26 852 081.78 pesos, lo que significa un 6% del total nacional (SIAP, 2019). Los estados de Sinaloa, San Luis Potosí, Jalisco, Sonora y Coahuila representan más de 50% del valor de la producción total de la agricultura protegida. Puebla se coloca dentro de los diez primeros estados que más contribuyen al valor total de la producción en este mismo rubro, con una participación en su producción de \$906 857.92 pesos y que representa 4.6% (SIAP, 2019).

Dentro de los principales productos hortícolas bajo agricultura protegida con respecto al valor de la producción destacan jitomate, cebolla, tomate y calabacita; en conjunto suman 46.7% del valor total de la producción del estado de Puebla (SIAP, 2019). En 2010 la superficie hortícola sembrada en Puebla fue de 51 243.8 ha, de las cuales se obtuvo una producción de 662 873.88 t, con un valor total de \$2 014 126.32 pesos, para 2017 la superficie aumentó a 62 159 ha y se produjeron 1 073 449.62 t, con un valor total de \$4 157 965.34 pesos (SIAP, 2019).

En el país existen 4 069 938 unidades de producción, de las cuales 69% están conformadas por cinco o menos ha, que aportan 39% de la producción, además generan el 63% de los empleos en el sector agrícola considerando la mano de obra familiar, así como de contrato (INEGI, 2018). El crédito en el sector agrícola ha sufrido de variaciones al pasar de los años, en 1994 existió una cartera de \$154 340.3 millones de pesos, la cual bajó hasta el año 2006 llegando a sólo \$17 503.5 millones de pesos y teniendo un incremento a \$20 425 millones en 2009 y una estabilización que a partir del año 2009 se ha mantenido (Reyes y Reyes, 2018).

A nivel nacional solo 6% de los productores tienen acceso a un crédito institucional, cerca de 70% de las unidades económicas de producción rurales son de subsistencia y auto consumo (CONEVAL, 2018), al estar limitado el acceso a herramientas para formular proyectos, imposibilitan al productor a acceder a recursos suficientes y a tasas preferenciales, que le permitan dar el salto a unidades de producción competitivas (Fundar, 2014). Actualmente la metodología que prevalece para la formulación y evaluación de proyectos, que establece la CEPAL; en el 'manual de proyectos de desarrollo económico', contempla los criterios de estudios de ingeniería o técnico, inversión de presupuesto de ingresos, egresos, financiamiento y organización de la empresa (Pérez, 2000).

Los agricultores tienen que tomar complejas decisiones de producción y comercialización a lo largo del año, qué cultivos producir, cuánta tierra rentar, mano de obra a emplear y el momento óptimo para realizarlo, con uso de la PL se puede organizar la producción (Kaiser y Messer, 2011). Gittinger (1982); Alvarado (2009); Render *et al.* (2012) mencionan que la PL es un método matemático que permite analizar y elegir la mejor manera de distribuir los recursos limitados para maximizar las ganancias de la empresa.

La presente investigación tuvo como objetivo, optimizar la combinación de cultivos hortícolas para mejorar los indicadores financieros que se utilizan en la evaluación y formulación de proyectos de inversión, maximizando el ingreso neto de la producción, bajo un escenario de temporalidad en el uso de tierra, comparado con la metodología tradicional. Como hipótesis se estableció, que es posible determinar en una hectárea de suelo, la sucesión de cultivos hortícolas, que maximice los beneficios netos, optimizando los resultados que se obtendrían con la metodología tradicional para la formulación de proyectos de inversión.

Materiales y métodos

La investigación se realizó con información del estado de Puebla. Se localiza en la región centro de México, tiene una superficie de 34 251 km², integrado por 217 municipios y 6 500 comunidades. Del total 6 200 son rurales con una superficie total de 3 391 900 ha, de éstas 1 048 999 ha son para uso agrícola (898 875 ha de temporal y 150 124 ha de riego) (INEGI, 2019). Particularmente, se utilizó información de la región del valle de Tecamachalco, debido a que los productores de manera paulatina están adoptando cultivos hortícolas de alta densidad de siembra, producción y valor, información de los ciclos de producción 2018-2019, para hacer una proyección a cinco años.

En 2018, la superficie cultivada fue de 18 819.9 ha, con una producción de 441 267.58 t y un valor de la producción de \$1 942 453.74 pesos, en comparación con el resto de los municipios con una superficie cultivada de 40 902.93 ha (SIAP, 2019). Se utilizó un modelo de PL en forma de flujo de red, planteado por Bazaraa *et al.* (2010). Se estableció una hectárea como la superficie de tierra con potencial a sembrar, y se planteó sembrar cinco cultivos: cebolla (ce), jitomate (ji), pepino (pe), morrón (mo) y calabacita (ca).

Se consideró un periodo de planificación de 10 ciclos agrícolas (primavera-verano (pv 01) y otoño-invierno (oi 02)), representados como $t = 1, 2, 3, \dots, 10$. Las necesidades de sucesión de cultivos dependen solo de los tipos de cultivos que se siembran y se dan en forma de secuencias, por lo que no se pueden producir dos cultivos en el mismo terreno y a su vez tampoco en el mismo ciclo. El modelo se construyó de la siguiente manera: Maximizar $(Z) = \sum_{i=1}^{N=165} IT_i^{t-1} * x_i^{t-1} - \sum_{i=1}^{N=150} \{c_i^{t-1} * x_i^{t-1} + la_i^{t-1} * x_i^{t-1} + wa_i^{t-1} * x_i^{t-1}\}$ 1). Donde: i = cultivo hortícola, cebolla (ce), jitomate (ji), pepino (pe), pimiento morrón (mo) y calabacita (ca); $t-1$ = sucesión de cultivos en ciclos; IT_i^{t-1} = ingreso total de la producción del cultivo i en el ciclo $t-1$ (pv, oi); x_i^{t-1} = variable de decisión de uso de suelo (1 ha) del cultivo i , en el ciclo $t-1$ (pv, oi); c_i^{t-1} , mo_i^{t-1} y ag_i^{t-1} = costos de producción, mano de obra y extracción de agua (costos variables); $N = 165$: representa el número de actividades de ingresos de los cultivos y $N = 150$: representa el número de actividades de costos de los cultivos.

Sujeto a: $\sum_{j=1}^N x_j^t = -1$ 2), restricción de límite máximo de disponibilidad de tierra a sembrarse para el cultivo precedente “j” al inicio del proyecto en el ciclo t. $\sum_{i=1}^N x_i^{t-2} = 1$ 3), restricción de requerimiento de tierra para el cultivo i al final del periodo en el ciclo t-2. $\sum_{i=1}^N x_i^{t-2} - \sum_{j=1}^N x_j^{t-1} \leq 0$ 4), restricción de límite que representa la forma en que se distribuye la tierra disponible para cultivo precedente j al inicio del ciclo t-1 al cultivo sucesor i en el ciclo t-2. $x_{i,j} \geq 0$, para todo i, j 5).

Restricción de no negatividad

Las restricciones de transferencia proporcionan el medio por el cual el producto obtenido en una actividad puede ser transferido, dentro del modelo hacia otras actividades. $\sum_{i=1}^N c_i^{t-1} * x_i^{t-1} \leq 1$ 6), transfiere los costos (c) de producción del cultivo i en el ciclo t-1 por el uso de suelo para cultivo. $\sum_{i=1}^N mo_i^{t-1} * x_i^{t-1} \leq 1$ 7), transfiere los costos de mano de obra (mo) del cultivo i en el ciclo t-1 por el uso de suelo para cultivo. $\sum_{i=1}^N ag_i^{t-1} * x_i^{t-1} \leq 1$ 8), transfiere los costos de kW por extracción de agua (ag) al cultivo i en el ciclo t-1 por el uso de suelo para cultivo. La distribución de tierra disponible entre los ciclos se puede ver en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Calendario de producción hortícola para los ciclos pv y oi.

Mes/actividades	ce01	ji01	mo01	pe01	ca01	ce02	ji02	mo02	pe02	ca02
Diciembre	0	0	0	0	1 [□]	0	0	0	0	0
Enero	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Febrero	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Marzo	1	0	0	0	1 [§]	0	0	0	0	0
Abril	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Mayo	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Junio	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Julio	1 [§]	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Agosto	0	1	1 [¥]	1	0	0	0	0	0	1
Septiembre	0	1	0	1 [†]	0	1	0	0	0	1
Octubre	0	1 [¶]	0	0	0	1	0	0	1 [∞]	1 ^{§§}
Noviembre	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Diciembre	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Enero	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Febrero	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
Marzo	0	0	0	0	0	1 ^{§§}	1	1 ^{¥¥}	1 ^{††}	0
Abril	0	0	0	0	0	0	1 ^{¶¶}	0	0	0

Información de los centros de desarrollo y transferencia de tecnología del INIFAP. ce= cebolla, ji= jitomate; mo= pimiento morrón; pe= pepino; ca= calabacita; 01= periodo 1 ciclo pv, 02= periodo 2 ciclo oi, §1= término de producción de ce01 4 de julio; ¶1= termino de producción de ji01 12 de octubre; ¥1= termino de producción de mo01 23 de agosto; †1= termino de producción de pe01 27 de septiembre; □1= inicio de producción 16 de diciembre y §1= termino de producción 15 de marzo de ca01; §§1= termino de producción de ce02 4 de marzo; ¶¶1= termino de producción de ji02 14 de abril; ¥¥1= termino de producción de mo02 25 de marzo; ∞1= inicio de producción 16 de octubre y ††1= termino de producción 15 de marzo de pe02; §§1= termino de producción de ca02 29 de octubre.

Para evitar traslapes entre cultivos, se estableció un espacio de tiempo de 15 días para dar continuidad a la producción de un segundo cultivo. Para el caso de la mano de obra agrícola disponible, se tomó como base la información del informe sobre la Encuesta Nacional de Jornaleros Agrícolas (SEDESOL, 2011). Se consideró como sueldo de los trabajadores el salario mínimo de \$123.22 pesos por día para trabajadores en México, excluyendo la zona norte con frontera con Estados Unidos de América (CONASAMI, 2020). Para determinar el coeficiente de costos de agua, se calculó el costo de extracción por bombeo, para eso se obtuvo la potencia requerida por el equipo, en watts (W): $P_e = \frac{Q \cdot H \cdot \gamma}{\eta_e}$ (9). Donde: η_e = información técnica de los diversos fabricantes de bombas del país, la eficiencia presenta un valor de 82% (CONUEE, 2011).

En el valle de Tecamachalco en promedio los pozos tienen un gasto instantáneo promedio de 23 L s⁻¹ (Q), un peso específico del agua de 9.81 N m⁻³ (γ) y una carga total del equipo de bombeo de 91.4 m (H), (CRETEALC-México, 2011). Como resultado el equipo de bombeo entrega una potencia (P_e) de 25 150 vatios (w)= 25.15 kW. En el Cuadro 2, se muestra los cálculos de kWh (kilo watt hora) necesarios para el bombeo de agua requeridos por cultivo y el costo de la energía eléctrica, a partir de kWh= kW*t (10).

Cuadro 2. Costos de extracción de agua a partir de la información de requerimientos hídricos 2018.

	Cebolla	Jitomate	Pimiento morrón	Pepino	Calabacita
Volumen de agua requerida (L)	7 600 000	5 908 000	4 432 000	6 000 000	3 650 000
Tiempo de extracción (h)	91.78	71.35	53.52	72.46	44.08
kWh	8 310.27	6 460.14	4 846.20	6 560.74	3 991.11
Tarifa RABT \$2.50	\$20 813.00	\$16 189.53	\$12 156.29	\$16 440.92	\$10 019.40

Elaboración con datos de la CFE, tarifa RABT (riego agrícola en baja tensión) 2018.

La función objetivo se constituyó de 315 variables de decisión, 165 de venta y 150 costos de producción. Se incluyen 202 restricciones: 2 de recurso tierra, 50 de alternancia de cultivos en diez ciclos, y 150 de transferencia de recursos (50 de rendimientos, 50 de número de jornales y 50 de energía requerida para extracción de agua). La sucesión de cultivos posibles a sembrarse, de acuerdo con el calendario de producción, se encuentra expresada en un modelo de flujo de red b_{t-1} . La b representa cantidad de tierra permitida para producir en un ciclo anterior t-1.

Los cultivos ce, ji, pe, mo y ca representan los nodos de oferta y demanda de tierra, 01 y 02 representa el ciclo de producción pv y oi, respectivamente las líneas que conectan a los nodos representan la posible dirección de la producción desde el inicio hasta el final del horizonte de producción (Figura 1).

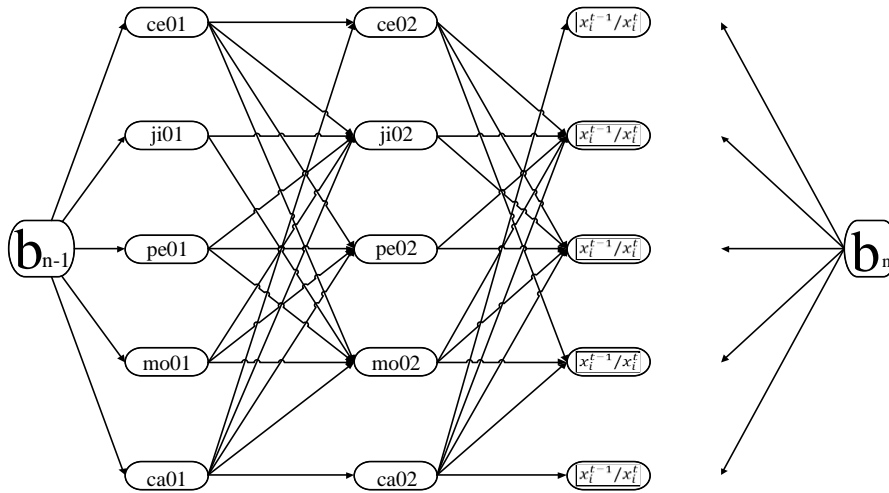


Figura 1. Representación gráfica del flujo de red para los cultivos hortícolas propuestos. Elaboración basada en los modelos de PL en red (Bazaraa *et al.*, 2010).

Resultados

Se analizó la proyección del flujo de efectivo de la secuenciación de cultivos óptimos del modelo obtenido, así como los indicadores financieros del proyecto. A continuación, se presenta el modelo de PL de flujo de redes el cual se corrió con Solver® Lindo®.

$$\begin{aligned}
 \text{Función objetivo MAX } Z = & 718447.60ca0111 + 1000645.18pe0111 + 1000645.18pe0112 + \\
 & 1000645.18pe0113 + 1000645.18pe0114 + 1648876.11mo0111 + 1648876.11mo0112 + \\
 & 1648876.11mo0113 + 1648876.11mo0114 + 1648876.11mo0115 + 1225449.92ji0111 + \\
 & 1225449.92ji0112 + 1225449.92ji0113 + 1225449.92ji0114 + 1225449.92ji0115 + \\
 & 729757.00ce0111 + 598803.56ca0211 + 598803.56ca0212 + 564685.51pe0211 + \\
 & 564685.51pe0212 + 564685.51pe0213 + 564685.51pe0214 + 786622.69mo0211 + \\
 & 786622.69mo0212 + 786622.69mo0213 + 786622.69mo0214 + 786622.69mo0215 + \\
 & 1148579.52ji0211 + 1148579.52ji0212 + 1148579.52ji0213 + 1148579.52ji0214 + \\
 & 1148579.52ji0215 + 63,307.42ce0211 + 631307.42ce0212 + 718447.60ca0121 + \\
 & 1000645.18pe0121 + 1000645.18pe0122 + 1000645.18pe0123 + 1000645.18pe0124 + \\
 & 1648876.11mo0121 + 1648876.11mo0122 + 1648876.11mo0123 + 1648876.11mo0124 + \\
 & 1648876.11mo0125 + 1225449.92ji0121 + 1225449.92ji0122 + 1225449.92ji0123 + \\
 & 1225449.92ji0124 + 1225449.92ji0125 + 729757.00ce0121 + 598803.56ca0221 + \\
 & 598803.56ca0222 + 564685.51pe0221 + 564685.51pe0222 + 564685.51pe0223 + \\
 & 564685.51pe0224 + 786622.69mo0221 + 786622.69mo0222 + 786622.69mo0223 + \\
 & 786622.69mo0224 + 786622.69mo0225 + 1148579.52ji0221 + 1148579.52ji0222 + \\
 & 1148579.52ji0223 + 1148579.52ji0224 + 1148579.52ji0225 + 63,307.42ce0221 + \\
 & 631307.42ce0222 + \dots + 598803.56ca0251 + 598803.56ca0252 + 564685.51pe0251 + \\
 & 564685.51pe0252 + 564685.51pe0253 + 564685.51pe0254 + 786622.69mo0251 + \\
 & 786622.69mo0252 + 786622.69mo0253 + 786622.69mo0254 + 786622.69mo0255 + \\
 & 1148579.52ji0251 + 1148579.52ji0252 + 1148579.52ji0253 + 1148579.52ji0254 + \\
 & 1148579.52ji0255 + 63307.42ce0251 + 631307.42ce0252 - 254525.85C0111 - 273148.60C0112 \\
 & - 607723.83C113 - 620681.02C0114 - 334164.54 C0115 - \dots - 254525.85C0151 -
 \end{aligned}$$

273148.60C0152 - 607723.83C153 - 620681.02C0154 - 334164.54 C0155 - 123.22MO0112 - 123.22MO0113 - 123.22MO0114 - 123.22MO0115 - ... - 123.22MO0251 - 123.22MO0152 - 123.22MO0153 - 123.22MO0154 - 123.22MO0155 - 2.5AG0111 - 2.5AG0112 - 2.5AG113 - 2.5AG0114 - 2.5AG0115 - ... - 2.5AG0251 - 2.5AG0152 - 2.5AG0153 - 2.5AG0154 - 2.5AG0155.

Restricciones de disponibilidad inicial de suelo

ca0111 + pe0111 + pe0112 + pe0113 + pe0114 + mo0111 + mo0112 + mo0113 + mo0114 + mo0115 + ji0111 + ji0112 + ji0113 + ji0114 + ji0115 + ce0111 = -1.

Restricciones de uso de suelo

ca0251 + ca0252 + pe0251 + pe0252 + pe0253 + pe0254 + mo0251 + mo0252 + mo0253 + mo0254 + mo0255 + ji0251 + ji0252 + ji0253 + ji0254 + ji0255 + ce0251 + ce0252 = 1. La forma de organizar el modelo coincide con lo planteado por Detlefsen y Leck (2004) al utilizar en el problema la rotación de cultivos mediante la modelización en red con periodos de hasta cuatro ciclos. En el Cuadro 3 se muestran los cultivos seleccionados para los ciclos pv y oi.

Cuadro 3. Selección de actividades y costo reducido de los cultivos de dos periodos (2019 y 2024).

Actividad	Año 5 ciclo o-i (2024)		Actividad	Año 1 ciclo o-i (2019)	
	Área a sembrar (ha)	Costo reducido		Área a sembrar (ha)	Costo reducido
ca02	0	\$3 119 861.00	ca02	0	\$0.00
	0	\$3 038 886.00		0	\$0.00
pe02	0	\$3 192 334.00	pe02	0	\$2 164 099.00
	0	\$225 892.90		0	\$0.00
	0	\$775 888.90		0	\$0.00
mo02	0	\$3 111 359.00	mo02	0	\$2 164 099.00
	0	\$3 294 525.00		0	\$2 164 099.00
	0	\$785 383.00		0	\$0.00
	0	\$328 083.60		0	\$0.00
	0	\$878 079.70		0	\$0.00
ji02	0	\$3 213 549.00	ji02	0	\$2 164 099.00
	0	\$2 966 441.00		0	\$2 164 099.00
	0	\$457 299.40		0	\$0.00
	1	\$0.00		1	\$0.00
ce02	0	\$549 996.00	ce02	0	\$0.0
	0	\$2 885 466.00		0	\$2 164 099.0
	0	\$3 179 642.00		0	\$0.00
ca01	0	\$3 098 667.00	ca01	0	\$0.00
	0	\$0.00		0	\$0.00

Elaboración con datos de 2018 (proyección 2019 y 2024).

Si se decidiera producir ca02, como resultado de sembrar ce01 en el ciclo anterior, la información del Cuadro 3 describe el valor de la función en una reducción de \$3 119 861.00 pesos. Si se decide producir pe02 como resultado de sembrar ca01 en el ciclo anterior, el mismo cuadro describe el valor de la función una reducción por \$3 111 359.00 pesos. En el caso de ji02, tiene un valor de cero y por tanto es una actividad que fue seleccionada como resultado de producir en el ciclo anterior mo01.

Los resultados son congruentes con los obtenidos por Alvarado (2009), quien propuso un modelo con seis hortalizas, y en sus resultados finales solo tres cultivos fueron seleccionados, debido a que el programa evitó el traslape de los cultivos, al igual que este estudio. En el Cuadro 4, el precio sombra representa en cuanto mejorará el valor actual de la función objetivo si se 'relaja' la restricción asociada en una unidad.

Cuadro 4. Nivel de uso del recurso suelo, precio sombra y valores de holgura del periodo de estudio.

Núm.	Hilera	Precio sombra	Holgura	Núm.	Hilera	Precio sombra	Holgura
1	Demanda de tierra	\$6 413 045.00	0	31	ji01	\$2 511 647.00	0
2	Disponibilidad de tierra	\$1 009 322.00	0	30	mo01	\$2 968 947.00	0
3	ca02	\$ -	1	32	ce01	\$1 526 214.00	0
4	pe02	\$ -	1	33	ca02	\$1 847 946.00	0
5	mo02	\$ -	0	34	pe02	\$3 218 206.00	0
6	ji02	\$ -	1	35	mo02	\$3 444 099.00	0
7	ce02	\$ -	1	36	ji02	\$3 444 099.00	0
8	ca01	\$ -	0	37	ce02	\$1 788 164.00	0
9	pe01	\$ -	0	38	ca01	\$2 289 321.00	0
10	mo01	\$ -	0	39	pe01	\$4 453 420.00	0
11	ji01	\$ -	0	40	mo01	\$4 453 420.00	0
12	ce01	\$ -	0	41	ji01	\$4 453 420.00	0
13	ca02	\$321 731.50	0	42	ce01	\$2 289 321.00	0
14	pe02	\$249 258.90	0	43	ca02	\$2 611 053.00	0
15	mo02	\$147 068.20	0	44	pe02	\$4 702 679.00	0
16	ji02	\$475 151.80	0	45	mo02	\$4 600 488.00	0
17	ce02	\$261 950.50	0	46	ji02	\$4 928 572.00	0
18	ca01	\$763 107.00	0	47	ce02	\$2 551 272.00	0
19	pe01	\$1 006 950.00	0	48	ca01	\$3 052 428.00	0
20	mo01	\$1 484 473.00	0	49	pe01	\$5 387 898.00	0
21	ji01	\$1 484 473.00	0	50	mo01	\$5 937 894.00	0
22	ce01	\$763 107.00	0	51	ji01	\$5 480 594.00	0
23	ca02	\$1 084 838.00	0	52	ce01	\$2 971 453.00	0
24	pe02	\$1 733 732.00	0	53	ca02	\$ -	1
25	mo02	\$1 631 542.00	0	54	pe02	\$ -	1

Núm.	Hilera	Precio sombra	Holgura	Núm.	Hilera	Precio sombra	Holgura
26	ji02	\$1 959 625.00	0	55	mo02	\$ -	1
27	ce02	\$1 025 057.00	0	56	ji02	\$ -	0
28	ca01	\$1 526 214.00	0	57	ce02	\$ -	1
29	pe01	\$2 968 947.00	0				

Elaboración con datos de 2018.

El plan óptimo de cultivos (Cuadro 5), tomando como base datos del año agrícola 2018-2019.

Cuadro 5. Proyección financiera a 5 años del patrón de cultivos óptimo (2019 al 2024).

Ciclo	Actividad	Superficie (ha)	Producción (t)	Precio t ⁻¹	Ventas	Costos	Beneficio
PV	Pimiento morrón	1	128.96	12 785	1 648 876	-639 554	1 009,321
OI	Jitomate	1	150.28	7 642	1 148 579	-673 427	475 151
PV	Pimiento morrón	1	128.96	12 785	1 648 876	-639 554	1 009 321
OI	Jitomate	1	150.28	7 42	1 148 579	-673 427	475 151
PV	Pimiento morrón	1	128.96	12 785	1 648 876	-639 554	1 009 321
OI	Jitomate	1	150.28	7 642	1 148 579	-673 427	475 151
PV	Pimiento morrón	1	128.96	12 785	1 648 876	-639 554	1 009 321
OI	Jitomate	1	150.28	7 642	1 148 579	-673 427	475 151
PV	Pimiento morrón	1	128.96	12 785	1 648 876	-639 554	1 009 321
OI	Jitomate	1	150.28	7 642	1 148 579	-673 427	475 151
		Total			13 987 278	-6 564 911	7 422 367

Elaboración con datos de 2018-2019.

Mohamad y Said (2011) concluyeron que un esquema de planeación de cultivos utilizando la PL, se obtienen resultados prometedores aun utilizando un periodo corto de tiempo de planeación; lo cual da alternativas a los productores para disminuir el riesgo agrícola. Se observó que el patrón de cultivos mantiene una estabilidad en la producción de los cultivos de pimiento morrón y jitomate en los 5 años del proyecto, la composición en cada ciclo no cambia. La composición de costos y beneficios se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Comparación de producción individual de hortalizas con la selección de PL, 2018-2019.

Cultivos	Rendimiento	Costos (\$)	Ingresos (\$)	Ganancias (\$)
Cebolla	67.75	3 515 945.80	7 563 155.23	4 047 209.43
Jitomate	140.37	6 468 891.20	12 723 559.69	6 254 668.49
Morrón	105.10	6 234 747.40	12 573 893.58	6 339 146.18
Pepino	108.18	2 41 839.40	8 498 133.51	5 556 294.11
Calabacita	72.11	2 658 814.00	7 540 856.93	4 882 042.93
Jitomate MPL	150.28	3 367 138.52	5 742 897.6	2 375 759.08
Morrón MPL	128.96	3 197 772.60	8 244 380.56	5 046 607.96

Elaboración con datos de 2018-2019.

Se procedió a realizar una proyección financiera de costos y beneficios con base en los resultados del modelo de PL (Cuadro 7).

Cuadro 7. Proyección financiera para los cultivos mo01 y ji02 resultantes del modelo año 2019-2024.

Conceptos/año	Inicio	1	2	3	4	5
(+) ventas	0	2 797 455	2 797 455	2 797 455	2 797 455	2 797 455
(+) valor de rescate	0	0	0	0	0	766 681
(=) ingresos totales	0	2 797 455	2 797 455	2 797 455	2 797 455	3 564 137
(=) costos totales	0	1 312 982	1 312 982	1 312 982	1 312 982	1 312 982
Compra activo fijo	1 504 108	0	0	0	0	0
Compra activo diferido	0	0	0	0	0	0
Compra capital de trabajo	499 704					
(=) Saldo final	-2 003 812	1 484 473	1 484 473	1 484 473	1 484 473	2 251 155

Elaboración con datos de 2018.

De la proyección financiera del cultivo conjunto de pimiento morrón (mo01) y jitomate (ji02) resultantes del modelo de PL, se estableció la proyección de flujo de efectivo (Cuadro 8) donde se observa la variación de entrada y salida de efectivo en un periodo de cinco años.

Cuadro 8. Flujo de efectivo para los cultivos mo01 y ji02 resultantes del modelo (2019-2024).

Año	Ingresos	Costos	Flujo de efectivo	Tasa $(1+T)^{n-1}$	Ingresos actualizados	Egresos actualizados
0	0	2 003 812.06	-2 003,812.06	1	0	1 669 843.38
1	2 797 455.63	1 312 982.22	1 484 473.409	0.833	2 331 213.02	1 094 151.85
2	2 797 455.63	1 312 982.22	1 484 473.409	0.694	1 942 677.52	911 793.21
3	2 797 455.63	1 312 982.22	1 484 473.409	0.578	1 618 897.93	759 827.68
4	2 797 455.63	1 312 982.22	1 484 473.409	0.482	1 349 081.61	633 189.73
5	3 564 137.29	1 312 982.22	2 251 155.076	0.401	1 432 346.84	527 658.11
Total	14 753 959.8	8 568 723.17	6 185 236.653		8 674 216.94	5 596 463.95

Elaboración con resultados del modelo.

Con la información obtenida y los cuadros de análisis financieros, se realizó la comparativa; en un horizonte productivo de cinco años (2019-2020 al 2023-2024), entre los cultivos hortícolas 'sin' y 'con' el uso de la PL, en cuanto al análisis de los indicadores de rentabilidad. Al igual que Forrester y Rodríguez (2018), el propósito de correr modelos de optimización es desarrollar la planeación de la rotación de cultivos que especifique la cantidad a plantar, uso de tierra, periodo de tiempo y como es que cada cultivo deberá de plantarse para satisfacer la demanda del mercado.

Para la obtención de los indicadores de rentabilidad, se utilizaron las fórmulas de Gittinger (1982), del valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio/costo (B/C) descontándose a una tasa de 20%. La situación 'con' el uso de la PL se obtuvo: VAN= \$2 952 269.84; TIR= 68.64%; R B/C= 1.52. Utilizando la misma tasa de descuento, se obtuvieron los indicadores de rentabilidad 'sin' el uso de PL, de cada cultivo hortícola considerados en el estudio (Cuadro 9).

Cuadro 9. Valores de los indicadores de rentabilidad de los cultivos ‘sin’ el uso de la PL 2019-2024.

Cultivos	VAN	TIR	R B/C
Cebolla 01/02	469 776	30.1	1.12
Jitomate 01/02	1 542 449	48.73	1.26
Morrón 01/02	1 637 316	51.02	1.29
Pepino 01/02	1 419 091	50.38	1.4
Calabacita 01/02	995 712	40.87	1.3

Elaboración con datos de 2018.

Los resultados muestran que la combinación de mo01 y ji02, mejoran los indicadores financieros comparados con un escenario sin el uso de la PL. Esto concuerda con Prisenk y Turk (2015) quienes sugieren que, con el conocimiento del área cultivada y el resto de sus resultados obtenidos de la optimización, los productores podrían analizar diferentes escenarios en un contexto de manejo de riesgo; es decir, que estrategias de cultivo y tierra usar, que cantidad de otros recursos se podrían usar (mano de obra mecánica o manual, fertilizantes), que cantidad cosechar y vender de los cultivos. Por su parte Jebelli *et al.* (2016) encontraron que cuando se incrementan las hortalizas y la combinación de éstas con cereales, el modelo exhibe reducciones en el ingreso neto; esto puede deberse a que una o más de las restricciones pudo no haber sido vinculada en el proceso de optimización, lo que implica un aumento en los recursos escasos.

Conclusiones

Con base a la información de la zona del Valle de Tecamachalco, Puebla, la PL del tipo flujo de redes permitió optimizar el patrón de cultivos. Así mismo formular un proyecto de inversión factible con mejores resultados al comprarlo con la metodología tradicional. En un periodo de 10 ciclos agrícolas, se logró determinar una dinámica de producción óptima que generó un ingreso neto total de \$7 422 367.00 pesos, cultivando pimienta morrón en los ciclos de p-v y jitomate en los ciclos de o-i.

En comparación con una producción de monocultivos, como se establece en forma tradicional en la formulación y evaluación de proyectos para los cultivos seleccionados en este estudio, se calcularon ganancias de \$6 254 668.49 y \$6 339 146.18 pesos para jitomate y pimienta morrón respectivamente. En comparación con los \$7 422 637.00 pesos de la combinación de jitomate y pimienta morrón resultante del modelo de PL.

Literatura citada

- Alvarado, B. J. 2009. La programación lineal aplicación de las pequeñas y medianas empresas. Reflexiones. 88(1):89-105. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72912559007>.
- Bazaraa, M. S.; Jarvis, J. J. and Sherali, H. D. 2010. Linear Programming and Network Flows. 4th (Ed). Editorial Hoboken, New Jersey: John Wiley y Sons, Inc. 748 p.
- CONASAMI, 2020. Secretaria del Trabajo y Previsión social. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/525061/Tabla.de.salarios.m.nmos.vigentes.apartir.del.01.de.enero.de.2020.pdf>.

- CONEVAL, 2018. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Ciudad de México: Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social.
- CONUEE, 2011. Estudio de Sistemas de Bombeo Agropecuarios en México, México DF.
- CRETEALC-México, 2011. Manejo del acuífero del valle de Tecamachalco, Puebla, México.
- Detlefsen, N. K. and Leck, A. L. 2004. Modelling optimal crop sequences using network flows. Tjele, Denmark: University of Aarhus, Faculty of Agricultural Sciences, Department of Agroecology and Environment. 94(2):566-572.
- Forrester, R. J. and Rodríguez, M. S. 2018. An integer programming approach to crop rotation planning at an organic farm. *The UMAP Journal*. 38(4):5-25.
- Fundar, 2014. Centro de Análisis e Investigación. Infografía: ¿Por qué es importante la pequeña agricultura? Subsidios al Campo en México. <https://fundar.org.mx/porque-es-importante-la-pequena-agricultura/>.
- Gittinger, J. P. 1982. Análisis económico de proyectos agrícolas. Banco Mundial. Madrid, España. 323-442 pp.
- Kaiser, H. M. and Messer, K. D. 2011. *Mathematical Programming for Agricultural, Environmental, and Resource Economics*. United States of America: John Wiley y Sons Inc. 151-155 pp.
- Jebelli, J.; Paterson, B. and Abdelwahab, A. 2016. A linear programming model to optimize cropping pattern in small-scale irrigation schemes: an application to Mekabo Scheme in Tigray, Ethiopia. *International Journal of Environmental and Agriculture Research*. 2(8):24-34.
- INEGI, 2018. Encuesta Nacional Agropecuaria 2017, CDMX: <https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2017/doc/mini-ena17.pdf>.
- INEGI, 2019. Marco Geoestadístico. Available at: <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>.
- Mohamad, N. H. and Said, F. K. 2011. A mathematical programming approach to crop mix problem. *African Journal of Agricultural Research*. 6(1):191-197.
- Pérez, M. D. 2000. *Formulación y evaluación de proyectos de inversión*. 1^{ra}. Ed. DICEA. Chapingo, Estado de México: 150 p.
- Prisenk, J. and Turk, J. 2015. A multi-goal mathematical approach for the optimization of crop lanning on organic farms: a Slovenian case study. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 52(4):971-979.
- Render, B. C.; Stair, R. M. y Hanna, M. E. 2012. *Métodos cuantitativos para los negocios*. 11^{va}. Ed. México. Pearson Education. 429-457 pp.
- Reyes, O. S. y Reyes, R. E. 2018. La historia del crédito agrícola en México. México, DF. Cámara de Diputados LXIII Legislatura. 341-344 pp.
- SEDESOL, 2011. Secretaría de Desarrollo Social. Pobreza, migración y capacidades básicas en la población jornalera agrícola en México. Resultados de la Encuesta Nacional de Jornaleros Agrícolas 2009, México, DF.
- SIAP, 2019. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Ciudad de México: SADER. <https://nube.siap.gob.mx/gobmx-publicaciones-siap/pag/2019/Atlas-Agroalimentario-2019>.