

Modelo matemático para determinar la rentabilidad de cultivos en el estado de Hidalgo

Mathematical model to determine the profitability of crops in the state of Hidalgo

Modelo matemático para determinar a rentabilidade das culturas no estado de Hidalgo

Recibido: 09/03/2026 | Revisado: 25/03/2026 | Aceptado: 26/03/2026 | Publicado: 27/03/2026

Alex Priscila Hernández Espinosa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0443-0605>

Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

E-mail: he444818@uaeh.edu.mx

Francisca Santana Robles

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3301-9790>

Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

E-mail: profe_7739@uaeh.edu.mx

Rafael Granillo Macías

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1015-667X>

Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

E-mail: rafaelgm@uaeh.edu.mx

Resumen

El sector agrícola del estado de Hidalgo enfrenta diversos desafíos derivados de la volatilidad de precios y de la disminución de acuerdos comerciales asociados a la producción de cebada, cultivo estrechamente vinculado a la industria cervecera. Ante este contexto, el objetivo del presente trabajo es evaluar la rentabilidad de cultivos alternativos a la cebada que apoyen a la toma de decisiones de los productores agrícolas. Para ello, se aplicaron modelos de pronóstico de promedios móviles y suavizamiento exponencial simple para estimar la producción anual de cebada, avena, sorgo y trigo, así como un modelo de optimización basado en programación lineal, considerando restricciones de disponibilidad de superficie agrícola, disponibilidad de semilla y monto de inversión. El modelo propuesto fue resuelto utilizando el software Lingo 19.0 y aplicado a municipios representativos del estado de Hidalgo, principalmente a los pertenecientes al Altiplano hidalguense. Los resultados obtenidos indican que cultivos como el sorgo y la avena representan alternativas viables y rentables para la región de estudio, debido a sus bajos costos de producción y a su adecuada adaptación a las condiciones climáticas y de riego de la región, sin descartar completamente la producción de cebada en aquellos municipios donde continúa siendo estratégica. Se concluye que, el uso de herramientas de optimización es útil en el apoyo a la toma de decisiones para mejorar la rentabilidad de la producción agrícola del altiplano, permitiendo reducir la dependencia de un solo cultivo y mitigar los riesgos asociados a la incertidumbre del mercado.

Palabras clave: Rentabilidad de cultivos; Modelos de optimización; Productores agrícolas.

Abstract

The agricultural sector in the state of Hidalgo faces several challenges stemming from price volatility and the decline in trade agreements related to barley production, a crop closely linked to the brewing industry. Given this context, the objective of this study is to evaluate the profitability of alternative crops to barley that can support agricultural producers' decision-making. To this end, moving average and simple exponential smoothing forecasting models were applied to estimate the annual production of barley, oats, sorghum, and wheat, as well as an optimization model based on linear programming, considering constraints on agricultural land availability, seed availability, and investment amount. The proposed model was solved using Lingo 19.0 software and applied to representative municipalities in the state of Hidalgo, primarily those located in the Altiplano hidalguense. The results obtained indicate that crops such as sorghum and oats represent viable and profitable alternatives for the study region, due to their low production costs and their good adaptation to the region's climatic and irrigation conditions, without completely ruling out barley production in those municipalities where it remains strategic. It is concluded that the use of optimization tools is useful in supporting decision-making to improve the profitability of agricultural production in the highlands, allowing for a reduction in dependence on a single crop and mitigating the risks associated with market uncertainty.

Keywords: Crop profitability; Optimization models; Agricultural producers.

Resumo

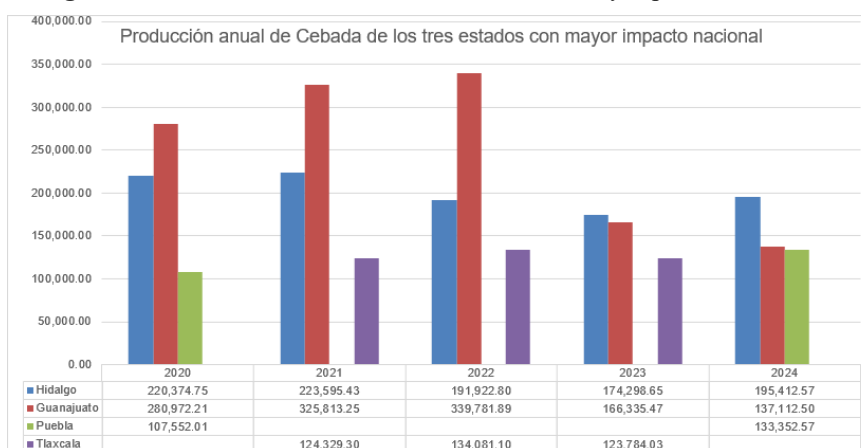
O setor agrícola do estado de Hidalgo enfrenta diversos desafios decorrentes da volatilidade de preços e do declínio dos acordos comerciais relacionados à produção de cevada, cultura intimamente ligada à indústria cervejeira. Diante desse contexto, o objetivo deste estudo é avaliar a rentabilidade de culturas alternativas à cevada que possam auxiliar os produtores agrícolas na tomada de decisões. Para tanto, foram aplicados modelos de previsão de média móvel e suavização exponencial simples para estimar a produção anual de cevada, aveia, sorgo e trigo, bem como um modelo de otimização baseado em programação linear, considerando restrições de disponibilidade de terras agrícolas, disponibilidade de sementes e montante de investimento. O modelo proposto foi resolvido utilizando o software Lingo 19.0 e aplicado a municípios representativos do estado de Hidalgo, principalmente aqueles localizados na região serrana de Hidalgo. Os resultados obtidos indicam que culturas como sorgo e aveia representam alternativas viáveis e rentáveis para a região estudada, devido aos seus baixos custos de produção e à sua boa adaptação às condições climáticas e de irrigação da região, sem descartar completamente a produção de cevada nos municípios onde ela permanece estratégica. Conclui-se que a utilização de ferramentas de otimização é útil para apoiar a tomada de decisões visando melhorar a rentabilidade da produção agrícola nas terras altas, permitindo reduzir a dependência de uma única cultura e mitigar os riscos associados à incerteza do mercado.

Palavras-chave: Rentabilidade das culturas; Modelos de otimização; Produtores agrícolas.

1. Introducción

México ocupa el cuarto lugar de producción de cerveza a nivel mundial con un volumen de salida de 142.410.000 millones de hectolitros (hL), también es el mayor exportador de cerveza del mundo exportando casi la mitad de la cerveza que se produce. La producción del país continúa en aumento, pasando de 126.9 millones de hectolitros en 2020 a 142 millones de hectolitros en 2023 (VinePair Staff 2024). Asimismo, en el país, la elaboración de la cerveza es la más importante dentro de las bebidas alcohólicas ya que, representa los mayores porcentajes de personal ocupado (49.3%) y producción bruta (65%) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI, 2019). A partir del año 2023, el Estado de Hidalgo se posicionó como el mayor productor de cebada en México (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP, 2025); de acuerdo con esta misma fuente, a partir del año 2023 la producción de cebada a nivel nacional ha tenido una tendencia descendente. La Figura 1 muestra la tendencia de producción anual de cebada desde 2020 a 2024 de los principales estados productores a nivel nacional.

Figura 1 - Histórico de cebada de los estados con mayor producción anual.



Fuente: SIAP (2025).

De acuerdo con INEGI (2021) la bebida que más remuneraciones tiene de toda la industria de bebidas alcohólicas es la cerveza, con 34,900 pesos mensuales por persona. Por otro lado, de acuerdo Valadez (2023), los productores de cebada han reportado el recorte o suspensión de acuerdos de agricultura por contrato, mismos que se mantenían desde a mediados de la década del 2010; donde marcan la formalización de negociación para ciclos agrícolas específicos. Asimismo, Montoya (2025) menciona que el precio por tonelada de cebada es de \$7,500 a partir de un acuerdo con productores, ya que, las empresas

cerveceras pretendían pagar solo \$4,500 por tonelada. De lo cual se puede deducir que, a pesar del crecimiento de la industria cervecera a lo largo de los años, los productores de cebada —materia prima esencial— enfrentan bajos precios y pérdida de acuerdos comerciales, lo que genera desequilibrios en la cadena de valor. El objetivo de este trabajo es evaluar la rentabilidad de cultivos alternos a la cebada para apoyar a los productores en la toma de decisiones que les permita obtener mayores ganancias, aplicando la técnica de programación lineal.

Modelos de optimización

Un modelo de optimización consiste en elegir los valores de las variables de decisión que optimizan (maximizan o minimizan) una función objetivo, sujeto a un conjunto de restricciones que representan las limitaciones del sistema (Hillier, 2010).

Programación lineal

La programación lineal es una técnica matemática que se utiliza para optimizar el rendimiento o la eficiencia de un sistema. Esta técnica es ampliamente utilizada en el mundo empresarial para resolver problemas de planificación, asignación de recursos y toma de decisiones. La programación lineal trata de optimizar (maximizar o minimizar) una función lineal, denominada función objetivo, estando las variables sujetas a una serie de restricciones expresadas mediante inecuaciones lineales (Taha, 2012).

Diversos estudios han utilizado modelos matemáticos para optimizar la producción agrícola y maximizar la rentabilidad bajo restricciones de recursos. La Tabla 1 resume la revisión de la literatura sobre modelos matemáticos aplicados a problemas agrícolas; donde se especifica el problema abordado, método de solución y tipo de función objetivo de cada uno de los artículos. En el trabajo de Arias-Collaguazo et al., (2021) se aplicó el método simplex para maximizar la ganancia de pequeños productores considerando limitaciones de tierra y agua, demostrando la efectividad de la programación lineal en contextos agrícolas. Por otro lado, Céspedes-Sabogal (2019) abordó la variabilidad de precios y la reubicación de zonas productivas mediante modelos de programación lineal entera mixta y técnicas complementarias de optimización, integrando aspectos productivos y de mercado. Los autores Lu, Liu, Long y Guan (2013) desarrollaron un modelo de optimización por intervalos para maximizar los beneficios del sistema agrícola considerando la seguridad alimentaria y los efectos ecológicos.

Por su parte, Singh y Panda (2012) emplearon programación lineal matemática para optimizar el uso de recursos hídricos limitados, maximizando los rendimientos agrícolas. Asimismo, Shaimardanovich y Rustamovich (2018) propusieron un modelo económico-matemático con análisis estadístico multidimensional para optimizar la producción agrícola y mejorar la rentabilidad. Finalmente, Osaki y Batalha (2014) utilizaron el método MOTAD para mejorar sistemas de doble cultivo de granos, reduciendo el riesgo y aumentando la estabilidad de los ingresos agrícolas.

Tabla 1 - Modelos matemáticos aplicados a problemas agrícolas.

Autor (es)	Problema abordado	Método de Solución	Tipo de función objetivo	
			Simple	Múltiple
Arias-Collaguazo et al., (2021)	Maximizar la ganancia de pequeños productores considerando la disponibilidad de agua, tierra y recursos limitados.	Modelo de optimización por medio del método simplex	X	
Céspedes-Sabogal, (2019)	Mitigar la variabilidad del precio con el que se comercializan los productos agropecuarios y reubicar las zonas de producción de algunos alimentos a lugares donde se produce más eficientemente.	Modelo de programación lineal entera mixta (MIP), flujo de redes, arboles de decisión, modelo de asignación de productos, modelo de fijación de precio	X	
Lu et al., (2013)	Maximizar los beneficios totales del sistema considerando la seguridad alimentaria y los efectos ecológicos	Modelo de optimización por intervalos (IPAPSOM)	X	

Singh y Panda, (2012)	Maximizar los rendimientos de recursos limitados como el agua para la producción agrícola	Modelo de programación lineal matemática	X	
Shaimardanovich y Rustamovich, (2018)	Optimizar la producción de productos agrícolas para maximizar la rentabilidad	Modelo económico/matemático y análisis estadístico multidimensional	X	
Osaki y Batalha, (2014)	Mejorar el sistema de producción de doble cultivo de granos	Método de minimización de las desviaciones absolutas totales (MOTAD)	X	

Fuente: Elaboración propia.

Modelos de pronóstico

Los modelos de pronóstico se clasifican en cualitativos y cuantitativos, en función de la disponibilidad de información y del enfoque metodológico empleado. Los modelos cualitativos se basan en el juicio experto, la experiencia y la percepción del mercado, siendo especialmente útiles cuando no existen datos históricos suficientes. Entre los más utilizados se encuentran el método Delphi, los paneles de expertos, la investigación de mercados y la analogía histórica. Por su parte, los modelos cuantitativos emplean datos históricos y herramientas estadísticas o matemáticas para estimar el comportamiento futuro de una variable. Estos se subdividen en modelos de series de tiempo, los cuales analizan patrones como tendencia, estacionalidad y ciclos, incluyendo promedios móviles, suavización exponencial, modelos ARIMA y métodos de descomposición; y en modelos causales, que explican la variable de interés a partir de una o más variables independientes, como la regresión lineal simple y múltiple y los modelos econométricos (Heizer, 2020).

Los promedios móviles son promedios utilizados cuando la demanda no tiene tendencia o estacionalidad (Chopra y Meindl, 2013). El pronóstico de promedio móvil simple es óptimo para patrones de demanda aleatoria o nivelada donde se pretende eliminar el impacto de los elementos irregulares históricos mediante un enfoque de periodos de hasta 7 días anteriores.

$$\hat{x}_t = \frac{\sum_{i=1}^n x_{t-i}}{n}$$

Donde:

\hat{x}_t Promedio de la demanda en el periodo t

x_{t-1} Demanda real de los periodos anteriores a t

n Número de observaciones

El método de suavizamiento exponencial simple se aplica cuando la demanda no tiene una tendencia o estacionalidad observable (Chopra y Meindl, 2013).

$$L_{t+1} = \sum_{n=0}^{t-1} \alpha (1 - \alpha)^n D_{t+1-n} + (1 - \alpha)^t D_1$$

Donde:

L_t Estimación del nivel al final del periodo t

α Constante de suavizamiento $0 < \alpha < 1$

D Demanda

n Número de observaciones

MAD (Mean Absolute Deviation / Desviación Absoluta Media)

El MAD mide el promedio de los valores absolutos de los errores de pronóstico, es decir, cuánto se desvía en promedio el pronóstico respecto a la demanda real, sin considerar el signo del error.

Definición:

Es el promedio de las desviaciones absolutas entre la demanda real y el pronóstico durante un número determinado de periodos.

Fórmula:

$$MAD = \frac{\sum |D_t - F_t|}{n}$$

Donde:

- D_t = demanda real en el periodo t
- F_t = pronóstico en el periodo t
- n = número de periodos

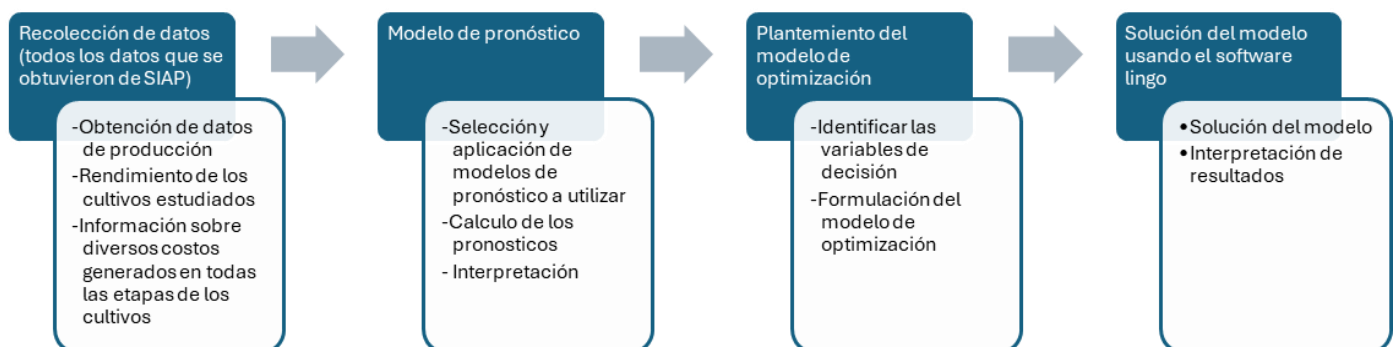
2. Metodología

El presente estudio corresponde a una investigación aplicada, desarrollada bajo un enfoque cuantitativo, sustentado en los principios de la metodología científica que garantizan la validez y confiabilidad de los resultados (Pereira et al., 2018; Risemberg et al., 2026). Además, se basa en la aplicación de modelos matemáticos para pronosticar y optimizar, concretamente a través de técnicas de programación lineal y series de tiempo, las cuales apoyan el análisis y la toma de decisiones en el ámbito agrícola (Chase, Almeida & Morais, 2021; Boghi & Shitsuka, 2005).

Descripción del Método

En el presente artículo, la metodología se presenta en cuatro etapas, la primera es la recolección de datos de fuentes confiables, la segunda es definir el modelo de pronóstico, la tercera el planteamiento del modelo de optimización y la cuarta etapa con la solución del modelo usando el software Lingo.

Figura 2 - Metodología utilizada para este estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Paso (1) Recolección de datos: Comprende la recolección de datos de diferentes fuentes como el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) y Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) para obtener datos históricos de la producción, rendimiento y diversos costos involucrados desde la siembra hasta la cosecha.

Paso (2) Modelo de pronóstico: Se seleccionan los modelos de pronóstico que mejor se ajustan a los datos históricos obtenidos en el paso 1 para estimar el comportamiento de producción de los diferentes cultivos para los años posteriores.

Paso (3) Planteamiento del modelo de optimización: Se define en el modelo de optimización la función objetivo y las restricciones.

Paso (4) Solución del modelo: Interpretar los resultados del modelo matemático.

2.1 Recolección de información: En esta etapa se recopila información para comprender el contexto de la producción agrícola en el estado de Hidalgo. Se analizó la situación actual del cultivo de cebada, destacando la disminución de su producción durante los últimos tres años, así como los acuerdos comerciales establecidos por empresas que pagan un bajo precio por tonelada, afectando la rentabilidad de los productores. Asimismo, se obtuvieron datos históricos provenientes de fuentes oficiales como SIAP y FIRA para sustentar el análisis. La Tabla 2 muestra la producción anual de avena, cebada, sorgo y trigo (SIAP)

Tabla 2 - Histórico de producción total de sorgo, producción total de los municipios más representativos para avena, cebada y trigo del estado de Hidalgo.

Producción total anual				
Año	Avena	Cebada	Sorgo	Trigo
2011	6143.4	52,820.74	473	4872.92
2012	4495.19	219,829.63	831.74	7365.9
2013	3716.55	154,609.04	912.5	3086.28
2014	9604.05	193,627.72	668.8	2991.15
2015	6112.5	194,728.14	550.4	4824.15
2016	4608.2	239,335.95	449.5	4548.78
2017	3785.88	209,193.85	284.5	4533.28
2018	3920.89	221,550.47	369	3228.45
2019	3653.98	176,457.86	451.2	3131.6
2020	2941.65	192,075.80	393.98	3276.79
2021	2709.49	198,011.90	385.7	1543.07
2022	2599.6	172,441.62	342.68	1929.02
2023	1838.81	158,087.90	278.06	2019.76
2024	2897.57	172,342.44	263.68	1225.8

Fuente: SIAP (2025).

2.2 Modelo de pronóstico: Con base en el contexto y los datos recopilados de FIRA y SIAP, se planteó la estimación de la producción agrícola por municipio para el año 2025 mediante el uso de métodos de pronóstico de series de tiempo. Se aplicaron dos técnicas: el método de suavizamiento exponencial y el método de promedios móviles, con el fin de proyectar el comportamiento futuro de la producción. La Tabla 3 muestra los resultados de los pronósticos calculados.

Tabla 3 - Pronósticos para producción 2025 de cebada en los municipios estudiados.

Pronósticos de producción agrícola por municipio para el año 2025						
Municipio	Promedios Móviles $n=2$	MAD	Promedios Móviles $n=4$	MAD	Suavizamiento exponencial $\alpha=0.8$	MAD
Almoloya	24,933.60	2775.98	25,792.86	3,241.21	26861.49	5,599.46
Apan	44,505.39	5995.96	46,075.75	6,010.77	46841.81	8,140.67
Cuautepec	22,790.92	4854.04	23,727.85	5,209.71	22235.97	5,044.93
Epazoyucan	3,004.33	2535.66	2,976.46	2,355.06	3345.46	3,814.72
Pachuca	1465.75	573.85	1,743.54	707.93	1379.06	635.11
Singuilucan	26,261.27	7626.80	30,235.56	6,518.05	25381.32	7,898.38
Tepeapulco	16,490.40	2188.95	16,610.37	2,226.51	17153.62	3,228.57
Tizayuca	1,061.13	998.09	1,265.94	608.18	1176.67	1,163.49
Tlanalapa	6031.9	1164.88	6,469.93	1,333.53	6446.81	1,282.44
Tolcayuca	3,198.13	1323.66	3,468.76	1,188.16	3645.51	1,458.08
Zapotlán	3,355.05	1520.38	3,511.38	1,638.95	3720.96	1,456.55
Zempoala	12,117.32	4234.10	13,342.58	4,823.52	12069.79	4,525.84

Fuente: Datos de esta investigación (2025).

2.3 Planteamiento del modelo de optimización: Se estableció la función objetivo orientada a maximizar los ingresos de los productores agrícolas. Para ello, se definieron las variables de decisión y restricciones pertinentes del problema abordado, construyendo un modelo matemático que fue resuelto haciendo uso del software Lingo. Para este modelo se usaron datos de FIRA Y SIAP. La Tabla 4 muestra los costos de producción desde la siembra hasta la cosecha (FIRA, 2025) y la Tabla 5 muestra los precios de venta por tonelada (Montoya, 2025), presentan datos usados para la alimentación del modelo matemático propuesto.

Tabla 4 - Costos de producción por tipo de cultivo.

Costos de producción				
Aspecto	Avena	Cebada	Sorgo	Trigo
Preparación del terreno	\$2,833	\$3,687	\$4,200	\$3,110
Siembra	\$3,683	\$3,140	\$4,144	\$3,205
Fertilización	\$11,309	\$4,365	\$8,020	\$6,353
Control de malezas, plagas y enfermedades	\$849	\$2,915	\$1,778	\$3,325
Cosecha, selección y Empaque	\$2,925	\$1,648	\$3,680	\$2,030
Total	\$21,598	\$15,755	\$21,822	\$18,022

Fuente: FIRA (2022) y FIRA (2025).

Tabla 5 - Precio por tonelada de cultivo.

Precio de venta por tonelada	Cultivo
\$ 11,270	Avena
\$ 7,500	Cebada
\$ 7,600	Trigo
\$ 4,700	Sorgo

Fuente: Montoya (2025).

Planteamiento del modelo de optimización

Se presenta el modelo matemático cuya función objetivo es maximizar las ganancias a partir de identificar los cultivos más rentables para la región de estudio, considerando restricciones de disponibilidad de hectáreas a cultivar, precio de venta por tonelada por tipo de cultivo, cantidad disponible a invertir, rendimiento en toneladas por hectárea, costo de cultivo por hectárea (desde la siembra hasta la cosecha), precio de semilla por tipo de cultivo, cantidad requerida de semilla por hectárea cultivada y disponibilidad de semilla. A continuación, se describen las variables consideradas para el modelo matemático.

Definición de variables

X_{ij} = cantidad de hectáreas a cultivar, donde i corresponde al *tipo de cultivo* ($i = 1$, cebada; $i = 2$, avena; $i = 3$, trigo; $i = 4$, sorgo) y j al *municipio* (Almoloya, Apan, Cuautepéc de Hinojosa, Epazoyucan, Singuilucan, Tepeapulco, Zempoala, Zapotlán, Tizayuca, Tolcayuca, Tlanalapa, Pachuca).

Y_i = precio por tonelada de cada tipo de cultivo i .

I = cantidad disponible a invertir.

R_i = rendimiento en toneladas por hectárea para cada tipo de cultivo i por municipio j .

C_i = costos de producción por tipo de cultivo i (incluye las diferentes etapas, desde la siembra hasta cosecha).

S = costo de seguro agrícola por hectárea.

h_j = cantidad de hectáreas disponibles por municipio j .

b_i = cantidad en kilogramos requerida de semilla por hectárea por tipo de cultivo i .

P_i = precio por kilogramo de semilla para cada tipo de cultivo i .

d_i = disponibilidad de semilla para cada tipo de cultivo i .

Función objetivo

$$\text{Maximizar } Z = \sum_i \sum_{ij} Y_i X_{ij} R_{ij} - \left(\sum_i \sum_{ij} C_i X_{ij} + \sum_i \sum_{ij} b_i P_i X_{ij} + \sum_i \sum_{ij} S X_{ij} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Restricciones

$$\sum_j \sum_{ij} X_{ij} \leq h_j \quad \text{Ec. 2}$$

$$\sum_i \sum_{ij} C_i X_{ij} \leq I \quad \text{Ec. 3}$$

$$\sum_i \sum_{ij} b_i X_{ij} \leq d_i \quad \text{Ec. 4}$$

La Ecuación 1 (Ec.1) representa la función objetivo, que busca maximizar los ingresos de los productores a partir de la venta de los diferentes tipos de cereales (avena, cebada, sorgo y trigo) considerados en este trabajo, y restando los costos asociados a dichos cultivos, como son, costos de producción, costos de semillas y costos de seguros agrícolas. Asimismo, la Ecuación 2 (Ec. 2) se refiere a la disponibilidad de hectáreas para cultivo para cada municipio, la cual no debe excederse; la Ecuación 3 (Ec. 3), hace referencia a la disponibilidad de capital de inversión; finalmente, la Ecuación 4 (Ec. 4) considera que la cantidad requerida de semilla para la siembra debe ser menor o igual a la disponible en el mercado.

2.4 Solución e interpretación del modelo: Se interpretan los resultados obtenidos del modelo en Lingo, analizando la solución óptima del problema y proponiendo alternativas de cultivo más rentables, destacando el sorgo como una opción viable para mejorar los ingresos agrícolas. Los resultados se presentan en la sección de resultados y discusión.

3. Resultados y Discusión

Modelos de pronóstico

En este estudio se obtuvieron los pronósticos de producción mediante los métodos de promedios móviles y suavizamiento exponencial simple, empleando valores de $n=2$ y $n=4$ para los promedios móviles y un coeficiente de suavizamiento $\alpha=0.8$. Los resultados permitieron estimar la producción futura de avena, cebada, trigo y sorgo en los municipios analizados del Altiplano hidalguense, los cuales fueron incorporados posteriormente al modelo de optimización.

Tabla 6 - Tabla de resultados al solucionar el modelo matemático usando Lingo.

Municipio	Avena	Cebada	Trigo	Sorgo
Almoloya		11,035.40		
Apan		20,863.54		
Cuautepec				8,542.93
Epazoyucan				3,302.23
Singuilucan				11,160.15
Tepeapulco		7,852.62		
Zempoala		13,204.62		
Zapotlán		3,848.63		
Tizayuca				1,269.38
Tolcayuca				3,597.45
Tlanalapa				3,688.61
Pachuca				1,865.85

Fuente: Datos de esta investigación (2025).

Para la solución del modelo se usó el software Lingo 19.0, obteniendo los datos mostrados en la Tabla 6. Los resultados proponen que el uso de Sorgo es una alternativa para los municipios de Cuautepec, Epazoyucan, Singuilucan, Tizayuca, Tolcayuca, Tlanalapa y Pachuca como cultivo debido a que es más barato producirlo, además sus características de producción que se adaptan al clima y la condición de temporal del Altiplano hidalguense. La cebada fue asignada para los municipios como Almoloya, Apan, Tepeapulco, Zempoala y Zapotlán, está estratégicamente asignado en determinados municipios, cuya producción debe mantenerse aun cuando existan alternativas como la avena, el trigo y el sorgo. Esto se debe a la relación de interdependencia entre los productores y la industria, la cual requiere un abastecimiento constante de cebada, lo que dificulta su sustitución total.

En el caso de la avena, el modelo de programación lineal únicamente la asigna cuando se reduce el monto de inversión, debido a que, aunque presenta menores costos y precios competitivos, su rendimiento por hectárea es inferior. Al considerar un capital de inversión más cercano a la realidad, la cebada y el sorgo se posicionan como las alternativas más viables y consistentes dentro del modelo.

Por su parte, el trigo no fue seleccionado en la solución óptima, ya que requiere mayores costos de producción, particularmente por la cantidad de semilla utilizada por hectárea, lo que genera pérdidas superiores bajo las restricciones de inversión analizadas.

Los resultados obtenidos concuerdan con la literatura que resalta la utilidad de los modelos de pronóstico de series de tiempo y la programación lineal como herramientas para apoyar la toma de decisiones en el sector agrícola. En particular, el uso de promedios móviles y suavizamiento exponencial simple es consistente con lo señalado por Chopra y Meindl (2013),

quienes recomiendan estos métodos cuando se dispone de información histórica limitada y no se observan patrones claros de tendencia o estacionalidad. La aplicación de ambos métodos permitió generar estimaciones estables de la producción, adecuadas para su integración en el modelo de optimización.

Asimismo, los resultados del modelo de programación lineal coinciden con estudios previos que demuestran que la optimización bajo restricciones de tierra, inversión y disponibilidad de insumos permite identificar combinaciones productivas más rentables (Arias-Collaguazo et al., 2021; Singh & Panda, 2012). En este sentido, la identificación del sorgo y la avena como alternativas viables para el Altiplano hidalguense se alinea con investigaciones que destacan la importancia de cultivos con menores costos de producción y mayor adaptabilidad climática para reducir el riesgo económico.

Finalmente, los resultados refuerzan lo reportado por Osaki y Batalha (2014) y Lu et al. (2013), quienes señalan que la diversificación de cultivos contribuye a mejorar la estabilidad de los ingresos agrícolas y a mitigar los efectos de la volatilidad del mercado. En este contexto, el presente estudio aporta evidencia que respalda el uso conjunto de modelos de pronóstico y optimización como una estrategia técnica viable para fortalecer la rentabilidad y resiliencia de la producción agrícola regional.

4. Conclusión

En presente trabajo se evaluó la rentabilidad de cultivos alternativos a la cebada en el estado de Hidalgo mediante la aplicación de modelos de pronóstico y un modelo de optimización basado en programación lineal. Los resultados obtenidos muestran que cultivos como el sorgo y la avena representan alternativas viables y rentables para los productores del Altiplano hidalguense, debido a sus menores costos de producción y a su adaptabilidad a las condiciones climáticas y de riego de la región además de reforzar la aplicación de rotación de cultivos.

El sorgo, siendo el cultivo que el modelo considero para la mayoría de los municipios, es de los cultivos más nobles para terrenos que tienen problemas de agua además de aportar carbono al sustrato.

El modelo propuesto permite apoyar la toma de decisiones de los productores al considerar de manera simultánea variables económicas, productivas y de disponibilidad de recursos, lo que contribuye a reducir la dependencia de un solo cultivo y a mitigar los riesgos asociados a la volatilidad del mercado de la cebada. Si bien actualmente no existe un marco legal específico que proteja a los productores de cebada, como ocurre en el caso del café, la diversificación de cultivos se presenta como una estrategia viable mientras se desarrollan políticas públicas más incluyentes para el sector agrícola.

Finalmente, se concluye que el uso de herramientas de optimización constituye un apoyo técnico relevante para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de la producción agrícola en la región.

Referencias

- Arias-Collaguazo, W. M., Castro-Morales, L. G., Maldonado-Gudiño, C. W., & Burbano-García, L. H. (2021). Análisis del modelo de optimización aplicado a la producción agrícola en la Asociación del Gobierno Autónomo Parroquial de Cahuasqui. *Dilemas contemporáneos: educación, política y valores*, 8(3).
- Boghi, C. y Shitsuka, R. (2005). *Aplicaciones prácticas con Microsoft Office Excel 2003 / Solver*. Editora Érica.
- Cámara de Diputados. (2025, 22 de abril). Minuta 027. Proyecto de decreto por el que se expide la Ley de Desarrollo Sustentable de la Cafeticultura (Oficio DGPL2P1A3072). https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/senclave/66/CS-LXVI-I-2P-27/01_minuta_027_22abr25.pdf
- Céspedes-Sabogal, E. S. (2019). Modelo de optimización para la producción y comercialización de productos agrícolas en Colombia.
- Chase, OA, Almeida, JFS y Morais, EC (2021). *Programação matemática: optimização linear y no linear*. Editora Dialétrica. ISBN-13: 978-6525201252.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2013). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (5th ed.). Pearson Education.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2022). Avena BMF Chihuahua OI 2022–2023 [PDF]. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=102438>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2024). Trigo GMF Coahuila de Zaragoza OI 2024–2025 [PDF]. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=124717>

- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2025a). Cebada TMF Hidalgo PV 2025 [PDF]. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=126014>
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2025b). Sorgo TMF Puebla PV 2025 [PDF]. <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=127628>
- Hartwich, F., & Kormawa, P. (2009). Value chain diagnostics for industrial development. United Nations Industrial Development Organization.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2020). Principios de Administración de Operaciones (12.ª ed.). Pearson: Estados Unidos.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones* (9.ª ed.). McGraw-Hill: Estados Unidos.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice* (2nd ed.). OTexts: Australia.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). Conociendo la industria de la cerveza. INEGI. https://www.inegi.org.mx/tablerosestadisticos/industria_cerveza/#Informacion_general
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). Conociendo la industria de la cerveza (Colección de estudios sectoriales y regionales). https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825198428.pdf
- Kaplinsky, R., & Morris, M. (2016). Thinning and thickening: Productive sector policies in the era of global value chains. *European Journal of Development Research*, 28, 625–645. <https://doi.org/10.1057/ejdr.2015.29>
- Lu, S., Liu, Y. S., Long, H. L., & Guan, X. L. (2013). Agricultural production structure optimization: a case study of major grain producing areas, China.
- Montoya, R. (2025, 4 de mayo). Productores de Hidalgo y Modelo fijan precio de cebada; finaliza conflicto. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2025/05/04/estados/productores-de-hidalgo-y-modelo-fijan-precio-precio-de-cebada-finaliza-conflicto>
- Osaki, M., & Batalha, M. O. (2014). Optimization model of agricultural production system in grain farms under risk, in Sorriso, Brazil. *Agricultural Systems*, 127, 178-188.
- Pereira AS et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [libro electrónico gratuito]. Santa María/RS. Ed. UAB/NTE/UFSM
- Risemberg, RIC y cols. (2026). A importância da metodologia científica no desenvolvimento de artigos científicos. *E-Acadêmica*, 7 (1), e0171675. <https://eacademica.org/eacademica/article/view/675>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2025). Producción agrícola: Cierre de la producción agrícola (1980–2022). <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2025). Avance de siembras y cosechas: Resumen por estado. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ResumenProducto.do
- Shaimardanovich, D. A., & Rustamovich, U. S. (2018). Economic-mathematical modeling of optimization production of agricultural production. *Asia Pacific Journal of Research in Business Management*, 9(6), 10-21.
- Singh, A., & Panda, S. N. (2012). Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return. *Agricultural water management*, 115, 267-275.
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de operaciones* (9ª ed.). Pearson Educación: México.
- Valadez, A. (2023, 4 de diciembre). Grupo Modelo redujo compra de cebada en México; la trae de Australia. *La Jornada*. <https://www.jornada.com.mx/2023/12/04/estados/029n1est>
- Vázquez-Alfaro, M., Aguilar-Ávila, J., & Palacios-Rangel, M. I. (2021). Cadena de valor de la industria cervecera en México. *Nova Scientia*, 13(27), 277–299. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2778>
- VinePair Staff. (2024, July 22). These are the top 20 beer-producing countries in the world (2024). VinePair. <https://vinepair.com/booze-news/top-20-beer-producing-countries-2024/>