



Optimización técnico-económica en la engorda de guajolotes de líneas genéticas comerciales en Temascaltepec, México



Héctor Hugo Velázquez-Villalva ^a

Rodolfo Rogelio Posadas-Domínguez ^{b*}

Samuel Rebollar-Rebollar ^a

Encarnación Ernesto Bobadilla-Soto ^c

^a Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM Temascaltepec. Facultad de Ingeniero Agrónomo Zootecnista. Carretera Toluca-Temascaltepec. Colonia Barrio de Santiago. 51300, Estado de México, México.

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Escuela Superior de Zimapán. Facultad de Contaduría. Hidalgo, México.

^c Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo-CONAHCYT. Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Michoacán, México.

* Autor de correspondencia: rodolfo_posadas@uaeh.edu.mx

Resumen:

El objetivo del estudio fue desarrollar un enfoque combinado de modelado determinista y simulación Monte Carlo para determinar el nivel óptimo técnico-económico en la engorda de guajolotes de líneas genéticas comerciales en el municipio de Temascaltepec, México. Se analizaron datos de 42 pavos de la variedad genética diamante doble pechuga, con una edad promedio de tres semanas y un peso corporal inicial de 1.077 ± 0.132 kg. Para modelar la relación entre el consumo de alimento y el peso final de los guajolotes, se empleó una función de producción cuadrática ajustada mediante regresión no lineal, complementada con un análisis de simulación Monte Carlo para evaluar el riesgo asociado con las fluctuaciones en el costo del alimento y el precio de venta de los guajolotes. El análisis determinista identificó que la rentabilidad económica se maximiza cuando los guajolotes consumen 26.81 kg de alimento y alcanzan un peso vivo de 11.30 kg. La simulación Monte Carlo confirmó la validez de estos resultados bajo escenarios

de incertidumbre en los precios de venta y el costo del alimento, estimando una utilidad neta promedio de \$379.29 por ave en el óptimo económico, frente a \$325.39 en el técnico, lo que representa un incremento del 16.56 % en la rentabilidad por guajolote. Estos hallazgos confirman que la integración del modelado determinista con simulación estocástica constituye una herramienta metodológica eficaz para la toma de decisiones productivas en condiciones de variabilidad e incertidumbre. Se recomienda validar este enfoque en otros contextos agropecuarios para fortalecer su aplicabilidad práctica.

Palabras clave: Consumo de alimento, Nivel óptimo económico, Simulación estocástica, Análisis económico, Regresión no lineal.

Recibido: 04/03/2025

Aceptado: 10/06/2025

Introducción

En México la crianza de guajolote (*Meleagris gallopavo*) con líneas genéticas comerciales (meleagricultura), se considera una de las actividades ganaderas con mayor tradición⁽¹⁾. Este sistema productivo, se desarrolla en todo el territorio nacional, concentrándose principalmente en comunidades indígenas⁽²⁾, donde operan pequeñas unidades de producción que implementan prácticas zootécnicas adaptadas a las condiciones de los campesinos⁽³⁾. La producción de guajolote en México se realiza bajo tres sistemas bien definidos; tecnificado, semitecnificado y pequeños productores que crían los guajolotes en traspatio de forma tradicional⁽⁴⁾, cada sistema con características y niveles tecnológicos distintos^(5,6).

A partir de la domesticación se han desarrollado diversas variedades o líneas genéticas del guajolote silvestre, las de mayor importancia comercial incluyen el pavo blanco grande y el bronceado de doble pechuga⁽⁷⁾. La cría de estas líneas comerciales se lleva a cabo, principalmente, en sistemas intensivos y son seleccionadas por su rápido crecimiento, eficiencia alimenticia, rendimiento de canal y mayor tamaño de la pechuga⁽⁸⁾. A pesar de la diversidad en los sistemas de producción de guajolote, la avicultura en México enfrenta importantes desafíos para satisfacer la creciente demanda interna de carne de pavo, lo que ha llevado a un aumento considerable de las importaciones. En 2017, el país se posicionó como el tercer mayor importador de carne de pavo con 7.2 millones de toneladas de carne congelada y 85 mil de carne fresca refrigerada⁽⁹⁾.

Un factor determinante para mejorar la producción de guajolote es la eficiencia técnico-económica y el uso óptimo de los factores productivos (trabajo, capital y materias primas)⁽¹⁾, especialmente el alimento que representa uno de los insumos más relevantes

en este sistema productivo^(1,10). El crecimiento animal en este contexto puede modelarse con precisión mediante funciones matemáticas que describan la evolución del peso vivo, permitiendo estimar los valores máximos de crecimiento y las edades óptimas para maximizar la productividad y el beneficio económico^(11,12). Para evaluar la eficiencia técnica en la producción Battese y Coelli⁽¹³⁾ proponen dos enfoques; el determinista y el probabilístico. Este estudio se enfoca en el modelo probabilístico mediante la aplicación de una función de producción cuadrática con un enfoque de regresión no lineal, complementada con un análisis de simulación Monte Carlo.

A pesar de que algunos estudios previos en el sector agrícola mexicano han implementado funciones de producción para evaluar el impacto del alimento en la ganancia de peso de los animales⁽¹⁴⁻¹⁷⁾, existe una carencia de trabajos enfocados en la meleagricultura con líneas genéticas comerciales que permitan determinar las edades óptimas de sacrificio para maximizar la rentabilidad económica en este sistema productivo, particularmente considerando que el alimento representa más del 70 % de los costos totales en la producción de guajolote^(10,18,19). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue desarrollar un enfoque combinado de modelado determinista y simulación Monte Carlo para determinar el nivel óptimo técnico-económico en la engorda de guajolotes de líneas genéticas comerciales, incorporando variables alimenticias y el impacto del costo de las dietas utilizadas en el municipio de Temascaltepec, México.

Material y métodos

Área de estudio

El experimento se desarrolló en la granja de aves de engorda de la posta zootécnica del Centro Universitario UAEM Temascaltepec. La granja se localiza entre los paralelos 18°49'58.9'' y 19°08' 37.0'' latitud norte y entre los meridianos 99°51'17.9'' y 100°36.0' 46.2'' longitud oeste. El clima de la zona es semicálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 20.3 °C, con precipitación de 1,158 mm⁽²⁰⁾.

Manejo de los animales y preparación de las instalaciones

La nave de engorda que se utilizó en el experimento cuenta con dimensiones de 9 m de largo, 6 m de ancho y 3.5 m de altura. En su interior se instalaron corrales individuales fabricados con varillas de 3/8'' recubiertos con malla hexagonal, con dimensiones de 100 cm de largo, 50 cm de ancho y 70 cm de alto. Estos corrales se diseñaron para evitar el contacto entre los pavos de diferentes lotes y asegurar una ventilación adecuada durante el ciclo de engorda. Previo al inicio del experimento, las instalaciones se sometieron a un proceso de limpieza empleando agua y jabón, seguido por una desinfección mediante aspersión con una solución de creolina (13.33 ml/L), 48 h antes de la recepción de los animales.

Cada corral se equipó con un sistema de iluminación mediante focos fluorescentes de 40 watts, comederos lineales de 30 cm con capacidad para 1.2 kg de alimento. Para garantizar un adecuado control de la ventilación, se instalaron cortinas de plástico ajustables a lo largo de la nave. Durante los primeros cuatro días del experimento, las cortinas permanecieron completamente cerradas para evitar corrientes de aire. A partir del quinto día, se iniciaron ajustes progresivos bajándolas 25 cm por día, hasta que, desde el séptimo día en adelante, permanecieron abiertas entre las 0800 y 2000.

Recepción y manejo de los guajolotes

Previo a la llegada de los guajolotes, se implementó un protocolo de bioseguridad mediante la colocación de un tapete sanitario en la entrada de la nave, el cual fue empapado con una solución de 2 L de agua y 5 ml de creolina para evitar la introducción de patógenos externos.

Material biológico y alimentación

El estudio utilizó 42 guajolotes de la variedad genética diamante doble pechuga, con un promedio de edad de tres semanas y un peso corporal inicial de 1.077 ± 0.132 kg. Los guajolotes se distribuyeron aleatoriamente, asignando uno por corral y se manejaron bajo un régimen de alimentación *ad libitum* (Figura 1). Durante las primeras dos horas después de su llegada, no se les proporcionó alimento para permitir su adaptación. Posteriormente, se calculó la cantidad de alimento a suministrar con base en el pavo de mayor peso, añadiendo un 10 % sobre su peso corporal para garantizar un adecuado consumo.

Figura 1: Sistema de alimentación tradicional en la granja de aves de engorda de la posta zootécnica del Centro Universitario UAEM Temascaltepec



En este estudio se utilizaron tres fases alimenticias: pavo inicia, pavo crece y pavo finaliza, de acuerdo con el plan nutricional del alimento comercial utilizado en la

investigación, el cual integra las fases de crecimiento y desarrollo en una sola etapa denominada pavo crece. Durante la fase inicial, la cual contempló desde la llegada de los guajolotes hasta el día 23, se les suministró una dieta con 27 % de proteína cruda. La transición hacia la dieta de crecimiento se realizó de manera gradual en tres días, utilizando proporciones decrecientes de la dieta inicial (75-25 %, 50-50 %, y 25-75 %). Los guajolotes consumieron esta dieta de crecimiento entre los días 27 y 55 (Cuadro 1). Posteriormente se inició la transición hacia la dieta de finalización, la cual se suministró hasta la conclusión del experimento (84 días).

Cuadro 1: Composición nutricional de las dietas suministradas a guajolotes en diferentes etapas de crecimiento (%)

Etapa	Proteína cruda	Grasa cruda	Fibra cruda	Cenizas	Humedad	ELN
Inicio	27.00	3.50	4.50	7.50	12.00	45.50
Crecimiento	23.00	4.50	5.00	7.00	12.00	48.50
Finalización	20.00	4.50	5.00	6.00	12.00	52.50

ELN= extracto libre de nitrógeno por diferencia.

Fuente: Productores Agropecuarios Tepexpan, S.A. de C.V., 2023.

Variables de respuesta

El peso vivo inicial de los guajolotes se registró individualmente al momento de la recepción, utilizando una báscula con capacidad de 40 kg. El seguimiento del peso vivo se realizó cada ocho días, de acuerdo con el procedimiento descrito por Rodríguez-Licea *et al*⁽¹⁾, quienes demostraron que este intervalo es adecuado para capturar cambios significativos en el crecimiento de guajolotes en condiciones similares. El alimento se ofreció dos veces al día, a las 0900 y 1800. En esta última hora, se recolectó el alimento rechazado de cada comedero, almacenándolo en bolsas identificadas por lote y pesándolo para registrar el desperdicio antes de la siguiente alimentación. Durante el primer día tras la recepción de los guajolotes, se les suministró agua con una solución de RuViOtic (0.6 g/L) para asegurar su hidratación; posteriormente, a partir del segundo día y hasta el final del experimento, el agua se proporcionó *ad libitum*.

El consumo diario de alimento se calculó como la diferencia entre el alimento total ofrecido menos el alimento rechazado cada día. A partir de esta información, se estimó el consumo semanal sumando los valores diarios para cada guajolote. La ganancia de peso semanal se determinó restando del peso inicial en cada etapa (inicio, crecimiento y finalización), el peso final registrado en cada semana. La conversión alimenticia se estimó al dividir el consumo total de alimento entre el peso final menos el peso inicial de los guajolotes. Los datos se registraron en una bitácora de campo durante todo el periodo experimental. Posteriormente, la información se organizó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, la cual sirvió como base para el procesamiento estadístico y la modelación posterior.

Modelo estadístico

Para evaluar la relación entre el consumo de alimento y el peso final de los guajolotes, se utilizó una función de producción representada por un modelo de regresión no lineal cuadrático. En este modelo el consumo total de alimento (A) en cada etapa de producción se utilizó como variable independiente, mientras que el peso vivo (P) expresado en kilogramos, se consideró como variable dependiente. Este enfoque no lineal fue elegido debido a la naturaleza biológica de crecimiento animal, donde el rendimiento marginal decreciente del consumo de alimento ha sido, ampliamente, documentado en la literatura^(16,17,21). El modelo de regresión se determinó al evaluar tanto la significancia estadística como la coherencia en las hipótesis biológicas y económicas, considerando la magnitud y signo de los coeficientes en cada parámetro⁽¹²⁾. La especificación del modelo fue la siguiente:

$$P = \alpha + \beta_1 A + \beta_2 A^2 + \varepsilon$$

Donde P= peso vivo de cada guajolote en kg; α = intercepto de la función; β_1 y β_2 = son los coeficientes estimados que capturan el efecto lineal y cuadrático del consumo de alimento; A= es la cantidad de alimento suministrado a cada guajolote (kg); ε = error aleatorio.

Análisis de la eficiencia técnico-económica

Para estimar la eficiencia técnico-económica, se utilizaron los métodos propuestos por diversos autores^(1,12,14). Estos autores calculan el nivel óptimo técnico (NOT), a partir de la primera derivada parcial de la función de producción con respecto a la variable independiente "A". Al igualar la primera derivada a cero se obtiene la cantidad de alimento, con la cual, la tasa de ganancia en peso alcanza su máximo valor. Posteriormente el valor derivado de "A", se sustituye en la función de producción para determinar el peso máximo de rendimiento biológico.

Para determinar el nivel óptimo económico (NOE), se utiliza la primera derivada parcial de la función de producción y se iguala a la relación entre el precio del insumo (alimento), dividida entre el precio de venta del guajolote en pie. Esta aproximación permite integrar criterios económicos en el modelo y al derivarla se obtiene la cantidad de alimento y peso vivo que maximiza la rentabilidad económica⁽¹⁶⁾. Durante el periodo de estudio, el costo por kilogramo de alimento fue de \$11.63, mientras que el precio de venta por kilogramo en pie fue de \$73.

Simulación Monte Carlo

La determinación del NOT y NOE se realizó a través de un análisis de optimización tradicional, el cual se basa en cálculos que suponen condiciones constantes. Sin embargo,

para abordar la incertidumbre en el precio de venta y costo de alimento, se realizó un análisis de simulación Monte Carlo; este enfoque permite modelar la incertidumbre de estas variables, generando una distribución de resultados posibles que complementan el análisis tradicional. La simulación Monte Carlo proporcionó una visión detallada del impacto que tienen las fluctuaciones en el precio del alimento y venta de los guajolotes en los beneficios monetarios asociados con los niveles óptimos, lo que proporcionó una evaluación más robusta del riesgo y ganancias económicas.

Para realizar el análisis de simulación Monte Carlo, se ajustaron los parámetros asociados con el precio por kilo de alimento y precio de venta del guajolote, utilizando datos históricos de 15 años (2008-2022). El precio histórico de venta del guajolote se obtuvo del portal estadístico del Sistema de Información Agroalimentario y Pesquera⁽²²⁾, mientras que el precio histórico por kilo de alimento se determinó utilizando una metodología de ajuste por inflación, dado que en México no existe una fuente para obtener datos de precios históricos precisos. El ajuste por inflación se realizó al utilizar tasas de inflación anuales consultadas en el portal del Banco de México⁽²³⁾ con un precio base de \$11.63 por kg de alimento para el año 2023. La fórmula que se utilizó para este ajuste fue la siguiente:

$$P_{ajustado} = \frac{P_{actual}}{1+inflación}$$

$P_{ajustado}$ es el precio ajustado del año anterior, P_{actual} es el precio base del año 2023 (\$11.63). Este ajuste permitió obtener una serie temporal de precios históricos del alimento (2008-2022), ajustados a valores constantes del año base, garantizando con ello, una comparación consistente a lo largo del período de estudio.

La simulación Monte Carlo se realizó con 10,000 iteraciones para evaluar la variabilidad en el precio de venta del guajolote y costo de alimento. Los parámetros iniciales para la simulación se definieron a partir de los datos históricos del precio por kilo de alimento y venta del guajolote. El costo de alimento se modeló con una media = \$8.18 y desviación de \$1.46, mientras que el precio de venta del guajolote incluyó una media de \$57.11 y desviación estándar = 14.01 pesos.

Para cada iteración se calcularon los ingresos y costos totales en el NOT y NOE. El ingreso total se obtuvo al multiplicar el precio de venta por el peso del guajolote, mientras que el costo total se calculó al multiplicar el costo de alimento por el consumo. La ganancia neta se determinó restando al ingreso el costo total. Para asegurar la precisión y robustez de la simulación, se realizó una prueba de convergencia y validación cruzada.

La evaluación de la convergencia se llevó a cabo mediante un análisis con diferentes números de iteraciones (1,000, 5,000 y 10,000) para obtener la media, desviación estándar y los percentiles al 5, 50 y 95 %, de las ganancias netas en cada nivel óptimo. La validación cruzada se realizó utilizando cinco pliegues para comprobar la consistencia de

los resultados. Este proceso implicó dividir las simulaciones en diferentes subconjuntos y combinar los resultados para verificar si las estimaciones en la ganancia neta para cada óptimo fueron consistentes con las particiones de los datos. El análisis de optimización, así como la simulación Monte Carlo se llevaron a cabo utilizando el software R (versión 4.4.1)⁽²⁴⁾.

Resultados

En el Cuadro 2, se muestra el incremento de peso de los guajolotes desde la tercera semana de edad con 1.08 kg, hasta la semana 12, en la cual alcanzaron un peso promedio de 12.45 kg. El consumo total de alimento por guajolote fue de 34.74 kg durante la fase de finalización con una CA de 3.05 kg de alimento por cada kilo de peso ganado.

Cuadro 2: Variables productivas en la engorda de guajolotes diamante doble pechuga

Variable	Valores
Número de guajolotes	42.00
Peso promedio inicial por guajolote, kg	1.08
Peso promedio final por guajolote, kg	12.45
Consumo total de alimento promedio por guajolote, kg	34.74
Conversión alimenticia promedio por guajolote	3.05

El valor F del modelo (1,167.97; $P < 0.001$), indica que las variables predictoras (A y A²) tienen un impacto significativo sobre la ganancia de peso de los guajolotes. El coeficiente de determinación muestra que el 99.57 % de la variabilidad en el peso se explicó por las predictoras. El R² predicho (0.9876), confirma que el modelo tiene un alto poder predictivo, y se puede utilizar para su aplicación práctica bajo distintas condiciones alimenticias. El coeficiente positivo de “A”, muestra que por cada kilo adicional de alimento consumido la ganancia de peso de los guajolotes aumenta en promedio 0.58 kg, mientras que el coeficiente negativo de “A²”, indica la presencia de rendimientos marginales decrecientes. Este comportamiento muestra que el aumento en el consumo de alimento, no fue proporcional con el peso de los guajolotes (Cuadro 3).

Cuadro 3: Resultado del modelo de regresión para predecir la ganancia de peso en guajolotes

	Parámetros estimados	Error estándar	Estadístico t	P-valor
Intercepto	1.41419	0.15220	9.29	<.0001
Variable A	0.57806	0.02512	23.01	<.0001
Variable A ²	-0.00781	0.00074	-10.55	<.0001
R ² del modelo	0.99570			
R ² predicho del modelo	0.98769			
F del modelo	1,167.97			<.0001

Nivel óptimo técnico en la producción de guajolotes

El NOT, se obtuvo al igualar a cero la primera derivada de la función de producción, lo cual corresponde al punto donde los guajolotes alcanzan su máxima producción biológica o el máximo peso *in vivo*^(12,21).

Para la función de producción estimada: $P1.41419 + 0.57806A - 0.00781A^2$, al derivar P respecto a A e igualar a cero se obtiene:

$$\frac{dy}{dx} = 0.57806 - 0.01562A = 0$$

Al resolver para A, se genera el valor del insumo variable, que representa la cantidad total de alimento que los guajolotes necesitan para alcanzar su máximo peso de producción o máximo peso *in vivo*.

$$-0.01562A = -0.57806$$

$$A = \frac{-0.57806}{-0.01562}$$

A = 37.01 kilogramos de alimento

Los guajolotes requieren 37.01 kg de alimento para alcanzar su máximo peso de producción. Sustituyendo este valor de A, en la función de producción se obtiene el peso vivo máximo de los guajolotes.

$$P1.41419 + 0.57806(37.01) - 0.00781(37.01)^2 = 12.11 \text{ kilogramos de peso.}$$

Nivel óptimo económico en la producción de guajolotes

El NOE, se determinó al igualar la primera derivada de la función de producción a la relación entre el precio de un kilogramo de alimento (P_x) entre el precio de venta de un kilogramo de guajolote (P_y). Este análisis establece la cantidad óptima de alimento que deben consumir los guajolotes para maximizar el beneficio económico^(12,21).

$$\frac{dP}{dA} = \frac{P_x}{P_y} = 0.57806 - 0.01562A = \frac{11.63}{73}$$

Resolviendo para A:

$$\begin{aligned} 0.57806 - 0.01562A &= 0.15936 \\ -0.01562A &= -0.4187 \end{aligned}$$

$$A = \frac{-0.4187}{-0.01562} = 26.81 \text{ kg de alimento}$$

Los guajolotes requieren 26.81 kg de alimento para alcanzar el máximo beneficio económico. Al sustituir este valor de A, en la función de producción se obtiene el peso vivo que maximiza el ingreso.

$$P1.41419 + 0.57806(26.81) - 0.00781(26.81)^2 = 11.30 \text{ kilogramos de peso vivo.}$$

En el Cuadro 4, se observa que el NOE genera una ganancia superior por guajolote (\$513.10) en comparación con el NOT (\$413.60). La reducción en el consumo de alimento para el NOE, genera una disminución en el costo total, lo que se traduce en un incremento de la relación beneficio/costo por cada peso invertido.

Cuadro 4: Comparación de ganancias monetarias en el nivel óptimo técnico y económico

Parámetro	Nivel óptimo técnico	Nivel óptimo económico
Consumo de alimento, kg	37.01	26.81
Peso del guajolote, kg	12.11	11.30
Ingreso total, \$	844.03	824.90
Costo total, \$	430.43	311.80
Ganancia, \$	413.60	513.10
Relación beneficio/costo, \$	1.96	2.65

Simulación Monte Carlo

Los resultados de la simulación Monte Carlo indican que la ganancia neta media para el NOE fue mayor en comparación con el NOT. Al aumentar el número de simulaciones, se

observó que tanto la ganancia media como los valores en los percentiles 5 y 95 % se estabiliza a partir de las 1,000 interacciones. La validación cruzada confirmó la precisión de estas estimaciones con valores muy cercanos a los obtenidos por el método de convergencia. La desviación estándar para ambos óptimos se mantuvo constante e indicó una variabilidad estable en la ganancia neta sin importar el tamaño de muestra. El comportamiento de los percentiles indicó que los valores centrales permanecieron consistentes, lo que refuerza la estabilidad de las estimaciones y robustez de los resultados. Sin embargo, los extremos de la distribución revelaron mayor variabilidad en la ganancia promedio para el NOE, lo que puede asociarse con mayor riesgo en condiciones adversas en comparación con el NOT (Cuadro 5).

Cuadro 5: Evaluación de la ganancia neta con simulación Monte Carlo para el nivel óptimo técnico y económico

Número de simulaciones	Nivel óptimo técnico			Nivel óptimo económico		
	Ganancia (\$)	Desviación estándar (\$)	Percentiles	Ganancia (\$)	Desviación estándar (\$)	Percentiles
1,000	334.14	182.79	5%: 35.86 50%:338.04 95%: 621.55	387.73	164.98	5%: 119.88 50%: 393.90 95%: 656.86
5,000	330.4	182.75	5%: 32.85 50%:326.64 95%: 629.40	383.82	165.98	5%: 112.41 50%:383.33 95%: 657.83
10,000	325.39	181.51	5%: 30.40 50%:324.09 95%: 624.83	379.29	164.95	5%:111.49, 50%: 378.40 95%: 652.50
Parámetro:						
Validación cruzada	329.25	180.88	5%: 30.32 50%:328.59 95%: 626.42	383.01	164.15	5%: 109.13, 50%: 381.75 95%: 651.61

Discusión

El peso final de los guajolotes a las 12 semanas de vida en este estudio (12.45 kg), fue similar al reportado por Santos-Ricalde *et al*⁽²⁵⁾ en guajolotes de la línea genética Convertible. Resultados similares se han reportado en Nigeria, donde los guajolotes alimentados con dietas comerciales presentaron ganancias de peso comparables a los de esta investigación⁽²⁶⁾. La conversión alimenticia observada en este estudio fue de 3.05 kg, superior a los 2.46 kg registrados para pavos de la línea Nicholas 700 en un periodo de engorda similar⁽²⁷⁾. Esta diferencia puede explicarse por variaciones en la dieta y manejo utilizado en cada investigación, factores que influyen directamente en la eficiencia alimentaria. Por otro lado, un estudio realizado en Nigeria reportó una conversión alimenticia mayor de 3.53 kg⁽²⁶⁾, lo que resalta la influencia en las condiciones de manejo y alimentación en el rendimiento productivo de los guajolotes.

El peso promedio final de los guajolotes en este trabajo (12.45 kg, tras 12 semanas de engorda), fue superior al reportado en sistemas de producción de traspatio y semitecnificados, donde los pesos promedio a las 15 semanas fueron de 3.19 y 4.76 kg, respectivamente⁽¹⁾. El análisis de los errores estándar confirmó la validez de este comportamiento, demostrando que todas las suposiciones asociadas con la distribución de las variables A y A² quedan satisfechas⁽¹²⁾. Esto garantiza que las estimaciones de los efectos de las variables en la producción de guajolotes son confiables y poco susceptibles a variaciones en los datos muestrales.

El estadístico t asociado con las variables A y A², mostró significancia estadística en el modelo de regresión, confirmando su influencia significativa en la producción de guajolotes⁽¹⁾. Además el valor de R² en el modelo fue consistente con lo reportado por Rodríguez-Licea *et al*⁽¹⁾, quienes encontraron que el insumo alimento explicó el 99.55, 98.76 y 99.34 % del peso alcanzado por los guajolotes en sistemas tecnificados, semitecnificados y de traspatio, respectivamente. Estos resultados coinciden con otros estudios, que destacan al insumo alimento como un factor crítico en la producción de guajolotes⁽²⁶⁾, y refuerza la importancia de la dieta en la conversión alimenticia y el crecimiento⁽²⁷⁾.

De acuerdo con la teoría microeconómica⁽²⁸⁾, el signo negativo del parámetro A² en la función de producción indica la presencia de un modelo cuadrático con rendimientos marginales decrecientes. Este comportamiento, implica que a medida que se incrementa progresivamente el insumo alimento, el incremento en el peso de los guajolotes comienza a decrecer⁽¹⁾. En consecuencia, se observa una disminución en la ganancia económica al momento de la venta.

La máxima producción de peso vivo en los guajolotes no implica la obtención de la máxima ganancia monetaria⁽¹⁾. Esto se explica dado que a niveles altos en el consumo de alimento, una proporción del peso ganado se transforma en grasa en lugar de carne, reduciendo la eficiencia técnica y aumentando los costos de producción^(12,14,29). En este estudio se confirmó que la ganancia monetaria fue mayor en el NOE, desempeño que puede atribuirse entre otras variables a la relación inversa entre el óptimo económico y el precio del alimento⁽¹⁶⁾, lo cual destaca la importancia de optimizar los costos de alimentación para maximizar la rentabilidad del sistema productivo.

Los resultados de la simulación Monte Carlo revelan diferencias claras en las ganancias netas obtenidas para los niveles óptimos, destacando que el NOE presenta mayor ganancia en todas las simulaciones realizadas. Este comportamiento resalta la importancia de optimizar los costos de producción para maximizar los beneficios económicos. Además, la estabilización de las ganancias promedio y de los percentiles 5 y 95 % a partir de las 1,000 iteraciones valida la suficiencia del modelo para obtener estimaciones confiables, lo cual coincide con estudios previos que han demostrado la eficacia del método Monte Carlo en la estimación de variables económicas bajo incertidumbre^(30,31).

Un resultado relevante es la menor desviación estándar observada en el NOE en comparación con el NOT, lo cual sugiere una mayor estabilidad de las ganancias económicas cuando se optimizan los costos. Sin embargo, los percentiles extremos (5 y 95 %) muestran mayor variabilidad en las ganancias asociadas con el NOE, lo que podría implicar un riesgo mayor en condiciones adversas. Este comportamiento es relevante para pequeños productores, quienes podrían enfrentar dificultades mayores en escenarios de incertidumbre económica o fluctuaciones en el precio de los insumos alimenticios en el mercado.

La validación cruzada refuerza la robustez de los resultados obtenidos, al demostrar consistencia con los valores derivados por el método de convergencia. Este hallazgo indica que el modelo empleado es confiable para proyectar escenarios económicos en la producción de guajolote bajo condiciones similares a las de esta investigación. La estabilidad observada en los percentiles centrales para ambos niveles óptimos, es un indicador de que las estimaciones obtenidas no solo son precisas, sino que tienen una alta reproducibilidad en diferentes escenarios simulados.

Conclusiones e implicaciones

El análisis determinista identificó que la rentabilidad económica se maximiza cuando los guajolotes consumen 26.81 kg de alimento y alcanzan un peso vivo de 11.30 kg. La simulación Monte Carlo confirmó la validez de estos resultados bajo escenarios de incertidumbre en los precios de venta y el costo del alimento, estimando una utilidad neta promedio de \$379.29 por ave en el óptimo económico, frente a \$325.39 en el técnico, lo que representa un incremento del 16.56% en la rentabilidad por guajolote. Estos hallazgos confirman que la integración del modelado determinista con simulación estocástica constituye una herramienta metodológica eficaz para la toma de decisiones productivas en condiciones de variabilidad e incertidumbre. Se recomienda validar este enfoque en otros contextos agropecuarios para fortalecer su aplicabilidad práctica.

Agradecimientos

Al Centro Universitario UAEM Temascaltepec por facilitar el uso de la granja de aves de engorda de la posta zootécnica y a los estudiantes de la facultad de Ingeniero Agrónomo Zootecnista por participar en el proyecto.

Conflicto de intereses

Los autores del presente trabajo declaran no tener conflicto de intereses.

Literatura citada:

1. Rodríguez-Licea G, Carrillo-Juárez C, Hernández-Martínez J, Borja BM. Análisis diferencial técnico-económico de los sistemas productivos de guajolotes en el Estado de México. *Ciencia Ergo Sum* 2017;24(1):25-47.
2. Estrada-Mora A, Alcántara-Carbajal JL, Cadena-Iñiguez J, Tarango-Arámbula LA, Segura-León O, Escalante-Pliego P. La crianza del guajolote (*Meleagris gallopavo*) en comunidades indígenas de la región centro de México. *Agroproductividad* 2013;6(6):59-68.
3. Camacho MA, Torres IL, Ramírez CL, López PR, Arcos GL. La avicultura de traspatio en la Costa de Oaxaca, México. *Ciencia y Mar* 2006;IX(28):3-11.
4. Jerez MP, Herrera JG, Vásquez MA. La gallina criolla en los Valles Centrales de Oaxaca. ITAO-CIGA, Oaxaca, México. 1994.
5. Santos-Ricalde R, Segura-Correa, J. La importancia de la cría de pavos (Meleagricultura) en Yucatán. *Bioagrocencias* 2020;13(1):1-8.
6. Pérez RG, Rodríguez GB. Huexolotl: pasado y presente en México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas. 2020.
7. Cantaro H, Sánchez J, Sepúlveda P. Cría y engorde de pavos. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina. 2010.
8. Segura-Correa JC, Santos-Ricalde R, Sarmiento-Franco L. Origen y genética de las razas comerciales del pavo en México. *Bioagrocencias* 2022;15(2):84-90.
9. SIAVI. Sistema de Información Comercial Vía Internet. Importaciones de pavos. México. 2019. <http://siavi.economia.gob.mx/>. Consultado 26 Ago, 2024.
10. Montoya A, Caicedo S, Montoya IA. Análisis de las oportunidades de aumento de consumo de carne de pavo (*Meleagris gallopavo*) en Colombia. *Suma de Negocios* 2015;(6):183-193.
11. Agudelo GD, Cerón MM, Restrepo LL. Modelación de funciones de crecimiento aplicadas a la producción animal. *Rev Colom Cienc Pecu* 2008;21(1):39-58.
12. Rebollar RS, Hernández J, Rojo R, González F, Mejía D, Cardoso J. Óptimos económicos en corderos Pelibuey engordados en corral. *Universidad y Ciencia* 2008;24(1):67-73.
13. Battese GE, Coelli T. A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data, *Empirical Economics* 1995;20:235-332.

14. Rebollar-Rebollar S, Posadas-Domínguez RR, Hernández-Martínez J, Rojo-Rubio R, González-Razo FJ, Guzmán-Soria E. Óptimo técnico y económico en bovinos productores de carne engordados en corral. *Trop Subtrop Agroecosystems* 2011;14(2):413-420.
15. Bautista MY, Espinosa GJA, Herrera HJG, Martínez CFE, Vaquera HH, Estrada DB et al. Óptimos técnicos para la producción de leche y carne en el sistema bovino de doble propósito del trópico mexicano. *Rev Mex Cienc Pecu* 2019;10(4):933-950.
16. Ramos-Canché ME, Magaña-Magaña MÁ, Aguilar-Urquiza E, Pech-Zapata A, Piñero-Vázquez ÁT, Toledo-López VM, et al. Óptimos económicos en la cría del cerdo pelón mexicano: propuesta de integración para cadena productiva. *Ecosistemas Recursos Agropecu* 2020;7(1):1-10.
17. Velázquez-Xochimil HG, Portillo-Vázquez M. Determinación del óptimo técnico y económico en maíz (*Zea mays* L.) modalidad temporal del Estado de México. *Agroproductividad* 2018;11(1):15-20.
18. Dorantes-Coronado EJ, Posadas-Domínguez RR, Rojo-Rubio R, Mendoza-Méndez RV, López-Benítez H. Evaluación financiera en la engorda rural de guajolote blanco doble pechuga. *Invest Cienc Universidad Autónoma de Aguascalientes* 2025;33(94):e4969.
19. Arieta-Román RJ, Graillet-Juárez EM, Alvarado-Gómez LC, Martínez-Martínez M, Gómez-Alor JG. Evaluación de ganancia de peso en dos líneas de pollos (*Gallus gallus domesticus* L.) bajo un manejo en casetas con ambiente natural. *Agroproductividad* 2018;11(6):79-84.
20. INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Consulta de indicadores sociodemográficos y económicos por área geográfica. <https://www.inegi.org.mx/>. Consultado 15 Sep, 2024.
21. Villavicencio-Gutiérrez MR, Martínez-Castañeda FE, Rogers-Montoya NA, Martínez-Campos AR, Gómez-Tenorio G, Velazquez L, et al. Environmental impacts of medium-scale pig farming at technical and economic optimum production weight in Mexico. *Sci Total Environ* 2024;(946):174240.
22. SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción ganadera. https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/. Consultado 26 Nov, 2024.
23. Banco de México. Portal de inflación. <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=inf&idioma=sp>. Consultado 28 Nov, 2024.
24. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Version 4.4.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024.

25. Santos-Ricalde R, Segura-Correa J, Palma-Ávila I, Sandoval-Castro C, Sarmiento-Franco L. Evaluación de dos programas de alimentación sobre el comportamiento productivo y lesiones en patas de pavos comerciales. *Nova Scientia* 2017;9(2):37-50.
26. Makinde OJ, Inuwa M. The use of agro industrial by-products in the diet of grower turkeys. *Trop Subtrop Agroecosystems* 2015;18(3):371-378.
27. Valarezo-Ulloa M, Valarezo-García J, Vacacela-Ajila W, Ortega RR. Evaluación productiva y económica del engorde de pavos de la estirpe Nicholas 700. *Rev Dirección de Investigación* 2017;6(1):91-99.
28. Leroy MR, Meiners RE. *Microeconomía*. Tercera ed., Estado de México, México: Mc Graw Hill; 1990.
29. Rebollar-Rebollar S, Gómez-Tenorio G, Callejas-Juárez N, Guzmán-Soria E, Hernández-Martínez J. Óptimos técnicos y económicos en cortes de carne de cerdo en dos regiones de México. *Agronom Mesoamericana* 2014;25(1):161-168.
30. Tayyab M, Malik AI, Khan I, Ullah M. A simulation-optimization approach for economic assessment of an imperfect serial production management under uncertainty. *J Industrial Prod Engineering* 2024;41(7):618–635.
31. Amorim FR, Guimarães CC, Afonso P, Tobias MSG. Forecasting cost risks of corn and soybean crops through Monte Carlo Simulation. *Appl Sci* 2024;14(17):8030.