

Condiciones Karush-Kuhn-Tucker aplicadas al mercado de la carne de bovino en México

Karush-Kuhn-Tucker Conditions Applied to the Beef Market in México

Samuel Rebollar-Rebollar¹ <https://orcid.org/0000-0002-2906-0571>
Juvencio Hernández-Martínez^{2*} <https://orcid.org/0000-0001-7864-5595>

¹ Universidad Autónoma del Estado de México-Centro Universitario UAEM Temascaltepec, Estado de México.

² Universidad Autónoma del Estado de México-Centro Universitario UAEM Texcoco, Estado de México.

*Autor de correspondencia: jhmartinez1412@gmail.com

Resumen

Objetivo. Se evaluó la distribución del mercado de carne bovina en México en 2020. **Materiales y métodos.** Se utilizó un modelo de programación no lineal bajo condiciones de optimización Karush-Kuhn-Tucker. El territorio nacional se dividió en ocho regiones productoras-consumidoras y en dos puntos de internación de importaciones. **Resultados.** El modelo sobreestimó la producción nacional y regional en 0.4%, equivalente a 10 229 toneladas, cantidad cercana al valor observado en 2020; sobreestimó el consumo nacional y regional en 0.8%, con un valor social neto de 14 073 millones de pesos. La optimización dedujo producción y consumo positivos, margen de comercialización superior al costo de transporte y activó rutas óptimas de distribución. El ajuste entre lo observado y el modelo fue menor a 0.004%. **Conclusión.** Las condiciones Karush-Kuhn-Tucker son una herramienta de programación lineal que permite identificar problemas de optimización que afectan la eficiencia de los mercados.

Abstract

Objective. The distribution of the beef market in Mexico in 2020 was evaluated. **Materials and methods.** A nonlinear programming model was used, under Karush-Kuhn-Tucker optimization conditions. The national territory was divided into eight producer-consumer regions and two entry points for imports. **Results.** The model overestimated national and regional production by 0.4%, equivalent to 10 229 t; an amount close to the value observed in 2020; overestimated national and regional consumption by 0.8%, with a Net Social Value of 14 073 million pesos. The optimization deduced positive production and consumption, a marketing margin higher than the transportation cost, and activated optimal distribution routes. The fit between the observed and the model was less than 0.004%. **Conclusion.** The Karush-Kuhn-Tucker conditions are a linear programming tool that allows identifying optimization problems that affect the efficiency of the markets.

Palabras clave

Distribución óptima, programación no lineal, valor social neto.

Keywords

Optimal distribution, nonlinear programming, social net value.

Introducción

La producción mexicana de bovinos para carne, considerando raza y sistema de producción, se acepta como actividad ganadera importante por su contribución a la oferta nacional disponible de productos cárnicos (ave, bovino y porcino), además de la participación en la balanza comercial del país, empleos que genera y transmisora de precios de las demás especies pecuarias de interés económico, como los porcinos y aves, entre otras (Del Moral y Murillo, 2015; Puebla *et al.*, 2018).

En 2020, México produjo 2.08 millones de toneladas (Mt) de carne bovina en canal, equivalente a 145 026.5 millones de pesos (MDP), en tanto que el valor de las aves y los porcinos, en el mismo año fue de 121.3 y 75.3 MDP (SIAP, 2021); en ese mismo año se exportaron 299.1 mil toneladas (t) de carne bovina y se importaron 165.4 miles de t. De esta manera, México se ubicó como el sexto productor mundial de esta carne, sólo después de Estados Unidos (USA), Brasil, China, Argentina y Australia; y el décimo exportador, actividad a la que destinó poco más de 10% de su producción (COMERCARNE, 2021a).

En México, durante 2020, la distribución espacial de la producción e importaciones de carne bovina vinculadas al consumo fue heterogénea; por un lado, desde el ámbito temporal y por entidad federativa, la producción se llevó a cabo de forma simultánea a lo largo y ancho del territorio. Por otro lado, con base en Bassols (1995), al concentrar el volumen producido (SIAP, 2021) mediante regiones económicas, por ejemplo, sólo por mencionar a la centro-occidente (CO), cuyas entidades son Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco y Michoacán; la centro-este (CE) integrada por Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala, entre otras, se detectó que no todo lo que se produjo, de esa carne en dichas regiones se consumió en esos lugares, por lo que sus excedentes se enviaron a regiones deficitarias (aquéllas en las que la producción fue inferior a su consumo), conformando así su demanda en consumo. Es en este proceso de producción, distribución y consumo donde se va perdiendo eficiencia y, por ende, una reducción en el nivel de bienestar de la sociedad.

Por ejemplo, cifras oficiales mostraron que, en 2020, las regiones CO (20.7%) y norte (NR), cuyas entidades son Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, (20.1%), contribuyeron más a la producción nacional, equivalente a 40.8% (SIAP, 2021); pero no fueron las que más consumieron, por tanto, una fracción de su producción se envió a regiones del país con requerimientos de ese volumen cárnico. De ahí la importancia de utilizar modelización matemática que proporcione elementos que apoyen la propuesta de una distribución óptima de la producción y consumo que mejoren el bienestar social.

Por tanto, el objetivo de esta investigación se centró en evaluar la eficiencia del mercado de la carne bovina en México para el año 2020 en términos de producción, importaciones y consumo, tanto nacional como regional del cárnico utilizando para ello las condiciones de optimización conocidas como Karush-Kuhn-Tucker e incorporarlas sobre el consumo, precios al productor y al consumidor.

La hipótesis supone que con elasticidades precio de la demanda y precio de la oferta regionales inelásticas el modelo maximiza el valor social neto (VSN) y, en consecuencia, con una distribución óptima del mercado del producto superior a la observada, la producción, las importaciones y el consumo son mayores con relación al año de análisis.

Materiales y métodos

En programación no lineal con modelos de equilibrio espacial y precios endógenos, las condiciones de optimización Karush-Kuhn-Tucker (KKT) juegan un papel importante (Satoshi, 2021) y se obtienen a partir de la estimación de la función de optimización (maximización o minimización de la función objetivo) al verificar las igualdades de los precios óptimos (al consumidor y al productor) que asigna la salida del modelo con los precios de mercado estimado de forma manual para ambas variables y son aplicables al mercado de cualquier producto (Rebollar *et al.*, 2019a; Rebollar, 2021), como es el caso de la carne en canal bovina en México.

Las condiciones KKT se definen como exigencias necesarias y suficientes para que la solución de un problema de programación matemática sea óptima (Gass y Harris, 2001; Moon y Gue, 2013); se entienden como una generalización del método de multiplicadores de Lagrange (Andreani *et al.*, 2005; Boyd *et al.*, 2011) y se utilizan como procedimiento para encontrar máximos y mínimos de funciones con múltiples variables sujetas a restricciones, reduciendo un problema restringido con n variables a otro sin restricciones de $n + k$ variables, donde la letra k es igual al número de restricciones y cuyas ecuaciones se solucionan por el método convencional.

Es válido mencionar que el método utilizado en este trabajo no constituye el uso de una herramienta estadística en la que se realiza una predicción, el modelo no es estadístico (Takaya y Judge, 1964) sino de optimización (maximización de una función objetivo), que se trata sobre la aplicación de programación no lineal y en la que la estimación de las ecuaciones de demanda y oferta que auxilian a calcular el nivel de bienestar, precisan de la utilización de elasticidades precio de la demanda y oferta estimadas previamente en otras investigaciones.

Por tanto, con base en Rebollar *et al.* (2019a, 2020a) y Hernández *et al.* (2020), en esta investigación se utilizó la estimación de un modelo de equilibrio espacial, cuyos resultados permitieron, por un lado, proponer un esquema de distribución óptima de la producción y el consumo de carne bovina, de forma regional en México y, por otro, demostrar que mediante condiciones de optimización a través del procedimiento Karush-Kuhn-Tucker, es posible comprobar la validez de dicha optimización. Para ello, la estructura del modelo de programación con precios endógenos requirió de la utilización de ofertas y demandas, funcionalmente, dependientes del precio, conocidas como funciones

inversas de demanda y de oferta. La función inversa de la demanda, en la que el precio fungió como función de la cantidad demandada, para la región i fue:

$$P_{di} = P_{di}(Q_{di}) = \alpha_{di} + \beta_{di} Q_{di} \quad (1)$$

Donde:

$$\beta < 0$$

P_{di} = precio de la demanda de carne bovina en canal en la región i , en pesos por tonelada (\$/t).

Q_{di} = cantidad demandada de carne bovina en canal en la región i , en toneladas (t).

α = intercepto de la función de la demanda de carne bovina en canal para la región i .

β = pendiente de la función de demanda de carne bovina en canal para la región i .

Para la misma región, la función inversa de la ecuación de oferta de carne bovina en canal fue:

$$P_{si} = P_{si}(Q_{si}) = \alpha_{si} + \beta_{si} Q_{si} \quad (2)$$

Donde:

$$\beta > 0$$

P_{si} = precio de la oferta de carne bovina en canal en la región i , en \$/t.

Q_{si} = cantidad ofrecida de carne bovina en canal en la región i , en t.

α = intercepto de la función de oferta de carne bovina en canal en la región i

β = pendiente de la función de la oferta de carne bovina en canal en la región i .

Además, debe cumplirse que:

$$\frac{\partial P_{di}(Q_{di})}{\partial Q_{di}} \leq 0, \text{ para la función inversa de la demanda, y}$$

$$\frac{\partial P_{si}(Q_{si})}{\partial Q_{si}} \geq 0, \text{ para la función inversa de la oferta.}$$

La función de cuasi bienestar social para cada región se definió por el área entre la curva de demanda menos el área bajo la curva de oferta de carne bovina en canal, dada por:

$$W_i(Q_{si}^*, Q_{di}^*) = \int_0^{Q_{di}^*} P_{di}(Q_{di}) dQ_{di} - \int_0^{Q_{si}^*} P_{si}(Q_{si}) dQ_{si} \quad (3)$$

Al añadir los costos de transporte para las n -regiones consideradas en este estudio, la función de cuasi bienestar social fue:

$$NW = \sum_{i=1}^n W_i(Q_{si}^*, Q_{di}^*) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} T_{ij} \quad (4)$$

Donde:

NW = valor social neto.

C_{ij} = costo de transporte de carne bovina de la región i a la región j , en pesos por tonelada (\$/t) de carne bovina transportada.

T_{ij} = cantidad transportada de la región i a la región j , en toneladas de carne de carne bovina.

Otros componentes del modelo tuvieron que ver con las restricciones de demanda y las restricciones de oferta de carne bovina. Las primeras; es decir, las de demanda, necesitaron que el volumen enviado a la región i sea igual o mayor al déficit que se tiene en la demanda de carne bovina de dicha región. Esto es:

$$Q_{di} \leq \sum_{j=1}^n T_{ij}, \text{ para toda } i.$$

Las segundas, esto es, las restricciones de oferta de carne bovina, requirieron que la suma de la cantidad transportada de la carne fuera de la región i deberá ser menor o igual a la producción total de carne en esa región:

$$Q_{si} \geq \sum_{j=1}^n T_{ij}, \text{ para toda } i.$$

Importante hacer mención que tanto la oferta como el consumo se estimaron previamente a fin de identificar los déficits o excedentes regionales, información necesaria para alimentar el modelo de programación.

Aplicación empírica del modelo

Se modeló el mercado nacional de carne bovina en canal, el cual se caracterizó por la existencia de varias regiones que producen, consumen y comercian un bien homogéneo (que es la carne bovina en canal). Cada región se constituyó en un mercado distinto, separado mediante costos de transporte.

Los costos de transporte se establecieron como variable económica directamente relacionada con el volumen comercializado. La producción e importaciones de carne bovina en canal por estado se obtuvieron del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2021), se restó la exportación a la producción sólo de los estados que reportaron y se adicionó la producción de los estados que integraron cada una de las regiones para obtener la producción regional o producción por cada región.

El dato sobre importación de carne bovina se obtuvo del SIAP (2021) según las fracciones arancelarias y puntos de acceso (aduanas), cuya base de datos estuvo disponible en ese momento.

Para determinar el consumo (demanda) por cada región, primero se obtuvo la población de cada estado del Censo de Población y Vivienda 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021); después se multiplicó por el consumo *per cápita* reportado para la zona tanto por el Fideicomisos Instituidos en Relación a la

Agricultura (FIRA), el SIAP y por el INEGI, y se sumó el consumo de cada uno de los estados que integraron cada región.

El precio de carne bovina en canal en cada región se obtuvo a través del dato de cada estado o entidad que integra la región, el cual se ponderó con la producción. El precio de la carne importada (de los puntos de internación) se obtuvo del Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados (SNIIM, 2020).

El modelo de programación, se constituyó de una función objetivo cuadrática (conocida como pseudocuadrática), que expresó la suma de los excedentes del consumidor y excedentes del productor de las regiones consideradas, menos los respectivos costos de transporte, sujetos a un conjunto de restricciones lineales y correspondientes a los equilibrios de oferta y demanda regionales de carne bovina en canal:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \left[\int_0^{Q_{di}^*} P_{di}(Q_{di}) dQ_{di} - \int_0^{Q_{si}^*} P_{si}(Q_{si}) dQ_{si} \right] - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} T_{ij} \quad (5)$$

Sujeto a:

$$Q_{di} - \sum_{j=1}^n T_{ij} \leq 0 \text{ para toda } i$$

$$-Q_{si} + \sum_{j=1}^n T_{ij} \leq 0 \text{ para toda } i, y$$

$Q_{di}, Q_{si}, T_{ij} \geq 0$ para toda i y j (entendidas como condiciones de no negatividad del modelo).

Con base en Bassols (1995), Velázquez *et al.* (2016), Almazán *et al.* (2018) y Rebollar *et al.* (2019b), el modelo propuesto para México incluyó ocho regiones consumidoras: *noroeste* (NO): Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa y Nayarit; *norte* (NR): Chihuahua, Coahuila, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas; *noreste* (NE): Nuevo León y Tamaulipas; *centro-occidente* (CO): Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco y Michoacán; *centro-este* (CE): Ciudad de México, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala; *sur* (SU): Chiapas, Guerrero y Oaxaca; *oriente* (OR): Tabasco y Veracruz; *península de Yucatán* (PE): Campeche, Quintana Roo y Yucatán.

Como regiones productoras se consideraron un total de ocho y fueron NO, NR, NE, CO, CE, SU, OR, PE, más dos puntos de internación de importaciones de carne bovina, procedentes de Estados Unidos (USA). Los puntos de internación 1 y 2 no se consideraron regiones productoras, sino que pasaron a formar parte del volumen consumido en el año de análisis; el punto de internación 1 (PI1) integró las aduanas de Colombia en el estado de Nuevo León, Nuevo Laredo y Reynosa en Tamaulipas y Piedras Negras en el estado de Coahuila. Este primer punto registró el ingreso de 90.1% de la carne importada y, el punto de internación 2 (PI2) que fueron las aduanas de Mexicali y Tijuana en Baja California; Nogales y San Luis Rio Colorado en el estado de Sonora

y Ciudad Juárez en el estado de Chihuahua (COMECARNE, 2021b; SENASICA, 2021). Por este punto ingresó el 9.9% de la importación.

La solución bajo un equilibrio factible requirió que las funciones de demanda fueran de pendiente negativa y las de oferta, pendiente positiva, con base en que la teoría económica establece que existe una relación directa entre la oferta y el precio de un bien considerando todas las demás variables constantes y que, por lo tanto, su pendiente es positiva; asimismo, establece que existe una relación inversa entre la demanda y el precio de un bien, considerando todas las demás variables constantes y que, por lo tanto, su pendiente es negativa, por lo que las condiciones Karush-Kuhn-Tucker se expresaron en estos términos y se relacionaron con las expresiones matemáticas. Así, las condiciones Karush-Kuhn-Tucker (Rebollar, 2021), para este problema de optimización se expresaron así:

$$\frac{\partial Z}{\partial Q_{di}} = P_{di} - \lambda_{di} \leq 0, \left(\frac{\partial Z}{\partial Q_{di}} \right) Q_{di} = 0, Q_{di} \geq 0$$

este conjunto de ecuaciones obliga a que el precio de la demanda de carne bovina de la región i sea igual a su precio sombra (ψ_{di}) si la cantidad demandada de carne bovina (en canal) es positiva, y:

$$\frac{\partial Z}{\partial Q_{si}} = P_{si} - \psi_{si} \leq 0, \left(\frac{\partial Z}{\partial Q_{si}} \right) Q_{si} = 0, Q_{si} \geq 0$$

este conjunto de ecuaciones requiere que el precio de la oferta de carne bovina en la región i sea igual a su precio sombra (ψ_{si}) si la cantidad ofrecida de carne bovina es mayor a cero; además:

$$\frac{\partial Z}{\partial T_{ij}} = C_{ij} + \lambda_{dj} - \psi_{si} \leq 0, \left(\frac{\partial Z}{\partial T_{ij}} \right) T_{ij} = 0, T_{ij} \geq 0$$

Este conjunto de ecuaciones estableció que el precio de demanda (λ_{di}) en la región i sea igual al promedio de los precios de oferta (ψ_{di}) de carne bovina en la región i y las regiones j más los costos de transporte representados por la variable (T_{ij}), en caso de que la cantidad transportada de carne bovina sea mayor que cero.

La solución óptima a este problema indicó el nivel de oferta (Q_{si}) y el consumo (Q_{di}) de cada región, el comercio entre dos regiones diferentes (T_{ij} donde i es diferente de j), así como dentro de la misma región (T_{ij} donde i es igual a j). El precio de cada región se encontró en las variables P_{di} y P_{si} .

La relación que cada región tiene entre los precios de equilibrio será: 1) si la región i absorbe la demanda de su misma región ($T_{ii} = Q_{di} > 0$), entonces, la diferencia entre el precio de demanda y precio de oferta de carne bovina en canal es el costo de transporte ($P_{di} = C_{ii} + P_{si}$) en la misma región, tal como lo señala la condición de optimización; 2) si la región i exporta a la región j ($T_{ij} > 0$) entonces el precio de demanda de la región

j al precio de oferta de la región i más el costo de transporte de la región i ($P_{dj} = C_{ij} + P_{sj}$) y, 3) el precio de demanda de la región j fue igual al precio de oferta de la región j más el costo de transporte en la región j ($P_{dj} = P_{sj} + C_{jj}$).

Si la región j no envía a la región i , entonces el precio de oferta de carne bovina en canal de la región j fue, significativamente, mayor que el precio de demanda de la región i , por lo que el comercio de la región j a la región i , no es deseable o no se activó en la salida del modelo ($P_{di} < C_{ji} + P_{sj}$).

Los dos estimadores de las funciones de demanda y oferta fueron el intercepto (α_i) y la pendiente (β_i). Tales estimadores se calcularon con base en las elasticidades, precios y cantidades producidas y demandadas de carne bovina en canal, con la expresión:

$$\varepsilon_{pi} = \left(\frac{\partial Q_i}{\partial P_i} \right) \left(\frac{P_i}{Q_i} \right) \quad (6)$$

Donde, ε_{pi} es la elasticidad precio de la función de oferta o de la función de demanda de la región i .

Obtención de datos

Para las funciones de oferta regionales de 2020 se utilizó la elasticidad precio propia de la oferta de carne bovina en canal estimada para México, de forma regional y publicada por Puebla *et al.* (2018), y para la demanda regional de carne bovina en canal las estimadas por Rebollar *et al.* (2020b). Para los puntos de internación se consideraron las elasticidades reportadas por Pérez *et al.* (2010) y Vázquez y Martínez (2015). No se estimaron las elasticidades precio de la oferta y de la demanda para el año 2020, dado que ya se habían publicado y sólo se utilizaron tales resultados para generar las respectivas funciones inversas e insertarlas en el modelo de programación.

La información que alimentó al modelo fue de fuentes secundarias, datos mensuales/ anuales de 2020 sobre consumo, producción, importación y precios, tanto al consumidor como al productor de carne bovina; primero por entidad federativa, luego mediante ponderación se obtuvo el dato a nivel regional. Los datos de consumo regional se ponderaron según su participación en el total nacional, con información disponible en el SIAP, ASERCA, SADER, SNIIM, CNOG, Secretaría de Economía, avances de la Producción Pecuaria publicado por el SIAP y de ASERCA, entre otras fuentes.

Los precios al consumidor de carne bovina en canal son los referidos como de consumo, se consideró información disponible sobre precios de mercado existente en diferentes fuentes oficiales, entre ellas el SNIIM (2020). Para los precios al productor de carne bovina en canal se consideró el precio medio rural reportado por el SIAP-SADER, pero ponderado a la carne bovina vendida por el productor y demás fuentes alternas sobre la especie en cuestión, y se tomó en cuenta la principal zona productora de referencia según la región. El precio internacional de la carne bovina, en los puntos de internación 1 y 2, que se consideró para las funciones de oferta del modelo fue de 3 550 USD/t a un tipo

de cambio de 19.9 \$/USD (BANXICO, 2021). Los costos de transporte (\$/t/km) nacional se obtuvieron de empresas de transporte solamente terrestre.

En México, la carne de bovino se transporta por carretera y en frío. En su mayoría se utilizan camiones semirremolque de dos ejes con altura de cuatro metros (m), 2.5 m de ancho y una longitud de 12.2 metros (m), el costo por tonelada (t) por kilómetro (km) recorrido ya integra el retorno de la unidad vacía (Morales y de la Torre, 2006). La carne en canal de bovino es el principal subproducto que se obtiene al sacrificar el ganado en pie, por lo que la oferta disponible es lo que se obtiene del ganado en pie que se produce y que se sacrifica, así como de lo que entra de otras regiones, sea ganado en pie no producido en esa región para sacrificio o carne en canal si fuera el caso.

Sin distorsiones al mercado de la carne de bovino en México en 2020; esto es, bajo condiciones óptimas, el modelo de programación no lineal maximizó la función objetivo. El ajuste del modelo se conoce como modelo base o modelo óptimo y, su estimación, entre lo estimado y lo observado fue de 0.004%, tal porcentaje se haya dentro del rango de estimación aceptado que debe ser entre 0 y 10% (Rebollar *et al.*, 2019a); en consecuencia, el modelo base se considera como válido para realizar cualquier análisis de política comercial pertinente.

Los resultados de la salida del modelo permitieron realizar comparaciones de lo que sucedió en la realidad (con los datos estadísticos oficiales). La solución al modelo y sus escenarios se obtuvo con el solver MINOS, escrito en el lenguaje de programación *General Algebraic Modeling System* (GAMS), versión 24.4.2 para Windows 8, Office 2013 y con base en Rosenthal (2008).

Resultados

El VSN óptimo dado por el modelo fue 14 mil millones de pesos, superior en 0.004% al observado en el año de análisis. Por región, la maximización del VSN sugirió una redistribución de la producción nacional de carne de bovino diferente a la observada (0.49%); en otras palabras, el modelo base sobreestimó a la producción nacional, a las importaciones (6.5%) y al consumo (0.86%). La optimización del modelo adujo que en cuatro regiones productoras de México (NO, NR, NE y CO), el volumen que debió haberse generado fue menor al observado. La región de la península de Yucatán (PE), debido a su ubicación geográfica se consideró como autosuficiente; pese a lo sugerido por el modelo de haber incrementado producción en sólo tres toneladas del cárnico. Con referencia al consumo, el modelo expuso incrementar el volumen en todo el territorio nacional, excepto en la región SU del país con una reducción de casi cinco mil t (cuadro 1).

Producción óptima

Por su parte, la producción es óptima desde el momento en que se cumple la condición matemática en la que el precio de mercado y el precio óptimo al productor (el que da la salida del modelo) de carne bovina sean iguales (cuadro 2). Se observa que, para todas las regiones productoras, si bien los precios fueron diferentes, en lo general se cumple tal condición, excepto que por la utilización de decimales la diferencia aritmética no cerró en cero.

Cuadro 1
Mercado de carne bovina en México, 2020. Modelo base

Región	Observado	Modelo base	Cambio	Cambio %
	Producción (t)			
Noroeste (NO)	317 321	317 267	-54	-0.02
Norte (NR)	419 407	419 092	-315	-0.08
Noreste (NE)	112 736	112 675	-61	-0.05
Centro-occidente (CO)	450 633	450 605	-28	-0.01
Centro-este (CE)	164 486	170 281	5 795	3.52
Sur (SU)	213 255	216 842	3 587	1.68
Oriente (OR)	342 601	343 903	1 302	0.38
Península de Yucatán (PE)	58 923	58 926	3	0.01
Subtotal	2 079 362	2 089 591	10 229	0.49
	Importaciones (t)			
Punto de internación 1	121 630	129 660	8 030	6.60
Punto de internación 2	13 514	14 270	756	5.59
Subtotal	135 144	143 930	8 786	6.50
	Consumo (t)			
Noroeste (NO)	206 923	214 147	7 224	3.49
Norte (NR)	231 367	233 451	2 084	0.90
Noreste (NE)	163 647	167 528	3 881	2.37
Centro-occidente (CO)	376 440	383 903	7 463	1.98
Centro-este (CE)	730 204	732 171	1 967	0.26
Sur (SU)	232 263	227 346	-4 917	-2.11
Oriente (OR)	183 910	183 684	-226	-0.12
Península de Yucatán (PE)	89 752	91 293	1 541	1.71
Subtotal	2 214 506	2 233 523	19 017	0.85
VSN (MMDP)	14 073	14 074	0.6	0.004

Fuente: elaboración propia con resultados del modelo base u óptimo, 2020. VSN: valor social neto.

Dado que en las condiciones de optimización se utilizan los términos precio de mercado y precio óptimo, fue entonces que el precio de mercado al productor de carne bovina se estimó con su respectiva ecuación, en tanto que el precio óptimo ya lo asigna la salida del modelo.

A manera de ejemplo, para la región NO de México, la ecuación del precio endógeno, es decir el precio de mercado: $P_{NO} = -13\,724\,267 + 43.4678 (X_{NO})$, X_{NO} es la producción óptima de la región NO dada por la salida del modelo y fue 317 267 t de carne bovina; así, el precio de mercado calculado fue de 66 631 \$/t (por cuestión de decimales, el precio debió ser 66 629). En tanto que el precio óptimo dado por el modelo base para la misma región fue de 66 629 \$/t, la diferencia en ambos precios es de dos \$/t (cuadro 2).

Cuadro 2
Condiciones de optimización. Oferta de carne bovina

Región	Producción óptima (t)	Precio de mercado al productor (S/t) A	Precio óptimo al productor (\$/t) B	Diferencia (A-B)
NO	317267	66631	66629	2
NR	419092	70953	70952	1
NE	112675	70939	71126	-188
CO	450605	72211	72227	-16
CE	170281	73379	73378	1
SU	216842	72353	72353	0
OR	343903	72079	72079	0
PE	58926	74701	74215	486
PI1	129660	70240	70240	0
PI2	14270	69290	66536	2754

Fuente: estimaciones propias con resultados de la salida del modelo base.

Consumo óptimo

Con referencia a la demanda de carne bovina, la función endógena del precio estimada para la región NO fue $P_{NO} = 257764 - 0.874790 Y_{NO}$; en este caso, en lugar de Y_{NO} (consumo óptimo Y_d) se coloca el valor dado por el modelo que fue de 214 147 t y, al sustituirlo en la ecuación del precio endógeno, el resultado fue $P_{NO} = 257764 - 0.874790 (214147) = \70431 \$/t (cuadro 3).

Cuadro 3
Condiciones Karush-Kuhn-Tucker para demanda de carne bovina en México, 2020

Región	Consumo óptimo (t)	Precio de mercado al consumidor (\$/t) A	Precio óptimo al consumidor (\$/t) B	Diferencia (A-B)
NO	214147	70431	70430	1
NR	233451	72423	72420	3
NE	167528	71702	71700	2
CO	383903	76900	73020	3880
CE	732171	74003	74000	3
SU	227346	74233	74230	3
OR	183684	73082	73080	2
PE	91293	74865	74870	-5

Fuente: cálculos propios, con base en resultados del modelo base.

Flujos comerciales óptimos

Con respecto a los flujos comerciales óptimos, éstas se identifican con las rutas de abasto y distribución de carne bovina (cuadro 4); para el caso específico, en la ruta dada por $X_{4,5}$ (esto es, de la región CO a la región CE de México), se puede observar la activación debido a que el precio óptimo al consumidor de la CE ($\bar{\sigma}_d$) fue mayor al precio óptimo al productor ($\bar{\sigma}_s$) de la región CO y el costo de transporte por tonelada comercializada de la CO a la CE fue inferior al margen obtenido. Otras rutas de comercialización de carne bovina entre regiones no se visualizan, debido a que el margen de comercialización fue menor que el costo de transporte por tonelada de carne.

Cuadro 4

Carne de bovino. Rutas de comercialización por región, 2020, activadas por el modelo

Ruta activada (Xsd)	Margen (\$/t)	Costo de transporte (\$/t)	Diferencia
$X_{1,1}$ (NO a NO)	3 811	3 801	10
$X_{2,2}$ (NR a NR)	1 476	1 471	5
$X_{2,5}$ (NR a CE)	3 059	3 050	9
$X_{3,5}$ (NE a CE)	3 060	2 877	183
$X_{4,4}$ (CO a CO)	793	793	0
$X_{4,5}$ (CO a CE)	1 808	1 775	33
X_{66} (SU a SU)	1 888	1 880	8
X_{65} (OR a CE)	1 923	1 923	0
X_{76} (OR a SU)	2 154	2 154	0
X_{77} (OR a OR)	1 005	1 004	1
X_{88} (PE a PE)	655	650	5
$XP_{11, 3}$ (P_{11} a NE)	1 464	1 463	1
$XP_{11, 5}$ (P_{11} a CE)	4 095	4 095	0
P_{12} , NO (PI_2 a NO)	4 323	4 321	2
P_{12} , NR (P_{12} a NR)	5 887	5 887	0

Fuente: cálculos propios, con base en resultados del modelo base, 2020.

Discusión

La producción óptima ocurre cuando se cumple la igualdad entre el precio de mercado y el precio óptimo, por existir una mínima diferencia indica el cumplimiento de la condición necesaria y suficiente para que se obtengan precios y consumos óptimos positivos (Rebollar *et al.*, 2019a). El cálculo fue similar para el resto de las regiones. En este caso, 6.1% del consumo nacional de carne de bovino tendría como origen el mercado internacional (PI_1 y PI_2) y la región CO como principal productora debería producir 21.7% del total nacional (cuadro 2).

Por su parte, el consumo óptimo se da cuando el valor estimado es lo que se considera como precio de mercado al consumidor y es similar al precio óptimo al consumidor. En el caso de la región NO se tuvo un precio óptimo ($\overline{\sigma}_d$) al consumidor de 70 430 \$/t, cuya diferencia con el precio de mercado al consumidor fue mínima, aproximándose a cero, por lo que se cumple con la condición matemática de consumos óptimos positivos (cuadro 3). La región CE de México consumió 32.8% y la NE solamente 4.1% del volumen total nacional, según estimaciones realizadas con base en el consumo *per cápita* reportado por COMECARNE (2021a). El consumo se relaciona directamente con el número de consumidores, más que del precio.

Con relación a los flujos comerciales óptimos (cuadro 4), podemos observar que el margen de comercialización entre regiones que comercializaron carne bovina en México en 2020 fue igual o mayor que cero, lo cual convergió con Rebollar *et al.* (2019b) en carne de cerdo en México, y Rebollar (2021) para el mercado de la carne de pollo también para México (cuadro 4). Con el análisis comparativo de los trabajos antes mencionados se comprobó dicha convergencia, que indica la existencia de la condición necesaria y también suficiente en la activación de rutas óptimas de comercialización y distribución de carne bovina, afirmación que contribuye a la condición de optimización de Karush-Kuhn-Tucker derivada del modelo Lagrangeano.

Conclusiones

Por un lado, los resultados del modelo estimado permitieron generar una alternativa a la distribución del cárnico regional en México. Por otro lado, el modelo optimizó la producción, importaciones y consumo de carne bovina en México en 2020. Los precios óptimos y de mercado, tanto al consumidor como al productor, así como el diferencial entre el margen de comercialización y el costo de transporte fueron la base para activar rutas de distribución de carne entre las diferentes regiones del país; situación que se consideró necesaria y suficiente para la demostración de las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker obtenidas del modelo Lagrangeano. Las restricciones del problema, así como el criterio de optimalidad (multiplicadores de Lagrange) quedaron satisfechos, en consecuencia, los resultados del modelo son válidos para aplicar escenarios de política comercial sobre los que se centre el interés de la política gubernamental.

Literatura citada

- Almazán, F.O.; Rebollar, R.S.; Velázquez, V.H.H.; Gómez, T.G. y Hernández, M.J. (2018). Efectos de depreciación del peso mexicano sobre el mercado de la carne de cerdo. *Agronomía Mesoamericana*. 29(3): 557-569.
- Andreani, R.; Martínez, J. y Schuverdt, M. (2005). Technical note: on the relation between constant positive linear dependence condition and quasnormality constraint qualification. *Journal of Optimization Theory and Applications*. 125(2): 473-485.
- Bassols, B. A. (1995). El Desarrollo Regional de México: teoría y práctica. Libros de la Revista Problemas del Desarrollo. Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM, México. Pp. 43-75.
- BANXICO. Banco de México. (2021). Tipo de cambio. <https://www.banxico.org.mx/tipCamb/tipCamI-HAction.do> (Consultada el día 8 de septiembre de 2021).

- Boyd, S.; Parikh, N.; Chu, E.; Peleato B. y Eckstein, B. (2011). Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers. *Foundations and Trends in Machine Learning*. 3(1): 1-122.
- COMECARNE. Consejo Mexicano de la Carne. (2021a). Compendio estadístico. https://comecarne.org/wp-content/uploads/2021/05/Compendio_Estad%C3%ADstico_2021_VF.pdf. (Consultada el día 10 de agosto de 2021).
- COMECARNE. Consejo Mexicano de la Carne. (2021b). Principales puntos de entrada para importaciones agropecuarias de los EE.UU. a México. https://comecarne.org/wp-content/uploads/2018/05/160901_Tijuana-Septiembre-1-FAS-and-FSIS-combined-Final.pdf (Consultada 8 de septiembre 2021).
- Gass, I. y Harris, M. (2001). KKT Conditions. En: S. I. Gass & C. M. Harris (Eds). *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. NY. US.
- Hernández, P.; Rebollar, S.; Gómez, G. y Velázquez, H.H. (2020). Efectos de una cuota compensatoria *ad valorem* sobre importaciones de carne de pollo en México. *Acta Agrícola y Pecuaria*. 6(1): 1-12.
- INEGI. Instituto Nacional Estadística Geografía e Informática (2021). Censo de Población y Vivienda 2020. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Resultados_generales (Consultada 8 septiembre 2021).
- Moral del, L.E. y Murillo, B. (2015). Dinámica del mercado de la carne bovina en México: un análisis de competitividad. *Paradigma Económico*. 77(1): 107-125.
- Morales P.; C. G. y de la Torre M. M. E. (2006). Características del autotransporte refrigerado en México. *Publicación Técnico 297*, Instituto Mexicano del Transporte-Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt297.pdf> (Consultada 14 septiembre 2021).
- Moon, K. y Gue, L. (2013). On efficient applications of G. Karush Kuhn-Tucker necessary optimality theorems to objective programming problems. *Journal of Global Optimization*. 55(1): 5-11.
- Pérez, F.C.; García, R.; Martínez, M.A.; Mora, J. S.; Vaquera, H. y González, A. (2010). Efecto de las importaciones de la carne de porcino en el mercado mexicano, 1961-2007. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 1(2): 115-126.
- Puebla, S.; Rebollar, S.; Gómez, G.; Hernández, J. y Guzmán, E. (2018). Factores determinantes de la oferta regional de carne bovina en México, 1994-2013. *Región y Sociedad*. 30(72): 1-17.
- Rosenthal, E.R. (2008). *GAMS. A User's Guide*. GAMS Development Corporation. Washington, D. C., USA. 281 p.
- Rebollar, R.S.; Martínez, D.M.Á.; Callejas, J.N. y Velázquez, V.H.H. (2019a). Eficiencia en el mercado de carne de cerdo en México. *Ciencia Ergo Sum*. 26(3): 1-13.
- Rebollar, R.S.; Chiatchoua, C. y Gómez, T. G. (2019b). Efectos de la aplicación de un impuesto en México: caso carne de cerdo. *Análisis Económico*. 34(86): 245-261.
- Rebollar, R.S.; Velázquez, V.H.H.; Gómez, T.G.; Posadas, D.R.R. y Martínez, C.F.E. (2020a). Efectos de la aplicación de subsidios al mercado porcino en México. *Archivos de Zootecnia*. 69(265): 30-37.
- Rebollar, S.; Rebollar, E.; Guzmán, E. y Hernández, J. (2020b). Determinantes de la demanda de carne bovina en México, 1996-2017: un análisis por regiones. *Debate Económico*. 9(1): 65-84.
- Rebollar, R.S. (2021). Distribución de la carne de pollo en México: una aplicación de las condiciones Karush-Kuhn-Tucker. *Investigación y Ciencia*. 43(12): 231-239.
- Satoshi, S. (2021). Karush-Kuhn-Tucker type optimality condition for quasiconvex programming in terms of Greenberg-Pierskalla subdifferential. *Journal of Global Optimization*. 79: 191-202.
- SENASICA. Servicio Nacional de Sanidad e Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2021). Inspección de cárnico en fronteras. https://comecarne.org/wp-content/uploads/2021/06/SENASICA_.pdf (Consultada 8 septiembre 2021).
- SNIIM. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. (2020). Mercados del exterior. <http://www.economia-sniim.gob.mx/nuevo/Home.aspx?opcion=../SNIIM-MercadosExterior/fruhort/me.htm> (Consultada 2 junio 2021).
- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2021). Anuario Estadístico de la Producción Ganadera. https://nube.siap.gob.mx/cierre_pecuario/ (Consultada 2 junio 2021).

- Takayama, T., y G. G. Judge. (1964). Partial equilibrium and quadratic programming. *Journal of Farm Economics*. 64: 67-93.
- Vázquez, A.J.M.P. y Martínez, D.M. A. (2015). Estimación empírica de elasticidades de oferta y demanda. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6(5): 955-965.
- Velázquez, V.H.H.; Gómez, T.G.; Rebollar, R.S. y Martínez, C.F.E. (2016). Efectos regionales y nacionales sobre la producción y consumo de carne de cerdo con la aplicación de aranceles a carne importada. XVI Congreso Nacional de Investigación Socioeconómica y Ambiental de la Producción Pecuaria. Universidad Autónoma Chapingo, 26-28 de octubre de 2016.

Recepción: 4 de enero de 2023

Aceptado: 24 de abril de 2023