

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA PLANEACIÓN DE OPERACIONES EN
UNA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS CÁRNICOS**

KELLY JOHANNA ISAZA PIEDRAHITA

Directora

GLORIA PATRICIA JARAMILLO ÁLVAREZ, PhD



MEDELLÍN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE MINAS

2016

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE LA PLANEACIÓN DE OPERACIONES EN
UNA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS CÁRNICOS**

KELLY JOHANNA ISAZA PIEDRAHITA

Trabajo final de maestría

Presentada como requisito para optar el título de Magíster en Ingeniería –
Ingeniería de Sistemas

Directora

GLORIA PATRICIA JARAMILLO ÁLVAREZ, PhD



MEDELLÍN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE MINAS

2016

A Dios por hacer que su sueño sea mi sueño y muy pronto una realidad.

A mi novio Juan Esteban por su amor y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por regalarme la vida y la sabiduría para afrontar todos los retos de mi vida.

A mi novio y amigo, Juan Esteban Calle por ser mi guía, mi inspiración y mi soporte, por darme las fuerzas cuando más las necesitaba y enseñarme a disfrutar el camino y dar lo máximo en el presente.

A mi Directora Patricia Jaramillo, por todo el acompañamiento, soporte y sus valiosas ideas que permitieron el desarrollo de este trabajo.

A mis padres Nancy Piedrahita, Ivan Isaza, hermana Paula Isaza y abuela Leonila Morales, que siempre me han brindado mucho amor y compañía en todos los momentos de mi vida.

A mi Empresa y Jefe Alejandro Sánchez, por la flexibilidad en brindarme los espacios para estudiar, por el apoyo económico y conceptual en el desarrollo de este trabajo.

Y a todas aquellas personas que contribuyeron con la realización de este trabajo muchas gracias.

RESUMEN

Las cadenas de suministro de alimentos cárnicos son redes globales y complejas que van desde la producción agropecuaria donde se integran los procesos de cría y levante, tanto de ganado como de animales de corral, pasando por diferentes procesos de transformación en plantas de beneficio, deshuese y plantas de producción de producto terminado donde convierten la materia prima cárnica en un producto final listo para distribuir y satisfacer las necesidades de un cliente. El carácter perecedero de las materias primas cárnicas y los productos terminados es la característica más importante que la hace diferente de las demás cadenas de suministro.

Con este trabajo se presenta un modelo integrado que apoya la toma de decisiones de la planeación operativa en una cadena de suministro de alimentos cárnicos sugiriendo el qué, cuándo, cómo y dónde comprar, producir y almacenar de manera rentable bajo las restricciones operativas de flujo, capacidades y vencimientos. El alcance del modelo objeto de estudio va desde el deshuese de canales hasta la producción y el almacenamiento del producto terminado, implementado en un software de optimización AIMMS como un problema de programación lineal entera mixta y solucionado con el solver Gurobi 6.0. El análisis de los resultados del modelo permite al lector la verificación del modelo, bajo la claridad que son resultados de datos modificados de un problema real.

El siguiente trabajo presenta, en una primera parte, la introducción al problema objeto de estudio, su justificación y objetivos; en una segunda parte, la caracterización de la cadena de suministro de cárnicos en Colombia, pasando a una tercera parte donde se presenta el marco teórico que resume todos los conceptos relacionados con el problema; finalizando con el modelo matemático y el análisis de los resultados.

Dentro de los principales logros del trabajo propuesto se encuentra la modelación de la vida útil de las materias primas cárnicas y sus diferentes estados de consumos.

PALABRAS CLAVES: Cadena de suministro, planeación, materia prima cárnica, productos perecederos, vida útil.

SUMMARY

Meat foods supply chains are global and complex networks. The chain goes from the agricultural production, process that includes the breeding and raising of farm animals. Afterwards animals goes through transformation in processing, boning up and production plants, where the finished product leaves ready to be distributed and meet the needs of a customer. The perishability of meat raw materials and finished products is the most important feature that makes it different from other supply chains.

In this work is presented an integrated model that supports decision making for operational planning in a meat food supply chain. Decisions supported by the model includes: what, when, how and where to buy, produce and store profitably under the operational flow constraints, capabilities and expiration. The scope of the model under study ranges from boning channels to production and storage of the finished product. The model was implemented AIMMS, a leading optimization platform, it is a mixed integer linear programming which is solved using Gurobi 6.0. The analysis of the model results allows the reader model verification under the clarity that results are a real problem modified data.

This work is organized as follows: in the first part, the introduction to the problem under study is presented, its justification and objectives; in the second part, the characterization of the meat supply chain in Colombia; in the third part, the theoretical framework that summarizes all the concepts related to the problem is presented; last part, the mathematical model and analysis of the results are presented

Among the main achievements of the proposed work is the modeling of the shelf life of the meat raw materials and their different stages of consumption.

KEYWORDS: Supply Chain, planning, meat raw material, perishables, shelf life.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Planteamiento del Problema	10
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo general.....	13
1.3.2 Objetivos específicos.....	13
1.4 Contenido	13
2. CARACTERIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO DE CÁRNICOS EN COLOMBIA	14
3. MARCO TEÓRICO	18
3.1 Contextualización cadenas de suministro	18
3.2 Planeación en cadenas de suministro	18
3.3 Modelación de cadenas de suministro	19
3.4 Cadenas de suministro de carácter perecedero	21
4. MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANEACIÓN DE OPERACIONES EN UNA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS CÁRNICOS. ..	23
4.1 Introducción al Modelo	23
4.1.1 Consideración de la Vida útil.....	26
4.1.2 Descripción de los Elementos del Modelo.....	26
4.2 Modelo de Programación matemática POCSAC	27
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	45
6. CONCLUSIONES	56
7. TRABAJO FUTURO	57
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cadena productiva cárnica en Colombia.....	14
Tabla 2. Beneficio porcino nacional y por departamentos (Cabezas).....	16
Tabla 3. Conceptos claves modelo POCSAC..	24
Tabla 4. Índices Modelo POCSAC.....	27
Tabla 5. Conjuntos leídos Modelo POCSAC.....	28
Tabla 6. Conjuntos indexados Modelo POCSAC..	28
Tabla 7. Conjuntos calculados Modelo POCSAC.....	29
Tabla 8. Parámetros leídos Modelo POCSAC.....	30
Tabla 9. Variables Modelo POCSAC..	31
Tabla 10. Restricciones Modelo POCSAC.....	43
Tabla 11. Función objetivo Modelo POCSAC.....	45
Tabla 12. Características modelo POCSAC simplificado..	45
Tabla 13. Resultados materia prima cárnica Modelo POCSAC Simplificado.....	49
Tabla 14. Resultados materia prima cárnica industrial1 Modelo POCSAC simplificado. ..	50
Tabla 15. Resultados financieros Modelo POCSAC Simplificado.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cadena de suministro de alimentos cárnicos.	11
Figura 2. Eslabón de carnes frías y embutidas en Colombia.....	15
Figura 3. Beneficio porcino acumulado enero-enero a 2016.	15
Figura 4. Beneficio Bovino en Colombia..	16
Figura 5. Inventario Bovino en Colombia..	17
Figura 6. Cadena de suministro Negocio Cárnico Nutresa.....	17
Figura 7. Modelación de procesos en una cadena de suministro.....	21
Figura 8. Diagrama de flujo de una cadena de suministro de alimentos cárnicos.	25
Figura 9. Formas de consumo de materia prima cárnica.	25
Figura 10. Resultados de canales Modelo POCSAC simplificado.....	46
Figura 11. Resultados relación canales alternativas y Canales procesados Modelo POCSAC simplificado.....	47
Figura 12. Resultados Cantidad canales a deshuesar por alternativa de corte Modelo POCSAC Simplificado..	47
Figura 13. Resultados tiempo procesamiento canales Modelo POCSAC simplificado.	48
Figura 14. Resultados ocupación de almacenamiento canales.....	48
Figura 15. Resultados almacenamiento de materia prima cárnica refrigerada y congelada..	52
Figura 16. Resultados tiempo de congelación y descongelación Modelo POCSAC Simplificado.	52
Figura 17. Resultados producto terminado Modelo PCSAC Simplificado.....	53
Figura 18. Resultados tiempos de producción por recurso Modelo POCSAC Simplificado..	53
Figura 19. Resultados compras de materia prima no cárnica Modelo POCSAC Simplificado..	54

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

Para entender el problema de optimización de la planeación de operaciones en una cadena de suministro de alimentos cárnicos, vale la pena recordar cómo se define la gestión de una cadena de suministro y las características que diferencian una cadena de suministro de alimentos cárnicos de otras cadenas.

La gestión de una cadena de suministro abarca todo el conjunto de actividades que tienen como objetivo el control del flujo del material, información y dinero entre los proveedores de materias primas, centros de producción, distribución, minoristas y clientes finales para lograr la mejor combinación de capacidad de respuesta y eficiencia para el mercado (Papageorgiou, 2009) y (Muñoz, Capón-García, Laínez-Aguirre, Espuña, & Puigjaner, 2014).

Hoy en día, las cadenas de suministro de alimentos cárnicos son redes globales y complejas que van desde granjas a los consumidores finales, involucrando una serie de actividades de transformación en el abastecimiento, producción y distribución. La diferencia fundamental entre las cadenas de suministro de alimentos y otras cadenas, es el cambio continuo y significativo en la calidad de los productos alimenticios a lo largo de toda la red hasta los puntos de consumo final (Yu & Nagurney, 2013) y el sistema de frío requerido en sus procesos, como es el caso en los alimentos cárnicos, lácteos, entre otros.

Adicional al alto carácter perecedero en cadenas de alimentos, el entorno competitivo actual hace cada vez más necesario el incrementar la eficiencia en las operaciones, y en este proceso la búsqueda de métodos de optimización para la gestión de la cadena de suministro se hace imprescindible (Sanchez, 2008).

Tradicionalmente el proceso de planeación en la cadena de suministro se encuentra dividido en tres niveles: estratégico (largo plazo), táctico (mediano plazo) y operativo (corto plazo). Este trabajo se enfoca en el nivel de planeación operativo donde se busca dar respuesta a los siguientes interrogantes: ¿qué, cuánto y cuándo comprar, producir, almacenar y distribuir? a un nivel de detalle diario (Shah & Ierapetritou, 2012).

La cadena de suministro de alimentos cárnicos se compone por los siguientes eslabones: granjas, donde se crían los cerdos y reses; planta de beneficio, donde se sacrifican cerdos y reses para convertirlos en canales; planta de deshuese, donde los canales son despiezados generando los cortes de materia prima cárnica requeridos para el proceso de producción en las plantas de transformación, de la cual salen productos terminados para ser almacenados y distribuidos desde los centros de distribución a los diferentes clientes.

A continuación, se ilustran los eslabones de una cadena de suministro de alimentos cárnicos descritos anteriormente:

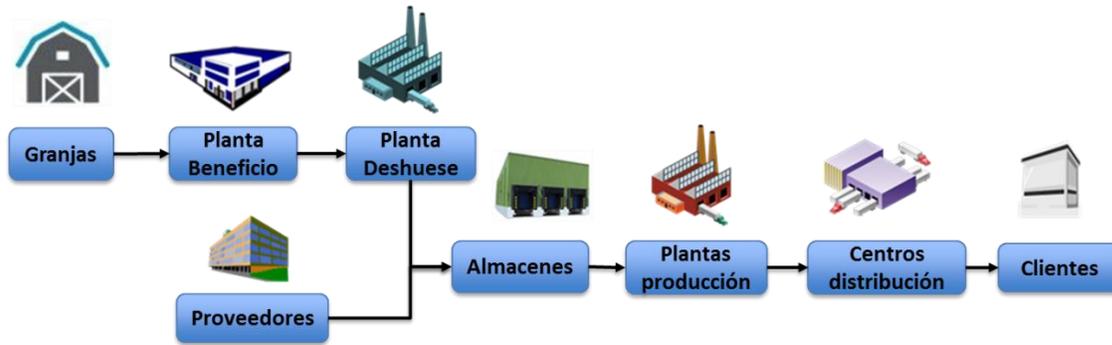


Figura 1. Cadena de suministro de alimentos cárnicos (Elaboración propia).

Existen diferentes formas de abastecer a las plantas de transformación de materia prima cárnica; una de ellas es el abastecimiento desde la planta de deshuese y la otra es el abastecimiento directo de cortes de materia prima cárnica que llegan de un proveedor externo a los almacenes de las plantas de transformación. Dependiendo del tipo de materia prima, esta se debe almacenar a una temperatura específica; la materia prima cárnica se debe refrigerar o congelar, y la materia prima no cárnica (condimentos, material de empaque, etc) se debe almacenar a temperatura ambiente. Cuando una materia prima cárnica se utiliza en el proceso productivo en estado de refrigeración y proviene de un abastecimiento en estado de congelación, este debe pasar por un proceso de descongelación previamente. Cabe detallar que la materia prima cárnica en estado de congelación pudo haber llegado en este estado directo del proveedor o por garantizar su calidad, se debió congelar la materia prima cárnica refrigerada. El costo del abastecimiento de materia prima cárnica representa más del 50% del costo de un producto terminado, lo que lleva a tener una especial atención en este proceso en el problema de optimización.

El proceso productivo en las plantas de transformación cuenta con tres niveles: tanda, producto en proceso y producto terminado. En la tanda se hace la mezcla del material cárnico y condimentos, pasa a ser producto en proceso cuando se embute la tanda en barras, luego las barras se someten a un proceso térmico. En la etapa final, las barras son tajadas o separadas para ser empacadas y convertirse en producto terminado. En cada uno de los procesos se asocian diferentes recursos (máquina y mano de obra) y cada producto tiene diferentes rutas de fabricación y listas de materiales.

Los productos terminados son trasladados a los centros de distribución, en los cuales se realizan las operaciones de recepción, almacenamiento, despacho y transporte para la entrega final a clientes.

Para poder controlar el flujo anteriormente descrito, gestionar los recursos escasos en el corto plazo, garantizar la calidad de productos perecederos y maximizar la rentabilidad, se propone desarrollar un modelo de optimización de la planeación de operaciones en una cadena de suministro de alimentos cárnicos comprendida desde el abastecimiento de materias primas cárnicas y no cárnicas (planta de deshuese y proveedores) hasta los centros de distribución.

El problema abordado por el presente trabajo se denomina el problema de planeación operativa en una cadena de suministro de productos cárnicos, el cual formalmente se enuncia como sigue: **dado un pronóstico de la demanda para un conjunto de productos**

terminados agregado en un centro de distribución a detalle día, unas restricciones de capacidad de almacenamiento de producto terminado en el centro de distribución, un tiempo máximo de trabajo por día en los recursos productivos de la planta de transformación, una capacidad máxima de almacenamiento en los almacenes de materia prima cárnica y no cárnica, una capacidad máxima en los recursos de congelación y descongelación de materias primas cárnicas, un tiempo máximo de trabajo por día en los recursos de la planta de deshuese, una capacidad máxima de abastecimiento de los diferentes canales y una vida útil definida para las materias primas cárnicas, se deben determinar las cantidades y el periodo en el cual se debe abastecer, producir y almacenar el material (materias primas y producto terminado) que fluye por la cadena, además determinar la cantidad de recursos (mano de obra y almacenamiento) que se deben tener en cada periodo, identificando cuellos de botella, incrementos en la capacidad o desmonte, de tal forma que se maximice la rentabilidad como resultado de la diferencia de la valorización de la demanda y los costos de la operación asociados al abastecimiento, producción, almacenamiento e inventarios.

1.2 Justificación

La agilidad es la característica fundamental de una cadena de suministro necesaria para la supervivencia en los mercados turbulentos, volátiles y de libre comercio, fuerzas ambientales y productos con ciclos de vida cada vez más cortos. Agilidad, interpretada también como velocidad y flexibilidad, apoya a la prestación del bien o servicio en el momento, lugar y en la cantidad adecuada para el consumidor, como objetivo principal de cualquier cadena de suministro (Agarwal, Shankar, & Tiwari, 2007). Es por esto que se necesita desarrollar la capacidad de ser más ágiles en las operaciones a lo largo de la cadena. Una de las formas de gestionar esa flexibilidad y velocidad es mediante el desarrollo de un modelo matemático que pueda capturar las principales variables y restricciones operativas y permita planear la consecución de los recursos en el corto plazo, para así maximizar su utilización y rendimiento.

Sincronizar la oferta y la demanda en una cadena de suministro de productos perecederos es una tarea compleja, ya que la restricción de vida útil de materia prima y productos hace que la administración de inventarios sea más exigente que en una cadena de suministro convencional. Si se tiene mucho inventario, se corre el riesgo de que el producto pierda calidad y hasta se pueda vencer; mientras que si se tiene poco inventario, se corre el riesgo de interrumpir el proceso productivo y de no satisfacer la demanda. Un modelo matemático que gestione dicha complejidad permitiría reducir las pérdidas generadas por el vencimiento de productos y el incumplimiento de la demanda.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Formular un modelo matemático de optimización e implementar una metodología de solución basada en técnicas exactas al problema de planeación operativa en una cadena de suministro de alimentos cárnicos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir detalladamente el flujo de cada material dentro de la cadena de suministro.
- Caracterizar la cadena de suministro cárnica en Colombia.
- Formular un modelo de optimización matemática que represente el problema.
- Implementar el modelo matemático elaborado en el software de optimización AIMMS.

1.4 Contenido

En el capítulo 2 se presenta la caracterización de cadenas de suministro cárnica en Colombia, revisando brevemente algunos de los eslabones de la cadena, identificando su tamaño y crecimiento en Colombia. El capítulo 3 revisa las bases teóricas necesarias para entender el modelo propuesto objeto de este trabajo. En el capítulo 4 se presenta el modelo matemático propuesto para resolver el problema de planeación operativa en una cadena de suministro de alimentos cárnicos con un alcance establecido desde la planta de deshuese hasta el almacenamiento de productos terminados. Los capítulos 5 y 6 presentan los resultados computacionales y las conclusiones del modelo respectivamente, y el capítulo 7 algunas ideas para trabajo futuro.

2. CARACTERIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO DE CÁRNICOS EN COLOMBIA

La estructura productiva de la cadena de suministro de cárnicos en Colombia inicia con la cría y engorde del ganado vacuno, ganado porcino, aves de corral y especies menores (ganado ovino, caprino y conejos); continúa con el transporte, sacrificio, corte, congelación y comercialización de éstos para la producción de carnes, donde a la vez se generan subproductos que termina con la elaboración de productos como carnes frías y embutidas.

En la tabla 1 se puede observar el valor de producción de fábrica de cada eslabón perteneciente a la cadena productiva cárnica en Colombia, donde el eslabón de Carnes frías y embutidas representa en el 2013 el 27% del valor total de la cadena cárnica como lo muestra la Figura 2.

Principales variables cadena Cárnicos (2007-2013)							
Nombre eslabón	Valor producción de fábrica (Miles de pesos)						
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Carne de otras aves de corral	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Carne ganado porcino	99,803,436	112,923,083	132,576,981	230,684,119	271,190,954	363,248,086	410,604,696
Carne ganado vacuno	351,966,120	640,219,097	651,295,698	329,309,619	406,581,407	431,680,335	478,742,159
Carne y vísceras de especies menores	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Carnes arregladas	28,729,394	37,785,668	44,275,294	81,398,547	73,421,647	254,241,697	272,491,256
Carnes frías y embutidas	992,467,324	1,256,607,505	1,404,735,970	1,523,272,393	1,869,627,894	1,841,333,784	1,832,483,294
Carnes y vísceras de pollo y gallina	1,871,860,298	2,485,912,954	2,661,781,406	2,842,390,896	3,221,763,190	3,307,676,733	3,647,898,259
Ganado especies menores	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Ganado porcino	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Ganado vacuno	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Grasas y sebos	78,923,236	92,087,236	132,522,750	156,695,345	163,041,692	169,259,933	178,425,826
Huevos	n.d	n.d	n.d	3,746,530	5,048,697	4,885,960	867,773
Otras aves de corral	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Pollos y gallinas	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
Subproductos cárnicos	5,759,479	10,149,561	11,437,020	13,731,014	12,181,529	9,126,096	9,102,641
Visceras de bovinos y porcinos	18,292,090	28,988,402	41,668,137	28,827,844	30,076,150	27,432,518	28,608,014
Total Cadena	3,447,801,377	4,664,673,506	5,080,293,256	5,210,056,307	6,052,933,160	6,408,885,142	6,859,223,918

Tabla 1. Cadena productiva cárnica en Colombia. Fuente (DNP, 2014)

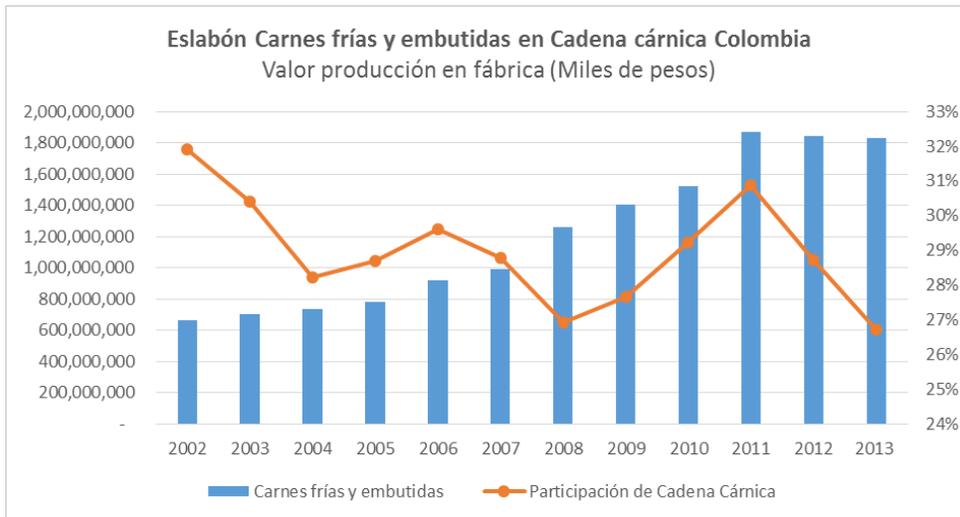


Figura 2. Eslabón de carnes frías y embutidas en Colombia. Fuente (DNP, 2014).

La cadena productiva se inicia con la producción agropecuaria donde se integran los procesos de cría y levante tanto de ganado como de aves de corral y otros, diferenciando por sus especificaciones los animales destinados a la actividad dedicada al engorde (cuyo propósito es el beneficio para obtener carne) y los animales destinados a otras actividades, por ejemplo, el ganado dedicado a producción de leche o los pollos dedicados a la producción de huevos.

En cuanto a los animales que son destinados al beneficio para obtener carne, de acuerdo con las últimas cifras presentadas por el Sistema Nacional de Recaudo de la Asociación Colombiana de Porcicultores – FNP, el beneficio del mes de enero de 2016 fue de 286.248 cabezas (cb), cifra que representa un crecimiento de 8.5% frente a enero del año anterior, el cual mostró un beneficio de 263,774 cb como se muestra en la Figura 3.

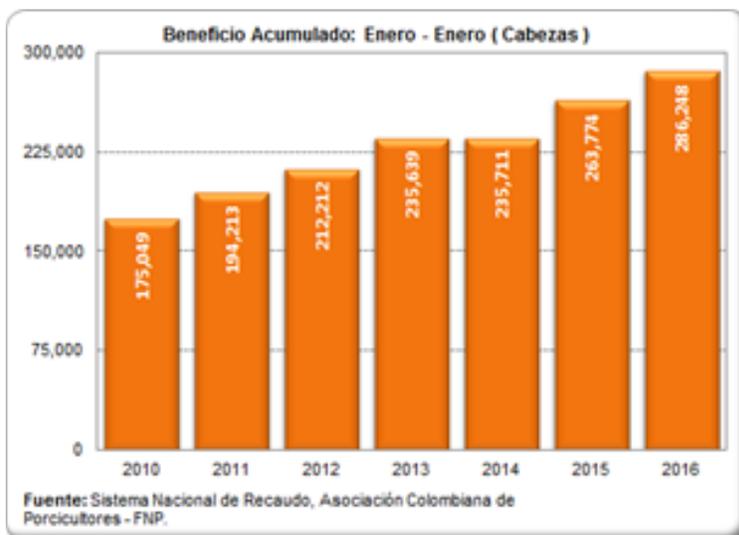


Figura 3. Beneficio porcino acumulado enero-enero a 2016. Fuente (FNP,2016)

Adicionalmente, al revisar la participación de los diferentes departamentos dentro del consolidado nacional, se observa que el mayor aporte del beneficio se encuentra concentrado en Antioquia, Bogotá y Valle del Cauca, con participaciones del 47.7%, 20.6% y 15.3% respectivamente, como se muestra en la tabla 2.

**Beneficio porcino nacional y por departamentos
(Cabezas):
Enero - Enero**

Departamento	2015	2016	Part (%)	Tasa de Crecimiento
Antioquia	126,874	136,562	47.7%	7.6%
Bogotá, D.C.	55,774	58,883	20.6%	5.6%
Valle del Cauca	39,389	46,666	16.3%	18.5%
Risaralda	9,144	11,618	4.1%	27.1%
Atlántico	7,831	8,013	2.8%	2.3%
Caldas	6,084	4,448	1.6%	-26.9%
Quindío	3,783	3,996	1.4%	5.6%
Nariño	3,037	3,014	1.1%	-0.8%
Huila	2,026	2,469	0.9%	21.9%
Santander	2,690	2,418	0.8%	-10.1%
Meta	1,406	2,172	0.8%	54.5%
Chocó	1,338	1,728	0.6%	29.1%
Boyacá	1,066	1,196	0.4%	12.2%
Otros	3,332	3,065	1.1%	-8.0%
Total Nacional	263,774	286,248	100.0%	8.5%

Tabla 2. Beneficio porcino nacional y por departamentos (Cabezas). Fuente (FNP, 2016).

Por otra parte, el beneficio del ganado Bovino en el año 2015 estuvo alrededor de 4,311 millones de cabezas según el reporte de la Federación Colombiana de Ganaderos, Fedegan. En la Figura 4 y 5 se muestra el comportamiento del beneficio bovino en Colombia desde el año 2011 y el inventario bovino distribuido por las diferentes regiones del País, donde el departamento de Antioquia representa el 23% del inventario nacional, seguido de Córdoba y Casanare con una participación del 18%.

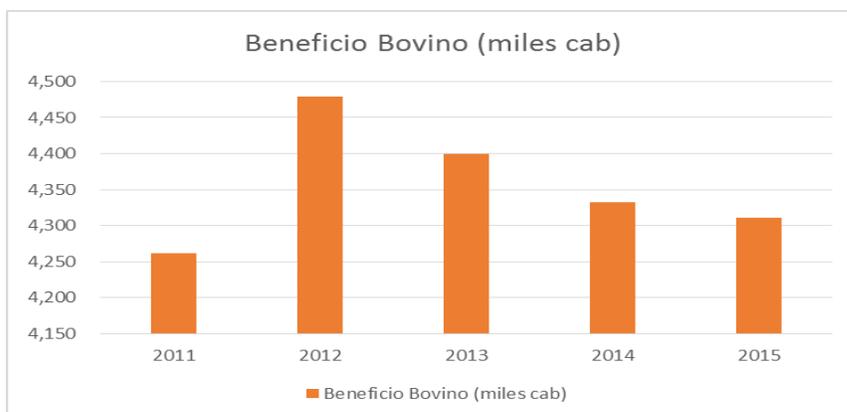


Figura 4. Beneficio Bovino en Colombia. Fuente (Fedegan, 2016).

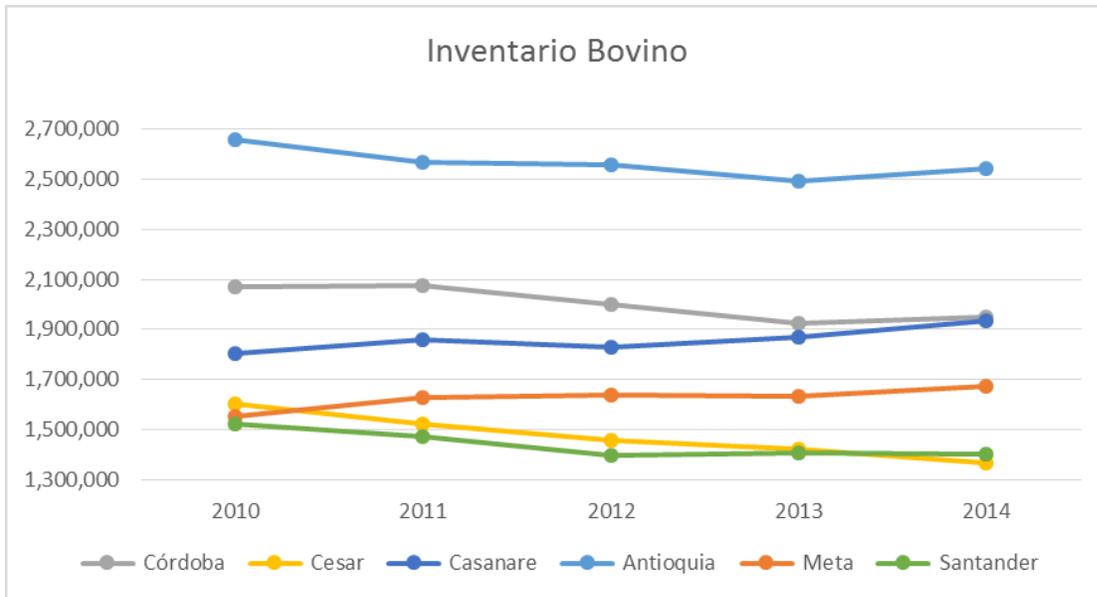


Figura 5. Inventario Bovino en Colombia. Fuente (Fedegan, 2016).

Regresando a la estructura productiva de cadenas cárnicas en Colombia que finalizan con la producción y comercialización de carnes frías y embutidas, se encuentra la Cadena de suministro del Negocio Cárnico del Grupo Nutresa con una participación en el mercado del 73.3% (Grupo Nutresa, 2015). A continuación se observa cómo se encuentra distribuida su cadena de suministro en Colombia:

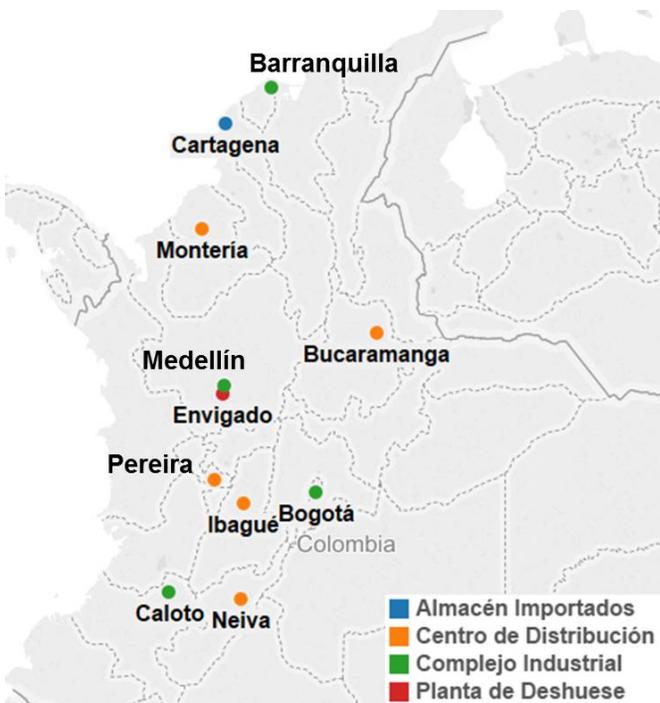


Figura 6. Cadena de suministro Negocio Cárnico Nutresa. Fuente (Elaboración propia).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Contextualización cadenas de suministro

La cadena de suministro es una integración de procesos de negocios donde varias entidades de negocio trabajan juntos en un esfuerzo por (a) la adquisición de materias primas, (b) convertir estas materias primas en productos finales especificados, y (c) entregar estos productos finales a los minoristas (Beamon, 1998). Una cadena global cubre múltiples sitios de transformación y consta de proveedores, fábricas, centros de almacenamiento y distribución, así como entidades de outsourcing. Las actividades de planificación y programación de estas cadenas de suministro son muy complejas y tienen que llevarse a cabo a lo largo de toda la cadena con el fin de lograr productos de alta calidad a un menor costo, menor inventario, y altos niveles de rendimiento. Como resultado de proporcionar de manera eficiente soluciones óptimas globales, las empresas están migrando de los procesos de planificación separados hacia procesos más coordinados e integrados de planificación (Moon, Lee, Jeong, & Yun, 2008).

En recientes años, muchos investigadores han prestado su atención en integrar los procesos de planeación y programación. Procesos de planeación y programación son, posiblemente, las funciones más importantes en una cadena de suministro, porque son funciones esenciales para tener el inventario disponible a los clientes. La planeación actúa como puente entre el diseño, la fabricación y la programación.

3.2 Planeación en cadenas de suministro

Con el fin de abordar el complejo problema de planeación dentro de una organización, gerentes de la cadena de suministro dividen sus decisiones en tres niveles: estratégico (largo plazo), táctico (mediano plazo) y operativa (a corto plazo).

Cuando se habla de planeación estratégica de la producción se debe abordar la toma de tres tipos de decisiones. La primera decisión estratégica que se debe tomar es acerca de la localización y capacidad de la planta, la segunda es acerca de la tecnología de la planta y la tercera es acerca del diseño de la planta (Mourtzis, Doukas, & Bernidaki, 2014).

Tomar la decisión de localización y capacidad de la planta, implica enmarcarse dentro de la cadena de suministro completa, conocer dónde están los proveedores de materia prima y qué tipo de contratos se manejarían con cada uno para determinar los costos de abastecimiento y transporte de materia prima, conocer si el producto irá directo de la planta al cliente o a un centro de distribución y cuáles son los costos de transporte en los que se incurriría, cuáles son los costos de mano de obra y de producción en los potenciales lugares donde se podría establecer la planta, cuáles son los productos y las demandas de estos que atenderá la planta (Yu, 2012). Comúnmente para resolver este tipo de problemas se han utilizado metodologías de programación lineal entera mixta.

La planeación táctica en el mediano plazo busca gestionar las restricciones de los recursos productivos tomando decisiones del qué, cuándo y dónde comprar, producir y distribuir con información agregada por familias de productos y un tiempo a detalle semanal-Mensual.

Los resultados de este proceso de optimización son cantidades semanales-mensuales de producción para todas las familias de productos en cada lugar o instalación, las asignaciones de recursos a las distintas familias de productos y el nivel de inventario de los productos terminados en los diferentes lugares (Pinedo, 2011).

En la planeación operativa el horizonte de análisis es más corto, los pronósticos de demanda son más precisos y los sitios no se modelan como una sola unidad, por el contrario se convierte en un conjunto de recursos y máquinas, teniendo en cuenta tiempos de preparación, de entrega y costos asociados (Pinedo, 2011). Las decisiones que se toman son más detalladas dando respuesta al qué, cuándo, cómo y dónde comprar, producir y distribuir.

La planeación de necesidades de materiales (MRP) en una cadena de suministro tradicional parte de un plan maestro de producción, listas de materiales y rutas de fabricación para proceder a realizar una explosión de materiales. Adicionalmente, en una cadena de alimentos cárnicos planear las necesidades de materiales cárnicos requiere de un MRP inverso, el cual se define como un proceso de implosión de necesidades de cortes cárnicos llevados a determinar las necesidades de reses y cerdos como lo es para el caso de estudio. Arbós (2012) se refiere a un MRP inverso en un contexto diferente pero siguiendo la idea de implosión partiendo de necesidades desagregadas llevadas a necesidades agregadas.

3.3 Modelación de cadenas de suministro

Se puede considerar el trabajo de Wagner & Whitin (1958) como el primer modelo de planeación de una cadena de suministro. Los autores, a partir de su modelo proponen encontrar las cantidades óptimas a pedir de un producto en un periodo, balanceando los costos de pedir y de almacenar, utilizando restricciones de balance de inventarios y de no negatividad de las variables. Dicho modelo se puede extender a múltiples productos y considerar otro tipo de factores, tales como estimación del costo de las ventas perdidas, ventas retrasadas, vida útil de los productos, entre otras variantes (Kallrath, 2006).

El modelo de Wagner y Within solo considera un eslabón dentro de la cadena, pero también se puede extender con sus respectivas variantes a múltiples eslabones dentro de una cadena donde se considera la transformación de materias primas y el transporte entre eslabones.

Shah (2012) presenta el cambio que han vivido los ambientes de la industria manufacturera actualmente; en el pasado este tipo de industrias se consideraban con una sola planta que atendía un solo mercado. Hoy en día se tienen cadenas de suministros donde múltiples sitios atienden múltiples mercados. El gran reto en la planeación de estas cadenas está en la complejidad del problema de optimización asociado a la planeación, ya que el tamaño del problema aumenta considerablemente con el aumento de sitios, productos y mercados. Shah propone la solución del problema de planeación de cadenas de suministro con múltiples eslabones utilizando la metodología de relajación lagrangiana aumentada.

El presente trabajo modela una cadena de suministro con múltiples eslabones donde cada eslabón contiene diferentes procesos distribuidos en serie o paralelo que transforman un

material o producto. En la Figura 7 se resumen las variables y restricciones a tener en cuenta en la modelación de los procesos. Para cada proceso se definen 3 tipos de variables:

- Cantidad de material de entrada al proceso
- Cantidad de material de salida del proceso
- Cantidad de material de entrada y/o salida en inventario al final del periodo.

Dichas variables se relacionan a través de 4 tipos de restricciones:

Relación de entrada y salida de material: Esta restricción define como se da la transformación de un(os) material(es) de entrada en un(os) material(es) de salida. Las relaciones de material de entrada y salida se pueden dar de tres diferentes formas. Puede que entre un solo material y salgan muchos materiales (uno a muchos), o puede que esta relación sea una a uno, es decir que entre un material y salga solo un material, y el otro tipo de relación en un proceso es que entren varios materiales y solo salga un material (muchos a uno). El modelo desarrollado en la presente tesis utiliza cada uno de estos tipos de relaciones, el primer proceso modelado que es el deshuese es un proceso uno a muchos, de una canal salen muchas materias primas cárnicas; el segundo proceso modelado es la congelación / descongelación que es un proceso una a uno, entra materia prima cárnica y sale materia prima cárnica; el tercer proceso modelado es la producción que es un proceso muchos a uno, en donde entran muchas materias primas cárnicas y no cárnicas y sale un producto terminado.

Restricción de disponibilidad de tiempo del proceso: esta restricción limita la cantidad de material que se puede procesar por periodo, ya que el tiempo que se tiene disponible en el proceso no es infinito.

Restricción de capacidad de almacenamiento de material: esta restricción limita a que el almacenamiento del material no sobrepase la capacidad del almacén.

Balance de inventario de material: es la restricción que define el flujo de un material a través de un balance entre entradas y salidas, determinando la cantidad de material a tener en inventario al finalizar un periodo específico.

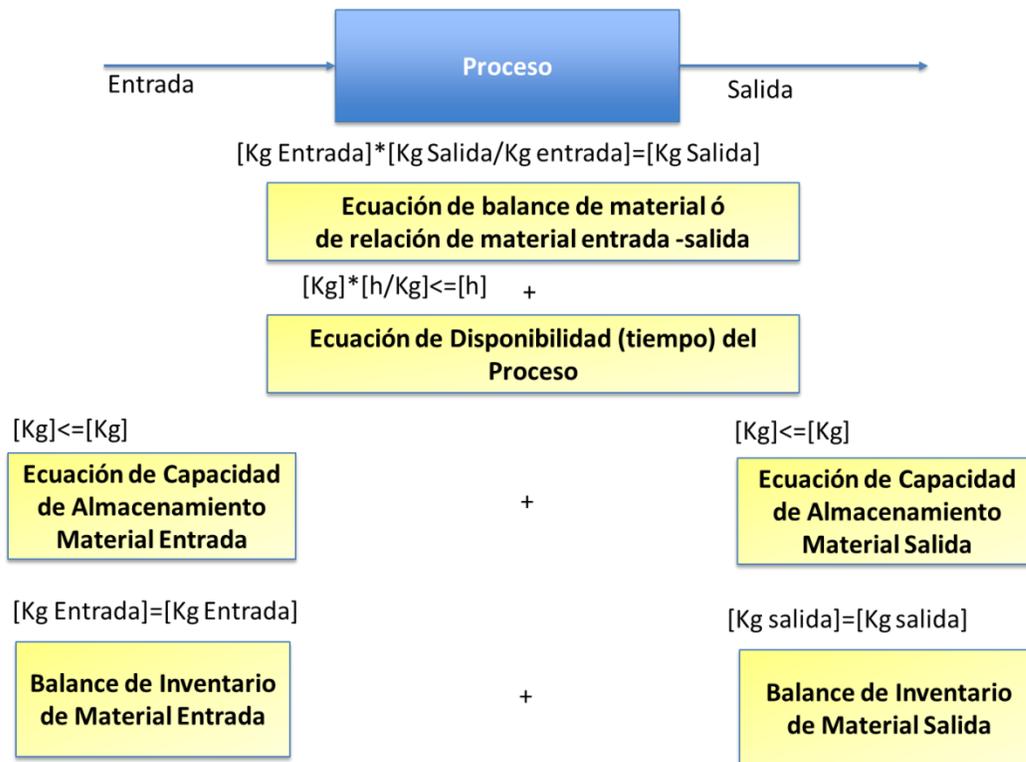


Figura 7. Modelación de procesos en una cadena de suministro. Fuente (Elaboración propia).

3.4 Cadenas de suministro de carácter perecedero

En la modelación matemática de control de inventarios que inició con el modelo clásico del lote económico (COE) de Harris (1913), el supuesto implícito era que los productos almacenados tenían una vida infinita de almacenamiento. El carácter perecedero o deterioro se representó por primera vez para Whitin (1953), que consideró el deterioro de productos de moda después de un periodo de almacenamiento prescrito. Ghare y Schrader (1963) modelaron por primera vez la descomposición de inventario a través de una función exponencial negativa.

Durante 40 años después aproximadamente, se presentan muchas variaciones que difieren en suposiciones no sólo en la vida útil de un producto, sino también en el tipo de demanda, la presencia de descuentos en los precios, la modelación de un único a varios escalones, entre otras. En el 2001, Goyal y Giri presentaron la modelación del inventario haciendo distinción entre tres amplias categorías de inventario: obsolescencia, deterioro, o ningún deterioro. Los productos que están sujetos a la obsolescencia pierden su valor con el tiempo debido a los rápidos cambios de la tecnología o a la introducción de un nuevo producto por un competidor, o porque que pasan de moda. Y el deterioro se define como el daño, descomposición o pérdida de calidad del producto.

Las contribuciones posteriores se concentraron en áreas específicas y lo asocian a la gestión de cadenas de suministro, como Pierskalla (2005), que analiza el inventario de sangre y su gestión en la cadena de suministro. Pahl et al. (2007), Akkerman et al. (2010),

y Karaesman et al. (2011) se enfocan en el tema del deterioro de la producción y la planeación de la distribución, en especial de las cadenas de suministro de alimentos. Nahmias (2011) publicó un libro que ofrece una visión general de los métodos de modelación utilizado en el campo de los sistemas de inventarios perecederos. Ahumada & Villalobos (2009) presentaron una amplia revisión de la planeación en cadenas de suministro agro alimentarias, en la cual estructuran la literatura en dos tipos de problemas: cuando la materia prima es no perecedera y cuando es perecedera, además presenta los diferentes enfoques bajo los cuales se ha abordado este problema: programación entera mixta, programación dinámica, además de un enfoque estocástico utilizando programación estocástica y programación dual estocástica. Rong, Akkerman, y Grunow, (2011) determinaron que la vida útil de un producto depende en gran medida de las condiciones medio ambientales en las que se encuentra, dichos autores desarrollaron un modelo de programación lineal entera mixta para resolver el problema de planeación de la cadena de suministro. Amorim, Gunther y Almada, (2012) presentaron un problema multiobjetivo donde integran en un nivel operativo el problema de planeación de producción y distribución en una cadena de suministro con productos altamente perecederos, donde el problema va más allá de los aspectos económicos al combinarlo con el valor intangible de frescura. La formulación de la vida útil la consideran una parte fija en el tiempo y otra parte imprecisa. Los resultados muestran que los beneficios económicos derivados de la utilización de un enfoque integrado dependen del nivel de frescura de los productos entregados.

Finalmente Bakker, Riezebos y Teunter (2012), exponen una revisión de los diferentes sistemas que modelan el carácter perecedero presentando una clasificación en términos generales de acuerdo con el tiempo de vida de los productos y las características de la demanda. Definen tres categorías con base a la vida útil: (1) fijo de por vida, es decir, tiempo de vida predeterminado, determinístico, por ejemplo, dos días o una temporada. (2) Tasa de deterioro dependiendo de la edad (tiempo de vida probabilístico, distribuido, por ejemplo, Weibull). (3) Un deterioro dependiente de la tarifa.

4. MODELO MATEMÁTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA PLANEACIÓN DE OPERACIONES EN UNA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS CÁRNICOS.

4.1 Introducción al Modelo

Para el desarrollo del Modelo que optimiza la planeación de Operaciones en una cadena de suministro de alimentos cárnicos (POCSAC), se parte de la simplificación de la cadena de suministro cárnica iniciando en el abastecimiento de canales, pasando por el proceso de deshuese de canales a cortes cárnicos, procesos de congelación y descongelación, procesos productivos y almacenamiento de productos embutidos terminados, como se muestra en la Figura 8.

Antes de continuar con la descripción detallada de cada proceso y las consideraciones de la modelación, se presenta la siguiente tabla con una serie de conceptos claves necesarios para el entendimiento del problema.

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Canales	Una canal está representada por las estructuras anatómicas que quedan luego de que un bovino/porcino vivo se ha sacrificado bajo procedimientos estándares establecidos en las plantas de Beneficio.
Deshuese de Canales	Es el despiece de la canal en diferentes cortes cárnicos.
Alternativas de Corte o Deshuese	Son las diferentes formas de deshuesar una canal, de la cual dependiendo de la alternativa de corte salen diferentes cortes cárnicos en diferentes proporciones.
Materia prima cárnica comercial	Es la materia prima cárnica que sale directamente para el consumo de un cliente.
Materia prima cárnica Industrial	Es la materia prima cárnica que sale como insumo a procesos de producción posteriores.
Refrigeración	La refrigeración es el proceso de conservación de las materias primas cárnicas a bajas temperaturas, pero por encima de su temperatura de congelación. De manera general, la refrigeración se enmarca entre 0°C y 4°C.
Congelación	Es el proceso en el cual la materia prima cárnica pasa a un estado de solidificación por el agua contenida en ella y sirve para conservar sus propiedades ampliando su vida útil. De manera general, la congelación se enmarca entre -22°C y -18°C.
Descongelación	Es el proceso por el cual pasa el material congelado a temperaturas mayores para recuperar su estado origen para el consumo.

Días de Vida útil	Los días de vida útil son los días que el material se encuentra en las condiciones adecuadas para su consumo y empiezan a contar al siguiente día de la producción.
Vencimiento	El vencimiento corresponde al último día que el material está habilitado para su consumo.
Materia prima no cárnica	Otros insumos requeridos en el proceso de producción equivalente a condimentos, material de embutido y empaque.

Tabla 3. Conceptos claves modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

El problema inicia con el abastecimiento de canales, donde se diferencian dos tipos de proveedores: proveedor propio y proveedor comprado. El proveedor propio hace referencia a los canales que provienen de las granjas y fincas propias de la cadena, y el proveedor comprado hace referencia a los proveedores externos.

Después de comprar los canales, estos pasan por un almacenamiento y posteriormente al proceso de deshuese, donde dependiendo de la alternativa de corte seleccionada, se obtienen diferentes cortes cárnicos en diferentes volúmenes. Algunos cortes cárnicos que salen del proceso de deshuese se pueden comercializar (MCC, materia prima cárnica comercial), es decir, atender una venta a clientes que está sujeta a la disponibilidad del material porque la prioridad del modelo es atender el consumo industrial, las necesidades de los procesos posteriores para la producción de carnes frías embutidas.

Una vez se deshuesa la canal, como lo muestra en la Figura 8, se debe tomar la decisión de cómo conservar los cortes cárnicos o la materia prima cárnica, es decir, refrigerar o congelar y en qué cantidad. En la Figura 9 se detallan las diferentes formas de consumo de la materia prima cárnica (MPC). La forma 1 está relacionada con las materias primas cárnicas que tienen un estado de consumo industrial congelado y la forma 2 presenta dos alternativas de consumo asociadas a las materias primas cárnicas en estado de refrigeración; una de estas alternativas es el almacenamiento refrigerado para un posterior consumo y la otra alternativa es la congelación para el almacenamiento congelado y un descongelamiento posterior para el consumo. La ventaja de esta última alternativa es que puede prolongar la vida útil del material ya que la restricción de la vida útil se presenta para las materias primas cárnicas refrigeradas.

El modelo presenta también la opción de abastecer las materias primas cárnicas de proveedores en su estado de consumo refrigerado o congelado como lo muestra la Figura 8.

El abastecimiento de materiales no cárnicos (MNC) proviene de proveedores que pasan directamente el material a ser almacenado para su consumo.

El proceso de producción consiste en la transformación de materias primas cárnicas y no cárnicas en productos terminados de acuerdo a unos rendimientos. Allí se encuentran dos líneas de producción con un recurso restrictivo para cada una que produce diferentes productos terminados. Luego de ser producidos los productos terminados, son almacenados para satisfacer la demanda del cliente final.

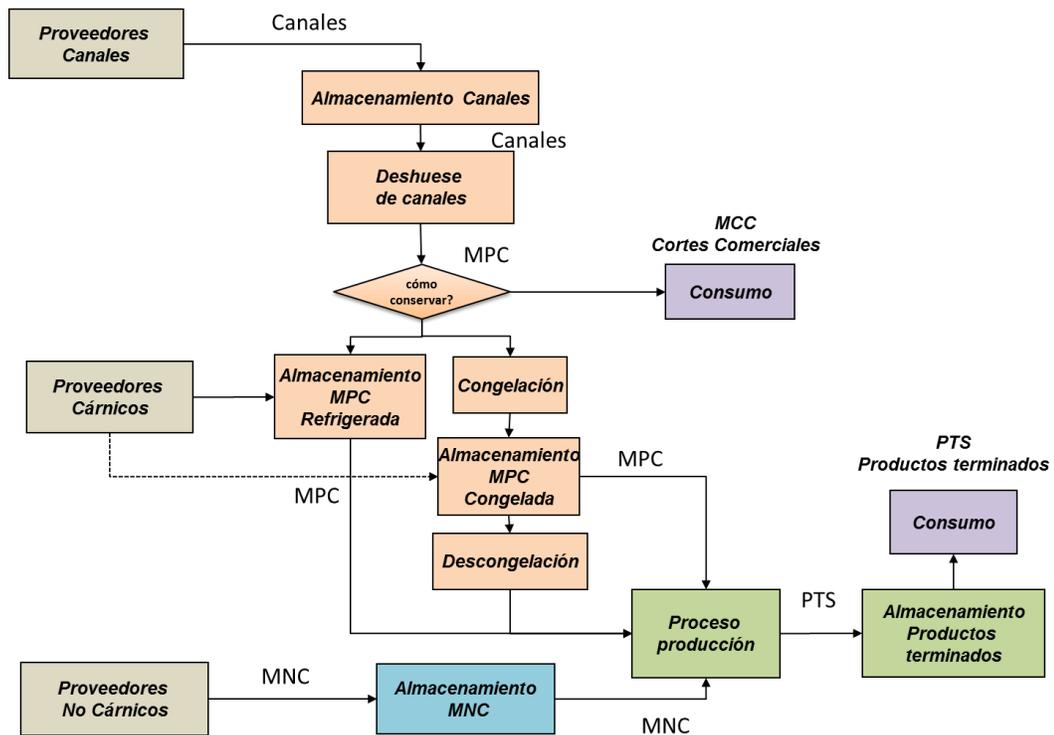


Figura 8. Diagrama de flujo de una cadena de suministro de alimentos cárnicos. Fuente (Elaboración Propia)

Formas de Consumo de MPC

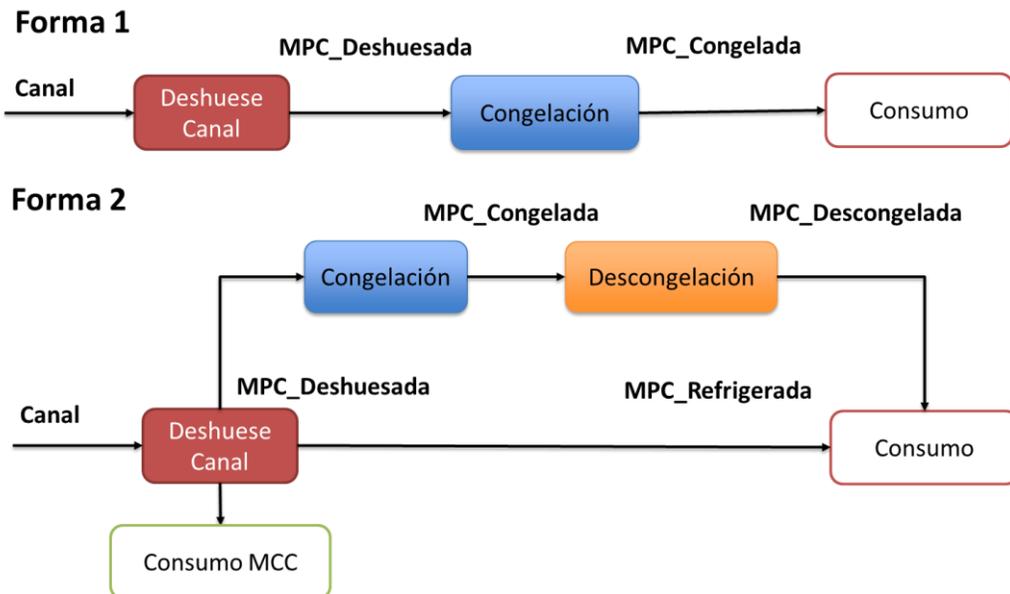


Figura 9. Formas de consumo de materia prima cárnica. Fuente (Elaboración Propia)

4.1.1 Consideración de la Vida útil

La modelación de la vida útil parte de la respuesta a la pregunta ¿Cuándo se vence un producto? Y la respuesta que se encuentra es cuando la oferta es mayor a la demanda en una ventana de tiempo igual a la vida útil. Ahora ¿Cuándo la oferta es mayor a la demanda?

Si se supone que se tiene una empresa que fabrica salchichas, y la salchicha tiene una vida útil de 2 días, la producción que se haga el sábado, se tiene el domingo y lunes para consumirla, si no se consume se vence el producto.

Entonces, si:

Inventario (Salchicha, viernes) + Producción (salchicha, sábado) – Vencimiento (salchicha, sábado) – Vencimiento (salchicha, domingo) > Venta (salchicha, sábado) + Venta (salchicha, domingo) + Venta (salchicha, lunes)

Entonces, se va a tener vencimiento de salchicha el lunes.

¿En qué cantidades?

Vencimiento (salchicha, lunes) = Oferta (sábado) – Vencimientos (sábado, domingo) – Ventas (sábado, domingo, lunes)

De esta manera se modela la vida útil de las materia primas cárnicas refrigeradas, partiendo de una vida útil fija, como lo clasifican Goyal y Giri (2001) y Bakker, Riezebos y Teunter (2012), donde el vencimiento del material depende del balance entre la oferta y la demanda. Esta definición es el resultado de analizar el problema haciendo uso de la experiencia laboral y fundamentado en la literatura técnica revisada propuesta por Goyal y Giri (2001); Ahumada y Villalobos (2009); Rong, Akkerman y Grunow (2011); Amorim, Gunther y Almada (2012), y Bakker, Riezebos y Teunter (2012).

En el problema se considera que los productos terminados y las materias primas cárnicas congeladas no tienen vida útil corta porque su tiempo de vida superan el horizonte de análisis del modelo, para el caso de materias primas cárnicas refrigeradas su vida útil se define en 3 días.

4.1.2 Descripción de los Elementos del Modelo

Para facilitar la lectura del modelo, se creó una clasificación tanto para las variables como para las restricciones dependiendo de su funcionalidad.

Variables

- **Variables de cantidad continuas:**
Son las variables continuas positivas o ceros que representan por ejemplo la cantidad de materia prima cárnica a comprar, congelar, descongelar, mantener en inventario.
- **Variables de cantidad enteras:**
Son las variables enteras positivas o ceros que representan por ejemplo el número de canales a comprar, deshuesar o a mantener en inventario en un periodo determinado.

- **Variables de asignación:**
Son las variables binarias que indican si algo sucede o no sucede, por ejemplo una materia prima cárnica se vence o no en un periodo determinado.

Restricciones

- **Restricciones de Flujo:**
Son las que permiten llevar el balance de inventario de los canales, materias primas cárnicas y no cárnicas, y productos terminados al final de cada periodo, teniendo en cuenta todas las entradas y salidas de cada proceso.
- **Restricciones de Capacidad de Almacenamiento:**
Son las que obligan a que no se sobrepase el almacenamiento de canales, materias primas y productos terminados, la capacidad de cada almacén dado en peso o posiciones de almacenamiento.
- **Restricciones de Capacidad de Procesos:**
Son las que obligan que no se sobrepase la cantidad procesada en cada recurso por periodo. En el modelo se encuentran los siguientes procesos: Deshuese, Congelación, Descongelación y Producción de productos terminados.
- **Restricciones de Relación:**
Son las que obligan a ciertas variables tomar ciertos valores dependiendo del valor de otras. Por ejemplo, la variable de Cantidad canales a deshuesar por alternativa de corte en cada periodo dependerá de la variable Cantidad de canales deshuesados en el mismo periodo.
- **Restricciones de Vida Útil:**
Son las restricciones que definen si hay o no vencimiento y en qué cantidad de cada materia prima cárnica refrigerada.

4.2 Modelo de Programación matemática POCSAC

A continuación se presenta el detalle de la programación matemática utilizada para modelar el problema:

ÍNDICES	
Índice	Descripción
a	Alternativa de corte
c	Canal
l	Animal
m	Materia prima cárnica
n	Materia prima no cárnica
p	Producto terminado
r	Proceso
s	Proveedor
t	Periodo

Tabla 4. Índices Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia)

CONJUNTOS LEIDOS		
Índice	Conjunto	Descripción
a	ALT	Alternativas de corte
l	ANI	Animales
c	CAN	Canales
m	MCC	Materias primas cárnicas comerciales
m	MCI	Materias primas cárnicas industriales
m	MCO	Materias primas cárnicas congeladas
n	MNC	Materias primas no cárnicas
m	MPC	Materias primas cárnicas
m	MRE	Materias primas cárnicas refrigeradas
t, tt, u, uu	PHO	Periodos del horizonte de planificación
r	PRC	Procesos
p	PTS	Productos terminados
s	SUP	Proveedores

Tabla 5. Conjuntos leídos Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

CONJUNTOS INDEXADOS		
Índice	Conjunto	Descripción
l	ACA(c)	Animales del canal
a	ALC(c)	Alternativas de corte del canal
a	AMC(m)	Alternativas de las materias primas cárnicas
c	CAA(l)	Canales del animal
c	CAL(a)	Canales de la alternativa
c	CMC(m)	Canales de la materia prima cárnica
m	MCA(a)	Materias primas cárnicas de las alternativas
n	MNP(p)	Materias primas no cárnicas del producto terminado
n	MNS(s)	Materias primas no cárnicas del proveedor
m	MPS(s)	Materias primas cárnicas del proveedor
m	MPT(p)	Materias primas cárnicas del producto terminado
uu	PDE(m,u)	Periodo de producción de m, que se vence en u
uu	PIV(m,u)	Periodo anterior al periodo de producción de m, que se vence en el periodo u
uu	PLB(m,u)	Periodos de vida de la producción que se vence en u menos el último día
uu	PLI(m,u)	Periodos de vida de la producción que se vence en u
s	SMP(m)	Proveedores de la materia prima cárnica m

Tabla 6. Conjuntos indexados Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

CONJUNTOS CALCULADOS			
Índice	Conjunto – Familia	Descripción	OPERACIÓN
c	CAM(a,m)	Canales que con la alternativa a producen la materia prima cárnica m	CAL(a) U CMC(m)

Tabla 7. Conjuntos calculados Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

PARÁMETROS LEIDOS		
Parámetro	Descripción	Unidades
CCOP _{m,t}	Cantidad de materia prima cárnica congelada del pasado	[Kg]
CCRP _{m,t}	Cantidad de materia prima cárnica refrigerada del pasado	[Kg]
CDEP _{m,t}	Cantidad de materia prima cárnica descongelada del pasado	[Kg]
CDES _m	Costo de descongelar materia prima cárnica	[\$/Kg]
CMNP _n	Factor de conversión de materia prima no cárnica a unidad de almacenamiento	[Kg/Posición]
COAA _i	Costo almacenamiento de animales	[\$/Canal]
COAC _m	Costo de almacenamiento de materia prima cárnica	[\$/Kg]
COAN _n	Costo de almacenamiento de materia prima no cárnica	[\$/Posición]
COAO _m	Costo de almacenamiento de materia prima cárnica congelada	[\$/Kg]
COAP _p	Costo de almacenamiento de producto terminado	[\$/Posición]
COCA _c	Costo compra del canal	[\$/Canal]
COCO _m	Costo de congelar materia prima cárnica	[\$/Kg]
COMC _{c,a,m}	Costo de producción de materias primas cárnicas	[\$/Kg]
COPR _{c,a}	Costo de procesamiento alternativa canal	[\$/Canal]
COPT _p	Costo de procesamiento producto terminado	[\$/Unidad]
COSC _{s,m}	Costo de compra de materia prima cárnica	[\$/Kg]
COSN _{s,n}	Costo de compra de materia prima no cárnica	[\$/Kg]
CPCN _p	Factor de conversión de productos terminados a unidad de almacenamiento	[Unidad/Posición]
CXAA _i	Capacidad máxima de animales a almacenar	[Canal]
CXAC	Capacidad máxima de almacenamiento de materia prima cárnica	[Kg]
CXAN	Capacidad máxima de almacenamiento de materia prima no cárnica	[Posición]
CXAO	Capacidad máxima de almacenamiento de materia prima cárnica congelada	[Kg]
CXAP	Capacidad máxima de almacenamiento de producto terminado	[Posición]
CXCC _c	Capacidad máxima de compra de canal	[Canal]

DEMC _{m,t}	Demanda de materia prima cárnica	[Kg]
DEPT _{p,t}	Demanda de producto terminado	[Unidad]
ICOP _{m,t}	Inventario de materia prima cárnica congelada del pasado	[Kg]
IICA _c	Inventario inicial de canales	[Canal]
IICO _m	Inventario inicial de materia prima cárnica congelada	[Kg]
IIMC _m	Inventario inicial de materia prima cárnica	[Kg]
IIMN _n	Inventario inicial de materia prima no cárnica	[Kg]
IIPT _p	Inventario inicial producto terminado	[Unidad]
IMCP _{m,t}	Inventario de materia prima cárnica del pasado	[Kg]
MBIV _{m,u}	Valor muy grande utilizado en las restricciones DBIV que definen la variable binaria BIV, la cual indica cuando hay o no vencimiento	[Kg]
MCVR _{m,u}	Valor muy grande utilizado en las restricciones DCVR que definen la cantidad de materia prima cárnica que vence en u	[Kg]
MERM _m	Merma cárnica en el proceso de descongelación	[%]
PVMP _m	Precio de venta de materia prima cárnica	[\$/Kg]
PVPT _p	Precio de venta de producto terminado	[\$/Unidad]
REMC _{m,p}	Rendimiento de materia prima cárnica en producto terminado	[Kg/Unidad]
REMN _{n,p}	Rendimiento de materia prima no cárnica en producto terminado	[Kg/Unidad]
REND _{c,a,m}	Rendimiento de cantidad de corte por alternativa canal	[Kg/Canal]
TCO _{m,r}	Tiempo de congelación de la materia prima cárnica en el proceso r	[Hr/Kg]
TDES _{m,r}	Tiempo de descongelación de la materia prima cárnica en el proceso r	[Hr/Kg]
TPRC _{c,r}	Tiempo de procesamiento del canal c en el proceso r	[Hr/Unidad]
TPRO _{p,r}	Tiempo de procesamiento producto terminado	[Hr/Unidad]
TXCO _{r,t}	Tiempo máximo de congelación por periodo	[Hr]
TXDE _{r,t}	Tiempo máximo de descongelación por periodo	[Hr]
TXPR _{i,r,t}	Tiempo máximo disponible en el proceso r por periodo	[Hr]
TXPT _{r,t}	Tiempo máximo de producción de producto terminado	[Hr]
VIUT _m	Vida útil de la materia prima cárnica m	[Periodo]
VMPP _{m,t}	Venta de materia prima cárnica del pasado	[Kg]

Tabla 8. Parámetros leídos Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

VARIABLES			
Variable	Descripción	Tipo	Unidades
$BIV_{m,t}$	Variable que indica si hay vencimiento de materia prima cárnica en t, es 1 cuando hay vencimiento, y es 0 cuando no hay vencimiento	B	
$CCA_{c,a,t}$	Cantidad de canales a deshuesar por alternativa de corte por periodo	Z^+	[Canal]
$CCC_{c,t}$	Cantidad de canales a comprar por periodo	Z^+	[Canal]
$CCO_{m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica congelada	R^+	[Kg]
$CCP_{c,t}$	Cantidad de canales a procesar por periodo	Z^+	[Canal]
$CCR_{m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica a refrigerar	R^+	[Kg]
$CDE_{m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica descongelada	R^+	[Kg]
$CMA_{m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica requerida para producir	R^+	[Kg]
$CMD_{m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica deshuesada en el periodo	R^+	[Kg]
$CMN_{n,t}$	Cantidad de materia prima no cárnica requerida para producir	R^+	[Kg]
$CMS_{s,m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica comprada al proveedor	R^+	[Kg]
$CNS_{s,n,t}$	Cantidad de materia prima no cárnica comprada al proveedor	R^+	[Kg]
$CPT_{p,t}$	Cantidad a producir de producto terminado	R^+	[Unidad]
$CVE_{m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica estimada que se vence en periodo t	R	[Kg]
$CVR_{m,t}$	Cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t	R^+	[Kg]
$ICA_{c,t}$	Inventario de canales al finalizar el periodo	Z^+	[Canal]
$ICO_{m,t}$	Inventario de materia prima cárnica congelada al finalizar el periodo	R^+	[Kg]
$IMC_{m,t}$	Inventario de materia prima cárnica al final del periodo	R^+	[Kg]
$IMN_{n,t}$	Inventario de materia prima no cárnica al finalizar el periodo	R^+	[Kg]
$IPT_{p,t}$	Inventario de producto terminado al finalizar el periodo	R^+	[Unidad]
$VMP_{m,t}$	Ventas de materia prima cárnica	R^+	[Kg]

Tabla 9. Variables Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

En la tabla 9 el tipo de variable Z^+ corresponde a variables enteras mayores o iguales a cero, R^+ a variables que toman valores de los Reales mayores o iguales a cero, R a variables libres y B a variables binarias.

Restricciones		
Restricción	Descripción	Unidades
(1) $DICA_{c,t}$	<p>Disponibilidad de canales La cantidad de canales a comprar por periodo no debe superar la capacidad máxima de compra de canal.</p> $CCC_{c,t} \leq CXCC_c$ $\forall c \in CAN, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS CAN Canales PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS CXCC_c Capacidad máxima de compra de canal</p> <p>VARIABLES CCC_{c,t} Cantidad de canales a comprar por periodo</p>	[Canal]
(2) $BICA_{c,t}$	<p>Balance de inventario de canales El inventario al final del periodo t es igual a la cantidad que tenía en inventario al final del periodo anterior, más los canales comprados en t menos las cantidades procesadas en t.</p> $ICA_{c,t-1} + CCC_{c,t} - CCP_{c,t} = ICA_{c,t}$ $\forall c \in CAN, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS CAN Canales PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>VARIABLES CCC_{c,t} Cantidad de canales a comprar por periodo ICA_{c,t} Inventario de canales al finalizar el periodo CCP_{c,t} Cantidad de canales a procesar por periodo</p>	[Canal]
(3) $RCAC_{c,t}$	<p>Relación de cantidad alternativa canal con cantidad canal Establece que la suma de los canales a deshuesar por alternativa debe ser igual a la cantidad total de canales a procesar.</p> $\sum_{a \in ALC(c)} CCA_{c,a,t} = CCP_{c,t}$ $\forall c \in CAN, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS CAN Canales PHO Periodos del horizonte de planificación ALC(c) Alternativas de corte del canal</p> <p>VARIABLES CCP_{c,t} Cantidad de canales a procesar por periodo CCA_{c,a,t} Cantidad de canales a deshuesar por alternativa de corte</p>	[Canal]

(4) CALA _{i,t}	<p>Capacidad de almacenamiento de animales por periodo Establece que el número de canales a ser almacenados al final de cada periodo, no deben superar la capacidad máxima de animales que pueden ser almacenados.</p> $\sum_{c \in CAA(I)} ICA_{c,t} \leq CXAA_i$ $\forall i \in ANI, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS ANI Animales PHO Periodos del horizonte de planificación CAA(I) Canales del animal</p> <p>PARÁMETROS CXAA_i Capacidad máxima de animales a almacenar</p> <p>VARIABLES ICA_{c,t} Inventario de canales al finalizar el periodo</p>	[Canal]
(5) DIPR _{i,r,t}	<p>Disponibilidad de procesamiento en el proceso r Establece que el tiempo llevado a cabo en procesar la cantidad de canales en un periodo, no debe superar el tiempo máximo disponible para cada t.</p> $\sum_{c \in CAA(I)} TPRC_{c,r} \times CCP_{c,t} \leq TXPR_{i,r,t}$ $\forall r \in PRC, \forall i \in ANI, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS ANI Animales PRC Procesos PHO Periodos del horizonte de planificación CAA(I) Canales del animal</p> <p>PARÁMETROS TPRC_{c,r} Tiempo de procesamiento del canal c en el proceso r TXPR_{i,r,t} Tiempo máximo disponible en el proceso r por periodo</p> <p>VARIABLES CCP_{c,t} Cantidad de canales a procesar por periodo</p>	[Hr]
(6) CAMC _t	<p>Capacidad de almacenamiento de materias primas cárnicas refrigeradas por periodo Establece que la cantidad de materia prima cárnica a ser almacenada no debe superar la capacidad máxima de almacenamiento.</p> $\sum_{m \in MRE} IMC_{m,t} \leq CXAC$ $\forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS CXAC Capacidad máxima de almacenamiento de materia prima cárnica</p> <p>VARIABLES IMC_{m,t} Inventario de materia prima cárnica al final del periodo</p>	[Kg]

(7) BICR _{m,t}	<p>Balance de inventarios de materia prima cárnica refrigerada Establece que el inventario de materia prima cárnica al final de t, es igual al inventario del periodo anterior, más las entradas de materias cárnicas (refrigerada, descongelada, comprada) menos lo que se vence y lo que se vende en ese periodo.</p> $\text{IMC}_{m,t-1} + \text{CCR}_{m,t} + \text{CDE}_{m,t} + \sum_{s \in \text{SMP}(m)} \text{CMS}_{s,m,t} - \text{CVR}_{m,t} - \text{VMP}_{m,t} = \text{IMC}_{m,t}$ <p style="text-align: center;">$\forall m \in \text{MRE}, \forall t \in \text{PHO}$</p> <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación SMP(m) Proveedores de la materia prima cárnica m</p> <p>VARIABLES IMC_{m,t} Inventario de materia prima cárnica al final del periodo CDE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica descongelada VMP_{m,t} Ventas de materia prima cárnica CDE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica descongelada CCR_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica a refrigerar CMS_{s,m,t} Cantidad de materia prima cárnica comprada al proveedor CVR_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo</p>	[Kg]
(8) RCMA _{m,t}	<p>Relación de cantidad de materia prima cárnica con alternativa canal Establece la relación entre la cantidad de materia prima que queda deshuesada en el periodo t como resultado del procesamiento de unos canales por un rendimiento.</p> $\sum_{a \in \text{AMC}(m)} \sum_{c \in \text{CAM}(a,m)} \text{REND}_{c,a,m} \times \text{CCA}_{c,a,t} = \text{CMD}_{m,t}$ <p style="text-align: center;">$\forall m \in \text{MPC}, \forall t \in \text{PHO}$</p> <p>CONJUNTOS MPC Materias primas cárnicas PHO Periodos del horizonte de planificación AMC(m) Alternativas de corte de las materia primas cárnica m CAM(a,m) Canales que con la alternativa de corte a producen la materia prima cárnica m</p> <p>PARÁMETROS REND_{c,a,m} Rendimiento de cantidad de corte por alternativa canal</p> <p>VARIABLES CCA_{c,a,t} Cantidad de canales a deshuesar por alternativa de corte por periodo CMD_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica deshuesada en el periodo</p>	[Kg]
(9) VMPI _{m,t}	<p>Ventas de materia prima cárnica industrial Establece que la cantidad de materia prima cárnica industrial a vender es igual a la materia prima cárnica industrial requerida para producir.</p> $\text{VMP}_{m,t} = \text{CMA}_{m,t}$ <p style="text-align: center;">$\forall m \in \text{MCI}, \forall t \in \text{PHO}$</p> <p>CONJUNTOS MCI Materias primas cárnicas industriales PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>VARIABLES VMP_{m,t} Ventas de materia prima cárnica CMA_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica requerida para producir</p>	[Kg]

(10) VMPC _{m,t}	<p>Ventas de materias prima cárnica comercial Establece que la materia prima cárnica comercial para ventas no debe superar su demanda.</p> $\mathbf{VMP}_{m,t} \leq \mathbf{DEMC}_{m,t}$ $\forall m \in \mathbf{MCC}, \forall t \in \mathbf{PHO}$ <p>CONJUNTOS MCC Materias primas cárnicas comerciales PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS DEMC_{m,t} Demanda de materia prima cárnica</p> <p>VARIABLES VMP_{m,t} Ventas de materia prima cárnica</p>	[Kg]
(11) DCVE _{m,u}	<p>Definición de cantidad de materia prima cárnica que se estima vencer en periodo u</p> $\mathbf{CVE}_{m,u} = \sum_{uu \in \mathbf{PIV}(m,u)} \mathbf{IMC}_{m,uu} + \sum_{uu \in \mathbf{PDE}(m,u)} (\mathbf{CCR}_{m,uu} + \mathbf{CDE}_{m,uu}) - \sum_{uu \in \mathbf{PLB}(m,u)} \mathbf{CVR}_{m,uu} - \sum_{uu \in \mathbf{PLI}(m,u)} \mathbf{VMP}_{m,uu}$ $\forall m \in \mathbf{MRE}, \forall u \in \mathbf{PHO}$ <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación de la materia prima cárnica PIV(m,u) Periodo anterior al periodo de producción de m, que se vence en el periodo u PDE(m,u) Periodo de producción de m, que se vence en u PLI(m,u) Periodos de vida de la producción que se vence en u PLB(m,u) Periodos de vida de la producción que se vence en u menos el último periodo</p> <p>VARIABLES IMC_{m,uu} Inventario de materia prima cárnica al final del periodo uu CDE_{m,u} Cantidad de materia prima cárnica descongelada en el periodo uu CCR_{m,u} Cantidad de materia prima cárnica a refrigerar en el periodo uu CVR_{m,uu} Cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo uu CVE_{m,u} Cantidad de materia prima cárnica estimada que se vence en periodo u VMP_{m,uu} Ventas de materia prima cárnica en el periodo uu</p>	[Kg]

(12) DBIV _{1,m,t}	<p>Definición de variable binaria que indica si hay vencimiento en un periodo o no Establece el valor de la variable binaria a 1, cuando la cantidad estimada de materia prima cárnica que se vence en t es mayor que cero.</p> $CVE_{m,t} \leq MBIV_{m,t} \times BIV_{m,t}$ $\forall m \in MRE, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS MBIV_{m,u} Valor muy grande utilizado en las restricciones DBIV que definen la variable binaria BIV</p> <p>VARIABLES CVE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica estimada que se vence en periodo t BIV_{m,t} Variable binaria que indica si hay vencimiento de materia prima cárnica en t</p>	[Kg]
(13) DBIV _{2,m,t}	<p>Definición de variable binaria que indica si hay vencimiento en un periodo o no Establece el valor de la variable binaria a 0, cuando la cantidad estimada de materia prima cárnica que se vence en t es menor que cero.</p> $CVE_{m,t} \geq MBIV_{m,t} \times (BIV_{m,t} - 1)$ $\forall m \in MRE, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS MBIV_{m,u} Valor muy grande utilizado en las restricciones DBIV que definen la variable binaria BIV</p> <p>VARIABLES CVE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica estimada que se vence en periodo t BIV_{m,t} Variable binaria que indica si hay vencimiento de materia prima cárnica en t</p>	

(14) DCVR1 _{m,t}	<p>Definición de la cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t Establece junto con DCVR2 la igualdad entre la cantidad de materia prima cárnica que se vence en t, y la cantidad estimada de materia prima cárnica que se vence en t.</p> $CVR_{m,t} \geq CVE_{m,t} - MCVR_{m,t} \times (1 - BIV_{m,t})$ $\forall m \in MRE, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS MCVR_{m,u} Valor muy grande utilizado en las restricciones DCVR que definen la cantidad de materia prima cárnica que vence en t</p> <p>VARIABLES CVE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica estimada que se vence en periodo t CVR_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t BIV_{m,t} Variable binaria que indica si hay vencimiento de materia prima cárnica en t</p>	[Kg]
(15) DCVR2 _{m,t}	<p>Definición de la cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t Establece junto con DCVR1 la igualdad entre la cantidad de materia prima cárnica que se vence en t, y la cantidad estimada de materia prima cárnica que se vence en t.</p> $CVR_{m,t} \leq CVE_{m,t} + MCVR_{m,t} \times (1 - BIV_{m,t})$ $\forall m \in MRE, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS MCVR_{m,u} Valor muy grande utilizado en las restricciones DCVR que definen la cantidad de materia prima cárnica que vence en t</p> <p>VARIABLES CVE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica estimada que se vence en periodo t CVR_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t BIV_{m,t} Variable binaria que indica si hay vencimiento de materia prima cárnica en t</p>	[Kg]

(16) DCVR _{3,m,t}	<p>Definición de la cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t Obliga a la variable CVR a ser cero cuando no hay vencimiento de la materia prima cárnica en t.</p> $CVR_{m,t} \leq MCVR_{m,t} \times BIV_{m,t}$ $\forall m \in MRE, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS MCVR_{m,u} Valor muy grande utilizado en las restricciones DCVR que definen la cantidad de materia prima cárnica que vence en t</p> <p>VARIABLES CVR_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t BIV_{m,t} Variable binaria que indica si hay vencimiento de materia prima cárnica en t</p>	
(17) RDCR _{m,t}	<p>Relación materia prima cárnica deshuesada con la congelación y refrigeración Establece que la cantidad de materia prima deshuesada debe ser igual a la suma de las materias primas cárnicas congeladas y refrigeradas.</p> $CMD_{m,t} = CCO_{m,t} + CCR_{m,t}$ $\forall m \in MPC, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MPC Materias primas cárnicas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>VARIABLES CMD_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica deshuesada en el periodo CCO_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica congelada CCR_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica a refrigerar</p>	[Kg]
(18) DPCO _{r,t}	<p>Disponibilidad del proceso de congelación Establece que el tiempo de congelación de la materia prima cárnica m en el periodo t, no debe superar el tiempo máximo de congelación disponible por periodo.</p> $\sum_{m \in MPC} (TCON_{m,r} \times CCO_{m,t}) \leq TXCO_{r,t}$ $\forall r \in PRC, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MPC Materias primas cárnicas PRC Procesos PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS TCON_{m,r} Tiempo de congelación de la materia prima cárnica en el proceso r TXCO_{r,t} Tiempo máximo de congelación por periodo</p> <p>VARIABLES CCO_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica congelada</p>	[Hr]

(19) DPDE _{r,t}	<p>Disponibilidad del proceso de descongelación Establece que el tiempo de descongelación de la materia prima cárnica m en el periodo t, no debe superar el tiempo máximo de descongelación disponible por periodo.</p> $\sum_{m \in MRE} (TDES_{m,r} \times CDE_{m,t}) \leq TXDE_{r,t}$ $\forall r \in PRC, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS PRC Procesos MRE Materias primas cárnicas refrigeradas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS TDES_{m,r} Tiempo de descongelación de la materia prima cárnica en el proceso r TXDE_{r,t} Tiempo máximo de descongelación por periodo</p> <p>VARIABLES CDE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica descongelada</p>	[Hr]
(20) BICO _{m,t}	<p>Balance de inventarios de materia prima cárnica congelada Establece que el inventario de materia prima cárnica congelada al final de t, es igual al inventario que tenía al final del periodo anterior, menos lo que se descongeló, menos lo que se vendió.</p> $ICO_{m,t-1} + CCO_{m,t} - (1/MERM_m) \times CDE_{m,t} - VMP(m m \in MCO,t) = ICO(m,t)$ $\forall m \in MPC, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS MPC Materias primas cárnicas MCO Materias primas cárnicas congeladas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS MERM_m Merma cárnica en el proceso de descongelación</p> <p>VARIABLES CCO_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica congelada CDE_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica descongelada ICO_{m,t} Inventario de materia prima cárnica congelada al finalizar el periodo VMP_{m,t} Ventas de materia prima cárnica en el periodo t</p>	[Kg]

(21) $CACO_t$	<p>Capacidad de almacenamiento de materias primas cárnicas Congeladas por periodo Establece que la cantidad a ser almacenada en inventario de materia prima cárnica congelada, debe ser menor a la capacidad máxima de almacenamiento de materia prima congelada.</p> $\sum_{m \in MPC} ICO_{m,t} \leq CXAO$ $\forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>VARIABLES ICO_{m,t} Inventario de materia prima cárnica congelada al finalizar el periodo</p> <p>PARÁMETROS CXAO Capacidad máxima de almacenamiento de materia prima cárnica congelada</p>	[Kg]
(22) $BIPT_{p,t}$	<p>Balance de inventarios de producto terminado Establece que el inventario al final del periodo t de producto terminado, es igual al inventario al final del periodo anterior, más la cantidad a producir en ese periodo, menos la demanda de producto terminado en t.</p> $IPT_{p,t-1} + CPT_{p,t} - DEPT_{p,t} = IPT_{p,t}$ $\forall p \in PTS, \forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS PTS Productos terminados PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS DEPT_{p,t} Demanda de producto terminado</p> <p>VARIABLES CPT_{p,t} Cantidad a producir de producto terminado IPT_{p,t} Inventario de producto terminado al finalizar el periodo</p>	
(23) $CAPT_t$	<p>Capacidad de almacenamiento de productos terminados Establece que la cantidad de producto terminado a ser almacenado en cada periodo, convertido a número de posiciones de almacenamiento, no debe superar la capacidad máxima de almacenamiento.</p> $\sum_{p \in PTS} CPCN_p \times IPT_{p,t} \leq CXAP$ $\forall t \in PHO$ <p>CONJUNTOS PTS Productos terminados PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS CXAP Capacidad máxima de almacenamiento de producto terminado CPCN_p Factor de conversión de productos terminados a unidad de almacenamiento (Posiciones)</p> <p>VARIABLES IPT_{p,t} Inventario de producto terminado al finalizar el periodo</p>	[Posición]

(24) RMNP _{n,t}	<p>Relación materia prima no cárnica producto terminado. Establece la relación entre la cantidad de materia prima no cárnica requerida para producir, como el resultado de multiplicar la cantidad a producir de producto terminado por el rendimiento (cantidad de materia prima no cárnica por unidad de producto terminado).</p> $\sum_{p n \in \text{MNP}(p)} (\text{REM}_{n,p} \times \text{CPT}_{p,t}) = \text{CM}_{n,t} \\ \forall n \in \text{MNC}, \forall t \in \text{PHO}$ <p>CONJUNTOS MNC Materias primas no cárnicas PHO Periodos del horizonte de planificación MNP(p) Materias primas no cárnicas del producto terminado</p> <p>PARÁMETROS REM_{n,p} Rendimiento de materia prima no cárnica para producto terminado</p> <p>VARIABLES CPT_{p,t} Cantidad a producir de producto terminado CM_{n,t} Cantidad de materia prima no cárnica requerida para producir</p>	[Kg]
(25) RMCP _{m,t}	<p>Relación materia prima cárnica Producto terminado. Establece la relación entre la cantidad de materia prima cárnica requerida para producir, como el resultado de multiplicar la cantidad a producir de producto terminado por el rendimiento (cantidad de materia prima cárnica por unidad de producto terminado).</p> $\sum_{p m \in \text{MPT}(p)} (\text{REM}_{m,p} \times \text{CPT}_{p,t}) = \text{CMA}_{m,t} \\ \forall m \in \text{MPC}, \forall t \in \text{PHO}$ <p>CONJUNTOS MPC Materias primas cárnicas PHO Periodos del horizonte de planificación MPT(p) Materias primas cárnicas del producto terminado</p> <p>PARÁMETROS REM_{m,p} Rendimiento de materia prima cárnica en producto terminado</p> <p>VARIABLES CPT_{p,t} Cantidad a producir de producto terminado CMA_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica requerida para producir</p>	[Kg]

(26) BIMN _{n,t}	<p>Balance de inventario de materia prima no cárnica. Establece que el inventario al final del periodo t de materia prima no cárnica, es igual al inventario al final del periodo anterior, más la cantidad comprada al proveedor en el periodo t, menos la cantidad requerida para producir en t.</p> $\text{IMN}_{n,t-1} + \sum_{s n \in \text{MNS}(s)} \text{CNS}_{s,n,t} - \sum_{p n \in \text{MNP}(p)} (\text{REM}_{n,p} \times \text{CPT}_{p,t}) = \text{IMN}_{n,t}$ $\forall n \in \text{MNC}, \forall t \in \text{PHO}$ <p>CONJUNTOS MNC Materias primas no cárnicas PHO Periodos del horizonte de planificación MNS(s) Materias primas no cárnicas del proveedor MNP(p) Materias primas no cárnicas del producto terminado</p> <p>PARÁMETROS REM_{n,p} Rendimiento de materia prima no cárnica para producto terminado</p> <p>VARIABLES CNS_{s,n,t} Cantidad de materia prima no cárnica comprada al proveedor CPT_{p,t} Cantidad a producir de producto terminado IPT_{p,t} Inventario de producto terminado al finalizar el periodo IMN_{n,t} Inventario de materia prima no cárnica al finalizar el periodo</p>	[Kg]
(27) CAMN _t	<p>Capacidad almacenamiento materia primas no cárnicas. Establece que la cantidad de materia prima no cárnica a ser almacenada en cada periodo, convertido a número de posiciones de almacenamiento, no debe superar la capacidad máxima de almacenamiento.</p> $\sum_{n \in \text{MNC}} (\text{CMNP}_n \times \text{IMN}_{n,t}) \leq \text{CXAN}$ $\forall t \in \text{PHO}$ <p>CONJUNTOS MNC Materias primas no cárnicas PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS CXAN Capacidad máxima de almacenamiento de materia prima no cárnica CMNP_n Factor de conversión de materia prima no cárnica a unidad de almacenamiento (posiciones)</p> <p>VARIABLES IMN_{n,t} Inventario de materia prima no cárnica al finalizar el periodo</p>	[Posición]

(28) DPRO _t	<p>Disponibilidad del proceso de producción de producto terminado. Establece que el tiempo de procesar el producto terminado p en el proceso r en el periodo t, no debe superar el tiempo máximo de producción disponible por proceso y periodo.</p> $\sum_{p \in \text{PTS}} (\text{TPRO}_{p,r} \times \text{CPT}_{p,t}) \leq \text{TXPT}_{r,t}$ $\forall r \in \text{PRC}, \forall t \in \text{PHO}$ <p>CONJUNTOS PTS Productos terminados PRC Procesos PHO Periodos del horizonte de planificación</p> <p>PARÁMETROS TPRO_{p,r} Tiempo de procesamiento producto terminado TXPT_{r,t} Tiempo máximo de producción de producto terminado</p> <p>VARIABLES CPT_{p,t} Cantidad a producir de producto terminado</p>	[Hr]
------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------

Tabla 10. Restricciones Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

Las restricciones que modelan la vida útil presentadas en la tabla 10 se resumen en las restricciones: **(11) DCVE**: Definición de cantidad de materia prima cárnica que se estima vencer en un periodo; **(12 y 13) DBIV**: Definición de variable binaria que indica si hay vencimiento en un periodo o no; y **(14, 15 y 16) DCVR**: Definición de la cantidad de materia prima cárnica que se vence en un periodo.

La restricción 11 define el valor de la variable **CVE_{m,t}**: Cantidad de materia prima cárnica estimada que se vence en el periodo t; la cual puede tomar valores negativos o positivos, si toma valores positivos indica que hay vencimiento, por lo tanto se crean las restricciones (12 y 13) para definir el valor de la variable binaria que en este caso sería 1, sí hay vencimiento. Y para establecer la cantidad real de vencimiento se crean las restricciones (14 y 15) que relacionan las variables **CVE_{m,t}** y **CVR_{m,t}** a través de la variable binaria para definir la igualdad entre las variables. **CVR_{m,t}** es una variable que toma valores positivos o iguales a cero, indicando la cantidad de vencimiento en un periodo determinado. Cuando **CVE_{m,t}** toma valores negativos, indica que no hay vencimiento, por lo tanto la variable binaria toma el valor de cero y la restricciones 16, define que la variable **CVR_{m,t}** también toma el valor de cero.

FUNCIÓN OBJETIVO			
Variable	Tipo	Descripción – Ecuación	Unidades
MAR	Max	<p>Rentabilidad total: ventas (producto terminado y materias primas cárnicas comerciales) menos costos almacenar (animales, materia prima cárnica refrigerada, congelada, no cárnica y productos terminados) menos costos de comprar (canales, materia prima cárnica y no cárnica) menos costos procesar (canales y productos terminados) menos costos de congelar (materia prima cárnica) menos costos de descongelar (materia prima cárnica) menos costos de vencimiento (materia prima cárnica).</p> $\sum_{p \in \text{PTS}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{PVPT}_p \times \text{DEPT}_{p,t}) + \sum_{m \in \text{MCC}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{PVMP}_m \times \text{VMP}_{m,t}) - \sum_{l \in \text{ANI}} \sum_{c \in \text{CAA}(l)} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COAA}_l \times \text{ICA}_{c,t}) - \sum_{c \in \text{CAN}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COCA}_c \times \text{CCC}_{c,t}) - \sum_{c \in \text{CAN}} \sum_{a \in \text{ALC}(c)} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COPR}_{c,a} \times \text{CCA}_{c,a,t}) - \sum_{m \in \text{MPC}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COCO}_m \times \text{CCO}_{m,t}) - \sum_{m \in \text{MPC}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{CDES}_m \times \text{CDE}_{m,t}) - \sum_{m \in \text{MPC}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COAC}_m \times \text{IMC}_{m,t}) - \sum_{m \in \text{MPC}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COAO}_m \times \text{ICO}_{m,t}) - \sum_{s \in \text{SUP}} \sum_{m \in \text{MPS}(s)} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COSC}_{s,m} \times \text{CMS}_{s,m,t}) - \sum_{s \in \text{SUP}} \sum_{n \in \text{MNS}(s)} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COSN}_{s,n} \times \text{CNS}_{s,n,t}) - \sum_{n \in \text{MNC}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COAN}_n \times \text{IMN}_{n,t}) - \sum_{p \in \text{PTS}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COPT}_p \times \text{CPT}_{p,t}) - \sum_{p \in \text{PTS}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{COAP}_p \times \text{IPT}_{p,t}) - \sum_{m \in \text{MPC}} \sum_{t \in \text{PHO}} (\text{PVMP}_m \times \text{CVR}_{m,t})$ <p>CONJUNTOS ANI Animales ALC(c) Alternativas de corte del canal CAA(l) Canales del animal CAN Canales MNS(s) Materias primas no cárnicas del proveedor MCC Materias primas cárnicas comerciales MPC Materias primas cárnicas MPS(s) Materias primas cárnicas del proveedor PTS Productos terminados PHO Periodos del horizonte de planificación SUP Proveedores</p> <p>PARÁMETROS COAA_l Costo almacenamiento de animales COAC_m Costo de almacenamiento de materia prima cárnica COAO_m Costo de almacenamiento de materia prima cárnica congelada COAN_n Costo de almacenamiento de materia prima no cárnica COCA_c Costo compra del canal COCO_m Costo de congelar materia prima cárnica COSC_{s,m} Costo de compra de materia prima cárnica COSN_{s,n} Costo de compra de materia prima no cárnica COPR_{c,a} Costo de procesamiento alternativa canal CDES_m Costo de descongelar materia prima cárnica COPT_p Costo de procesamiento producto terminado DEPT_{p,t} Demanda de producto terminado PVMP_m Precio de venta de materia prima cárnica PVPT_p Precio de venta de producto terminado</p> <p>VARIABLES CCC_{c,t} Cantidad de canales a comprar por periodo CCA_{c,a,t} Cantidad de canales a deshuesar por alternativa de corte por periodo CCO_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica congelada CMS_{s,m,t} Cantidad de materia prima cárnica comprada al proveedor CNS_{s,n,t} Cantidad de materia prima no cárnica comprada al proveedor CVR_{m,t} Cantidad de materia prima cárnica que se vence en periodo t CPT_{p,t} Cantidad a producir de producto terminado</p>	\$

		ICA_{c,t} Inventario de canales al finalizar el periodo IMC_{m,t} Inventario de materia prima cárnica al final del periodo ICO_{m,t} Inventario de materia prima cárnica congelada al finalizar el periodo IPT_{p,t} Inventario de producto terminado al finalizar el periodo IMN_{n,t} Inventario de materia prima no cárnica al finalizar el periodo VMP_{m,t} Ventas de materia prima cárnica	
--	--	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

Tabla 11. Función objetivo Modelo POCSAC. Fuente (Elaboración propia).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta el análisis de una instancia del problema POCSAC con el objetivo de verificar el cumplimiento de las restricciones del problema. En la Tabla 12 se presentan las características principales de la instancia.

Tipo de Elemento	Cantidad	Descripción
Canales	2	RC: Res comprada y RP: Res propia
Alternativas de corte de canales	2	R1: Alternativa de corte 1 y R2: Alternativa de corte 2.
Materias primas cárnicas	3	MCC1: Materia prima cárnica comercial 1 de consumo congelado MCI1: Materia prima cárnica Industrial 1 de consumo refrigerado MCI2: Materia prima cárnica Industrial 2 de consumo congelado
Materias primas no cárnicas	4	MP1: Materia prima no cárnica 1 MP2: Materia prima no cárnica 2 MP3: Materia prima no cárnica 3 MP4: Materia prima no cárnica 4
Productos terminados	4	PT1: Producto tipo 1 PT2: Producto tipo 2 PT3: Producto tipo 3 PT4: Producto tipo 4
Procesos	5	DHC: Deshuese CON: Congelación DES: Descongelación PDN1: Producción línea 1 PDN2: Producción línea 2
Proveedores	1	SUP: Proveedor genérico

Tabla 12. Características modelo POCSAC simplificado. Fuente (Elaboración propia).

Este modelo se corre en un horizonte de 4 días hacia adelante incluyendo la lectura del pasado en 4 días hacia atrás, esto con el fin de leer la historia de variables importantes para la definición de la cantidad a vencer. La vida útil para las materias primas cárnicas refrigeradas se define en 3 días.

Por motivos de confidencialidad el análisis de resultados del presente trabajo se realiza sobre unos datos modificados, de la realidad de la cadena de suministro modelada. Su análisis se realiza para presentar al lector la validación del modelo POCSAC.

El modelo de programación lineal entera mixta se implementó en AIMMS 4.16 y las corridas se realizaron utilizando el solver Gurobi 6.0 en un computador Dell Core i7-416M Cpu @3.00 Ghz con 16 Gb de RAM en un sistema operativo de 64 bits.

A continuación se presenta una serie de gráficos y tablas que reportan los resultados de la corrida con los elementos descritos en la tabla anterior, en los cuales se podrá verificar la consistencia del modelo.

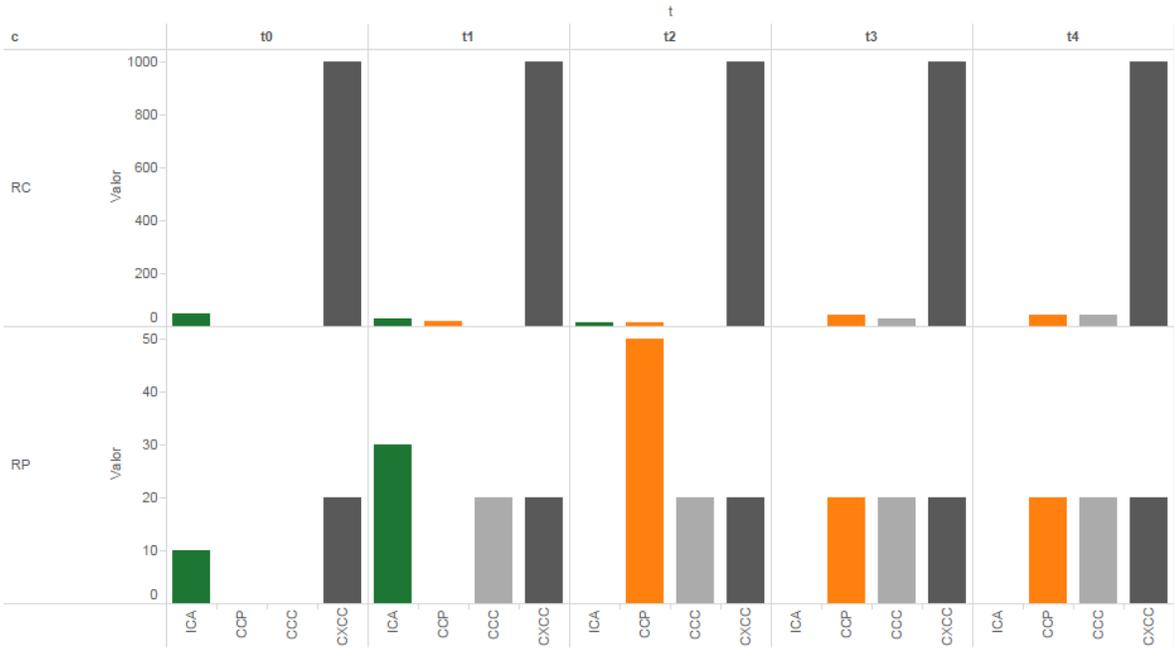


Figura 10. Resultados de canales Modelo POCSAC simplificado.
Fuente: (Elaboración propia).

En la Figura 10 se observa por tipo de canal RC y RP, la cantidad de canales mantenida en inventario (ICA), la cantidad de canales comprados (CCC), la cantidad de canales procesados (CCP) y la capacidad máxima de compra de canales por cada periodo (CXCC).

Como se puede observar, la cantidad de canales comprados en cada periodo es igual a la capacidad máxima de compra para el canal tipo RP: Res propia. La necesidad que queda faltante se abastece de la compra del canal tipo RC: Res comprada. Esto es coherente con los costos asociados y las capacidades, ya que es más económico abastecerse de canales propios que de comprados aunque la capacidad es mayor para este último.

En el periodo t1 y t2 se procesan canales tipo RC con el inventario inicial, en cambio con el canal tipo RP no hay procesamiento en t1, sólo hay compras para mantener en inventario y en t2 se procesa lo que había en inventario más la compra de ese periodo para satisfacer el incremento de demanda en t2.

La Figura 11 que se muestra a continuación presenta la relación que existe entre la cantidad de canales deshuesados por alternativa de corte (CCA) y la cantidad de canales procesados por tipo de canal (CCP). Como se puede observar al agregar todos los canales

deshuesados por alternativa periodo equivale al mismo número de canales procesados para el mismo periodo.

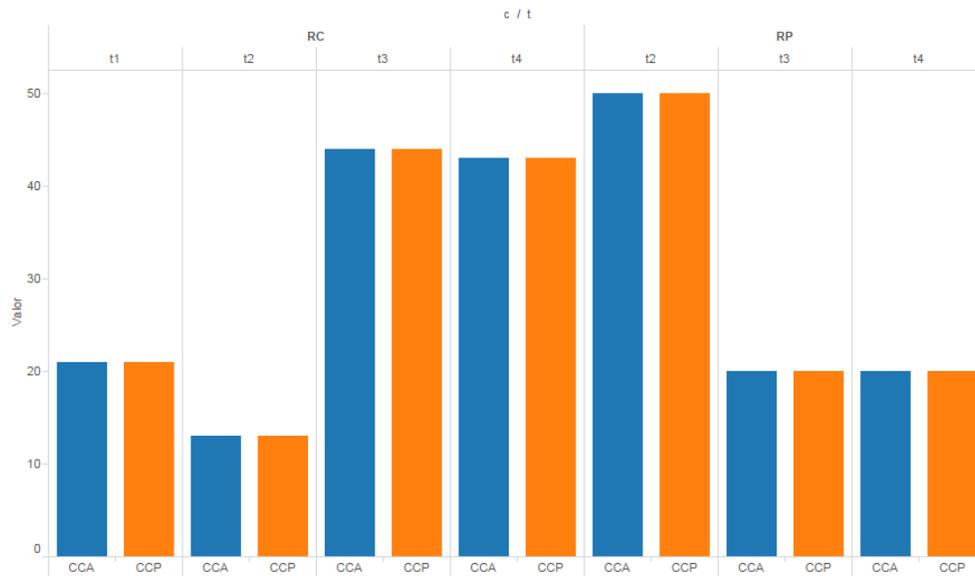


Figura 11. Resultados relación canales alternativas y Canales procesados Modelo POCSAC simplificado. Fuente: (Elaboración propia).

En la Figura 12 se observa que la alternativa seleccionada para el deshuese en cada periodo es la alternativa R1, esto aplica tanto para el canal tipo RC como RP.

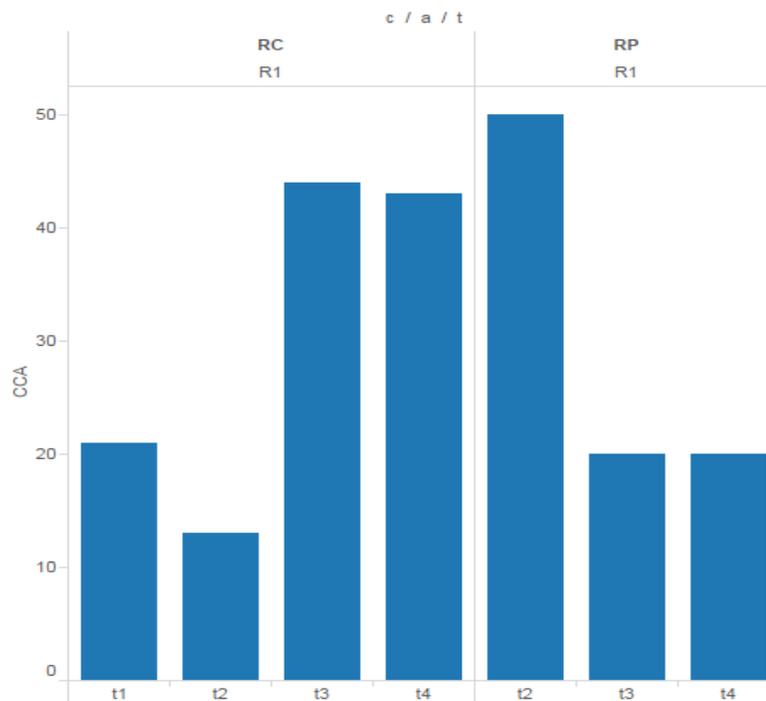


Figura 12. Resultados Cantidad canales a deshuesar por alternativa de corte Modelo POCSAC Simplificado. Fuente: (Elaboración propia).

En la figura 13 se ilustra que los tiempos de deshuese por periodo (PTPR) no superan la capacidad máxima disponible (TXPR) del tiempo de proceso de DHC: Deshuese. El tiempo requerido no supera las 10 horas, lo que significa que con sólo 1 turno laboral más algunas horas extras puede cumplir con la necesidad de deshuese de cada periodo.

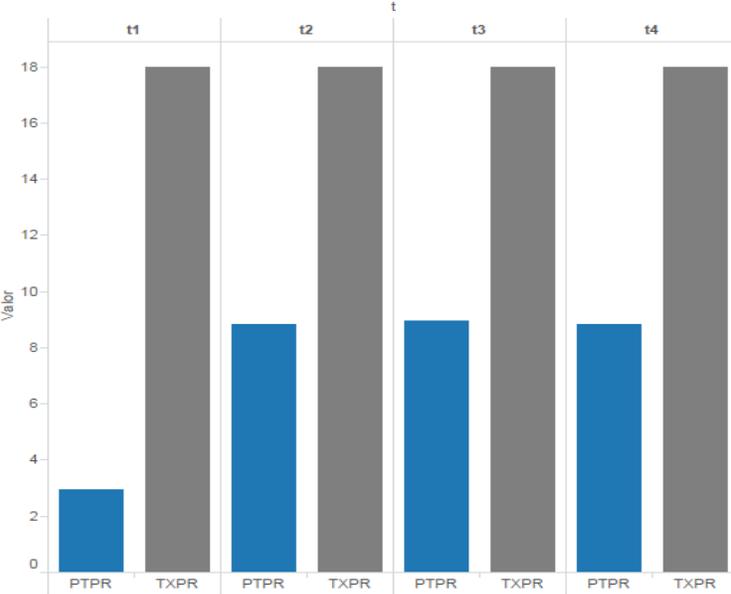


Figura 13. Resultados tiempo procesamiento canales Modelo POCSAC simplificado. Fuente: (Elaboración propia)

La figura 14 muestra que la cantidad de canales mantenida en inventario (ICA) no supera la capacidad máxima (CXAA) de 500 canales, manteniendo un bajo inventario en los primeros periodos y luego cantidad cero.

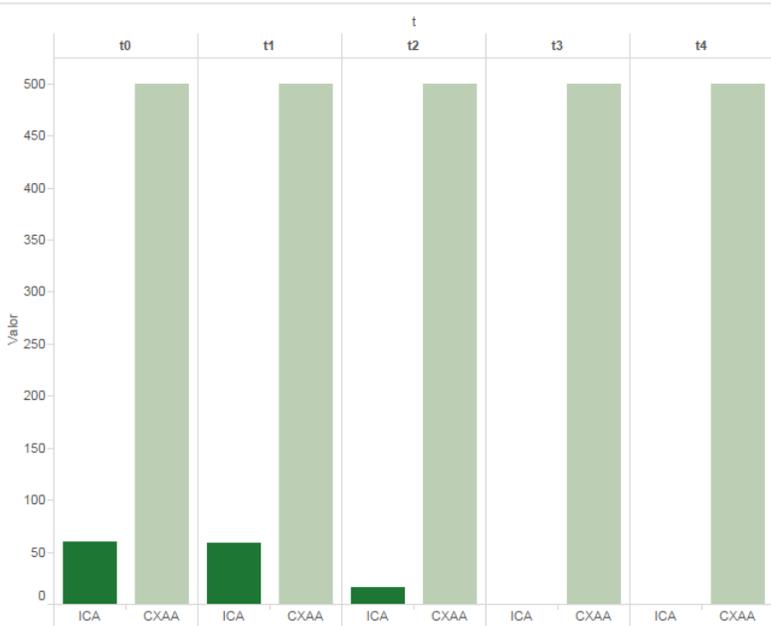


Figura 14. Resultados ocupación de almacenamiento canales. Fuente: (Elaboración propia)

En la tabla 13 se encuentra el resumen de todas las variables relacionadas con la materia prima cárnica por periodo. Como se puede observar para la materia prima cárnica MCC1 su estado de consumo es congelado ya que todo lo que sale del deshuese (CMD) se congela (CCO) y por ende no tiene restricción de vida útil. MCC1 es una materia prima cárnica comercial, lo que significa que no es una restricción cumplir el 100% de la demanda dado que la prioridad la tiene el abastecimiento de las materias primas cárnicas para procesos industriales posteriores como lo son MCI1 y MCI2.

m	t	IMC	ICO	CMD	CCO	CCR	CDE	CMS	DEMC	VMP	CMA	CVE	CVR	BIV
MCC1	t0	0	1.850	0	0	0	0		0	2.500	0	0	0	0
	t1	0	88	738	738	0	0		2.500	2.500	0	0	0	0
	t2	0	0	2.214	2.214	0	0		2.500	2.302	0	0	0	0
	t3	0	0	2.249	2.249	0	0		2.500	2.249	0	0	0	0
	t4	0	0	2.214	2.214	0	0		2.500	2.214	0	0	0	0
MCI1	t0	70.918	10.000	0	0	23.101	0		0	18.101	0	0	0	0
	t1	43.012	10.542	542	542	0	0		0	500	500	27.406	27.406	1
	t2	23.101	12.168	1.626	1.626	0	0		0	18.000	18.000	1.911	1.911	1
	t3	0	8.854	1.652	0	1.652	3.247		0	28.000	28.000	-4.899	0	0
	t4	0	9.680	1.626	826	800	0		0	800	800	-5.699	0	0
MCI2	t0	0	3.392	0	0	0	0		0	3.481	0	0	0	0
	t1	0	48	1.656	1.656	0	0		0	5.000	5.000	0	0	0
	t2	0	15	4.967	4.967	0	0		0	5.000	5.000	0	0	0
	t3	0	61	5.046	5.046	0	0		0	5.000	5.000	0	0	0
	t4	0	29	4.967	4.967	0	0		0	5.000	5.000	0	0	0

Tabla 13. Resultados materia prima cárnica Modelo POCSAC Simplificado.
Fuente: (Elaboración propia)

MCI2 es una materia prima cárnica de consumo en estado de congelación, como se puede observar de la tabla 13 lo que se deshuesa (CMD) pasa al proceso de congelación (CCO) y no existen vencimientos por vida útil. También la venta de esta materia prima cárnica (VMP) equivale a la cantidad cárnica requerida para el consumo (CMA), es decir, la venta es equivalente al consumo requerido en los procesos productivos posteriores.

Ahora se propone revisar el detalle de los resultados relacionados con la materia prima cárnica MCI1 mostrados en la tabla 14. Esta materia prima es de consumo refrigerado y tiene una vida útil de 3 días. Es importante recordar que toda materia prima cárnica que se consume en estado refrigerado tiene la alternativa de pasar por los procesos de congelación y descongelación para ampliar su vida útil a cambio de un mayor costo.

m	t	IMC	ICO	CCR	CDE	CCO	VMP	CVR	CVE	BIV	CMA	CMD
MCI1	t-4	399	0	18.500	0	0	18.101	0	0	0	0	0
	t-3	2.209	0	19.911	0	0	18.101	0	0	0	0	0
	t-2	64.108	10.000	80.000	0	10.000	18.101	0	0	0	0	0
	t-1	65.918	10.000	19.911	0	0	18.101	0	0	0	0	0
	t0	70.918	10.000	23.101	0	0	18.101	0	0	0	0	0
	t1	43.012	10.542	0	0	542	500	27.406	27.406	1	500	542
	t2	23.101	12.168	0	0	1.626	18.000	1.911	1.911	1	18.000	1.626
	t3	0	8.854	1.652	3.247	0	28.000	0	-4.899	0	28.000	1.652
	t4	0	9.680	800	0	826	800	0	-5.699	0	800	1.626

Tabla 14. Resultados materia prima cárnica industrial1 Modelo POCSAC simplificado.
Fuente: (Elaboración propia)

En la tabla 14 se muestran los resultados de las variables asociadas a la materia prima cárnica MCI1 para todo el horizonte del problema, además se incluyen los valores de las variables del pasado, que en realidad no son variables, ya que son parámetros de entrada al modelo.

Como se puede observar la variable binaria que determina si hay vencimiento o no (BIV), toma valores de 1 en los periodos t1 y t2 indicando que hay vencimiento. La variable que estima la cantidad a vencerse (CVE) toma valores positivos en t1 y t2, indicando igualmente que hay vencimiento real en esa cantidad (CVR) y cuando toma valores negativos la conclusión es que no hay vencimiento por lo tanto BIV y CVR son ceros.

¿Cómo se llega al valor que el vencimiento real de MCI1 en t1 es 27.406 Kg?

El periodo t1 es el último día de vencimiento para un lote de producción que debió producirse en t-2 (vida útil de 3 días que empiezan a contarse al día siguiente de la producción).

Ahora de la tabla 10 de restricciones del modelo, la restricción 11 presenta la ecuación que define CVE como se muestra a continuación:

$$(R11) \quad CVE_{m,u} = \sum_{uu \in PIV(m,u)} IMC_{m,uu} + \sum_{uu \in PDE(m,u)} (CCR_{m,uu} + CDE_{m,uu}) - \sum_{uu \in PLB(m,u)} CVR_{m,uu} - \sum_{uu \in PLI(m,u)} VMP_{m,uu}$$

Antes de resolverla se identifican los siguientes conjuntos para obtener la ecuación (R11'):

PIV (MCI1, t1): Periodo anterior al periodo de producción que se vence en t1 = { t-3 }

PDE (MCI1, t1): Periodo de producción que se vence en t1 = { t-2 }

PLB (MCI1, t1): Periodos de vida de la producción que se vence en t1 menos el último periodo = { t-2, t-1, t0 }

PLI (MCI1, t1): Periodos de vida de la producción que se vence en t1 = { t-2, t-1, t0, t1 }

$$(R11') \quad CVE_{(MCI1,t1)} = IMC_{MCI1,t-3} + CCR_{MCI1,t-2} + CDE_{MCI1,t-2} - \sum_{uu \in PLB(MCI1,t1)} CVR_{MCI1,uu} - \sum_{uu \in PLI(MCI1,t1)} VMP_{MCI1,uu}$$

La primera parte de la ecuación (R11') equivale al inventario en el periodo t-3, 2.209 Kg. La segunda parte de la ecuación equivale a la cantidad que se refrigera más lo que se descongela en el periodo t-2, 80.000 Kg. La tercera parte de la ecuación se refiere a los vencimientos de los periodos anteriores desde t-2 hasta t0 incluyéndolo, este valor es cero. Y la última parte de la ecuación es la sumatoria de las ventas o mejor dicho de las cantidades demandadas por los procesos productivos posteriores para los periodos { t-2, t-1, t0, t1}, esto equivale a sumar $18.101+18.101+18.101+500 = 54.800$ Kg.

Ahora, $CVE (MCI1,t1) = 2.209 + 80.000 - 0 - 54.800 = 27.409$ Kg cantidad positiva que equivale al vencimiento estimado en t1 como se muestra en la tabla 14.

Como CVE es una cantidad positiva y BIV toma el valor de 1, las restricciones (14 y 15) de la tabla 10 que establecen la relación entre cantidad de vencimiento real (CVR) y cantidad de vencimiento estimado (CVE) definen la igualdad entre estas dos variables determinando que la cantidad real de vencimiento en el periodo t1 es 27.409 Kg.

$$(R14) \quad CVR_{m,t} \geq CVE_{m,t} - MCVR_{m,t} \times (1 - BIV_{m,t})$$

$$(R15) \quad CVR_{m,t} \leq CVE_{m,t} + MCVR_{m,t} \times (1 - BIV_{m,t})$$

La materia prima cárnica MCI1 presenta un vencimiento alto en t1, en t2 se vence una cantidad menor y lo que se deshuesa (CMD) entra directamente a congelarse (CCO) atendiendo la demanda con el inventario disponible. En el periodo t3, se atiende la demanda con el inventario que queda al final del día en t2 más la cantidad que se deshuesa directamente refrigerada (CCR) más la cantidad que se descongela (CDE). En t4 de la cantidad que se deshuesa (CMD) se atiende la demanda de 800 Kg (VMP o CMA) directamente refrigerada (CCR) y el resto se congela (CCO) creciendo el inventario de materia prima cárnica congelada (ICO).

El vencimiento para la materia prima cárnica MCI1 se presenta en los primeros periodos por que se definen unas condiciones iniciales sub óptimas para comprobar que el modelo calcule el vencimiento real. Como se puede observar también para los últimos periodos, el modelo trata de no dejar vencer la materia prima cárnica porque el vencimiento es equivalente a la destrucción de valor afectando la función objetivo del modelo.

En la figura 15 se muestran los resultados de la cantidad requerida de almacenamiento para la materia prima cárnica refrigerada (IMC) y congelada (ICO) en cada almacén. Como se puede observar el nivel de inventario es inferior a la capacidad máxima de almacenamiento de materia prima cárnica refrigerada (CXAC) y congelada (CXAO).

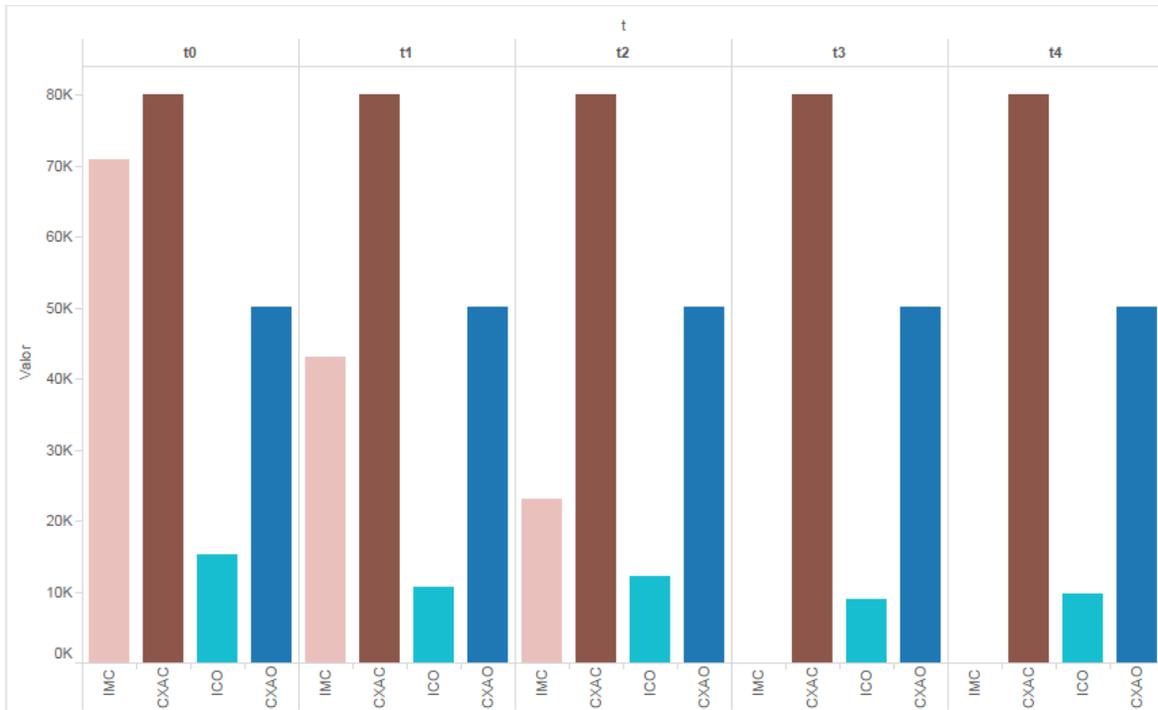


Figura 15. Resultados almacenamiento de materia prima cárnica refrigerada y congelada. Fuente: (Elaboración propia).

La figura 16 muestra los tiempos requeridos en los procesos de congelación (PTCO) y descongelación (PTDE) comparados con la capacidad máxima de cada proceso en cada periodo, congelación (TXCO) y descongelación (TXDE). La descongelación sólo se presenta en el periodo t3 no superior a 4 horas de una capacidad de 18 horas, por el contrario para el proceso de congelación se requiere alrededor de 8 horas día con excepción del periodo t1 que sólo requiere 3 horas no superior a la capacidad.

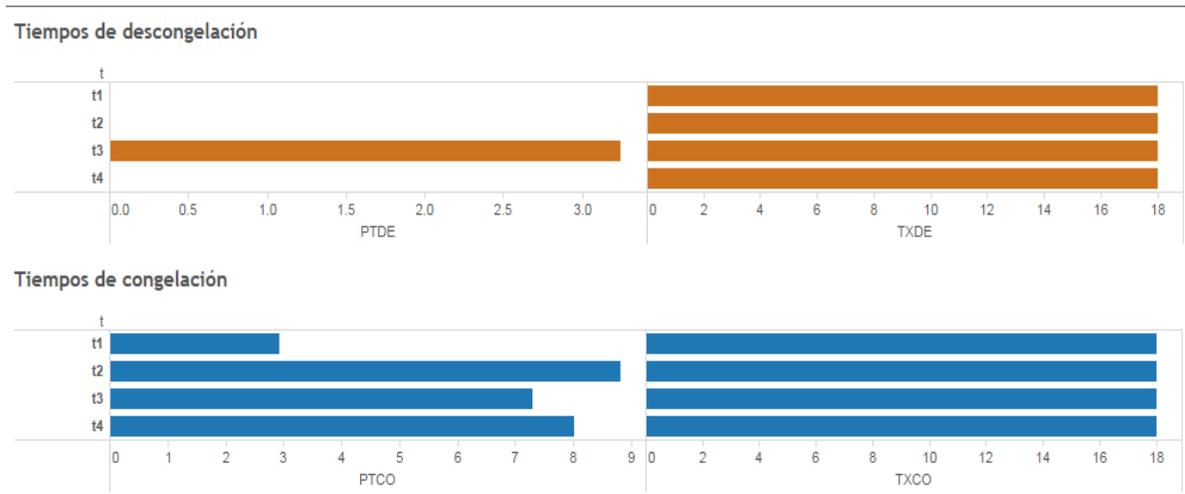


Figura 16. Resultados tiempo de congelación y descongelación Modelo POCSAC Simplificado. Fuente: (Elaboración propia).

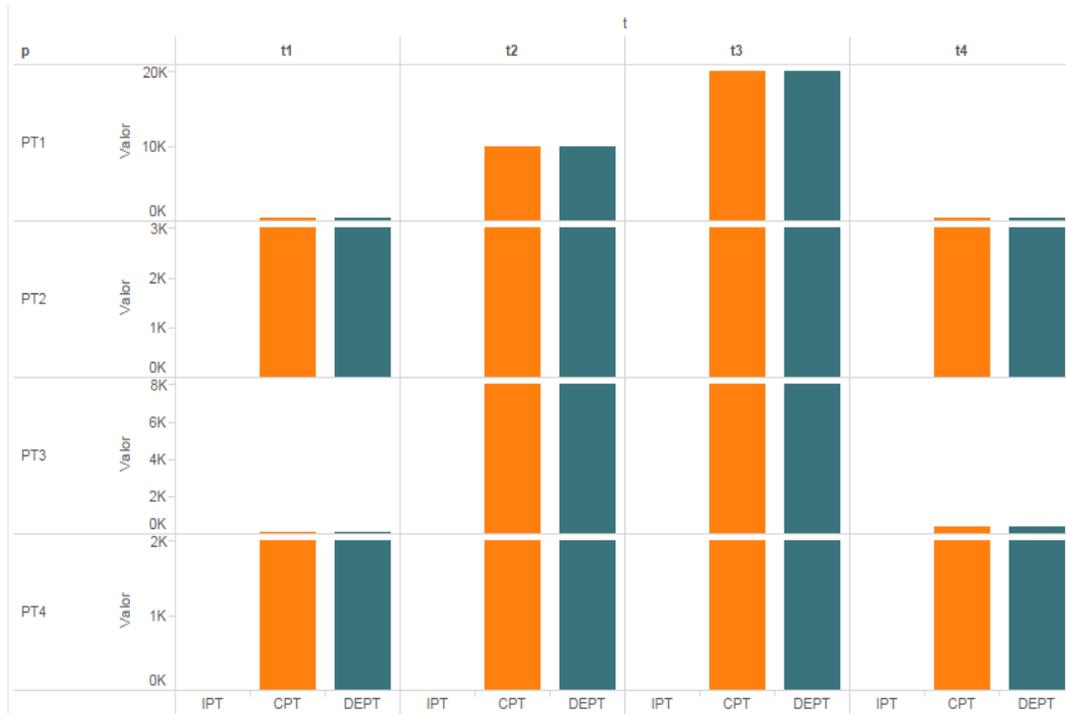


Figura 17. Resultados producto terminado Modelo PCSAC Simplificado. Fuente: (Elaboración Propia)

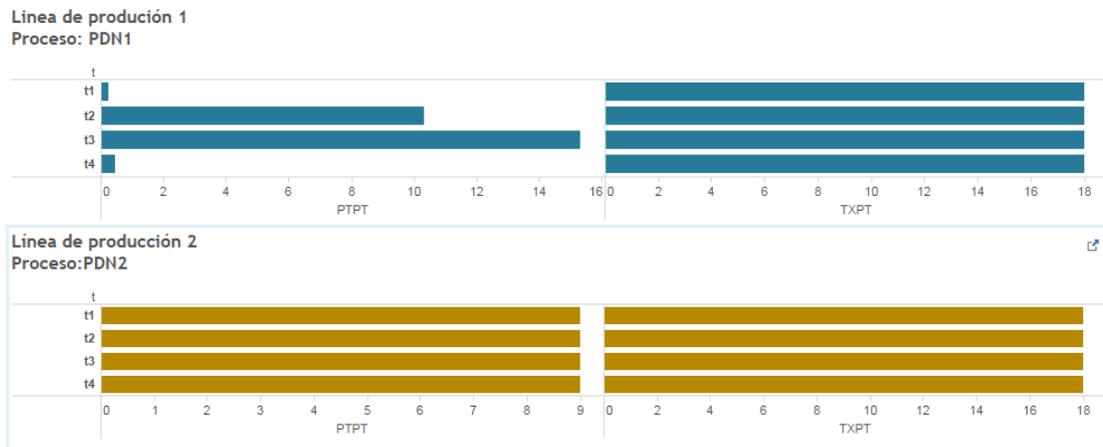


Figura 18. Resultados tiempos de producción por recurso Modelo POC SAC Simplificado. Fuente: (Elaboración propia).

En las figuras 17 y 18, se resumen los resultados de los productos terminados donde se evidencia el cumplimiento de la demanda en cada periodo, dado que la cantidad producida de producto terminado (CPT) es igual a la demanda (DEPT); y el cumplimiento del tiempo requerido de producción para cada proceso PDN1: Línea de producción 1 y PDN2: Línea de producción 2, dado que los tiempos requeridos por cada proceso no superan la

capacidad máxima (TXPT). Vale la pena recordar que el producto PT1 y PT3 pasan por PDN1 y los productos restantes PT2 y PT4 pasan por PDN2.

Adicionalmente de la figura 17 se observa que el modelo no sugiere mantener en inventario de ningún producto en el tiempo (IPT), esto se debe a que no hay restricción de capacidad de producción, es costoso el almacenamiento del producto terminado y no hay tiempos de aprovisionamiento que limiten atender la demanda con la producción del mismo día.

Lo mismo ocurre para las materias primas no cárnicas en la Figura 19. La cantidad de materia prima no cárnica requerida para la producción (CMN) es exactamente igual a la cantidad comprada al proveedor (CNS) debido a que no hay restricción de capacidad de compra, por lo tanto el modelo no sugiere inventario de estos materiales.

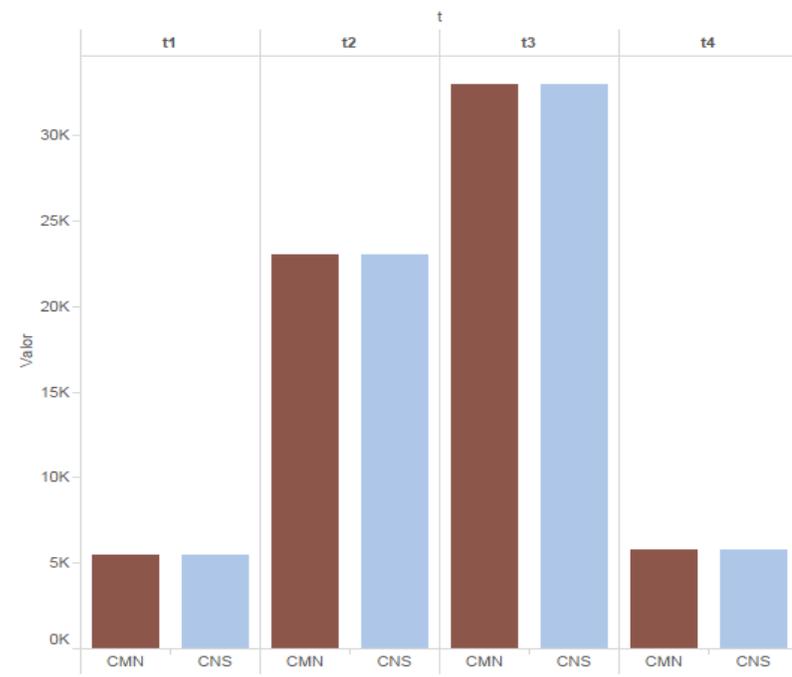


Figura 19. Resultados compras de materia prima no cárnica Modelo POCSAC Simplificado. Fuente: Tableau (Elaboración propia).

	t			
	t1	t2	t3	t4
PINP	110.000.000	460.000.000	660.000.000	116.000.000
PINM	42.500.000	39.130.108	38.232.463	37.635.081
PCAA	5.900	1.600	0	0
PCCC	16.000.000	16.000.000	44.000.000	59.000.000
PCPC	2.100.000	5.300.000	6.000.000	5.900.000
PCCO	2.936	8.807	7.295	8.007
PCDE	0	0	3.247	0
PCAC	4.301.200	2.310.100	0	0
PCAO	10.678	12.183	8.915	9.708
PCPT	1.100.000	4.600.000	6.600.000	1.160.000
PCVM	274.060.000	19.110.000	0	0
PCSN	55.000	230.000	330.000	58.000
PCAN	0	0	0	0
PCAP	0	0	0	0
PCSM	0	0	0	0
UTIL	-145.135.713	451.557.418	641.283.005	87.499.366

Tabla 15. Resultados financieros Modelo POCSAC Simplificado. Fuente:(Elaboración Propia).

Los resultados de la función objetivo se detallan en la tabla 15 por periodo, donde PINP: Ingresos de la venta del producto terminado; PINM: Ingresos de la venta de materia prima cárnica comercial; PCAA: Costo de almacenamiento de canales; PCCC: Costo de compra de canales; PCPC: Costo de procesamiento de canales; PCCO: Costo de congelar materia prima cárnica; PCDE: Costo de descongelar la materia prima cárnica; PCAC: Costo de almacenamiento de materia prima cárnica refrigerada; PCAO: Costo de almacenamiento de materia prima cárnica congelada; PCPT: Costo de procesamiento de productos terminados; PCVM: Costo del vencimiento de materia prima cárnica; PCAN: Costo de almacenamiento de materia prima no cárnica; PCSN: Costo de compra de materia prima no cárnica; PCAN: Costo de almacenamiento de materia prima no cárnica; PCAP: Costo de almacenamiento de producto terminado; PCSM: Costo de compra de materia prima cárnica y UTIL: Utilidad Operativa (Ingresos menos costos operativos).

Los resultados muestran rentabilidad para el horizonte analizado y cumplimiento en todas las restricciones.

6. CONCLUSIONES

Una cadena de suministro de alimentos cárnicos es un sistema complejo para la modelación por el carácter perecedero de las materias prima cárnicas y los productos terminados, por las múltiples alternativas para el deshuese de canales y por las diferentes formas de consumo de materia prima cárnica refrigerada pasando por varios procesos de congelación, descongelación o refrigeración. En el presente trabajo se desarrolló y se implementó un modelo matemático que tuviese en cuenta la vida útil de las materias primas cárnicas y la modelación del consumo de materias primas cárnicas refrigeradas.

En la modelación de la vida útil, la cantidad de materia prima cárnica a venderse, se define a través del desbalance entre la oferta y la demanda en una ventana de tiempo igual a la vida útil de la materia prima cárnica.

La programación matemática es una herramienta que permitió a través de un lenguaje estructurado representar detalladamente procesos complejos e integrarlos para la planeación operativa de una cadena de suministro de alimentos cárnicos, donde se presentan procesos como: el deshuese de canales en materias primas cárnicas, considerando todas las alternativas de cortes posibles; el proceso de congelación y descongelación, involucrando el estado de consumo y la vida útil; y los demás procesos de transformación que involucran diferentes entradas y salidas modelados en el presente trabajo, a través de restricciones de balances de inventarios, capacidad de almacenamiento, disponibilidad del proceso y relación de entradas y salidas.

La participación del 27% de las cadenas cárnicas en Colombia que finalizan con la producción de carnes frías y embutidas sostenida en el tiempo desde el año 2002 hasta el 2013, hacen que exista la oportunidad de implementar software para la planeación integrada de las operaciones permitiendo maximizar su rentabilidad y gestionar mejor sus inventarios bajo la restricción de vida útil de sus materias primas cárnicas y productos terminados.

7. TRABAJO FUTURO

Integrar al modelo de planear operaciones la cadena de suministro completa de alimentos cárnicos, partiendo de la producción agropecuaria donde se integren los procesos de cría y levante tanto de ganado como de animales de corral, incluyendo las plantas de beneficio, todos los transportes que se dan entre cada eslabón de la cadena y sus tiempos de aprovisionamiento, ya que el problema modelado asumía procesos continuos en una misma instalación.

Modelar la planeación en un horizonte más amplio donde permita visualizar y analizar el impacto de restringir la vida útil de los productos terminados, los cuales por lo general presentan una vida útil superior a un mes.

Incorporar la modelación de la incertidumbre en la demanda de los productos terminados y materias primas cárnicas por la gran variabilidad que este parámetro presenta en un sistema real y el impacto en la planeación de las operaciones.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, A., Shankar, R., & Tiwari, M. K. (2007). Modeling agility of supply chain. *Industrial Marketing Management*, 36(4), 443–457.
<http://doi.org/10.1016/j.indmarman.2005.12.004>
- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1–20.
<http://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- Akkerman R., Farahani P., Grunow M. (2010) Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges, *OR Spectrum* 32 (4) 863–904.
- Amorim, P., Gunther & Almada-Lobo, B. (2012) Multi-objective integrated production and distribution planning of perishable products. *Int. J. Production Economics* 138 , 89-101.
<http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.005>
- Arbós, L. C. (2012). Planificación de la producción. Gestión de materiales: Organización de la producción y dirección de operaciones. Ediciones Díaz de Santos. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=NMFH28s2MeQC&pgis=1>
- Bakker M., Riezebos J., Teunter R. H. (2012). Review of inventory systems with deterioration since 2001. *European Journal of Operational Research* 221. 275-284.
- Beamon, B. M. (1998). Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods. *International Journal of Production Economics*, 55(1), 1–22.
[http://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00079-6](http://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6)
- Departamento Nacional de Planeación (2014). Análisis Cadenas Productivas: Cadena Cárnicos. <https://www.dnp.gov.co/programas/desarrollo-empresarial/Paginas/analisis-cadenas-productivas.aspx>
- Federación Colombiana de Ganaderos (2016). Inventario Bovino Nacional. <http://www.fedegan.org.co/estadisticas/inventario-bovino-nacional>
- Federación Colombiana de Ganaderos (2016). Producción Colombia: Beneficio Bovino. <http://www.fedegan.org.co/estadisticas/produccion-0>
- Fondo Nacional De La Porcicultura (2016). Informe económico del mes de febrero 2016. http://www.asoporcicultores.co/porcicultores/index.php?option=com_porcicultores&view=cifras&Itemid=104&layout=1&informe=2016&ident=103
- Ghare P.N., Schrader G.F.(1963). A model for exponentially decaying inventories. *The Journal of Industrial Engineering* 238–243.

- Goyal S.K., Giri B.C.(2001). Recent trends in modeling of deteriorating inventory. *European Journal of Operational Research* 134 (1) 1–16.
- Grupo Nutresa (2015). Cárnico. <http://www.gruponutresa.com/es/content/carnico>.
- Harris F.W.(1913). How many parts to make at once. *Factory, The Magazine of Management* 10 (2) 135–136, 15.
- Kallrath, J. (2006). *Real Optimization with SAP® APO*. (Springer, Ed.). Berlin.
- Karaesmen I.Z., Scheller A. Wolf, Deniz B., Kempf K.G., Keskinocak P., Uzsoy R.(2011), Planning production and inventories in the extended enterprise, in: K.G. Kempf, P. Keskinocak, R. Uzsoy (Eds.), *A State of the Art Handbook, Volume 1*, vol. 151, pp. 393–436
- Moon, C., Lee, Y. H., Jeong, C. S., & Yun, Y. (2008). Integrated process planning and scheduling in a supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 54(4), 1048–1061. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2007.06.018>
- Mourtzis, D., & Doukas, M. (2014). Design and planning of manufacturing networks for mass customisation and personalisation: Challenges and Outlook. *Procedia CIRP*, 19(RoMaC), 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.004>
- Muñoz, E., Capón-García, E., Laínez-Aguirre, J. M., España, A., & Puigjaner, L. (2014). Supply chain planning and scheduling integration using Lagrangian decomposition in a knowledge management environment. *Computers & Chemical Engineering*, 72, 52–67. <http://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.06.002>
- Nahmias S.(2011), in: F.S. Hillier (Ed.), *Perishable Inventory Systems*, vol. 160, Springer US, Boston, MA, p. 80.
- Pahl J., Voss S., Woodruff D.L. (2007), Production planning with deterioration constraints: a survey, in: 19th International Conference on Production Research, p. 6.
- Papageorgiou, L. G. (2009). Supply chain optimisation for the process industries: Advances and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 33(12), 1931–1938. <http://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.06.014>
- Pierskalla W.P.(2005), Supply chain management of blood banks, in: M.L. Brandeau, F. Sainfort, W.P. Pierskalla (Eds.), *Operations Research and Health Care*, vol. 70, pp. 103–145.
- Pinedo, M. L. (2011). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems* (Fourth Edi).
- Rong, A., Akkerman, R., & Grunow, M. (2011). Int . J . Production Economics An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *Intern. Journal of Production Economics*, 131(1), 421–429. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.11.026>

- Sanchez, G. (2008). *Cuantificación y generación de valor en la cadena de suministro extendida*. Del Blanco editores. Retrieved from <https://books.google.com/books?id=mNuUduFpNNEC&pgis=1>
- Shah, N. K., & Ierapetritou, M. G. (2012). Integrated production planning and scheduling optimization of multisite, multiproduct process industry. *Computers and Chemical Engineering*, 37, 214–226. <http://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.08.007>
- Wagner, H. M., & Whitin, T. M. (1958). Dynamic Version of the Economic Lot Size Model. *Management Science*, 5(1), 89–96. <http://doi.org/10.1287/mnsc.5.1.89>
- Whitin, T.M. (1953), *The Theory of Inventory Management*, Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- Yu, M., & Nagurney, A. (2013). Competitive food supply chain networks with application to fresh produce. *European Journal of Operational Research*, 224(2), 273–282. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.033>
- Yu, S. (2012). Supply Chain Distribution Network--- Optimized Design Model and its Solution Based on Time Constraints, 941–945. <http://doi.org/10.1109/ISdea.2011.74>