

Modelo para la planificación operativa del transporte en una cadena de suministro del sector del automóvil*

Manuel Díaz-Madroño¹, Josefa Mula¹, David Peidro¹

¹ Centro de Investigación de Gestión e Ingeniería de Producción. Universidad Politécnica de Valencia.
fcodiama@cigip.upv.es, fmula@cigip.upv.es, dapeipa@cigip.upv.es

Palabras clave: Planificación de transporte, aprovisionamiento, logística, programación lineal.

1. Introducción

En los últimos años puede identificarse un nuevo enfoque para el análisis de la cadena de suministro basado en la integración de diferentes funciones (compras, producción, distribución y almacenamiento) en un único modelo de optimización. La idea básica de este enfoque es la optimización simultánea de las variables de decisión de las diferentes funciones que anteriormente eran tratadas de forma secuencial (Park, 2005)

A pesar de que es frecuente encontrar en la literatura el tratamiento de la integración de la planificación de la producción y el transporte desde la perspectiva del nivel de decisión estratégico (Hinojosa et al., 2000; Syam, 2002; Cordeau et al., 2006), es menos habitual considerar la integración de la producción y la logística desde el punto de vista operativo, siendo tratadas generalmente de modo independiente y separado (Chandra y Fisher, 1994; Ertogral et al., 1998; Jin et al., 2008). En la industria del automóvil, es una práctica común el desarrollo de planes de producción considerando muy pocos requisitos logísticos (Spencer et al., 1994). Asimismo, la elección del modo de transporte, la consolidación de envíos de productos, componentes y materias primas, y la selección de la compañía de transporte a utilizar son tareas realizadas basándose en la experiencia y en el juicio personal del responsable de estas actividades obteniendo decisiones subóptimas (Allen y Liu, 1995; Evans et al., 1990). Hernández et al. (2008) proponen un modelo conceptual para la planificación de la producción y el transporte en una cadena de suministro del sector del automóvil que sirve de base para la elaboración del presente trabajo.

En este artículo se propone un modelo de programación matemática para la optimización de la planificación operativa del transporte en una cadena de suministro de dos niveles. Este modelo hace uso de la programación lineal entera mixta y pretende mejorar el funcionamiento del proceso de aprovisionamiento en una cadena de suministro del sector del automóvil.

*Este trabajo está financiado parte por el Proyecto Nacional del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) del Gobierno Español titulado: Modelos de optimización *fuzzy* y computación evolutiva y de simulación de los procesos de planificación de la producción y del transporte en una cadena de suministro. Propuesta de planificación colaborativa soportada por sistemas multi-agente. Integración en un sistema de decisión. Aplicaciones (Ref. DPI2007-65501) y parte por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Politécnica de Valencia (PAID-05-08). www.cigip.upv.es/evolution.

El artículo se estructura de la siguiente forma. En la sección 2 se presenta el problema planteado y la formulación del modelo de programación matemática. En la sección 3 se muestran los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto. Por último, se presentan las conclusiones y las líneas futuras de investigación..

2. Planteamiento del problema

La cadena de suministro considerada está formada por un fabricante de automóviles y un proveedor de primer nivel cuyo proceso de aprovisionamiento de materiales y componentes se realiza según diferentes métodos de recogida asociados a los modos de carga completa o full truck load (FTL), carga parcial o less than load (LTL) y recogida en proveedores o milk-round (Hernández et al., 2008).

El problema estudiado se define del siguiente modo:

Dados:

- Una topología de cadena de suministro: número de nodos y tipo (proveedor de primer nivel y ensamblador).
- Datos de producto: dimensiones unitarias, número de unidades que componen cada lote de pedido.
- Datos de transporte: número de camiones disponibles por periodo, capacidad máxima disponible y porcentaje mínimo de ocupación por camión a cumplir.
- Información de almacén: número máximo de contenedores de cada producto que pueden ser almacenados.
- Información inicial de inventario y demanda retrasada de cada producto.
- Penalizaciones: por uso de camión en cada periodo; por demanda retrasada de cada producto en cada periodo y por posesión de inventario en cada periodo.
- Demanda del ensamblador de cada producto en cada periodo.

Determinar:

- Las cantidades a pedir de cada producto en cada periodo de tiempo.
- El nivel de inventario de cada producto en cada periodo de tiempo.
- El número de camiones necesarios en cada periodo de tiempo.
- El nivel de demanda retrasada de cada producto en cada periodo de tiempo.

El proceso de planificación del transporte en la cadena de suministro estudiada se basa en el empleo de una hoja de cálculo con una macro VBA asociada, mediante la cual el personal responsable del aprovisionamiento del proveedor de primer nivel calcula las necesidades netas a corto plazo Intentando satisfacer la demanda del ensamblador con el menor retraso posible, minimizar el nivel del inventario y mejorar la utilización de los recursos de transporte. Los parámetros (Figura 1) utilizados por el proveedor de primer nivel para el cálculo de las necesidades netas se describen a continuación:

- UB: número máximo de contenedores que caben en el almacén.
- Dim: dimensiones unitarias de cada pieza o componente, medidas en metros lineales. A partir de estos valores y del número de unidades a pedir se calcula la ocupación total del camión. El valor correspondiente a las dimensiones es calculado a partir de los valores de

unidad de embalaje (UE) y del número máximo de contenedores que caben en un camión (78) del siguiente modo:

$$\text{Dimensiones Unitarias} = \frac{13 \text{ metros}}{1 \text{ camión}} \cdot \frac{1 \text{ camión}}{78 \text{ contenedores}} \cdot \frac{1 \text{ contenedor}}{\text{UE piezas}} \quad (1)$$

- UE. (Unidad de Embalaje): número máximo de piezas o componentes que caben en un contenedor. Por ello, las cantidades a pedir serán múltiplos enteros de la cifra que corresponda a la unidad de embalaje de cada pieza, para aprovechar al máximo el volumen del contenedor.
- UM: número máximo de contenedores que caben en el almacén dentro de la lógica de relleno de camión. El proveedor de primer nivel suele asignar un valor muy alto para que no influya en los límites a la hora de ejecutar la macro VBA.
- Descripción: breve descripción del tipo de pieza para facilitar la comprensión del planificador.
- Referencia: identificador único de la pieza o componente a lo largo de toda la cadena de suministro.
- StockERP: inventario al inicio del periodo de planificación.
- Cobertura: número de días que el inventario disponible puede cubrir la demanda diaria. Este valor es calculado a partir de la ejecución de la macro VBA.
- DIF: demanda retrasada por referencia al inicio del periodo. Estas cantidades son descontadas al StockERP para poder atender la demanda rápidamente.
- Stock: inventario total al inicio del periodo de planificación, una vez se ha descontado del StockERP la demanda retrasada. A partir de este valor y de los datos de demanda diaria se calculan las necesidades netas y la planificación del transporte.

UB	DIM	UE	UM	DESCRIPCION	REFERENCIA	StockERP	Cobertura	DIF	Stock
17	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 1	ID ITEM 1	69	4		69
20	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 2	ID ITEM 2	45	4		45
17	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 3	ID ITEM 3	160	4	-18	142
33	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 4	ID ITEM 4	346	2	-60	286
20	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 5	ID ITEM 5	79	4	-9	70
3	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 6	ID ITEM 6	175	2	-25	150
3	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 7	ID ITEM 7	170	3	-66	104
13	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 8	ID ITEM 8	108	4		108
13	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 9	ID ITEM 9	156	4		156
9	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 10	ID ITEM 10	349	2		349
33	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 11	ID ITEM 11	365	2	-5	360
8	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 12	ID ITEM 12	71	4		71
9	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 13	ID ITEM 13	265	2	-10	255
33	0,001388889	120	100	DESCRIPCION ITEM 14	ID ITEM 14	802	2	-30	772
6	0,001388889	120	100	DESCRIPCION ITEM 15	ID ITEM 15	162	4		162
13	0,001388889	120	100	DESCRIPCION ITEM 16	ID ITEM 16	461	2	-72	389
13	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 17	ID ITEM 17	1364	2	-200	1164
3	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 18	ID ITEM 18	65	4		65
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 19	ID ITEM 19	715	2		715
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 20	ID ITEM 20	147	3		147
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 21	ID ITEM 21	423	2	-30	393
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 22	ID ITEM 22	69	2		69
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 23	ID ITEM 23	2735	2	-105	2630
4	0,001302083	128	100	DESCRIPCION ITEM 24	ID ITEM 24	168	3	-15	153
13	0,001302083	128	100	DESCRIPCION ITEM 25	ID ITEM 25	1637	2	-35	1602
13	0,001851852	90	100	DESCRIPCION ITEM 26	ID ITEM 26	1144	2	-115	1029
3	0,001388889	120	100	DESCRIPCION ITEM 27	ID ITEM 27	1602	2	-135	1467
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 28	ID ITEM 28	139	2		139
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 29	ID ITEM 29	88	2		88
4	0,002314815	72	100	DESCRIPCION ITEM 30	ID ITEM 30	89	4		89
4	0,001302083	128	100	DESCRIPCION ITEM 31	ID ITEM 31	182	4	-11	171
4	0,001302083	128	100	DESCRIPCION ITEM 32	ID ITEM 32	65	4		65
4	0,001302083	128	100	DESCRIPCION ITEM 33	ID ITEM 33	128	3		128
13	0,001302083	128	100	DESCRIPCION ITEM 34	ID ITEM 34	35	4		35

Figura 1: Modelo para la planificación del proveedor de primer nivel (I).

A partir del Stock, la estructura de la hoja de cálculo se modifica (Figura 2), apareciendo para cada día las columnas de demanda diaria y del inventario a final de cada día (Stock):

Stock	Pedir	Pedir	Demadna	Stock									
69			14	55		16	39		16	95		16	79
45			0	45		0	45		0	45		0	45
142			96	46		16	30		6	114		18	96
286	180	90	230	326	90	146	270	90	164	196	90	122	164
70			48	22		8	14		3	101		9	92
150	90	90	115	215		73	142		82	150		61	89
104			28	76		14	62		8	126		22	104
108			0	108		0	108		0	108		4	104
72			96	-24		16	-40		6	-46	72	18	8
349	144	144	230	407	72	146	333	144	164	313		122	191
360	180	180	241	479	180	199	460	180	206	434	180	198	416
71			1	70		6	64		5	59		4	55
255	180	90	164	361	180	145	396	90	141	345	90	141	294
772	360	360	482	1010	360	398	972	360	412	920	360	396	884
162			2	160		12	148		10	138		8	130
389	360	240	328	661	240	290	611	240	282	569	240	282	527
1164	432	288	396	1488	576	570	1494	432	426	1500	360	498	1362
65	72		20	117		10	107		2	105		0	105
715	360	216	482	809	360	398	771	360	412	719	288	396	611
147			2	145		12	133		10	123		8	115
393	216	288	328	569	288	290	567	216	282	501	288	282	507
69		72	38	103		14	89	72	12	149		2	147
2630	1800	2088	2470	4048	1800	2117	3731	1656	2278	3109	1728	2007	2830
153			38	115		14	101		12	89		2	87
1602	1280	1408	1738	2552	1280	1461	2371	1152	1496	2027	1024	1335	1716
1029	450	540	574	1445	540	618	1367	450	605	1212	360	585	987
1467	960	960	1148	2239	1080	1236	2083	1080	1210	1953	840	1170	1623
139			10	129		30	99		20	79		6	73
88			16	72		8	64		10	54		22	32
89			4	85		2	83		14	69		12	57
171			14	157		16	141		17	124		16	108
65			0	65		0	65		0	65		0	65
128			40	88		21	67	128	12	183		29	154
35			0	35		0	35		0	35		6	29

Figura 2: Modelo para la planificación del proveedor de primer nivel (II).

El parámetro Pedir se corresponde con las cantidades a pedir en cada camión. En la parte inferior de Demanda y Pedir, se calcula el espacio ocupado por las cantidades a pedir, coloreado en naranja, a partir de la ejecución de la macro VBA. Las columnas Stock se actualizan para las cantidades pedidas y según la demanda diaria. Esta estructura se repite según la longitud del horizonte de planificación deseado. El ejemplo mostrado corresponde al modo de transporte FTL para el cual se fija como objetivo una ocupación de 13 metros lineales por camión.

2.1. Formulación del modelo

El modelo propuesto es multiproducto y multiperiodo basándose su enfoque de modelado en el empleo de la programación lineal entera mixta. El modelo es formulado asumiendo tiempos de transporte nulos y una cantidad fija de camiones disponibles.

Las variables de decisión y los parámetros del modelo se definen en la Tabla 1:

Tabla 1: Variables de decisión y parámetros del modelo.

Conjuntos de índices	
I :	Conjunto de productos
C :	Conjunto de camiones
T :	Conjunto de periodos de tiempo en el horizonte de planificación
Datos generales	
m_i :	Dimensiones unitarias en metros lineales del producto i
ue_i :	Número de unidades que componen cada lote del producto i
$\max cont_i$:	Número máximo de contenedores que caben en el almacén del producto i
d_{it} :	Demanda del producto i en el periodo t
ST_{i0} :	Inventario del producto i en el periodo 0
Rd_{i0} :	Retraso de la demanda del producto i en el periodo 0
PC_{ct} :	Penalización por uso de camión c en el periodo t
PR_{it} :	Penalización por demanda retrasada del producto i , en el camión c , en el periodo t
PS :	Penalización por posesión unitario de inventario por periodo
L :	Máxima longitud de camión disponible
η :	Porcentaje mínimo de ocupación de la longitud disponible
Variables de decisión	
ST_{it} :	Inventario del producto i al final del periodo t
Rd_{it} :	Retraso de la demanda del producto i al final del periodo t
CP_{ict} :	Cantidad a pedir del producto i , en el camión c , en el periodo t
K_{ict} :	Número de lotes a pedir del producto i , en el camión c en el periodo t
Y_{ct} :	1 si se utiliza el camión c en el periodo t , 0 si no se utiliza

Minimizar Z (2)

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \left(\sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T L \cdot Y_{ct} - \sum_{i=1}^I \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T CP_{ict} \cdot ue_i \cdot m_i \right) + \sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T PC_{ct} \cdot Y_{ct} + \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T PR_{it} \cdot Rd_{it} + \\ & + PS \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T ST_{it} \end{aligned}$$

Sujeto a

$$ST_{it} = ST_{i(t-1)} - d_{it} + \sum_{c=1}^C CP_{ict} - Rd_{i(t-1)} + Rd_{it} \quad \forall i, t \quad (3)$$

$$CP_{ict} = K_{ict} \cdot ue_i \quad \forall i, c, t \quad (4)$$

$$ST_{it} + ue_i \leq ue_i \cdot \max cont_i \quad \forall i, t \quad (5) \quad \sum_{i=1}^I CP_{ict} \cdot m_i \leq L \cdot Y_{ct}$$

$$\forall c, t \quad (6) \quad \sum_{i=1}^I CP_{ict} \cdot m_i \geq \eta \cdot L \cdot Y_{ct} \quad \forall c, t \quad (7)$$

$$ST_{it} \geq d_{it+1} \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$ST_{it}, Rd_{it}, K_{it}, CP_{ict} \geq 0 \quad (9)$$

En la función objetivo (2) se definen cuatro partes diferenciadas para su minimización total. Por un lado, existe un componente correspondiente a la longitud total desaprovechada en el conjunto de camiones utilizado. El segundo componente es la penalización relativa al uso de éstos. Asimismo, como tercer componente, se define la penalización asociada al retraso de la demanda. El último de los componentes corresponde a la penalización asociada a la posesión del inventario. Este componente se incluye para reducir la cantidad de unidades almacenadas mediante la minimización de la función objetivo. La ecuación (3) representa la restricción del balance del inventario. La ecuación (4) representa la cantidad a pedir de cada producto, en cada camión, por cada periodo, como múltiplo entero de las unidades de embalaje. La ecuación (5) limita la cantidad del inventario por producto y día, según las dimensiones máximas del almacén. La ecuación (6) asegura que no se sobrepasen los 13 metros lineales por camión utilizado, mientras que la ecuación (7) asegura que el espacio ocupado en cada camión sea superior a 11 metros, evitando que existan camiones con desaprovechamiento de espacio excesivo. La ecuación (8) asegura un día de cobertura de los inventarios al final de cada periodo. Por último, la ecuación (9) establece las condiciones de no negatividad de las variables de decisión.

3. Experimento computacional

La aplicación práctica del modelo se ha basado en la resolución del mismo a partir de datos reales, a lo largo de un horizonte de 10 días, con 31 referencias diferentes, perteneciente a un único proveedor que transporta mediante FTL. El modelo se ha implementado con el lenguaje de modelado MPL. La resolución se ha llevado a cabo con CPLEX. Por último, los datos de entrada y salida del modelo se gestionan a través de la base de datos Microsoft Access.

La arquitectura del proceso de planificación del transporte del modelo propuesto se muestra en la Figura 3:

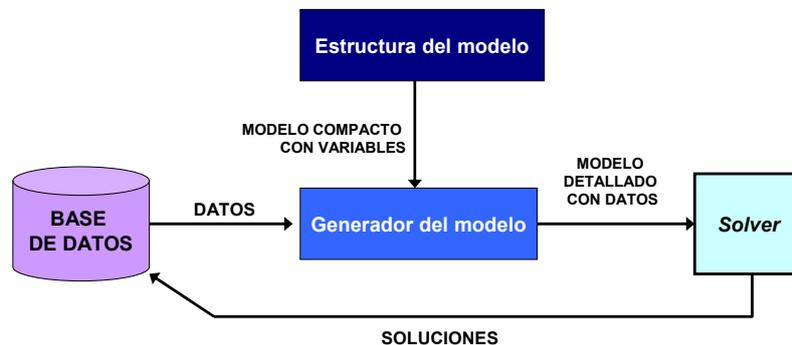


Figura 3: Arquitectura del modelo propuesto.

La formulación de un modelo de programación matemática permite la obtención de una solución que suponga un nivel óptimo en el aprovechamiento de los recursos de transporte disponibles, un nivel óptimo en los inventarios almacenados y un nivel óptimo en los niveles de demanda retrasada.

Para comparar las soluciones obtenidas con el modelo de programación matemática propuesto y las de la hoja de cálculo utilizada en la empresa objeto de la aplicación, se presentan de forma agregada los resultados relativos al número de camiones utilizados, el espacio no ocupado, la cantidad total de unidades pedidas y la suma del inventario al final del periodo de planificación (Tabla 2):

Tabla 2: Comparación de resultados agregados.

	Hoja de cálculo	Modelo
Camiones utilizados	13	12
Espacio no usado (m)	18	5,5
Total Cantidad Pedida	82076	74496
Suma Stock último periodo (t=10)	12218	11678

Las cantidades totales a pedir por periodo se muestran en la Figura 4:

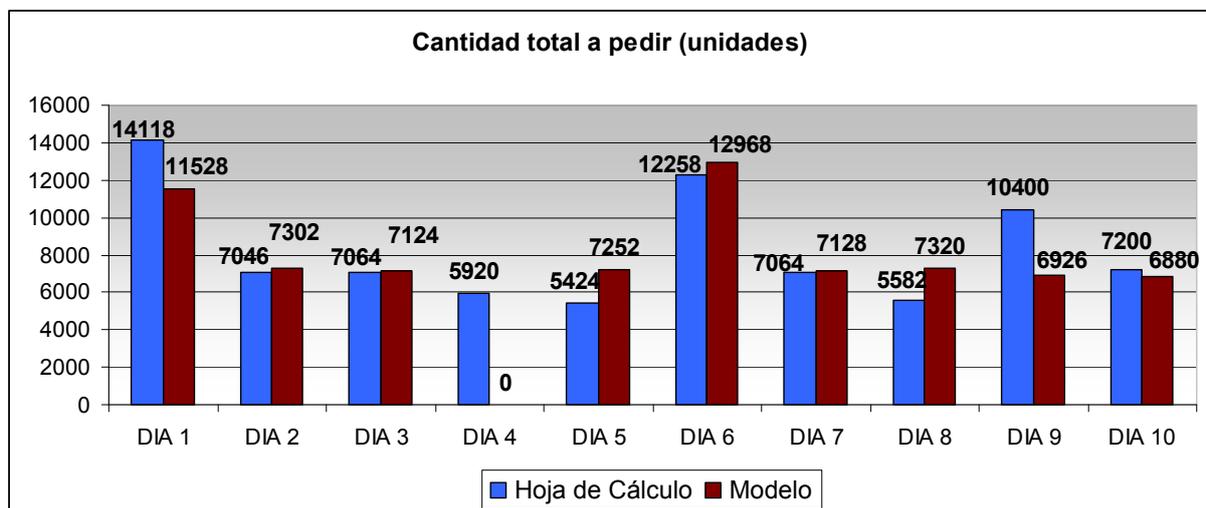


Figura 4: Comparación de las cantidades totales a pedir diariamente

Del mismo modo, puede comprobarse la evolución del inventario diario total en el periodo de planificación considerado, siendo más reducido el stock obtenido a partir de los resultados ofrecidos por el modelo propuesto (Figura 5).

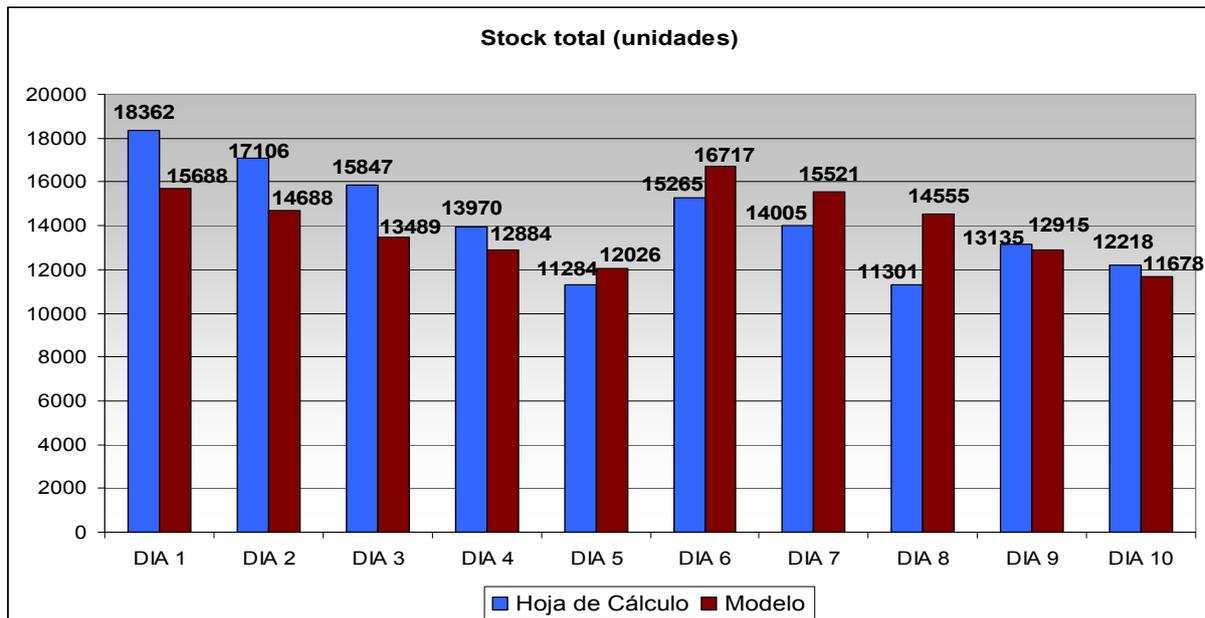


Figura 5: Comparación del inventario total diario

De igual modo, el aprovechamiento del espacio total disponible en cada camión es mejor en los resultados ofrecidos por el modelo de programación matemática que en los obtenidos según la hoja de cálculo utilizada en la actualidad por la empresa (Tabla 4).

Tabla 4: Comparación del espacio no utilizado.

	ESPACIO NO UTILIZADO (m)	
	Hoja de Cálculo	Modelo
DIA 1	0	3,83
DIA 2	0	0,17
DIA 3	0	0,17
DIA 4	2	0,17
DIA 5	3	0,17
DIA 6	3,5	0,33
DIA 7	0	0,17
DIA 8	3	0,17
DIA 9	6,5	0,17
DIA 10	0	0,17
TOTAL	18	5.5

4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha propuesto un modelo de programación matemática para la planificación operativa del transporte en una cadena de suministro del sector del automóvil, basándose su enfoque de modelado en el empleo de la programación lineal entera mixta. El objetivo perseguido ha sido la mejora del actual proceso de planificación operativa del transporte mediante la reducción de los niveles de inventario en el proveedor de primer nivel, el aumento de la utilización de los recursos de transporte y la satisfacción de la demanda del fabricante de automóviles con el menor retraso posible.

La aplicación práctica del modelo se ha basado en la resolución del mismo a partir de datos reales, tomados por el software de resolución, almacenados en una base de datos que han servido como entradas al modelo propuesto.

El empleo de un modelo de programación matemática frente a una técnica de carácter heurístico permite obtener resultados más satisfactorios. En el problema abordado, con el empleo del modelo propuesto, a lo largo de un horizonte de planificación de 10 días, se han obtenido las siguientes mejoras: (1) reducir el número de camiones a utilizar de 13 a 12; (2) disminuir el promedio del espacio no utilizado en los camiones, desde 18 m. a 5,5m.; (3) reducción de la cantidad total del inventario almacenado en un 1,64%; y (4) reducción en un 9,23% de la cantidad total de unidades a pedir.

Finalmente, se establecen las siguientes líneas futuras de investigación: (1) posibilidad de determinar como variable el número de camiones a utilizar, de tal forma que se utilicen en cada periodo, únicamente, los camiones necesarios; (2) formulación de un modelo multiobjetivo que incluya otros aspectos relativos al transporte presentes en la empresa; (3) uso de funciones objetivo no lineales que permitan incluir otro tipo de características al modelo; e (4) integración con los sistemas de planificación táctica de la cadena de suministro como el MRP (Planificación de Requerimientos de Materiales).

Referencias

- Allen, W.B. y Liu, D., (1995). Service Quality and Motor Carrier Costs: An Empirical Analysis. *The Review of Economics and Statistics*, 77(3), 499-510.
- Cordeau, J., Pasin, F. y Solomon, M., (2006). An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, 144(1), 59-82.
- Chandra, P. y Fisher, M.L., (1994). Coordination of production and distribution planning. *European Journal of Operational Research*, 72(3), 503-517.
- Ertogral, K., Wu, S. y Burke, L., (1998). Coordination production and transportation scheduling in the supply chain. Tech. Rep. #98T-010, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Lehigh University.
- Evans, K., Feldman, H. y Foster, J., (1990). Purchasing motor carrier service: an investigation of the criteria used by small manufacturing firms. *Journal of Small Business Management*, 28(1), 39-47.
- Hernández, J.E., Mula, J., Ferriols, F.C. y Poler, R., (2008). A conceptual model for the production and transport planning process: An application to the automobile sector. *Computers in Industry*, 59(8), 842-852.
- Hinojosa, Y., Puerto, J. y Fernández, F.R., (2000). A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, 123(2), 271-291.

Jin, M., Luo, Y. y Eksioglu, S.D., (2008). Integration of production sequencing and outbound logistics in the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 766-774.

Park, Y.B., (2005). An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 43(6), 1205-1224.

Spencer, M., Daugherty, P. y Rogers, D., (1994). Towards a deeper understanding of JIT: A comparison between APICS and logistics managers. *Production and Inventory Management*, 35(3), 23-28.

Syam, S.S., (2002). A model and methodologies for the location problem with logistical components. *Computers & Operations Research*, 29(9), 1173-1193.