



MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA PLANIFICAR EL TRANSPORTE A PLANTAS PROCESADORAS DE LA INDUSTRIA FRUTICOLA

Marcela C. González-Araya

Departamento de Modelación y Gestión Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca,
Merced 437, Curicó, Chile
mgonzalez@utalca.cl

Wladimir E. Soto-Silva

Programa de Doctorado en Ingeniería y Tecnologías de la Información, Universidad de Lleida
Investigador visitante del Centro de Estudios en Alimentos Procesados
Av. San Miguel N° 3425, Talca, Chile
wsoto@utalca.cl

Lluís M. Pla-Aragones

Departamento de Matemática, Universidad de Lleida, Universidad de Lleida
73, Jaume II 25001 Lleida, Spain
lmpa@matematica.udl.cat

RESUMEN

Para apoyar la planificación del transporte de fruta desde las cámaras almacenamientos hacia una planta procesadora, en este trabajo se propone un modelo de optimización que incorpora la apertura de aquellos tipos de cámaras más convenientes para la planta. El modelo busca minimizar los costos de transporte y de apertura de los diferentes tipos de cámaras de almacenamiento, de manera de atender la demanda de las plantas procesadora, considerando la capacidad de procesamiento de éstas y la cantidad fruta existente en los centros de almacenamiento. Se aplica el modelo propuesto a un caso de estudio en una planta procesadora de fruta de la Región de O'Higgins, Chile.

PALABRAS CLAVE. Programación Lineal Entera, Planificación del Transporte, Industria Frutícola.

AG & MA - IO en la Agricultura y el Medio ambiente, L & T - Logística y Transporte.

ABSTRACT

Aiming to support fruit transport planning from cold storages to processing factory, an optimization model that considers cold storages opening is developed. This model seeks to minimize transportation and cold storages opening costs, in order to reach processing factories demand, don not ultra pass factories capacities and fruit quantities kept in cold storages. This model is applied to a study case from a processing factory located in O'Higgins Region, Chile.

KEYWORDS. Integer Linear Programming, Transport Planning, Fruit Industry.

AG & MA - OR in Agriculture and Environment, L & T - Logistics and Transport.

1. Introdução

Dentro de la investigación de operaciones, en los últimos años el estudio de la planificación de la cadena de suministro ha tenido un aumento considerable (Catalá et al., 2013), pero no así en el área agroindustrial (Ahumada y Villalobos, 2009). Entre la literatura relacionada se puede encontrar a France y Thornley (1984), Glen (1987), Lucas y Chhajed (2004), Ahumada y Villalobos (2009), Weintraub y Romero (2006) y Audsle y Sandars (2009), quienes realizan revisiones bibliográficas y presentan modelos aplicados al área agroalimentaria. Ahumada y Villalobos (2009) presenta una clasificación en dos categorías de los trabajos de investigación, una de ellas es para productos agrícolas perecederos, productos frescos, y otra, para productos no perecederos.

Particularmente, para los productos perecederos, Verdouw *et al.* (2010) presenta que la cadena de suministro de frutas tiene plazos de entrega, condiciones de almacenamiento que buscan conservar la calidad y frescura, todas estas características propias del manejo de los alimentos, donde se busca optimizarlos.

Mulá *et al.* (2006) y Mulá *et al.* (2010) realizan revisiones de los distintos modelos aplicados a la cadena de suministro en general, encontrando que existe una amplia variedad de investigaciones en el ámbito táctico y con distintos métodos matemáticos para la obtención de resultados.

Mulá *et al.* (2006) se centra en la programación de la producción coordinada con el abastecimiento de la materia prima enfocadas en procesos productivos industriales y Mulá *et al.* (2010) realiza una revisión de los trabajos en la cadena de suministro enfocados a la optimización de los costos del abastecimiento de la materia prima, del proceso productivo y de la distribución del producto terminado.

En los trabajos mencionados anteriormente, junto con el trabajo de Ahumada y Villalobos (2009), Weintraub y Romero (2006) y Bjorndal *et al.* (2012), se puede evidenciar la falta de investigaciones en el tema de cadena de abastecimiento agroindustrial enfocados a la optimización del transporte desde los almacenamiento a las plantas procesadoras. Cabe destacar que la planificación en la cadena de suministro agrícola es un sistema complejo que implica planificación y coordinación con diferentes agentes encargados de la producción, procesamiento, almacenamiento y distribución (Pla y Nadal, 2013)

Chile busca llegar a convertirse en potencia alimentaria, por lo que contar con investigaciones que puedan entregar una óptima planificación del transporte y almacenamiento en la agroindustria, optimizando los recursos asociados al traslado de la fruta desde los centros de almacenamiento a las plantas procesadores, permitirá apoyar dicho objetivo.

Una de las motivaciones para esta investigación se debe a que existen limitaciones en el almacenamiento de la fruta en las plantas procesadoras, por lo que el almacenamiento de la fruta a ser procesada muchas veces debe ser externalizado en centros de almacenamiento, permitiendo abastecer de fruta constantemente a la planta procesadora. Otra motivación surge debido a que en Chile se tienen diferentes tipos de almacenamiento, pues existen diferentes tipos de tecnologías de refrigeración. Esto implica tener que realizar una planificación para retirar la fruta almacenada en las cámaras de frío, con el fin de satisfacer la demanda de la planta procesadora, buscando minimizar los costos asociados al retiro de la fruta.

En la próxima sección se presenta la descripción de la problemática de transporte y almacenamiento en Chile. En la sección 3 se describe el modelo propuesto para la planificación del transporte desde los almacenes a las plantas procesadoras de la industria frutícola. En la sección 4 se presenta un caso de estudio, donde se resuelve una situación real de una empresa chilena. En la sección 5 se presentan las conclusiones respecto al modelo propuesto y a los resultados que éste entrega.

2. Descripción de la Problemática

La estructura de la cadena de suministro de la fruta puede tener diferentes configuraciones, pero las características inherentes a la participación en la industria de la fruta se mantienen (Verdouw et al., 2010).

La realidad chilena de la cadena de suministro de la fruta se esquematiza en la Figura 1, adaptando la representación de la cadena de suministro presentada por Jang et al. (2002).

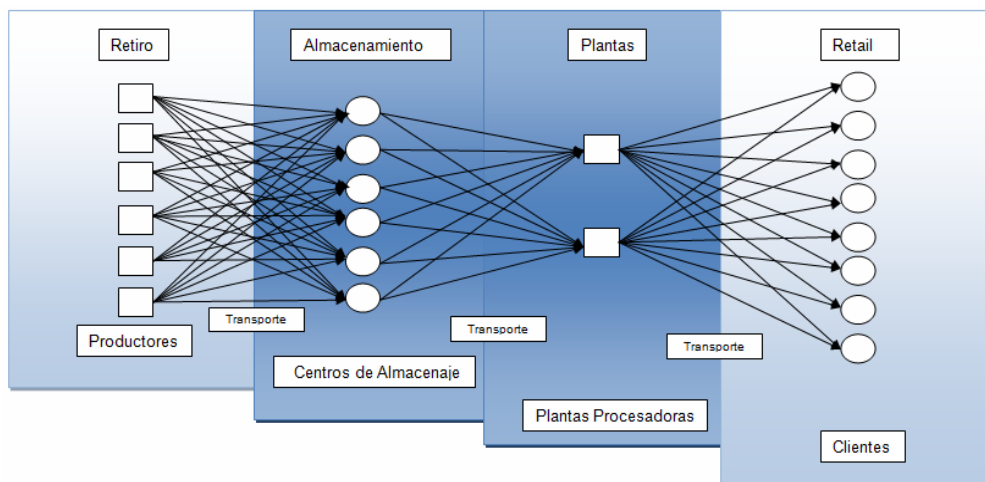


FIGURA 1 ESTRUCTURA GENERAL DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE FRUTA EN CHILE.

La cosecha de la fruta es realizada por los productores dueños de los huertos, siendo recolectada en bins (contenedores con capacidad de aproximadamente 350 kilos) desde los huertos. Los bins son acopiados en los huertos por un par de horas, para ser luego transportados hasta los centros de almacenamiento que indique la planta procesadora, o bien sean enviados directamente a las líneas de proceso. Cabe destacar que la unidad que compra la fruta cosechada, en este caso la planta procesadora, es la encargada de asignar el destino de la fruta (almacenamiento o proceso).

Algunas frutas, como las manzanas y las peras, pueden ser almacenadas por mucho tiempo (hasta 9 meses). Por otro lado, existe otro tipo de frutas, como los duraznos, que no pueden ser almacenadas por muchos días. También existen frutas donde el tiempo de almacenamiento es muy bajo (sólo horas), como es el caso de las cerezas. Sin embargo, en todas las frutas guardadas, el sistema de refrigeración es un elemento a considerar para controlar el proceso de maduración y la decadencia de la fruta (Plà y Nadal, 2013).

En Chile existen tres tipos de cámaras de almacenamiento en frío para mantener la fruta:

- Cámara de Frío Convencional (cámaras tipo 1): se realiza un control convencional de la temperatura mediante un termostato, permitiendo almacenar fruta hasta 3 meses;
- Cámara Smart Fresh (cámaras tipo 2): tiene incorporado un sistema de difusión del fitoregulador Smart Fresh, el cual protege las frutas de los efectos del etileno durante el almacenamiento, permitiendo almacenar la fruta hasta 6 meses;
- Cámara de Atmósfera Controlada (cámaras tipo 3): la atmósfera de la cámara es controlada, lo cual implica regular las concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono y nitrógeno, así como la temperatura y humedad, permitiendo almacenar fruta por hasta 12 meses.

Las plantas procesadoras son las encargadas del lavado, clasificado, envasado y etiquetado de las diferentes variedades de frutas. Posteriormente, el producto es distribuido a los clientes, pudiendo ser estos minoristas o mayoristas, nacionales o extranjeros.

La planta procesadora, conociendo la cantidad de fruta a procesar de manera de atender la demanda, y considerando el stock de fruta disponible, así como la cámara de almacenamiento donde se encuentra, requiere planificar el traslado de ésta a la planta. Esta planificación del transporte debe ser hecha de acuerdo a la disponibilidad de camiones y/o conductores (Hsiao *et al.*, 2010).

Una estructura de cadena de suministro común en Chile es que la planta procesadora tenga más de un almacenamiento para guardar la fruta (propio o externalizado), la cual es comprada a diferentes productores durante la temporada de cosecha, es decir, el almacenamiento queda a cargo de la planta procesadora y no de los productores. Esto lo hacen las plantas con el fin de tener fruta disponible para procesar a lo largo del año, de acuerdo a la demanda de cada una de las variedades. La planificación de la fruta a procesar debe ser coordinada con el transporte desde los diferentes almacenes a las plantas procesadoras.

3. Modelo propuesto para la planificación del transporte desde las cámaras de almacenamiento a la planta procesadora

En esta sección describe brevemente el modelo desarrollado para la planificación diaria de transporte desde las cámaras de almacenamiento a la planta procesadora.

Conjuntos

P : Conjunto de plantas procesadoras.

F : Corresponde a las variedades de frutas a almacenar en las diferentes cámaras disponibles para el almacenamiento de productos.

V : Corresponde a los camiones disponibles para el transporte.

I : Conjunto de almacenamientos disponibles para guardar la fruta.

C_i : Corresponde al conjunto de cámaras del almacenamiento i .

C_{if} : Corresponde al conjunto de cámaras disponibles del almacenamiento i pertenecientes al tipo de almacenamiento f .

C_{is} : Corresponde al conjunto de cámaras disponibles del almacenamiento i pertenecientes al tipo de almacenamiento s .

C_{ia} : Corresponde al conjunto de cámaras disponibles del almacenamiento i pertenecientes al tipo de almacenamiento a .

Parámetros

D_{fp} : Demanda de la fruta $f, f \in F$, desde la planta $p, p \in P$.

A_v : Capacidad Máxima de carga del camión $v, v \in V$.

TT_{cp} : Tiempo de viaje que incurrirá un camión desde la cámara de almacenamiento $c, c \in C$, a la planta de proceso $p, p \in P$.

H_v : Número Máximas de horas de conducción de un camión $v, v \in V$.

M_v : Número Máximo de viajes que puede realizar un camión $v, v \in V$.

R_v : Número Mínimo de viajes que puede realizar un camión $v, v \in V$.

W_f : Costo de penalización por apertura de las cámaras del tipo f (Tipo 1: Frio Convencional).

W_s : Costo de penalización por apertura de las cámaras del tipo s (Tipo 2: Smart Fresh).

W_a : Costo de penalización por apertura de las cámaras del tipo a (Tipo 3: Frio Atmosfera Controlada).

N : Numero de Camiones que pueden ir a retirar fruta a los centros de almacenamiento.

S_{icv} : Stock disponible en el almacenamiento i , en la cámara $c, c \in C_i$, de la fruta $f, f \in F$.

Variables de Decisión

X_{icvfp} : Kilogramos transportados desde el almacenamiento i , desde la cámara $c, c \in C_i$, de la fruta tipo $v, v \in V$, en el camión $f, f \in F$, con destino a la planta procesadora $p, p \in P$.

Y_{icfp} = Numero de viajes desde el almacenamiento i , desde la cámara c , $c \in C_i$, realizados por el camión f , $f \in F$, hacia la planta p , $p \in P$.

Formulación matemática

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C_i} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} C_{cvp} * Y_{icvp} + \sum_{i \in I} (W_f * \sum_{c \in C_{if}} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} X_{icfvp} + W_s * \sum_{c \in C_{is}} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} * X_{icfvp} + W_a * \sum_{c \in C_{ia}} \sum_{f \in F} \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} * X_{icfvp}) \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C_i} \sum_{v \in V} X_{icfvp} \geq D_{fp} \quad \forall p \in P, f \in F. \quad (2)$$

$$X_{icfvp} \leq A_v * Y_{icvp} \quad \forall i \in I, c \in C_i, f \in F, v \in V, p \in P. \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C_i} TT_{cvp} * Y_{icvp} \leq H_v \quad \forall v \in V, p \in P. \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} Y_{icvp} \leq N \quad \forall i \in I, c \in C_i, p \in P. \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C_i} \sum_{p \in P} Y_{icvp} \leq M_v \quad \forall v \in V. \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{c \in C_i} \sum_{p \in P} Y_{icvp} \geq R_v \quad \forall v \in V. \quad (7)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{p \in P} X_{icfvp} \leq S_{icf} \quad \forall i \in I, c \in C_i, f \in F. \quad (8)$$

$$Y_{icvp} \in Z^+ \quad \forall i \in I, c \in C_i, v \in V, p \in P. \quad (9)$$

$$X_{icfvp} \geq 0 \quad \forall i \in I, c \in C_i, f \in F, v \in V, p \in P. \quad (10)$$

La función objetivo busca minimizar los costos asociados al transporte desde los almacenes a una planta procesadora y los costos de apertura de los diferentes tipos de cámaras de almacenamiento. De esta manera, la función objetivo se puede descomponer en los siguientes

términos:

Minimizar: costo de transporte + costo por apertura cámaras tipo 1 + costo por apertura cámaras tipo 2 + costo por apertura cámaras tipo 3.

En el costo de apertura y/o penalización por apertura de una cámara de almacenamiento, de un determinado tipo, hace referencia al hecho de que en primer lugar, las plantas de proceso abran las cámaras de frío tipo 1, las cuales corresponden a frío convencional, posteriormente, abran las cámaras tipo 2, las cuales corresponden a Smart Fresh, y por último, hacia el final de la temporada, realicen la apertura de las cámaras tipo 3, que corresponden a Atmósfera Controlada. Esta prioridad se debe a que una vez abierta una cámara, se debe procesar toda la fruta y las cámaras de Atmósfera Controlada son las que permiten almacenar fruta por más tiempo, dada su tecnología.

Las restricciones del modelo consideran los siguientes aspectos:

La restricción (2) establece que la cantidad de fruta, de una variedad en particular, sacada desde un almacenamiento, en el total de camiones disponibles, debe ser mayor o igual a la demanda de la planta procesadora, para la variedad de fruta en particular. La restricción (3), define que se debe cumplir con la capacidad máxima de transporte de un camión, para cada uno de los almacenamientos disponibles. La restricción (4) obliga que, para cada uno de los camiones, no se debe sobrepasar la cantidad máxima de horas de conducción. La restricción (5) establece que no se debe sobrepasar una cierta cantidad de viajes de camión por almacenamiento. La restricción (6) limita el número máximo de viajes por camión. La restricción (7) determina el número mínimo de viajes por camión. La restricción (8) restringe que la cantidad de kilogramos que se debe enviar a cada planta, desde cualquier camión, debe ser menor al stock que se tiene disponible en el almacén, particularmente en cada cámara. Las restricciones (9) y (10) corresponden a las restricciones sobre la naturaleza de las variables de decisión (no negatividad e integralidad).

4. Caso de Estudio

El modelo es aplicado a un caso de estudio de una empresa localizada en la Región de O'Higgins, Chile.

El software de optimización utilizado es ILOG-OPL en su versión 6.1, con CPLEX-11. El modelo que se resolvió utilizando un computador con un procesador Intel(R) Core (TM) i3-3110M CPU 2.40 GHz, Memoria RAM de 6 Gb y disco duro de 600 Gb.

Los parámetros usados en el modelo se asocian a los recursos de la planta procesadora, la cual tiene 6 almacenes disponibles para la guarda de fruta, con un total 47 cámaras de frío, siendo éstas cámaras de Frío Convencional (cámara tipo 1), Smart Fresh (cámara tipo 2) y Atmósfera Controlada (cámara tipo 3).

La planta procesa 5 variedades de fruta y dispone para el transporte desde cada almacén a la planta un total de 6 camiones, donde 2 camiones (camión 1 y 2) pueden transportar hasta 8.100 kg, 2 camiones (camión 3 y 4) pueden transportar hasta 18.900 kg, y 2 camiones (camión 5 y 6) pueden transportar hasta 21.600 kg.

Al modelar la situación de la empresa para la planificación diaria del transporte de fruta desde los almacenes hasta la planta procesadora, los resultados en relación a la cantidad de viajes a realizar por los camiones y el almacenamiento al cual se deben dirigir cada camión para retirar la fruta, se presenta en la Tabla 1.

TABLA 1 PLANIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LOS VIAJES DE LOS CAMIONES DESDE LOS ALMACENAMIENTOS A LA PLANTA PROCESADORA.

N° de Almacenamiento	N° de Cámara	Tipo de Cámara	N° de Camión					
			1	2	3	4	5	6
1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	7	1	0	0	0	1	1	0
3	17	2	2	0	0	0	0	0
4	19	1	0	2	0	2	0	0
5	26	1	0	0	1	0	0	2
6	36	1	1	0	2	0	0	0
Total de Viajes por Camión			4	3	3	3	1	2

Como se observa en la Tabla 1, para satisfacer la demanda diaria de la planta, se debe realizar un total de 16 viajes de camión desde los almacenes a la planta procesadora y se debe recolectar la fruta desde 6 cámaras de frío: desde 5 cámaras de Frío Convencional y desde una cámara Smart Fresh.

En relación a la cantidad de kilogramos de fruta de cada variedad a transportar desde las diferentes cámaras usando cada uno de los camiones disponibles, estos resultados se muestran en la Tabla 2.

TABLA 2 PLANIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LOS KILOGRAMOS A TRANSPORTAR DESDE LOS ALMACENAMIENTOS A LA PLANTA PROCESADORA.

N° de Almacenamiento	N° de Cámara	Variedad 1		Variedad 2		Variedad 3		Variedad 4		Variedad 5	
		<i>N° de Camión</i>		<i>N° de Camión</i>		<i>N° de Camión</i>		<i>N° de Camión</i>		<i>N° de Camión</i>	
		1	2	3	6	1	3	4	5	2	4
1	1	6.900	8.100	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7	0	0	0	0	0	0	18.900	21.300	0	0
3	17	15.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	19	0	0	0	0	0	0	0	0	16.200	37.800
5	26	0	0	18.900	41.100	0	0	0	0	0	0
6	36	0	0	0	0	8.100	36.900	0	0	0	0
Kgs Transportados		30.000		60.000		45.000		40.200		54.000	
Demanda de la Planta		30.000		60.000		45.000		40.200		54.000	

Como se observa en la Tabla 2, se transporta desde las 6 cámaras de almacenamiento un total de 229.200 kilogramos, satisfaciendo con esto la demanda de la planta procesadora para cada una de las variedades procesadas.

El modelo dirige la búsqueda de la fruta a aquellas cámaras de almacenamiento menos costosas, de manera de satisfacer la demanda de la planta. Por esta razón, dado que existe fruta disponible para satisfacer la demanda, el modelo sugiere abrir 5 cámaras de Frío Convencional, donde, además, el tiempo de guarda es menor. Dado que la demanda de la variedad 1 no es totalmente satisfecha con la fruta almacenada en las cámaras de frío convencional, el modelo sugiere abrir una cámara de Smart Fresh, la cual, además, tiene un tiempo de guarda mayor. Finalmente, el modelo sugiere no abrir ninguna cámara de Atmósfera Controlada, dado que la demanda es totalmente satisfecha con la apertura de cámaras menos costosas.

Se debe notar que la situación modelada ocurre en un día particular de la temporada. Sin embargo, esta solución se irá modificando a medida que se vaya utilizando la fruta de las

cámaras. Por lo tanto, en días de proceso al final de la temporada, el modelo probablemente sugerirá abrir las cámaras de Atmósfera Controlada, que permiten almacenar la fruta por varios meses (9 meses), pero cuya apertura es más costosa.

5. Conclusiones

En esta investigación se desarrolla un modelo matemático de optimización que permite coordinar y planificar el transporte diario desde los diferentes centros de almacenamiento a una planta procesadora de fruta, buscando minimizar los costos asociados al transporte y apertura de cámaras de frío. De esta forma, se propone realizar una apertura óptima de las cámaras de almacenamiento, dependiendo del tipo de tecnología asociada a la refrigeración de cada una de ellas.

Cabe destacar que es importante realizar una división de las cámaras con diferentes tecnologías de frío, debido a los diferentes costos que implica su apertura y a los diferentes plazos máximos que tienen para guardar la fruta. De esta forma, resulta más fácil para el tomador de decisión optimizar la planificación de transporte desde los almacenamientos a las plantas. El modelo desarrollado toma como base el modelo presentado por Plà y Nadal (2013), sin embargo, nuevas restricciones son incorporadas para ajustarse a la realidad del transporte y almacenamiento de la industria frutícola chilena.

Referencias

- Audsley, E. and Sandars, D. L.** (2009). A review of the practice and achievements from 50 years of applying OR to agricultural systems in Britain, *OR Insight*, 22(1). 2–18.
- Ahumada, O. and J. Rene Villalobos.** (2009). Application of planning models in the agri food supply chain: A review. *European Journal of Operational Research* 195: 1-20.
- Bjorndal, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C. and Weintraub, A.** (2012). Operations research in the natural resource industry. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2): 39-62.
- Catalá, L.P.; Durand, G.A., Blanco, A.M. and Bandoni, J.A.** (2013). Mathematical model for strategic planning optimization in the pome fruit industry. *Agricultural Systems* 115: 63-71
- France, J. and Thornley, J.** (1984). *Mathematical Models in Agriculture*, London: Butterworths.
- Glen, J.** (1987). Mathematical Models in Farm Planning: a survey. *Operations Research*, 35(5): 641- 665.
- Jang, Y., Jang, S., Chang, B. and Park, J.** (2002). A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network. *Computers and Industrial Engineering*, 43: 263–281.
- Hsiao H.I., Kemp, R.G.M., van der Vorst, J.G.A.. and Omta, S.W.F.** (2010). A classification of logistic outsourcing levels and their impact on service performance: Evidence from the food processing industry. *Int. J. Production Economics*, 124: 75-86.
- Lucas, M. e Chhajed, D.** (2004). Applications of location analysis in agriculture: a survey. *Journal of the Operational Research Society*, 55, 561–578.
- Mula, J., Poler, R., Garcia-Sabater, J. and Lario, F.** (2006). Models for production planning under uncertainty: A review. *Int. J. Production Economics*, 103: 271–285.
- Mula, J., Peidro, D. D. and Vicens, E.** (2010). Mathematical programming models for supply chain production and transport planning. *European Journal of Operational Research*, 204:377-390.
- Pla, L and Nadal, E.** (2013). Optimal transport planning for the supply to a fruit logistic center.



Verdouw, N., Beulens, A., Trienekens, J. And Wolfert, J (2010). Process modelling in demand-driven supply chains: A reference model for the fruit industry. *Computers and Electronics in Agriculture* 73, 174–187.

Weintraub, A. and Romero, C. (2006). Operations Research Models and the Management of Agricultural and Forestry Resources: A Review and Comparison. *Interfaces*, 46(5): 446-457.