

## MODELO PARA LA PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BAYAS CONGELADAS

**Rodrigo Sánchez Ramírez**

Centro de Estudios en Alimentos Procesados (CEAP) CONICYT-REGIONAL GORE MAULE  
R09I2001  
Avenida San Miguel N°3425, Talca, Chile.  
rodrigossanchez@ceap.cl

**Carolina Urzúa Bobadilla**

Centro de Estudios en Alimentos Procesados (CEAP) CONICYT-REGIONAL GORE MAULE  
R09I2001  
Avenida San Miguel N°3425, Talca, Chile.  
curzua@ceap.cl

**Marcela González Araya**

Departamento de Modelación y Gestión Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca  
Merced N° 437, Curicó, Chile.  
Centro de Estudios en Alimentos Procesados (CEAP) CONICYT-REGIONAL GORE MAULE  
R09I2001  
Avenida San Miguel N°3425, Talca, Chile.  
mgonzalez@utalca.cl

### RESUMEN

Administrar la cadena de suministro de alimentos es un proceso complejo debido a la naturaleza perecedera de los productos, donde el deterioro de la calidad se incrementa a medida que transcurre el tiempo en que el producto no es consumido. Por esta razón, es relevante que las etapas involucradas en la cadena de suministro se realicen en forma coordinada, evitando demoras que reduzcan la calidad y provoquen pérdidas del producto. Con este propósito, se desarrolló un modelo de programación lineal entera para planificar la producción de bayas congeladas, que busca disminuir las pérdidas y minimizar los costos operativos en las plantas de embalaje. Este modelo fue corrido usando datos de plantas de embalaje de bayas congeladas, localizadas en la Región del Maule, Chile, con el fin de contar con una herramienta de apoyo para la planificación de la próxima temporada de producción.

**PALAVARAS CLAVE.** Modelo de Planificación de la Producción, Programación lineal entera mixta, Productos perecibles.

### ABSTRACT

Managing the food supply chain is a complex process, because of to perishable nature of the product. This paper presents an optimization model developed for production planning of frozen berries. The restrictions set model run times of the plant, capacity and limit production of goods and products, stock inventory, storage and freezing capacity, delivering optimal results for batch production, inventory levels for products frozen and products, sales to perform, unmet demand and storage capacity to outsource. This model was applied using data from packing plants of frozen berries located in the Maule Region, Chile, aiming to have a tool for supporting the production planning of the next season.

**KEYWORDS.** Production Planning Model, Mixed-Integer Linear Programming, Perishable Products.

## 1. Introducción

Una cadena de suministro representa una secuencia de actividades configuradas con el propósito de entregar productos frescos a un destino con la más alta calidad posible (Tijssens *et al.*, 2001). Cualquier actividad establecida en la cadena tiene un impacto potencial sobre el producto, debido a la interacción entre el medio ambiente circundante y el producto mismo (Apaiah *et al.*, 2005; Broekmeulen, 2001).

La cadena de suministro de alimentos frescos, tales como carne, verduras, frutas y productos lácteos, es un proceso complejo debido a la naturaleza perecedera de los productos (Ahumada y Villalobos, 2009). En la cadena de suministros de alimentos existe un continuo cambio en la calidad, desde el momento en que la materia prima deja al productor hasta el momento que el producto llega a manos del consumidor final. Esta situación contribuye considerablemente a la determinación del costo final del producto y a experiencia de consumo percibida por el cliente. Esto debe ser considerado en el diseño y gestión de la distribución de la cadena, con objeto de entregar un producto en el momento preciso, garantizando el nivel de calidad deseado por el cliente y manteniendo los costos asociados al manejo del producto (almacenamiento, refrigeración, etc.) lo más bajo posible.

El término Cadena de Suministro Agroalimentaria (CSA) ha sido generado para describir las actividades desde la producción a distribución de productos agrícolas u hortofrutícolas (Aramyan *et al.*, 2006) desde el campo a la mesa. La CSA está formada por las empresas responsables de la producción (granjeros), distribución, procesamiento, y el marketing de los productos hasta el consumidor final (Ahumada y Villalobos, 2009).

A pesar de la importancia del sector alimentario, la Gestión de la Cadena de Suministro Agroalimentaria (CSA) ha recibido poca atención en la literatura. La razón podría ser que la gestión es complicada dada la especificidad de los productos o características de los procesos. Estas características a menudo limitan las posibilidades para la integración de la CS en las CSAs (Van Donk *et al.*, 2008). En relación a los enfoques de modelación, la inclusión de características específicas de los alimentos es necesaria para el correcto desarrollo de esta área. Una de las características más esenciales es la consideración de la calidad del producto a través de la cadena de suministro (Aiying *et al.*, 2011). Mantener la alta calidad del alimento – la cual se degrada dependiendo de las condiciones de almacenamiento y transporte (Labuza, 1982) – es de vital importancia para el desempeño de la cadena de suministro. Además de ser una medida de desempeño de sí misma, la calidad está directamente relacionada con otros atributos de los alimentos tales como la integridad, seguridad y vida útil (Aiying *et al.*, 2011). En este sentido, Trienekens y Zuurbier (2008) han planteado que el aseguramiento de la calidad dominará el proceso de producción y distribución en las cadenas alimentarias en el futuro. Esto también significa que el flujo de productos con diferentes atributos de calidad podría ser dirigido por distintos canales logísticos de distribución (con diferentes condiciones medioambientales) y/o diferentes consumidores (con distintas demandas de calidad) en la cadena de suministro. En efecto, una de las claves para la CSA es la visión integrada de la logística y calidad, la cual es llamada por Van der Vorst *et al.* (2007) “logística controlada por la calidad”. En este contexto, de acuerdo a Trienekens y Zuurbier (2008) los productos alimenticios y procesos de producción poseen un número específico de características que influyen la calidad y el aseguramiento de la misma a través del proceso productivo. Por ejemplo, los rendimientos de producción son a menudo inciertos debido, entre otros, a las condiciones del medio circundante y la variación de la calidad de la materia prima dentro y entre lotes de producción (Trienekens y Zuurbier, 2008). Por lo que mantener un control del desempeño y productividad de la cadena se hace relevante, ya sea desde un punto de vista netamente industrial como de calidad, lo que de acuerdo a la práctica se ve reflejado en el procesamiento de un producto tan sensible como la frambuesa para congelado.

La necesidad de reducir las pérdidas por calidad en los *packings* de frambuesa para congelado, provocadas por dificultades en la gestión diaria del proceso, sumado a la alta competencia a la cual se encuentra enfrentada este sector, plantea la oportunidad de minimizar los costos operativos a través de un modelo de planificación de la producción que permita brindar flexibilidad al proceso, el cual considere las distintas fluctuaciones del mercado en cuanto a la

disponibilidad de fruta y los recursos escasos con los debe contar los packings de estas características. En este contexto, a continuación se hace una breve revisión sobre la planeación de la producción.

## 2. Planificación de la Producción en la Industria Alimentaria

La planificación de la producción es un proceso utilizado para el establecimiento de tasas de producción, niveles de fuerza de trabajo e inventario en mano para una familia de productos, los cuales poseen requerimientos de demanda y procesos de producción similares. En este sentido, para cada familia de productos se programa la producción mensual, inventario y requerimiento de personal de trabajo para un cierto horizonte de planificación, usualmente de uno o dos años (Duchessi y O'keefe, 1990, Graves, 2002).

Dado que la planificación de la producción involucra diversas variables relevantes para garantizar la rentabilidad y viabilidad de una empresa, el desarrollo de modelos de optimización en esta área ha sido una estrategia muy utilizada para mejorar la productividad de diferentes tipos de empresas y procesos productivos (Vollman *et al.*, 1997, Pochet, 2001, Mula *et al.*, 2006, Oztürk y Ornek, 2010).

En general, los problemas de planificación de la producción resultan más difíciles cuando se presentan diferentes tipos de restricciones, tales como restricciones de capacidad, tamaños de lote mínimo, cambios de los parámetros en el tiempo, entre otros (Constantino, 2000).

Como en casi todas las empresas, la planificación de la producción en la industria de alimentos resulta una función de la administración crítica (Doganis y Sarimveis, 2007), la cual adquiere mayor complejidad si se considera el corto ciclo de vida de los productos y la dificultad para predecir y entender la demanda del consumidor, especialmente en el mundo desarrollado. Grunert (2006) establece que esta complejidad es resultado de la combinación de la creciente diferenciación de los productos alimenticios desde el lugar de suministro, la creciente dinámica y la heterogeneidad de la demanda del consumidor, lo que se traduce en la necesidad de utilizar sistemas cada vez más integrados y complejos, sistemas que sean un soporte para una toma de decisiones oportuna y acertada. El mismo autor agrega que esta complejidad crea nuevas oportunidades para los productores de alimentos mediante la agregación de valor y diferenciación de sus productos.

A pesar de esta mayor complejidad en los sistemas productivos de la industria de alimentos, la literatura sobre investigaciones para apoyar la planificación de productos es aún escasa, centrándose principalmente en productos lácteos, fruta fresca, cárnicos, en especial pollo y vacunos (Lütke, 2005, Doganis y Sarimveis, 2007, Doganis y Sarimveis, 2008).

Entre los modelos de optimización propuestos en esta área, se puede mencionar el trabajo de Doganis y Sarimveis (2008), quienes desarrollaron un modelo para programar máquinas paralelas en una única etapa. Este modelo considera limitaciones de secuencia, donde las restricciones tecnológicas imponen un orden específico de producción, que debe ser seguido siempre. Sin embargo, es posible omitir uno o más productos. El impacto de la elección de una secuencia de producción sobre otra es modelado tomando en cuenta los tiempos de setup, dependientes del tipo de secuencia y los costos. Este modelo fue aplicado a una empresa de productos lácteos.

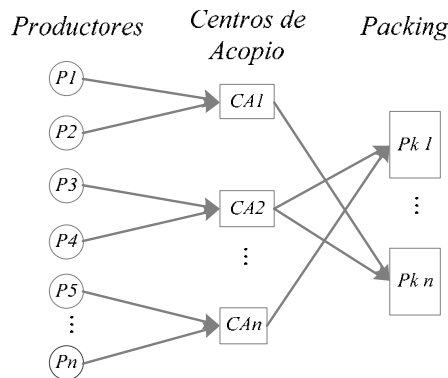
Por otro lado, Bixby *et al.* (2006) desarrollaron un modelo de programación dinámica para la planificación de la producción de la empresa Swift & Company, división vacunos. En la propuesta de estos autores, es utilizado un sistema integrado de 45 modelos de programación lineal, basado en tres formulaciones para calendarizar dinámicamente las operaciones de elaboración de carne en cinco plantas, en tiempo real, de acuerdo a la llegada de las órdenes o pedidos. La herramienta de programación desarrollada e implementada presentó mejoras en el ajuste de órdenes, la entrega a tiempo y en el porcentaje de la producción planificada de una semana para la cual no existen órdenes.

Debido a que la literatura de modelos de optimización para planificar la producción en la industria de alimentos es escasa, y, en particular, para la producción de cárnicos, en este

trabajo se presenta un modelo de Programación Lineal desarrollado para planificar la producción de cortes de cerdo, el cual es un aporte al actual estado del arte en esta área.

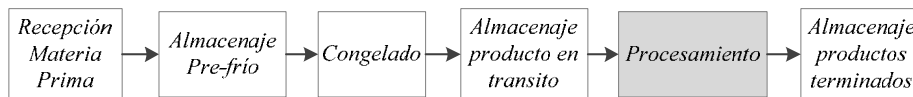
### 3. Cadena de Suministro de Bayas Congeladas

Chile actualmente es el principal país exportador de *berries* del hemisferio sur, ocupando el quinto lugar en las exportaciones de estos productos a nivel mundial. En este ámbito, en los últimos 23 años, las exportaciones de bayas congeladas han aumentado desde 4 mil a 55 mil toneladas, siendo la frambuesa uno de los principales actores, lo que ha posicionado a Chile en el segundo lugar del ranking mundial como exportador de frambuesa congelada. La producción nacional de frambuesa congelada se concentra principalmente en la Región del Maule y agrupa diferentes actores en su cadena de suministro, como productores, centros de acopio y packing. En la Figura se muestra las componentes principales de la cadena de suministro de frambuesa congelada.



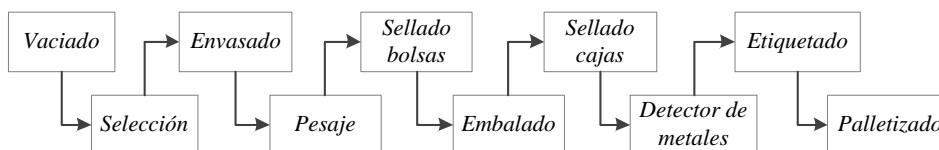
**FIGURA 1. CADENA DE SUMINISTRO DE FRAMBUESA CONGELADA**

Los productores son los encargados de producir y suministrar a los Centro de Acopio (CA) la materia prima que posteriormente será procesada en los Packings (PK), que en la mayoría de los casos exportan directamente. Los Packings son los encargados de recibir la materia prima, almacenarla en cámaras de pre-frío, congelarla, almacenarla en cámaras de producto en tránsito, procesarla y finalmente almacenarla hasta su traslado a puerto y consumidor final, tal como lo muestra la Figura .



**FIGURA 2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE FRAMBUESA CONGELADA**

En este caso, el trabajo de investigación a presentar se desarrolla en la etapa de *procesamiento*, en donde son realizadas distintas operaciones que agrupan la mayoría del recurso humano, teniendo en cuenta además las distintas restricciones de las etapas anteriores como los tiempos de congelado y las respectivas capacidades de las cámaras de pre-frío, congelado y almacenamiento de productos terminados. Respecto del proceso de transformación de la materia prima a producto terminando, en la Figura se muestran las operaciones generales requeridas para la producción de los distintos formatos de frambuesa congelada.



**FIGURA 3. DIAGRAMA DE OPERACIONES DE PROCESO PARA FRAMBUESA CONGELADA**

En la figura anterior se puede apreciar que el proceso comienza con el vaciado de la frambuesa congelada a las cintas de abastecimiento. Luego son derivados a las respectivas cintas

de selección manual, la cual tiene por objetivo descartar la fruta del proceso que no cumpla con las normas de calidad, derivándose en el producto principal que es IQF (*Individually Quick Frozen*) a los subproductos como *W&B (Whole and Broken)*, *Crumble*, entre otros. Posteriormente, la fruta es transportada hacia la operación de envasado en bolsas según formato, luego a pesaje y sellado de las mimas, operaciones que son realizadas en forma manual. Luego, se procede al embalaje en cajas y sellado. Después que la fruta congelada se encuentra en las respectivas cajas, éstas son pasadas a través de un detector de metales, para su posterior etiquetado y palletizado. Finalmente las cajas son trasladadas a la cámara de almacenamiento de producto final (éstas cámaras tienen una temperatura promedio de  $-20$  a  $-22$  °C).

#### 4. Modelo propuesto para la planificación de la producción de frambuesa congelada

A continuación se describe la formulación matemática desarrollada para planificar la producción de frambuesa congelada, definiéndose primero los parámetros y las variables de decisión considerados en el modelo.

##### **Conjuntos y parámetros**

###### Conjuntos

- $V$ : Especies de berries  
 $P$ : Tipos de producto  
 $T$ : Horizonte de planificación  
 $C$ : Tipos de cintas de producción

###### Rendimientos

- $\alpha_{pv}$ : Rendimiento promedio por producto  $p$ ,  $p \in P$ , de la fruta de variedad  $v$ ,  $v \in V$ , medido en porcentaje.  
 $\beta_{pvc}$ : Rendimiento promedio de un operario de la línea de proceso  $c$ ,  $c \in C$ , para el producto  $p$ ,  $p \in P$ , de la fruta de variedad  $v$ ,  $v \in V$ , medido en kilogramos/hora.  
 $\gamma_{cpv}$ : Rendimiento promedio de la línea de proceso  $c \in C$  para el producto  $p$ ,  $p \in P$ , de la fruta de variedad  $v$ ,  $v \in V$ , medido en kilogramos/hora.  
 $\varepsilon$ : Utilización de la capacidad instalada de la planta. Valor medido como la capacidad de proceso real sobre la capacidad nominal, en porcentaje.

###### Costos

- $c_{pv}$ : Costo de producción del producto  $p \in P$  de la fruta de variedad  $v \in V$  (\$/kg)  
 $c_{cong}$ : Costo de congelar (\$/kg).  
 $c_{inv}$ : Costo mantener inventario en cámaras de  $-20^\circ\text{C}$  (\$/kg/día)  
 $c_{inv}^{ext}$ : Costo mantener inventario en cámaras de  $-20^\circ\text{C}$  en bodegas subcontratadas (\$/kg/día)  
 $c_{trans}$ : Costo de transporte de productos desde planta de proceso a bodegas externas subcontratadas (\$/kg).  
 $c_{MO}$ : Costo de mano de obra contratada (\$/Operario).

###### Precios

- $p_{pv}$ : Precio de venta del producto  $p \in P$  de la fruta de variedad  $v \in V$  (\$/kg).

###### Oferta y demanda

- $f_{vt}$ : Cantidad de fruta disponible para ser procesada de la variedad  $v \in V$  en el periodo  $t \in T$ , medido en kilogramos.  
 $d_{pvt}$ : Cantidad demandada del producto  $p \in P$  de la fruta de variedad  $v \in V$  en el periodo  $t \in T$ , medido en kilogramos.

###### Tiempos

- $t_t$ : Tiempo estándar de proceso, medido en horas.  
 $t_{cong}$ : Tiempo en túneles de congelado, medido en horas.

$t_{venta}$ : Tiempo necesario para la equalización y estabilización de la fruta procesada antes de ser comercializada, medido en días.

#### Capacidades

$CI$ : Capacidad de almacenamiento de producto terminado, medido en kilogramos (kg).

$CI_{externo}$ : Capacidad de almacenamiento disponible a subcontratar, medido en kilogramos (kg).

$CTcong_t$ : Capacidad de congelado de la planta, medido en kilogramos por día (kg/día).

$NC_t$ : Número de cintas de producción disponibles en el período  $t$ ,  $t \in T$ , medido en número.

#### **Definición de variables de decisión**

$x_{pvt}$ : Cantidad a producir del producto  $p$ ,  $p \in P$  de la fruta de variedad  $v \in V$  en el periodo  $t \in T$ , medido en kilogramos.

$I_{pvt}$ : Inventario del producto  $p \in P$  de la fruta de variedad  $v \in V$  al final del periodo  $t \in T$ , medido en kilogramos.

$z$ : Cantidad a almacenar en bodegas externas, medido en kilogramos.

$\rho_{pvt}$ : Cantidad a vender del producto  $p$ ,  $p \in P$ , de la fruta de variedad  $v$ ,  $v \in V$ , en el periodo  $t$ ,  $t \in T$ , medido en kilogramos.

$s_{pvt}$ : Cantidad del producto  $p$ ,  $p \in P$ , de la fruta de variedad  $v$ ,  $v \in V$ , que no pudo ser vendida en el en el periodo  $t$ ,  $t \in T$ , medido en kilogramos.

$y_{ct} \in \{0,1\}$ :  $y_{ct} = 1$  si la línea de producción  $c \in C$  entra en funcionamiento en el periodo  $t \in T$ , 0 en el otro caso.

#### **Función Objetivo (FO)**

La presente formulación considera la maximización de la utilidad, la cual se define como los ingresos percibidos por la comercialización de los productos menos los costos incurridos en una venta y/o proceso productivo. La función objetivo se define como:

La función objetivo pretende la maximización de la utilidad, la cual está dada por los *ingresos por ventas*, menos los costos incurridos en: *congelamiento*, *mano de obra*, *almacenamiento en bodegas propias y externas*, *transporte de fruta*. La formulación se presenta a continuación:

$max Z = Ingresos por venta - Costo de congelación - Costo de mano de obra - Costo de almacenamiento - Costo de subcontratación de almacenamiento - Costo transporte de fruta.$

A continuación se detalla la formulación de la función objetivo:

$$MaxZ = \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{v \in V} \sum_{p \in P} [x_{pvt}(p_{pv} - c_{pv} - c_{cong}) - I_{pvt}c_{inv} - 0,2p_{pv}s_{pvt}] - \sum_{c \in C} 12y_{ct}c_{MO} \right\} - z(c_{inv}^{ext} + c_{trans}) \quad (1)$$

#### **Restricciones**

##### *Disponibilidad de fruta*

Debido a las características físicas y organolépticas de la fruta, ésta debe ser procesada en cuanto llegue a la planta de producción, en este caso el *packing*, o en un intervalo de tiempo que no afecte la integridad o calidad del producto final, lo cual queda registrado en la siguiente restricción técnica:

$$x_{pvt} \leq f_{vt}\alpha_{pv} \quad \forall p \in P, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (2)$$

En este caso, la restricción (2) asegura que el total producido para cada variedad de fruta sea procesado en el mismo periodo de tiempo que la fruta llegue a la planta de proceso. En algunos casos, existe un tiempo de espera de la fruta antes de ser procesada, el cual varía entre las 16 horas y las 32 horas, por lo que el promedio por norma se asocia a 24 horas o 1 día, el cual se justifica para la estabilización de la fruta.

##### *Capacidad de procesamiento*

Además de la disponibilidad de fruta, la cantidad de producto terminado no debe superar a la capacidad misma de la planta, la cual de acuerdo a la anterior descripción depende principalmente de las líneas de procesamiento.



$$x_{pvt} \leq \sum_{c \in C} t_i \gamma_{cpv} \gamma_{ci} \varepsilon \quad \forall p \in P, \forall v \in V, \forall t \in T, \forall c \in C \quad (3)$$

La ecuación (3) muestra que la cantidad producida del producto  $p$  de la variedad de fruta  $v$  en el periodo  $t$  debe ser menor o igual a la capacidad de producción total de acuerdo a la capacidad de la línea  $i$  para procesar dicho producto. Además, de considerar si es necesaria la puesta en marcha de algunas o todas las líneas de proceso, lo cual es representado por la variables booleanas de (7).

#### Balance de inventario

Al igual que la capacidad de procesamiento, cada planta o más bien proceso debe cumplir con ciertos balances básicos que aseguren el correcto funcionamiento de la planta. En este caso, la restricción (4) asegura que el inventario al final de cada periodo deberá ser igual al inventario al final del periodo anterior más la cantidad producida en el periodo  $t$  antes de ser comercializada, menos las ventas generadas en el mismo. Para el caso en estudio, existe una restricción impuesta por la norma de inocuidad alimentaria y aseguramiento de calidad, la cual impide la comercialización de un producto terminado antes de completar un tiempo predefinido dentro de las cámaras de almacenaje de producto congelado ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), tiempo que en esta formulación es representado por  $t_{venta}$ .

$$I_{pvt} = \begin{cases} I_{pv(t-1)} + x_{pvt} & t \leq t_{venta} \\ I_{pv(t-1)} + x_{pvt} - \rho_{pvt} & t > t_{venta} \end{cases} \quad \forall p \in P, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (4)$$

Para este caso, la restricción (4) asegura que para un periodo de producción inferior al tiempo  $t_{venta}$ , el inventario considere sólo el inventario al final del periodo anterior, más la producción en el mismo periodo. En el caso que la planificación alcance un periodo superior a  $t_{venta}$ , el balance permite la sustracción de productos por concepto de ventas.

#### Ventas realizadas

Para este caso, la cantidad comercializada por la planta, la cual está dada por las ventas, en estricto rigor debería ser igual a la demanda. Estando en conocimiento que los sistemas productivos son imperfectos, se ha considerado la incorporación de la variable demanda insatisfecha, dada por  $s_{pvt}$ , la cual otorgará un castigo a la empresa en su función objetivo con tal de minimizarla.

$$\rho_{pvt} + s_{pvt} \leq d_{pvt} \quad \forall p \in P, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (5)$$

La restricción (5) asegura que las ventas realizadas y no realizadas sean menor o igual a la cantidad solicitada por el mercado. En este contexto y dada la realidad del sector en estudio, puede darse en algunos casos que la venta puede ser producida en periodos de producción anteriores. En este caso, la restricción (6) permite que la una venta sea producida en distintos periodos anteriores en el horizonte de planificación pero considerando hasta el periodo  $t - t_{venta}$ .

$$\rho_{pvt} \leq \sum_{i=1}^{t-t_{venta}} x_{pvt} \quad \forall p \in P, \forall v \in V, \forall t \in T \wedge t > t_{venta} \quad (6)$$

#### Capacidad de almacenamiento

Dada que se trata de alimentos perecibles y de una rotación de inventario de corto y mediano plazo, una empresa no puede procesar más de lo que puede almacenar en sus bodegas propias y externas. En este caso, la restricción (7) asegura que el inventario generado en el total debe ser a lo más, la capacidad de almacenamiento propio y externo.

$$\sum_{v \in V} \sum_{p \in P} I_{pvt} \leq CI + z \quad \forall t \in T \quad (7)$$

#### Capacidad de congelamiento

Tal como fue descrito en secciones anteriores, uno de los procesos centrales para obtener el producto terminado es el congelamiento. El congelamiento se lleva a cabo en túneles independientes a las cámaras de mantención y almacenamiento, por lo que existe una capacidad

real diaria para la producción y procesamiento de fruta. En este caso la restricción (8) asegura que el total producido en un día debe ser a lo más la capacidad total de los túneles de congelado.

$$\sum_{v \in V} \sum_{p \in P} x_{pvt} \leq CTcong_t \quad \forall t \in T \quad (8)$$

#### Disponibilidad de líneas de procesamiento

Al igual que en otros sistemas de producción, la utilización de los recursos afecta de manera directa en la productividad y estructura de costos. Con énfasis en la utilización real de la capacidad es que se propone la restricción (9), la cual permite un uso discriminado de las líneas de procesamiento, haciendo posible que no todas las líneas estén en operación en un periodo determinado.

$$\sum_{c \in C} y_{ct} \leq NC_t \quad \forall t \in T \quad (9)$$

#### Disponibilidad de capacidad de inventario a subcontratar

Al igual que la restricción de capacidad de almacenamiento propio (7), existe un límite permitido por los propios empresarios a subcontratar en éste ámbito, el cual se ha representado por la ecuación (9).

$$z \leq CI_{externo} \quad (10)$$

$$x_{pvt}, I_{pvt}, z_{pv}, \rho_{pvt}, s_{pvt} \geq 0 \quad (11)$$

$$y_{ct} \in \{0,1\} \quad (12)$$

## 5. Resultados

El modelo fue aplicado usando datos de plantas de embalaje de bayas congeladas de la Región del Maule, Chile, abarcando cinco tipos de productos (IQF – *Individual Quick Freezing* o fruta congelada entera, W&B – *Whole and Broken* o fruta congelada entera y partida, Crumble – fruta congelada desmenuzada, fruta para jugo, y fruta grado B – mezcla de W&B y Crumble), pertenecientes a cuatro especies de *berries* (Frambuesa, Arándano, Mora y Frutilla). El horizonte de planificación es de 210 días, correspondiente al período entre los meses de noviembre y mayo de una temporada de proceso. El modelamiento consideró un proceso productivo de 8,5 horas por día de trabajo y 30 días laborales por mes. Con esta información, el modelo planteado presenta 18.602 variables de decisión, desagregadas en 16.802 variables continuas y 1.260 variables binarias, además de 42.631 restricciones. El modelo fue corrido para 31 escenarios, obteniéndose soluciones óptimas en tiempos computacionales entre 17 y 57 segundos, con un promedio de 41 segundos. El paquete de software utilizado fue CPLEX Optimization Studio, versión 12.4, instalado en un computador portátil con procesador Intel Core i3® de 2.1 GHz con 3 GbRAM de 1.333 MHz.

En la Tabla N° 1 se presenta un resumen de los parámetros más importantes utilizados en el modelo para la planificación de *bayas congeladas*, los cuales fueron modificados para generar los 31 escenarios.

**TABLA N° 1. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO**

Estadístico	Porcentaje de Utilización de la Capacidad de la Planta	Líneas de Proceso Disponibles (N°)	Tiempo Computacional de ejecución del Modelo (segundos)	Capacidad de Almacenamiento de Producto Terminado (kg)	Capacidad de Congelado en los Túneles Estáticos (kg)
Mínimo	75,0%	1	17	700.000	12.000
Promedio	85,9%	6	41	774.194	13.613
Máximo	100,0%	6	56	1.200.000	19.000
Desv. Estándar	4,9%	1	10	131.574	2.512

Usando los resultados de los diferentes escenarios, se realizó un análisis de sensibilidad de la función objetivo (FO) respecto al porcentaje de utilización de la capacidad de la planta de



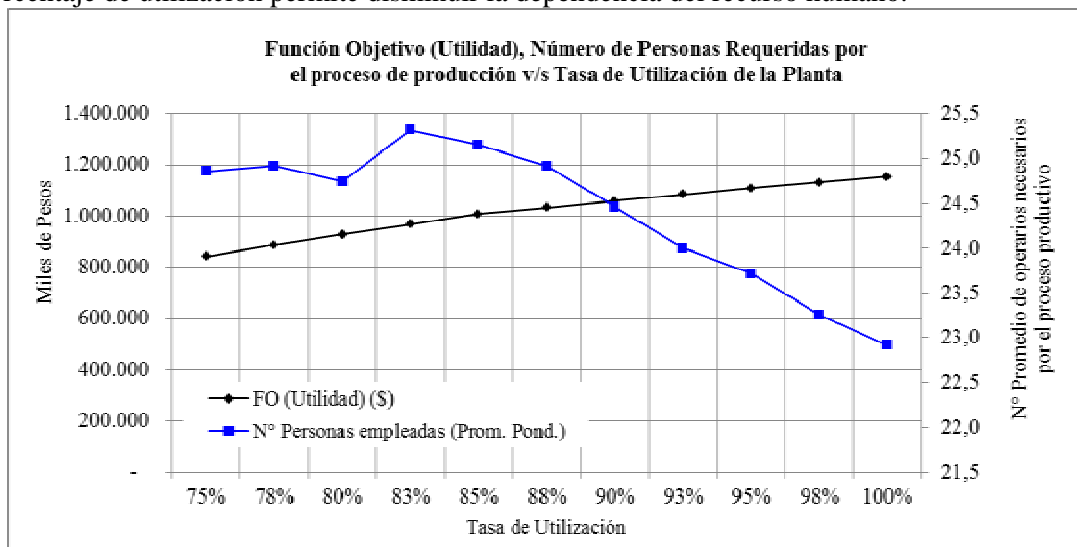
embalaje de bayas congeladas, el número de cintas de proceso disponibles en la planta durante el horizonte de planificación, así como respecto de las capacidades de Almacenamiento y Congelado. Los resultados obtenidos de este análisis se presentan en la Tabla N°2.

**TABLA N°2. RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS POR EL MODELO**

Estadístico	FO (Utilidad) (\$)	N° promedio de cintas de producción (CP) de utilizadas	N° promedio de personas empleadas	N° de CP más utilizado	Máxima cantidad de CP utilizadas
Min	417.538.149	1,00	12	1,0	1,0
Promedio	1.261.615.768	2,14	26	2,0	4,3
Max	2.175.267.516	2,47	30	2,0	6,0
Desv. estándar	457.825.841	0,28	3	0,2	1,5

Al momento de iniciar este trabajo se tenía seguridad que la capacidad de almacenamiento, al igual que la de congelado, correspondía a variables críticas del proceso. Luego de la utilización y aplicación del presente modelo, se logró descartar que el almacenamiento es un cuello de botella. Esto debido a que las variables más influyentes en la función objetivo fueron la capacidad de congelado, número de CP utilizadas, n° de personas empleadas y max n° CP utilizadas. En este ámbito, es importante mencionar que luego de un estudio realizado a distintas empresas de embalaje del rubro, cerca del 50% de ellas creían que la capacidad de congelado no era un problema ni impedimento para mejorar la rentabilidad del proceso.

En cuanto al análisis de los valores obtenidos de la función objetivo, a continuación en la Figura N° 4, se muestra la variabilidad de la utilidad, y el número promedio de personas demandadas por el proceso productivo, en función del porcentaje de utilización de la planta, la cual se define como la capacidad de proceso utilizada sobre la capacidad nominal de los equipos. Se observa además, que al aumentar la utilización de la planta, la rentabilidad y mano de obra también se incrementan, para este último hasta el 83%, a partir de este valor el aumento en el porcentaje de utilización permite disminuir la dependencia del recurso humano.



**FIGURA N° 4. SENSIBILIDAD DE LA UTILIDAD Y EL RECURSO HUMANO PRODUCTIVO RESPECTO DE LA TASA DE UTILIZACIÓN DE LA PLANTA**

## 6. Conclusiones

Las dificultades actuales en plantas de embalaje de bayas congeladas, reflejan en su mayoría la rigidez ante las eventuales fluctuaciones del mercado, como también el medio ambiente. En este ámbito, se desarrolla un modelo de planificación de la producción que brinde flexibilidad a las operaciones considerando la complejidad del problema.

En este trabajo fueron considerados estudios respecto al proceso de producción de bayas congeladas, con el propósito de determinar el proceso más relevante dentro del sistema de producción. Los datos utilizados correspondieron a estimaciones generadas a partir de datos reales de empresas del sector en cuestión, de los cuales se lograron obtener los tipos de productos y subproductos para cuatro distintas variedades de frutos, indicando rendimientos del producto respecto de la variedad, precios, penalizaciones por demanda no cumplida, costos de inventario, número de personas, cantidad de cintas de proceso, disponibilidad de fruta, demanda, etc.

El modelo, considera como parámetros, disponibilidad de fruta, rendimientos de cada producto por tipo de variedad de fruto, disponibilidad de tiempo para proceso normal, capacidades de proceso para cada producto y subproducto, capacidad de almacenamiento, capacidad de congelación, ordenes de productos, tasa de utilización, así como los precios y costos asociados a las operaciones. Por otro lado, en el modelo no se consideran parámetros tales como: instalaciones eléctricas, red potable o diseño de nuevos equipos o líneas. Sólo se consideran los equipos y las líneas disponibles con los que cuenta la empresa. De esta forma, contar con un variado número de parámetros ofrece una flexibilidad en términos de operaciones, tamaño y diferentes enfoques de producción.

Cabe señalar que en la actualidad, la planificación es realizada por personal de operaciones de las plantas en forma manual, demorando muchas veces horas en tenerla lista. Esta forma de planificar, además del alto tiempo involucrado, tiene gran rigidez, pues no permite incorporar fácilmente cambios en los parámetros, teniendo como consecuencia pérdidas o disminución de la utilidad del proceso.

## Referencias

- Bixby, A., Downs, B., Self, M.** (2006), A scheduling and capable-to-promise application for swift & company. *Interfaces*, vol. 36, 1:69-86.
- Dabbene, F., Gay, P., Sacco, N.** (2008), *Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, Part I: Background and methodology*. *Biosystems engineering*, 99, 348–359.
- Dogains, P., Sarimveis, H.**, Mixed integer linear programming scheduling in the food industry, en Erdögdu, F (Ed.), *Optimization in Food Engineering*, CRC press, 2008.
- Duchessi, P. y O'keefe R.** (1990), A Knowledge-based Approach to Production Planning, *The Journal of the Operational Research Society*, 41(5), 377–390.
- Graves S. C.**, Manufacturing Planning and Control, en Pardalos, P. y Resende M. (Eds.), *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press, New York, 728–746, 2002.
- Graves S. C.**, *Uncertainty and Production Planning*, Massachusetts Institute of Technology - MIT, 2008, <http://web.mit.edu/sgraves/www/papers/index.htm>, 2010.
- Grunert, K. G.** (2006), How Changes in Consumer Behaviour and Retailing affect Competence Requirements for Food Producers and Processors, *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 6(11), 3–22.
- Hax, A. C. y Meal H. C.**, Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling, en M. Geisler A. (Ed.), *Studies in Management Sciences, Vol. I, Logistics*, North Holland-American Elsevier, New York, 1975.
- Lütke, M.** (2005), *Advanced Planning in Fresh Food Industries: Integrating Shelf Life into Production Planning*, Physica-Verlag.
- Oztürk, C. y Ornek, A. M.** (2010), Capacitated lot sizing with linked lots for general product structures in job shops, *Computers and Industrial Engineering*, 58, 151-164.
- Silver E., Dixon P.** (1978), A Decision for Establishing Run Quantities for the Case of Time-Varying Demand and Production Capacity Restrictions, *APICS Conference Proceedings*, 818-827.
- Labuza, T.P.** (1982), *Shelf-life dating of foods*. Food and nutrition press, Wesport, CT, USA.
- Lükte, M.** (2005), *Shelf Life Integration in Poultry Processing*, Advanced Planning in Fresh Food Processing: Integrating the shelf life into production planning. Physica-Verlag, Springer.
- Trienekens, T., Zuurbier, P.** (2008), *Quality and safety standards in the food industry, developments and challenges*. *Int. J. Production Economics*, 113, 107–122.

**Van der Vorst, J.G.A.J., Van Kooten, O., Marcelis, W., Luning, P., Beulens, A.J.M.** (2007), *Quality controlled logistics in food supply chain networks: integrated decision-making on quality and logistics to meet advanced customer demands*. Proceedings of the 14<sup>th</sup> International EurOMA Conference, Ankara, Turkey.

**Van Donk, D.P., Akkerman, R., Van der Vaart, T.** (2008), *Opportunities and realities of supply chain integration: the case of food manufactures*. British Food Journal, 110, 218-235.