

## MODELO PARA LA PLANIFICACIÓN DE COSECHAS EN HUERTOS DE MANZANAS

**Marcela C. González-Araya**

Departamento de Modelación y Gestión Industrial Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca  
Camino a Los Niches km. 1, Curicó, Chile  
mgonzalez@utalca.cl

**Wladimir E. Soto-Silva**

Programa de Magíster en Gestión de Operaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Talca  
Camino a Los Niches km. 1, Curicó, Chile  
wladimir\_soto@alumnos.utalca.cl

**Luis G. Acosta Espejo**

Departamento de Industrias, Universidad Técnica Federico Santa María  
Av. Santa María, 6400, Vitacura, Santiago, Chile  
luis.acosta@usm.cl

### RESUMEN

Uno de los principales factores que afecta la calidad de la manzana es el punto de maduración en la cual es cosechada. Por esta razón, se desarrolla un modelo de optimización que incorpora este factor, para apoyar la planificación de las faenas agrícolas en huertos de manzanas. El modelo busca minimizar los costos de mano de obra, de uso de maquinaria y de pérdida de calidad de la fruta, de manera de atender la demanda de las plantas de embalaje, considerando la capacidad de procesamiento de éstas, la producción en los huertos y las ventanas de tiempo para realizar la cosecha. Al aplicar este modelo a tres huertos de manzanas de la Región del Maule, Chile, se obtuvo una importante disminución en los costos de mano de obra y en la pérdida de ingresos por cosechar fruta de baja calidad.

**PALABRAS CLAVE. Programación Lineal Entera Mixta. Planificación de cosecha. Productos Perecibles.**

**AG & MA - IO en la Agricultura y el Medio ambiente**

### ABSTRACT

One of the main factors that affect the apple quality is the maturation point in which the fruit is harvested. For this reason, an optimization model that incorporates this factor is developed, aiming to support harvest planning decisions in apple orchards. The model seeks to minimize the labor costs, machinery use and loss of fruit quality, in order to satisfy packing plants demand, considering processing capacity of plants, production in the orchards and time windows for doing the harvest. This model was applied to three apple orchards of Maule Region, Chile, obtaining an important reduction in the labor costs and in the loss of income for harvesting low quality fruit.

**KEYWORDS. Mixed Integer Linear Programming, Planning Harvest, Perishable Products.**

**AG & MA - OR in Agriculture and Environment**

## 1. Introducción

La agricultura en Chile en los últimos años ha perdido competitividad. En el período desde 2005 a 2008 hubo una disminución progresiva de la tasa de crecimiento del sector agropecuario, siendo superada por el crecimiento del PIB Nacional (Contreras, 2008). Esta pérdida de competitividad se debe principalmente a la baja en un 30% del precio del dólar, a un alza de 300% en los precios de los insumos, tales como fertilizantes (Contreras, 2008), y a la disminución en la disponibilidad de mano de obra agrícola y al aumento de 12% en su costo (Domínguez, 2007, Alarcón, 2008).

La producción de manzana tiene una participación del 32% en el total de la fruta fresca exportada en Chile, siendo superada solamente por la uva, con un 35% de participación (Centro de Pomáceas, 2010). La plantación de manzanos en la Región del Maule corresponde al 54% del total de manzanos en el país (INE, 2007), en donde ésta tiene una participación del 62% de la producción total de manzana roja y del 46% de la manzana verde en el país (ODEPA, 2007). En el año 2009, en la Región del Maule la producción de manzanas tuvo ventas por sobre el 38% del total de la exportación de manzana en el país (Centro de Competitividad del Maule, 2010).

Uno de los principales factores que afecta la calidad de la manzana es el punto de maduración en la cual es cosechada. Por esta razón, la planificación de cosecha debe considerar este factor y programar el uso eficiente de los recursos para cuando la fruta se encuentre en su tiempo de recolección. Los recursos necesarios en el proceso de cosecha de manzana son mano de obra, equipos y maquinaria, siendo la mano de obra el recurso crítico de este proceso. En los últimos 10 años, ha habido una disminución del 10% de la cantidad de trabajadores en las faenas agrícolas (Contreras, 2008), ocasionando, en los últimos 3 años, un incremento del 12% en su costo (Alarcón, 2008). Esta situación ha mermado la rentabilidad del productor agrícola, a pesar de que la superficie plantada de manzanas se ha mantenido constante en los últimos 10 años y que el rendimiento por hectárea ha crecido en aproximadamente 73% (Centro de Competitividad del Maule, 2010), pues, al no contar con la mano de obra necesaria para la recolección, la calidad de la fruta para exportación se ha visto perjudicada, al no ser recogida en su punto de maduración.

En este trabajo se propone un modelo de programación matemática para apoyar decisiones de planificación en la cosecha de un huerto, el cual busca minimizar la cantidad de recursos utilizados en las faenas, garantizando la obtención de una fruta de buena calidad para ser exportada. Más específicamente, este modelo determina la cantidad de mano de obra e insumos a utilizar durante una temporada de cosecha, de manera tal de minimizar los costos por el uso de estos recursos. Además, entrega un cronograma de cosecha que minimiza la pérdida de fruta por no alcanzar los parámetros de calidad deseables para su exportación. Dentro de las restricciones del modelo está atender la demanda de fruta de las plantas de embalaje, respetar la capacidad de procesamiento de las plantas de embalaje, la disponibilidad de producción en los cuarteles, el tiempo de recolección, según variedad de manzana plantada en los cuarteles. El modelo fue aplicado a tres huertos frutícolas de la Región del Maule, específicamente de la Provincia de Curicó, en donde se tomaron en consideración datos de la temporada de cosecha 2009/2010 de cada uno de los huertos.

A continuación, en la Sección 2, se hace una revisión de modelos de programación matemática desarrollados y aplicados en el área agrícola y forestal. En la Sección 3 se presenta el modelo propuesto para planificar de cosecha en huertos de manzanas. En la Sección 4 se realiza un resumen del análisis de los principales resultados obtenidos con el modelo. Finalmente, en la Sección 5 se entregan las conclusiones de este trabajo.

## 2. Planificación de Cosecha en el Área de Agrícola y Forestal

Para la planificación de la producción, Chase *et al.* (2009) señalan que es un proceso que implica traducir los planes empresariales anuales y trimestrales a planes de trabajo y producción de mediano plazo, entre 6 y 18 meses. Su objetivo es minimizar el costo de los recursos requeridos para satisfacer la demanda durante el período de mediano plazo, buscando determinar la configuración óptima de la tasa de producción, el nivel de la fuerza laboral y el

inventario disponible.

En el área de recursos naturales, Schuster (2004) propuso un modelo de planificación de la producción de uva para elaboración de jugo. Otro modelo desarrollado en esta área es el de Tadei *et al.* (1995). Este modelo busca minimizar los niveles de stock, para satisfacer una demanda conocida, determinando la cantidad de personal necesario para cada mes del año. De este modo, el modelo estima la cantidad de personal que se debe subcontratar en los meses de demanda alta. El modelo es aplicado a una empresa que produce productos perecederos, algunos estacionales y otros no.

En la planificación de cosecha existen dos áreas de gran importancia dentro de los recursos naturales, el área agrícola y el área forestal. Ambos sectores comparten problemas comunes tales como: la escasez de recursos, la preocupación por los efectos ambientales de producción y la necesidad de procesos de producción eficientes (Weintraub y Romero, 2006). A pesar de que estas dos áreas son diferentes, se asemejan en la naturaleza de los recursos productivos utilizados, en el horizonte de tiempo considerado, en la planificación de cosecha y en sus procesos operativos (Weintraub y Romero, 2006).

La cosecha es uno de los procesos de mayor importancia para el sector forestal, debido a la multiplicidad de factores y etapas que ésta tiene, dentro de las cuales se encuentra la tala del árbol que, junto al transporte, explican alrededor de un 75% de los costos de producción de madera asociados a la cosecha (Bossi, 2007).

Dentro de los modelos de planificación de cosecha forestal, Laroze *et al.* (1998) presentan modelos de optimización de cosecha, donde a través de diferentes funciones objetivos, analizan las modificaciones en la asignación de los recursos durante la faena de cosecha, con el propósito de optimizar la estabilidad laboral y los costos asociados. Los autores destacan que en las faenas silvícolas existe una gran inestabilidad laboral, debido principalmente a su temporalidad y corta duración. Como consecuencia de esta inestabilidad, se cuenta con una continua rotación de mano de obra. Una ayuda para aminorar esta situación sería conocer con anticipación las jornadas-hombre requeridas para llevar a cabo las actividades, considerando los costos asociados y la estabilidad laboral necesaria en este tipo de faenas.

En relación a la planificación de cosecha en el área agrícola, existen trabajos que han propuesto diferentes modelos de programación matemática aplicados al área. Una revisión de investigaciones en el área agrícola abarcando los últimos 40 años puede ser encontrada en Bjordal *et al.* (2011). Si bien es cierto, dentro del área agrícola, modelos de optimización para la planificación de cosecha han sido propuestos para diferentes tipos de productos hortofrutícolas, tales como naranja (Caixeta-Filho, 2006), azúcar (Higgins y Laredo, 2006), uva (Ferrer *et al.*, 2008), tomate (Van Berlo, 1993), no existen referencias de autores que hayan estudiado, a través de modelos matemáticos, las faenas de cosecha para la planificación en huertos de manzanas.

Los diferentes modelos desarrollados para la programación de la cosecha reflejan el hecho de que las operaciones de recolección varían de un cultivo a otro (Glen, 1987). La mayoría de los cultivos deben ser cosechados durante un período relativamente corto y de intensa actividad. Además, las técnicas que ayudan a la planificación de esas actividades pueden aportar un beneficio económico considerable. Glen (1987) considera que la inclusión de modelos de planificación de cosecha ha realizado una contribución importante en el diseño y evolución de los sistemas de recolección de productos agrícolas.

Cabe resaltar que existen trabajos que realizan una revisión de la literatura sobre la cadena de suministro agrícola, sin embargo, en ellos no se mencionan propuestas para apoyar la planificación del proceso de manzanas. Entre estos trabajos se puede citar a France y Thornley (1984), Glen (1987), Lucas y Chhajer (2004) y Ahumada y Villalobos (2009), Audsley y Sandars (2009).

Dentro de los modelos de optimización aplicados a la cosecha en el área agrícola, Ferrer *et al.* (2008) presentan un modelo de programación y planificación de las operaciones de cosecha de uvas de vino. El modelo considera los costos propios de las actividades de recolección y aquellos atribuidos a la pérdida de calidad de las uvas, ya sea por el adelanto o retraso de la cosecha. Las decisiones en este modelo incluyen la cantidad de uvas destinadas a la cosecha de

los diferentes cuarteles del huerto en cada período, la cual depende de la madurez de la fruta, las rutas de los trabajadores en el huerto, el itinerario de la cosecha entre los diferentes cuarteles, y el número de trabajadores a contratar o despedir por cada período de la temporada de cosecha. Uno de los principales aportes de este modelo es la representación de la calidad fruta en la función objetivo del modelo. Ésta corresponde a una penalización en la función objetivo, la cual se activa cuando se retrasa la cosecha de la fruta en un determinado cuartel, para una determinada ventana de tiempo de extracción de la uva.

Finalmente, Ahumada y Villalobos (2009), resaltan que la planificación de cosecha de alimentos perecederos requiere de una mayor cantidad de investigaciones.

Debido a que en la literatura sobre modelos de optimización para la planificación de cosecha no se ha desarrollado un modelo para planificar la cosecha de manzana, en este trabajo se propone un modelo de Programación Lineal Entera Mixta desarrollado para este propósito. La importancia de contar con este modelo se debe a que el 32 por ciento de la fruta fresca que se exporta desde Chile corresponde a manzanas.

### 3. Modelo Propuesto para la Planificación de Cosecha Agrícola en Huertos de Manzana

A continuación se presenta la formulación del modelo propuesto para la planificación de cosecha de manzanas, buscando minimizar los costos de mano de obra, insumos y pérdida de fruta por baja calidad.

#### *Conjuntos y parámetros usados en la formulación*

Los conjuntos de índices que se consideran en el modelo son los siguientes:

$K$ : Conjunto de modos de cosecha,  $K = \{1: \text{cosecha mecánica}, 2: \text{cosecha manual}\}$ .

$C_k$ : Conjunto de cuarteles en un huerto que utilizan el modo de cosecha  $k$ ,  $k \in K$ .

$C$ : corresponde al conjunto total de cuarteles factibles de ser cosechados al interior del huerto,  
 $C = C_1 \cup C_2$ .

$TMO$ : Conjunto de tipos de mano de obra existentes,  $TMO = \{1: \text{mano de obra fija}, 2: \text{mano de obra variable}\}$ .

$P$ : Conjunto de tipos de plantas procesadoras de frutas,  $P = \{1: \text{para exportación}, 2: \text{comercial}\}$ .

$T$ : Horizonte del período de planificación de cosecha del huerto.

$PMC_{ct}$ : Porcentaje de pérdida de manzana debido a mala calidad de la fruta en el cuartel  $c$ ,  $c \in C$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ .

$CH_l$ : Costo de contratar una unidad de mano de obra  $l$ ,  $l \in TMO$ .

$CF_l$ : Costo de despido de una unidad de mano de obra  $l$ ,  $l \in TMO$ .

$CMO_{cl}$ : Costo de la mano de obra  $l$ ,  $l \in TMO$ , para la jornada laboral en el cuartel  $c$ ,  $c \in C_2$ .

$Cmaq$ : Costo por hora de trabajo de una máquina para la cosecha.

$ProdMaq_c$ : Productividad para la cosecha en forma mecánica en el cuartel  $c$ ,  $c \in C_1$ , expresada en kilogramos por hora.

$ProdMofi_c$ : Productividad para la cosecha en forma manual en el cuartel  $c$ ,  $c \in C_2$ , con mano de obra fija, expresada en kilogramos/hombre.

$ProdMova_c$ : Productividad para la cosecha en forma manual en el cuartel  $c$ ,  $c \in C_2$ , con mano de obra variable, expresada en kilogramos/hombre.

$EC_{ckp}$ : Cantidad de manzana a cosechar en el cuartel  $c$ ,  $c \in C$ , cosechada con el modo  $k$ ,  $k \in K$ , con destino a la planta procesadora  $p$ ,  $p \in P$ , expresada en kilogramos.

$CPL_{kpt}$ : Capacidad de proceso de la planta  $p$ ,  $p \in P$ , para las manzanas cosechadas con el modo  $k$ ,  $k \in K$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ , expresada en kilogramos.

$MC_{ctk}$ : Máxima cantidad de manzana que puede ser cosechada en el cuartel  $c$ ,  $c \in C$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ , utilizando el modo de cosecha  $k$ ,  $k \in K$ , expresada en kilogramos.

$MV_k$ : Mínimo cantidad de manzana que puede ser cosechada en un cuartel usando el modo de cosecha  $k$ ,  $k \in K$ , expresada en kilogramos.

$DM_t$ : Disponibilidad de máquinas en el período  $t$ ,  $t \in T$ , expresada en horas.

$M$ : Un escalar positivo muy grande.

$\lambda$ : Parámetro que sirve de penalización por cosechar fruta sin las condiciones de madurez necesarias y, además, se utiliza para transformar la pérdida de fruta de kilogramos a pesos o unidades monetarias, con el fin de homogeneizar las unidades en la función objetivo.

$N$ : Número mínimo de personal fijo necesario para la cosecha. Este es la base de trabajadores para la temporada que debe tener asegurada su participación y que son contratados con anterioridad a las faenas.

*MaxTrabVariables*: Número máximo de personal variable permitido en la planificación de cosecha. Este valor es constante en toda la temporada.

*CapBins*: Capacidad de carga promedio de un bin (en kilogramos).

#### Variables de decisión

$X_{ctkp}$ : Cantidad de manzana (en kilogramos) cosechados en el cuartel  $c$ ,  $c \in C$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ , con el modo de cosecha  $k$ ,  $k \in K$ , y destinada a la planta procesadora  $p$ ,  $p \in P$ .

$YV_{ctp} = 1$ , si se cosecha en el cuartel  $c$ ,  $c \in C$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ , con destino a la planta procesadora  $p$ ,  $p \in P$ ;  $YV_{ctp} = 0$ , en caso contrario.

$THT_t$ : Cantidad de trabajadores contratados en el período  $t$ ,  $t \in T$ , y que permanecerán durante todo el período de cosecha.

$TVT_t$ : Número de trabajadores variables contratados al inicio del período  $t$ ,  $t \in T$ .

$TFV_t$ : Número de trabajadores variables despedidos al finalizar el período  $t$ ,  $t \in T$ .

$tf_{ct}$ : Número de trabajadores fijos para el cuartel  $c$ ,  $c \in C_2$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ .

$tvc_{ct}$ : Número de trabajadores variables para el cuartel  $c$ ,  $c \in C_2$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ .

$Hmaq_{ct}$ : Cantidad de horas máquina necesarias para la cosecha del cuartel  $c$ ,  $c \in C_1$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ .

$NumBins_{ctp}$ : Número de bins necesarios en el cuartel  $c$ ,  $c \in C$ , en el período  $t$ ,  $t \in T$ , que serán destinados a la planta procesadora  $p$ ,  $p \in P$ .

#### Formulación matemática

La función objetivo busca minimizar los costos asociados a una temporada de cosecha.

Min {costos por maquinaria + costos de alteración de la mano de obra fija + costos por alteración de la mano de obra variable + costo por remuneraciones + costos por pérdida de calidad de la fruta}

Las expresiones consideradas en la función objetivo se detallan a continuación:

$$\text{Costos por maquinaria} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C_1} Cmaq \times Hmaq_{ct} .$$

$$\text{Costos de alteración de la mano de obra fija} = (CH_1 + CF_1)THF_1 .$$

$$\text{Costos de alteración de la mano de obra variable} = \sum_{t \in T} CF_2 \times TFV_t + \sum_{t \in T} CH_2 \times THV_t .$$

$$\text{Costo por remuneraciones} = \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} CMO_{c1} \times tf_{ct} + \sum_{t \in T} \sum_{c \in C} CMO_{c2} \times tv_{cjt} .$$

$$\text{Costos por pérdida de calidad de la fruta} = \lambda \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P} PMC_{ct} X_{ctkp} .$$

En el costo de la pérdida de la calidad de la fruta se considera la manzana extraída durante cada período de la temporada de cosecha y el porcentaje de pérdida de calidad de la fruta. Esto permite recoger el hecho que durante el período de cosecha en cada uno de los cuarteles, existe pérdida de calidad de la manzana por no contar con los parámetros de madurez necesarios para su exportación. Esta pérdida de calidad es transformada en unidades monetarias, a través del parámetro  $\lambda$ (\$/kgr.); este parámetro corresponde a la cantidad que deja de percibir el productor cuando un kilogramo de manzana es clasificado como fruta comercial en lugar de fruta de exportación, disminuyendo su retorno.

#### Restricciones

- La cantidad de fruta cosechada en cada período está restringida por la capacidad de la planta

procesadora:  $\sum_{c \in C} X_{ctkp} \leq CPL_{kpt}, \forall k \in K, p \in P, t \in T.$

- Se debe cumplir con la cantidad estimada de fruta que debe recibir cada planta, proveniente de un determinado cuartel y que haya sido obtenida por un determinado modo de cosecha:
 
$$\sum_{t \in T} X_{ctkp} = EC_{ckp}, \forall k \in K, p \in P, c \in C.$$
- La cantidad de manzanas cosechada durante un período de la temporada en un cuartel, utilizando un modo de cosecha, no debe superar a la cantidad máxima que se puede cosechar por un modo de cosecha en particular, en el mismo período:
 
$$\sum X_{ctkp} \leq MVC_{ctk}, \forall c \in C, t \in T, k \in K.$$
- La cosecha de un cuartel, durante la temporada, se debe realizar dentro de una ventana de tiempo establecida previamente por los encargados de huerto:
 
$$\sum_{t \in T} YV_{ctp} \leq ModVent_c, \forall c \in C, p \in P.$$
- La cosecha de un cuartel se deba realizar en, por lo menos, un día dentro de la ventana de cosecha establecida:
 
$$\sum_{t \in T} YV_{ctp} \geq 1, \forall c \in C, p \in P.$$
- La cantidad de manzanas cosechada en cada cuartel, en cada período, debe ser mayor o igual a la cantidad mínima de kilogramos estimados para que la cosecha sea rentable en cada cuartel:
 
$$X_{ctkp} \geq MV_k \times YV_{ctp}, \forall c \in C, t \in T, k \in K, p \in P \wedge EC_{ckp} \neq 0.$$
- Debe realizarse la cosecha en algún período dentro de la ventana de cosecha de cada cuartel, siempre que haya fruta a cosechar. En este caso, se utilizó como valor para  $M$  (escalar muy grande), la cantidad máxima de fruta cosechada en un período de tiempo:
 
$$X_{ctkp} \leq M \times YV_{ctp}, \forall c \in C, t \in T, k \in K, p \in P.$$
- La cantidad de manzanas cosechadas por maquinaria en un cuartel, en cada período, está limitada por la productividad de la máquina en ese cuartel:
 
$$\sum_{p \in P} X_{ct1p} \leq ProdMaq_c \times Hmaq_{ct}, \forall c \in C_1, t \in T.$$
- La cantidad de manzanas cosechadas en forma manual en un cuartel, en cada período, está limitada por la productividad de cada tipo de mano de obra (fija o variable) para ese cuartel:
 
$$\sum_{p \in P} X_{ct2p} \leq ProdMofi_c \times tfc_{ct} + ProdMova_c \times tvc_{ct}, \forall c \in C_2, t \in T.$$
- La cantidad de kilogramos de manzanas cosechadas en un cuartel, según modo de cosecha y planta de destino, depende del número de bins disponibles para una temporada de cosecha:
 
$$X_{ctkp} \leq CapBins \times NumBins_{ctp}, \forall c \in C, t \in T, k \in K, p \in P.$$
- Se debe respetar el número de horas-máquina disponibles por período:
 
$$\sum_{c \in C_2} Hmaq_{ct} \leq DM_t, t \in T.$$
- La cantidad de mano de obra fija utilizadas para un período, considerando todos los cuarteles a cosechar, debe ser menor o igual que la cantidad de mano de obra fija contratada para ese período:
 
$$\sum_{c \in C_2} tfc_{ct} \leq THF_t, \forall t \in T.$$
- La mano de obra fija utilizada para toda la temporada de cosecha debe ser mayor o igual que el número de trabajadores contratados por el huerto para las faenas:
 
$$\sum_{c \in C_2} tfc_{ct} \geq N, \forall t \in T.$$
- Se debe garantizar que la mano de obra variable a utilizar en cada cuartel, en cada período, debe sea menor o igual que un valor máximo de trabajadores variables disponibles por período en la temporada. Este valor es fijo y preestablecido según datos históricos de la



$$\text{cosecha: } \sum_{c \in C_2} tvc_{ct} \leq \text{MaxTrabVariables}, \forall t \in T.S$$

- La cantidad de mano de obra fija estimada para un período de planificación debe ser igual en todos los períodos dentro de la temporada de cosecha:  $THF_t = THF_{t+1}, t = 1, \dots, |T| - 1$ .
- En el primer período, la mano de obra variable utilizada en todos los cuarteles debe ser igual a la mano de obra variable contratada en el período:  $\sum_{c \in C_2} tvc_{ct} = THV_t, t = 1$ .
- Balance de la mano de obra variable:  $\sum_{c \in C} tvc_{ct} = \sum_{c \in C} tvc_{ct-1} + THV_t - TFV_t, \forall t \in T : t \geq 2$ .

Las demás restricciones corresponden a las restricciones de no negatividad e integralidad de las variables de decisión, según corresponda.

#### 4. Principales Resultados

El modelo presentado en la sección 3 fue aplicado a tres casos de estudio, correspondientes a tres huertos frutícolas de la Región del Maule. Estos huertos presentan características diferentes en cuanto al número de cuarteles, variedades de manzana, hectáreas plantadas y estimación de kilogramos de manzana a cosechar durante la temporada. En la Tabla N° 1 se presentan los valores de las características de los huertos.

**TABLA N° 1. CARACTERÍSTICAS DE HUERTOS TOMADOS COMO CASO DE ESTUDIO**

Agrícola	Hectáreas plantadas	N° Cuarteles	Variedades	Estimación de cosecha temporada 2009/ 2010 (Kg)
Agrícola A	36,4	13	Gala-Roja-Granny-Fuji	844300
Agrícola B	39,3	12	Gala-Roja-Granny-Fuji	2186850
Agrícola C	16,9	5	Gala-Roja-Fuji	1489084

El horizonte de planificación considerado es de 64 días, tiempo en el cual se cosecha la totalidad de variedades de manzanas presentes en un huerto. Esta planificación se extiende desde mediados de febrero a mediados de abril, aproximadamente.

Los modelos fueron corridos en el software CPLEX Optimization Studio v.11.0 con licencia académica, utilizando un computador con las siguientes características: Procesador AMD Turion (tm) 64x2 Mobile Technology TL-60 2.00 GHz. Memoria: 2 Gb. Disco Duro: 512 Gb. Los tiempos asociados al aplicar el modelo en los casos de estudio para la Agrícola A, Agrícola B y Agrícola C son 1.364 segundos, 1.230 segundos y 2.148 segundos, respectivamente. Estos tiempos son razonables considerando que se está planificando la mano de obra, insumos y maquinarias para toda la temporada de cosecha.

En las Tablas N° 2, N° 3 y N° 4 se presentan los resultados al aplicar el modelo propuesto a los tres casos de estudio, comparándolos con los datos observados en la temporada modelada, temporada 2009/2010.

**TABLA N° 2. RESUMEN CON LOS RESULTADOS DE LA MANO DE OBRA (FIJA Y VARIABLE)**

Agrícola	Costo total observado en la temporada 2009/2010 (a)	Costo total entregado por modelo propuesto (b)	% Diferencia (100*(a-b)/a)
Agrícola A	\$ 10.091.620	\$ 8.022.518	21%
Agrícola B	\$ 36.021.546	\$ 30.934.388	14%
Agrícola C	\$ 11.456.786	\$ 9.433.000	18%

Los ahorros en costo que se observa en la Tabla 2 se deben, principalmente, a una mejor distribución del personal en cada uno de los períodos y cuarteles en donde se realiza la

cosecha de manzana.

En relación a las jornadas/hombre a utilizar en cada uno de los huertos, en la Tabla N° 3 se muestran los resultados del modelo propuesto y los valores utilizados en la temporada.

**TABLA N° 3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS JORNADAS/HOMBRES**

Agrícola	Valor observado en la temporada 2009/2010 (a)	Valor entregado por modelo propuesto (b)	% Diferencia (100(a-b)/a)
Agrícola A	1.214	976	20%
Agrícola B	2.916	2.651	9%
Agrícola C	1.516	1.049	31%

En relación a la pérdida de manzanas por concepto de calidad, la Tabla N° 4 muestra que utilizando el modelo de planificación es posible ayudar al productor a bajar su merma en los ingresos en el proceso de venta de la manzana.

**TABLA N° 4. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA PÉRDIDA POR CALIDAD**

Agrícola	Valor observado en la temporada 2009/2010 (a)	Valor entregado por modelo propuesto (b)	% Diferencia (100(a-b)/a)
Agrícola A	\$ 4.707.570	\$ 4.153.363	12%
Agrícola B	\$ 13.811.850	\$ 11.473.279	17%
Agrícola C	\$ 8.680.986	\$ 7.921.998	9%

En la Tabla 5 se presenta parte de los resultados que se puede generar para apoyar en la organización y distribución de la mano de obra, los bins y los kilogramos de fruta a cosecha durante la temporada para la Agrícola C. Esta información, más detallada, indica que para la temporada en estudio, en promedio durante los días de cosecha, se cuenta con 20 trabajadores (de los cuales 8 son trabajadores fijos). Con un promedio de extracción de 23.266 kilogramos por jornada laboral. Además se necesita 1.046 jornadas/hombres durante todo el período de planificación de cosecha, tomando en consideración a las jornadas hombre tanto del personal fijo como variable. La extensión de esta cosecha es de 42 jornadas laborales. Para la recolección de las manzanas del huerto se necesitan un total de 4.294 bins, de los cuales 3.578 van a la manzana de exportación y 716 a la manzana con destino comercial.



**TABLA N° 5. DISTRIBUCIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA MANO DE OBRA, BINS DURANTE LA TEMPORADA EN LA AGRÍCOLA C**

Periodo de Planificación de Cosecha																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Total Cosecha (Kgr)		0	0	0	0	0	12000	14389	14787	15185	15185	16608	16819	16819	16819	16217	24440
Trabajadores fijos		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Trabajadores variables		0	0	0	0	0	0	6	7	8	8	8	8	8	8	7	7
Total trabajadores		8	8	8	8	8	8	14	15	16	16	16	16	16	16	15	15
Bins (Unidades)	Exportación	0	0	0	0	0	35	42	43	44	45	49	49	49	50	47	35
	Comercial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37
		17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Total Cosecha (Kgr)		14856	15400	14400	14171	0	0	90000	94000	94000	94000	94000	91438	94000	94000	93763	
Trabajadores fijos		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Trabajadores variables		1	1	0	0	0	0	37	39	39	39	39	39	39	39	39	39
Total trabajadores		9	9	8	8	8	8	45	47	47	47	47	47	47	47	47	47
Bins (Unidades)	Exportación	0	0	0	0	0	0	259	269	269	269	270	270	262	269	270	269
	Comercial	43	46	42	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Total Cosecha (Kgr)		52200	49859	32400	16200	13994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Trabajadores fijos		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Trabajadores variables		21	20	10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total trabajadores		29	28	18	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Bins (Unidades)	Exportación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Comercial	150	144	93	48	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
Total Cosecha (Kgr)		0	13710	13710	13710	13710	13710	12505	12656	12000	12000	12000	11917	0	11483	0	0
Trabajadores fijos		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Trabajadores variables		0	3	3	3	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Total trabajadores		8	11	11	11	11	11	9	9	8	8	8	8	8	8	8	8
Bins (Unidades)	Exportación	0	40	40	40	40	40	36	37	35	35	35	35	0	0	0	0
	Comercial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0

## 5. Conclusiones

El modelo presentado puede ser aplicado a diferentes agrícolas que produzcan diferentes variedades de manzana. Al utilizarlo, éstas podrán optar a mejores herramientas de apoyo en las decisiones de una planificación operativa en la cosecha. Si bien se presenta un modelo general, éste sirve de base para una organización más eficiente de los recursos utilizados en la cosecha, debido a que se minimizan los costos, considerando los requerimientos de planificación.

Este modelo permite a los decisores (agrónomos a cargo de la cosecha) tener una planificación para la temporada de cosecha de los insumos y mano de obra necesarios. El modelo incorpora la experiencia de los agrónomos a cargo de la cosecha a través de parámetros tales como: estimación de cosecha, tipo de cosecha, destino de la fruta en cada uno de los cuarteles del huerto y los requerimientos de calidad exigidos para la fruta de exportación (parámetros de calidad y fechas idóneas de cosecha).

Es importante resaltar que el modelo propuesto considera dos tipos de cosecha de manzanas: por barrido y por floreo (por barrido: se cosecha la totalidad de las manzanas dentro de un cuartel; por floreo: se realiza uno o más cosechas para extraer la fruta del cuartel en donde se toma un cierto porcentaje de fruta que presenta las condiciones idóneas de cosecha, que son los parámetros de madurez).

Existen variedades de manzanas que sólo se cosechan por barrido, como por ejemplo la Red Chief y la Scarlet, y sólo por floreo, como por ejemplo, la Royal Gala y la Galaxy. Además, existen variedades de manzanas en donde se puede decidir que tipo de cosecha realizar, barrido o floreo, durante la temporada, como por ejemplo la Granny Smith. Además, para el tipo de cosecha por floreo se puede decidir cuántas cosechas realizar para extraer la totalidad de la fruta en cada uno de los cuarteles. Para estas decisiones y variedades de manzanas, el modelo permite al analista ingresar parámetros para decidir cómo realizar la cosecha. En base a los resultados del modelo, el encargado de cosecha podrá verificar qué tipo de cosecha le resulta más conveniente según la planificación de la mano de obra y el cronograma de cosecha para las faenas.

En la literatura revisada hasta la fecha no se han encontrado modelos de optimización para apoyar la planificación de cosecha de manzanas. Actualmente, las decisiones se basan en la experiencia de los encargados del huerto para preparar la jornada laboral diaria de cosecha.

## Referências

- Ahumada, O. e Villalobos, R.** (2009), Application of planning models in the agri-food supply chain: A review, *European Journal of Operational Research*, 196(1),1–20.
- Alarcón, R.** *Evolución del empleo en Chile: Principales resultados de la encuesta CASEN*, Santiago, Gobierno de Chile, 141 p., 2008.
- Audsley, E. e 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.
- Bjorndal, T., Herrero, I., Newman, A., Romero, C. e Weintraub, A.** (2011), Operations research in the natural resource industry, *International Transactions in Operational Research*, accepted for publication.
- Bossi, P.**, *Estudio de tiempo y rendimiento en torres de maderero en predio Ranchillo, Séptima Región*, Memoria de Título, Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, 70 p., 2007.
- Caixeta-Filho, J.** (2006), Orange harvesting scheduling management: A case study, *Journal of the Operational Research Society*, 57(6), 637– 642.
- Chase, R., Jacobs, F. e Aquilano, N.**, *Administración de operaciones: producción y cadena de suministros*, McGraw-Hill, Duodécima Edición, 2009.
- Centro de Pomáceas.** Centro de Pomáceas. *Centro de Pomáceas de la Universidad de Talca* (<http://pomaceas.utalca.cl/html/index.html>), 3 de 10 de 2010.
- Centro de Competitividad del Maule** (2010), Informe Centro de Competitividad del Maule “Manzanos”. *Universidad de Talca*, Talca.
- Contreras, O.**, *Productividad de los Trabajadores Agrícolas*, Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile, 2008.
- Domínguez, J.**, (2007), Recursos humanos en la agricultura. Trabajar con la mano de obra. *Revista de Extensión de la Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal UC*, 21: 6–10.
- Ferrer, J., MacCawley, A., Maturana, S., Toloza, S. e Vera, J.** (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations, *International Journal of Production Economics*, 112(2), 985–999.
- France, J. e Thornley, J.**, *Mathematical Models in Agriculture*, London: Butterworths, 1984.
- Glen, J.** (1987), Mathematical Models in Farm Planning: a survey, *Operations Research*, 35(5), 641- 665.
- Higgins, A. e Laredo, L.** (2006), Improving harvesting and transport planning within a sugar value chain, *Journal of the Operational Research Society*, 57, 367-376.
- INE.**, Censo Agropecuario. 2007, *Gobierno de Chile*, Santiago, 2007
- Laroze, A., Pinto, P. e Muñoz, F.** (1998), Evaluación de diferentes modelos de optimización para la planificación de faenas silvícolas, *Revista El Bosque*, 19(1): 13-26.
- Lucas, M. e Chhajed, D.** (2004), Applications of location analysis in agriculture: a survey, *Journal of the Operational Research Society*, 55, 561–578.
- ODEPA**, *Censo Frutícola realizado en año 2007*, Gobierno de Chile, Santiago, 2007.
- Schuster, E. e Allen, S.** (2004), Controlling the Risk for an Agricultural Harvest, *Manufacturing and service operations management*, 6(3), 225–236.
- Tadei, R., Trubian, M., Avendaño, J.L., Della Croce, F. e Menga, G.** (1995), Aggregate planning and scheduling in the food industry: A case study, *European Journal of Operational Research*, 87, 564-573.
- Van Berlo, M. J.** (1993), A decision support tool for the vegetable processing industry an integrative approach of market, industry and agriculture, *Agricultural Systems*, 43, 91-109.
- Weintraub, A. e Romero, C.** (2006), Operations Research Models and the Management of Agricultural and Forestry Resources: A Review and Comparison, *Interfaces*, 46(5), 446-457.