

## Modelo de Optimización aplicado a la agro-industria Colombiana: Plan logístico integrado para la exportación de feijoa fresca

Optimization model applied to Colombian agro-industry: integrated logistics plan for the export of fresh pineapple guava

Máryori Cañón<sup>1,2,a</sup>, Aura Ramírez<sup>1,3,b</sup>, Edgar Gutiérrez-Franco<sup>4,c</sup>, Héctor A. López-Ospina<sup>5,d</sup>

**Resumen.** La optimización es una herramienta matemática útil para la toma de decisiones en diversos sectores industriales. En este trabajo se propone un modelo matemático de programación lineal como apoyo para la toma de decisiones, que integra los eslabones de la cadena de exportación de feijoa en Colombia, desde la compra de la fruta fresca hasta la puesta en el puerto del país importador. El objetivo del modelo es maximizar la utilidad de la cadena sujeto a restricciones de producción, capacidad de alistamiento, empaque y satisfacción de la demanda para un periodo de planeación de doce meses. La búsqueda de la solución óptima se realizó con el apoyo del software GAMS. Las respuestas que arroja el modelo permiten establecer políticas de compra, empaque y distribución de feijoa fresca en el mercado internacional y nacional.

**Palabras claves:** Exportación de frutas, programación matemática, feijoa, cadena de abastecimiento agroindustrial.

**Abstract.** Optimization is a useful mathematical tool for decision making in different industrial sectors. In this work we propose a decision model based on linear programming that integrates in a structured way the links in the Colombian pineapple guava exportation chain, from the buying of the fruit to the set in the port of the imported country. The constructed model's objective is to maximize the profit obtained in each link, subject to fruit production constraints, enrollment capacity, packaging and demand satisfaction during a planning period of twelve months. The search for the optimal solution was established with support from the software GAMS. The model's outputs allow the definition of fresh fruit buying, packing and shipping in the international and national market.

**Keywords:** Fruits exportation, Mathematical programming, Pineapple guava, Agroindustrial Supply Chain, Agribusiness.

<sup>1</sup>Universidad de la Sabana, Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Super Nuevo Milenio S.A., Bogotá, Colombia

<sup>3</sup>Porvenir S.A, Bogotá, Colombia

<sup>4</sup>Centro Latinoamericano de Innovación en Logística- CLI, Grupo de Investigación en Sistemas Logísticos, Universidad de la Sabana,

<sup>5</sup>Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de los Andes, Chile

<sup>a</sup>mcanon@viccagroup.org

<sup>b</sup>aurairma@yahoo.com

<sup>c</sup>edgargutierrezfranco@gmail.com

<sup>d</sup>hlopez@uandes.cl

Mathematics Subject Classification: 80M50, 97M10, 00A69, 90B06, 90B30, 90C11, 90C90.

Recibido: febrero de 2014

Aceptado: abril de 2014

## 1. Introducción

El presente trabajo tiene dos objetivos. El primero es mostrar al estudiante y matemático en general una aplicación interesante y real de los modelos de optimización matemática al sector agroindustrial colombiano. Por otro lado, el presente artículo tiene su origen en la preocupación general del sector académico y agroindustrial de Colombia por impulsar la economía del país robusteciendo los procesos gerenciales de las cadenas de suministro agroindustriales, con el objeto de enfrentar un mercado cada vez más globalizado y competitivo. Las características de Colombia a nivel climático le permiten cultivar gran diversidad de frutas. Así mismo, su posición geoestratégica, ambiente de negocios, recursos humanos y su plataforma de exportación, la hacen un potencial exportador capaz de competir con otros países latinoamericanos en el mercado de frutas frescas, ver por ejemplo [11].

Dentro de las frutas incluidas como productos promisorios exportables se encuentran la feijoa, el tomate de árbol y la uchuva. En especial, la producción de feijoa, es considerada una de las principales fortalezas de Colombia, ya que permite una producción amplia y constante durante todo el año [3], [4], [6].

Por otro lado, las herramientas o técnicas para la toma de decisiones logísticas utilizadas por el sector agroindustrial en Colombia se basan en la experiencia, de acuerdo a los requerimientos inmediatos del mercado. Se evidencia por lo tanto, una escasez de la utilización de herramientas analíticas como la Investigación de Operaciones y matemáticas aplicadas en general. Dentro de esa área de las ciencias administrativas, la modelación matemática aplicada a la distribución de productos perecederos es un tema poco desarrollado en comparación al desarrollo de modelos de planeación para productos no perecederos y para el sector manufacturero [7]. Los escasos modelos desarrollados hasta la fecha para la planeación de productos agroindustriales, incluyen modelos determinísticos de programación lineal (LP), programación dinámica (DP), programación entera mixta (MIP) y programación por metas (GP), además de modelos estocásticos de programación estocástica (SP), programación estocástica dinámica (SDP), simulación (SIM) y programación de riesgos (RP). Aunque muy pocos de estos modelos han sido aplicados a la realidad, los modelos que han tenido los alcances más populares para la planeación de productos perecederos, con los casos de más exitosos de aplicación han sido los de programación lineal, como son los trabajos realizados por Allen y Schuster [1], Caixeta-Filho [2] y Saedt et al. [12]. Los resultados de este tipo de investigaciones han proporcionado una capacidad de aumentar la eficiencia, la integración empresarial, la capacidad de respuesta y en última instancia la competitividad en el mercado de los productos en estudio [8], [10], [13].

De esta forma, con miras a utilizar todo el potencial que ofrece el negocio de exportación de feijoa, se diseñó un modelo matemático, como una herramienta para el establecimiento de disposiciones logísticas, que sirva como apoyo para la

toma de decisiones a lo largo de la cadena de abastecimiento para exportación de feijoa, con enfoque en el empaque, transporte y almacenamiento de la misma. A través de él, se espera determinar la tecnología y los recursos necesarios para obtener una red logística eficiente en los términos establecidos, conservando la integridad del fruto, minimizando costos y teniendo en cuenta que la calidad en las entregas de la fruta es primordial para obtener competitividad en el mercado extranjero.

## 2. Metodología

### 2.1. Alcances del modelo

La cadena de exportación de feijoa en Colombia está compuesta por tres eslabones claramente definidos: Primario, son los cultivos o proveedores de la fruta fresca una vez cosechada; Secundarios, son agencias o centros de acopio que realizan actividades primarias de poscosecha (selección y lavado) y de empaque y embalaje; y el eslabón Terciario, son los mayoristas quienes se encargan de la exportación y venta de la fruta en el país importador. La fruta transita de un país a otro a través de los puertos de exportación e importación, los cuales pueden ser marítimos ó aéreos.

#### 2.1.1. Eslabón Primario

Para el modelo, se definieron dos elementos en el eslabón primario como posibles lugares de compra de la fruta: Tunja, como ciudad de Boyacá con mayor producción de feijoa y Corabastos, central de alimentos más grande de Latinoamérica. Debido al volumen de los mercados nacionales de feijoa fresca en el modelo se parte del supuesto de que la producción del departamento de Boyacá llega a Tunja y el resto de la producción nacional llega a Corabastos.

#### 2.1.2. Eslabón Secundario

Este eslabón inicia con la recepción de la fruta comprada en los sitios contemplados en el primer eslabón de cultivo o proveedores. En este eslabón se selecciona la fruta con calidad de exportación (selecta) y se obtiene una cantidad de feijoa no selecta, la cual se comercializará en el mercado nacional. Seguidamente, la feijoa se lava, desinfecta, empaca, paletiza, y se envía a los entes exportadores (tercer eslabón) incurriendo en los gastos de transporte dentro del país. El modelo contempla la posibilidad de mantener un inventario de fruta sin empacar (feijoa que no cumple con calidad de exportación), y un ingreso por la venta local de la fruta no selecta. Dentro del modelo se estableció un único centro de acopio en el barrio San Fernando, como centro geográfico y vial de la ciudad de Bogotá, con facilidades para el posterior envío de la mercancía a los puertos de exportación.

#### 2.1.3. Eslabón Terciario

Esta parte de la cadena inicia en las opciones de salida del país exportador e incluye las opciones de llegada a los países importadores, analizando los costos

en que se incurren por causa del transporte a los puertos y aeropuertos del país respectivo. El puerto de Cartagena y el aeropuerto El Dorado en Bogotá, son los dos lugares de salida de la mercancía establecidos para el modelo.

Las exportaciones de frutas exóticas, dentro de ellas la feijoa, se concentran en la Unión Europea, más específicamente en países como Alemania, Francia, Países Bajos y Reino Unido, [5]. Por tal motivo, se definieron en el modelo, estos cuatro países como importadores de feijoa.

En la Figura 1 se observan los elementos definidos para el modelo de cada uno de los eslabones de la cadena de abastecimiento de la feijoa.

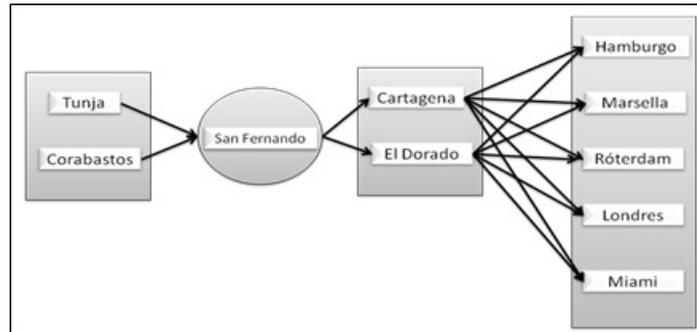


Figura 1: Eslabones que intervienen en la cadena de suministro de la feijoa definidos para el modelo

## 2.2. Supuestos del modelo

- El modelo contempla la venta nacional e internacional de feijoa, dando prioridad al mercado internacional.
- La demanda de cada mes se satisface en los primeros 15 días.
- Se desprecia la masa de las canastillas plásticas usadas para transportar la feijoa desde el sitio de compra hasta el centro de acopio.
- El proveedor entrega la feijoa, máximo dos días después de cosechado.
- Se asume que un 30% de la materia prima es no selecta (no apta para exportación).
- No existe inventario ni en el centro de acopio ni en las opciones de salida.
- Las estibas para la paletización del producto se descartan al usarse una vez.
- Para estimar la demanda asociada a la aplicación del modelo se utilizaron promedios e información histórica.
- Dado que la feijoa almacenada a  $4^{\circ}C$  y con humedad relativa del 90% permanece en óptimas condiciones para el consumo humano por máximo 8 semanas, el tiempo que el producto permanecerá en la cadena de

exportación de la feijoa será de un mes, dando a los compradores en los países importadores un tiempo de 23 días para su distribución y comercialización.

- El tiempo de transporte desde el sitio de compra hasta el centro de acopio se asume constante, dado que en ningún caso es mayor a un día para el sistema actual.
- La capacidad de los contenedores puede asumirse infinita.

### 2.3. Definición de índices, conjuntos y parámetros

#### Índices

- $t$  : Mes del periodo considerado en el horizonte de planeación,  $t = 1, \dots, T$ .
- $i$  : Sitios de compra de feijoa,  $i = 1, \dots, I$ .
- $j$  : Opciones de unitarización a utilizar,  $j = 1, \dots, J$ .
- $s$  : Opción de palet a usar,  $s = 1, \dots, S$ .
- $n$  : Opciones de transporte a utilizar desde Colombia a los importadores,  $n = 1, \dots, N$ .
- $k$  : Opciones de transporte dentro de Colombia,  $k = 1, \dots, K$ .
- $m$  : Opciones de salida,  $m = 1, \dots, M$ .
- $u$  : Opción de llegada en el país importador,  $u = 1, \dots, U$ .
- $o$  : Centros de acopio,  $o = 1, \dots, O$ .

#### Conjuntos

- *OPTR*: Opciones de transporte fuera de Colombia; indexado por  $n$ .
- *FCMAR*: Opciones de transporte por las opciones salida por mar desde Colombia a los países importadores; indexado por *FCMAR-OPTR*.
- *FCAIR*: Opciones de transporte por las opciones salida por aire desde Colombia a los países importadores; *FCAIR-OPTR*.
- *SAL*: Opciones de salida para el producto en Colombia; indexado por  $m$ .
- *SAMAR*: Opciones de salida por mar para el producto en Colombia; *SAMAR-SAL*.
- *SAIR*: Opciones de salida por aire para el producto en Colombia; *SAIR-SAL*.

#### Parámetros

- $CTP_{k,i,o}$  : Fletes de la opción de transporte  $k$  entre el sitio de compra  $i$  al centro de acopio  $o$  (*pesos por kilogramo*).

- $CATP_{k,o,m}$  : Fletes de la opción de transporte  $k$  entre el centro de acopio  $o$  a opción de salida  $m$  (pesos por kilogramo).
- $TTCCD$  : Tiempo de transporte promedio desde el sitio de compra hasta un centro de acopio (meses).
- $TTCDL_{o,m}$  : Tiempo de transporte desde el centro de acopio  $o$  hasta la opción de salida  $m$  (meses).
- $TTSALPI_{m,u}$  : Tiempo de transporte desde la opción de salida  $m$  a la opción de llegada  $u$  en el país importador (meses).
- $TAL$  : Tiempo que se emplea en alistar el producto en un centro de acopio (meses por kilogramo).
- $TMAX$  : Tiempo máximo en el que el producto permanecerá inocuo (meses).
- $TH$  : Tiempo de holgura para preparar el producto en caso de imprevistos (meses).
- $W_{t,i}$  : Capacidad del sitio de compra  $i$  en el periodo  $t$  (kilogramos).
- $PWP_{t,i}$  : Precio de compra en el sitio de compra  $i$  en el periodo  $t$  (pesos por kilogramo).
- $D_{t,u}$  : Demanda de producto terminado enviado a la opción de llegada  $u$  del país importador en el periodo  $t$  (kilogramos).
- $PVPD_{t,u}$  : Precio de venta del producto terminado enviado a la opción de llegada  $u$  del país importador en el periodo  $t$  (pesos por kilogramo).
- $KMP_o$  : Capacidad del centro de acopio  $o$  para almacenar materia prima (kilogramos).
- $KPT_o$  : Capacidad del centro de acopio  $o$  para almacenar producto terminado (kilogramos).
- $KEPR_j$  : Capacidad de la opción de unitarización  $j$  (kilogramos).
- $KUNI_{s,j}$  : Capacidad de la opción de palet  $s$  para la opción de unitarización  $j$ .
- $CEPR_j$  : Costo de la opción de unitarización  $j$  (pesos por unidad).
- $CUNI_{s,j}$  : Costo de la opción del palet  $s$  en términos de la opción de unitarización  $j$  (pesos por unidad).
- $CMSLD$  : Costo de la mano de obra para preparar el producto terminado (pesos por unidad).
- $VALORMP$  : Costo de mantener el inventario de feijoa en el centro de acopio (pesos por unidad).
- $RMP$  : Rendimiento de la materia prima.
- $PVC$  : Precio de venta del producto no selecto (pesos por kilogramo).

Definición de las Variables de decisión

- $CFC_{t,i,k,o}$  Cantidad de materia prima comprada en el sitio de compra  $i$  transportada al centro de acopio  $o$  en la opción de transporte  $k$  en el periodo  $t$  (kilogramos).
- $CFT_{t,o,m,k}$  : Cantidad de producto terminado transportado desde el centro de acopio  $o$  hasta la opción de salida  $m$  en la opción de transporte  $k$  en el periodo  $t$  (kilogramos).
- $CFE_{t,m,u,n}$ : Cantidad de producto terminado exportada desde la opción de salida  $m$  hasta la opción de llegada  $u$  en la opción de transporte  $n$  en el periodo  $t$  (kilogramos).
- $INVFC_{t,o}$  : Inventario de materia prima en el centro de acopio  $o$  en el periodo  $t$  (kilogramos).
- $NEPR_{t,j}$  : Número de opciones  $j$  de unitarización en el periodo  $t$  (unidades).
- $NUNI_{t,s}$  : Número de opciones de palet  $s$  a usar en el periodo  $t$  (unidades).

VARIABLES BINARIAS AUXILIARES PARA ELECCIÓN DE RUTAS:

- $PB_{t,o,m,u}$  : 1 si se va desde centro de acopio  $o$  a la salida  $m$  para llegar a  $u$  en el periodo  $t$ , 0 en otro caso.
- $PC_{t,m,u,n}$  : 1 si se va desde la salida  $m$  para llegar a  $u$  en el modo  $n$  en el periodo  $t$ , 0 en otro caso.

## 2.4. Función objetivo

La función objetivo busca maximizar las utilidades, teniendo en cuenta los ingresos generados en pesos por la exportación de feijoa (1), menos los principales costos de la cadena de exportación de la fruta que son los costos por la compra de fruta (2), costos de transporte (fletes) (3), (4) y (5), costos de preparación del producto (mano de obra, selección, lavado, desinfección, empaque, embalaje y paletización de la fruta) (6), costos de adquisición de recursos (empaques y embalajes) (7) y (8), y costos de inventario del producto comprado pero no exportado (9).

**Maximizar Utilidades:**

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N PVPD_{t,u} \times CFE_{t,m,u,n} + \sum_{t=1}^T \sum_{o=1}^O PVC \times INVFC_{t,o} \quad (1)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{o=1}^O PWP_{t,i} \times CFC_{t,i,k,o} \quad (2)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{o=1}^O CTP_{k,i,o} \times CFC_{t,i,k,o} \quad (3)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \sum_{o=1}^O CATP_{k,o,m} \times CFT_{t,o,m,k} \quad (4)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^U CTD_{n,m,u} \times CFE_{t,m,u,n} \quad (5)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{o=1}^O \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K CMSLD \times CFT_{t,o,m,k} \quad (6)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J CEPR_j \times NEPR_{t,j} \quad (7)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^J CUNI_{s,j} \times NUNI_{t,s,j} \quad (8)$$

$$- \sum_{t=1}^T \sum_{o=1}^O VALORMP \times INFVC_{t,o} \quad (9)$$

## 2.5. Restricciones

### 2.5.1. Restricciones de capacidad de producción

- **Materia prima** (10): La cantidad de materia prima comprada en el sitio de compra  $i$  transportada al centro de acopio  $o$  en la opción de transporte  $k$  en el periodo  $t$ , debe ser menor o igual a la capacidad del sitio de compra  $i$  en el periodo  $t$ .

$$\sum_{k=1}^K \sum_{o=1}^O CFC_{t,i,k,o} \leq W_{t,i} \quad \forall t, i \quad (Kg) \quad (10)$$

- **Materia prima en centros de acopio** (11): La cantidad de materia prima comprada en el sitio de compra  $i$  transportada al centro de acopio  $o$  en la opción de transporte  $k$  en el periodo  $t$ , debe ser menor o igual a la capacidad del centro de acopio  $o$  para almacenar materia prima.

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K CFC_{t,i,k,o} \leq KMP_{t,o} \quad \forall t, o \quad (Kg) \quad (11)$$

- **Producto terminado en centros de acopio** (12): La cantidad de producto terminado transportado desde el centro de acopio  $o$  hasta la opción de salida  $m$  en la opción de transporte  $k$  en el periodo  $t$ , debe ser menor o igual a la capacidad del centro de acopio  $o$  para almacenar producto terminado.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K CFT_{t,o,m,k} \leq KPT_{t,o} \quad \forall t, o \quad (Kg) \quad (12)$$

- **Producto terminado unitarizado (13):** La cantidad producto terminado exportado desde la opción de salida  $m$  hasta la opción de llegada  $u$  en la opción de transporte  $n$  en el periodo  $t$ , debe ser menor o igual a la capacidad de la opción de unitarización  $j$  que se haya decidido utilizar en el periodo  $t$ .

$$\sum_{m=1}^M \sum_{u=1}^U \sum_{n=1}^N CFE_{t,m,u,n} \leq \sum_{j=1}^J NEPR_{t,j} \times KEPR_j \quad \forall t \text{ (Kg)} \quad (13)$$

- **Producto terminado paletizado (14):** El número de opciones  $j$  de unitarización a utilizar en el periodo  $t$ , debe ser menor o igual capacidad de la opción de palet  $s$  para la opción de unitarización  $j$  por el número de opciones de palet  $s$  a utilizar en el periodo  $t$ .

$$NEPR_{t,j} \leq \sum_{s=1}^S KUNI_{s,j} \times NUNI_{t,s} \quad \forall t, j \text{ (Unid)} \quad (14)$$

### 2.5.2. Restricción de Satisfacción de la demanda (15)

La cantidad producto terminado exportado desde la opción de salida  $m$  hasta la opción de llegada  $u$  en la opción de transporte  $n$  en el periodo  $t$  debe ser igual a la demanda del producto terminado enviado a la opción de llegada  $u$  del país importador en el periodo  $t$ .

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N CFE_{t,m,u,n} = D_{t,u} \quad \forall t, u \text{ (Kg)} \quad (15)$$

### 2.5.3. Restricción de Rendimiento de Materia prima (16)

El inventario de materia prima comprada en el centro de acopio  $o$  en el periodo  $t$  debe ser menor o igual a la cantidad de producto no selecto comprado en el sitio de compra  $i$  transportada al centro de acopio  $o$  en la opción de transporte  $k$  en el periodo  $t$ .

$$INVFC_{t,o} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K CFC_{t,i,k,o} \times (1 - RMP) \quad (16)$$

### 2.5.4. Restricción de tiempo (17)

$$\begin{aligned} TCCD + \sum_{n=1}^N CFE_{t,m,u,n} \times TH \times TAL \times TTCDSAL_{o,m} \times PB_{t,o,m,u} \\ + \sum_{n=1}^N TTSALPI_{m,u} \times PC_{t,m,u} \leq TMAX; \quad \forall t, u, o, m \end{aligned} \quad (17)$$

### 2.5.5. Restricciones lógicas de cierre o no de centros de acopio y lugares de salida (18), (19) y (20)

$$\sum_{n=1}^N CFE_{t,m,u,n} = \sum_{o=1}^O D_{t,u} \times PB_{t,o,m,u}, \quad \forall t, m, u \quad (18)$$

$$CFE_{t,m,u,n} = D_{t,u} \times PC_{t,m,u,n}, \quad \forall t, m, u, n \quad (19)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N PC_{t,m,u,n} \geq 1 \quad (20)$$

## 3. Algunos Resultados y Discusión

El modelo fue programado en GAMS [9], a continuación se muestran algunos resultados importantes. Los resultados de la Tabla 1, proponen comprar siempre en la central mayorista de Tunja y transportar al centro de acopio de San Fernando en el tipo de transporte 1. Por otro lado, en los meses de octubre y noviembre se reduce la cantidad comprada por causa de la disminución de la demanda de los países importadores.

$CFC_{t,i,k,o}$ : cantidad de materia prima comprada en el sitio $i$ al centro de acopio $o$ en la opción de transporte $k = 1$ (kg)	
PERIODO	TUNJA
Enero	1288.732
Febrero	1288.732
Marzo	1288.732
Abril	1288.732
Mayo	1288.732
Junio	1288.732
Julio	1288.732
Agosto	1288.732
Septiembre	1288.732
Octubre	643.662
Noviembre	643.662
Diciembre	1288.732

Tabla 1: Resultado Modelo, Cantidad de materia prima a comprar

La cantidad de feijoa empacada y transportada del centro de acopio a cada una de las opciones de salida del país exportador que minimiza los costos de la operación en cada periodo del horizonte de planeación se registran en la Tabla 2.

$CFT_{t,o,m,k}$ : cantidad de producto terminado transportado desde el centro de acopio $o$ hasta la opción de salida $m$ en la opción de transporte $k = 1$ (kg)		
PERIODO	TUNJA-SAN FERNANDO - EL DORADO	TUNJA - SAN FERNANDO P. CARTAGENA
Enero	642	273
Febrero	642	273
Marzo	642	273
Abril	642	273
Mayo	642	273
Junio	642	273
Julio	642	273
Agosto	642	273
Septiembre	642	273
Octubre	321	136
Noviembre	321	136
Diciembre	642	273

Tabla 2: Resultado Modelo, Cantidad de producto terminado transportado

En cada mes del periodo de planeación, se suple la demanda de Alemania, enviando feijoa desde el puerto de Cartagena y de los restantes cuatro países (Reino Unido, Francia, Estados Unidos y Holanda) enviándola desde el aeropuerto El Dorado en Bogotá. La cantidad total de feijoa transportada a las opciones de salida es exactamente igual a la demanda total de los cinco países importadores, permitiendo pensar que no se presenta una economía de escala en este tipo de mercado, y por lo tanto, se recomienda estudiar implicaciones económicas y relacionales para definir la conveniencia de establecer un modelo para satisfacer la totalidad de la demanda.

De acuerdo a la Figura 2 y la Tabla 3 es conveniente utilizar las opciones de unitarización  $j = 2$  (Alvéolos de politerftalato de  $40 \times 30$  cm contenidos en cajas de cartón corrugado de  $40 \times 30 \times 8.5$  cm) y  $j = 4$  (Charola de plástico de  $19 \times 12 \times 8$  cm contenidas en cajas de cartón corrugado de  $40 \times 30 \times 8.5$  cm) para los meses de enero a septiembre y para el mes de diciembre, mientras que en los meses de octubre y noviembre la configuración cambia eligiendo la opción  $j = 1$  (Alvéolos de politerftalato de  $60 \times 40$  cm contenidos en cajas de cartón corrugado de  $60 \times 40 \times 18$  cm) y  $j = 4$  (Charola de plástico de  $19 \times 12 \times 8$  cm contenidas en cajas de cartón corrugado de  $40 \times 30 \times 8.5$  cm). Para todos los meses del periodo de planeación el modelo escoge utilizar la opción de paletización  $s = 2$ . En cada uno de los doce meses del periodo de planeación se está utilizando eficientemente la capacidad de las opciones de unitarización ya que la holgura máxima es de aproximadamente 0,2 Kg, es decir, se deja de utilizar en el peor de los casos menos del 1% de la capacidad de unitarización que se debe usar en cada mes. Sin embargo, la capacidad de paletización utilizadas en todos los meses está subutilizada. Se propone al exportador estudiar la posibilidad de enviar el producto sin paletizar en el

medio de transporte que propone el modelo para cada país, es decir al Reino Unido, Francia, Estados Unidos y Holanda en avión y a Alemania en barco.

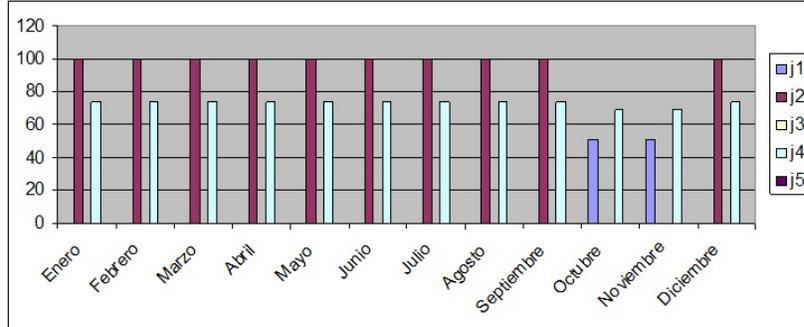


Figura 2: Resultados Modelo, número de opciones  $j$  de unitarización necesarias ( $NEPR_{t,j}$ )

		$NEPR_{t,j}$ Número de opciones de palet $s$ a usar (Und)																								
		$s = 1$					$s = 2$					$s = 3$					$s = 4$					$s = 5$				
$t \backslash j$	$j$	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Enero	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Febrero	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Marzo	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Abril	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Mayo	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Junio	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Julio	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Agosto	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Septiembre	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Octubre	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Noviembre	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Diciembre	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tabla 3: Resultados Modelo, Número de opciones de palet  $s$  a usar ( $NUNI_{t,s}$ )

Las cantidades de feijoa que deben exportarse a cada uno de los países desde los distintos lugares de salida, se registran en la Tabla 3.

El inventario de materia prima no selecta se estableció como un 30% de la cantidad de feijoa comprada, en la Tabla 4 se muestra la cantidad de inventario de materia prima en el centro de acopio San Fernando. Puesto que estos valores dependen indirectamente de la demanda de cada país, al igual que ella, se comporta constante de enero a septiembre y en diciembre, disminuyendo para los meses de octubre y noviembre. La cantidad de inventario obtenido para el centro de acopio implica una utilización de menos del 30% de la capacidad del centro de San Fernando.

Sería interesante para el exportador contemplar la posibilidad de abrir un centro de acopio en Tunja, donde el modelo sugiere comprar toda la materia prima. Esta posibilidad de cambio se puede además combinar con la recomendación de alquilar un centro de acopio de menor capacidad, para no subutilizarla.

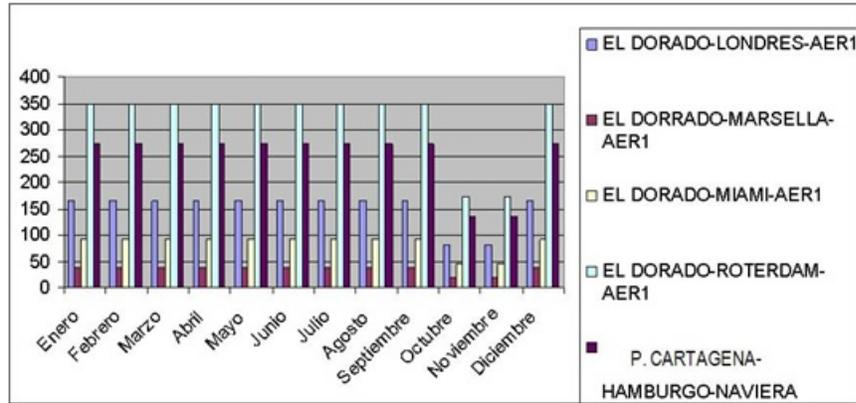


Figura 3: Resultados Modelo, Cantidad de Producto Exportado  $CFE_{t,m,u,n}$

$INVFC_{t,o}$ : Inventario de materia prima en el centro de acopio $o$ (Kg).	
PERIODO	INVENTARIO
Enero	373.732
Febrero	373.732
Marzo	373.732
Abril	373.732
Mayo	373.732
Junio	373.732
Julio	373.732
Agosto	373.732
Septiembre	373.732
Octubre	186.662
Noviembre	186.662
Diciembre	373.732

Tabla 4: Resultados Modelo de Cantidad de materia prima almacenada en el centro de acopio

## 4. Conclusiones

En este trabajo se propuso la formulación y desarrollo de un modelo de optimización entera mixta para el análisis de la cadena de suministro de la feijoa en Colombia. Los resultados que se obtienen del modelo permiten establecer políticas de compra, empaque y distribución de feijoa fresca en el mercado internacional y nacional. Los principales resultados se mencionan a continuación.

En cada uno de los doce meses del periodo de planeación se propone comprar la fruta en la central mayorista de Tunja. La demanda de los cinco países analizados se suple totalmente con la capacidad de esta central mayorista. Se sugiere al exportador la posibilidad de análisis de renta de un centro de acopio

de menor capacidad de materia prima. Además, dada la subutilización de la capacidad de los palets, se sugiere también al exportador el envío de mercancía sin palets y estudiar para Alemania, la posibilidad de realizar envíos por avión y no por mar, debido a la tendencia del sector marítimo a elevar costos de transporte. El modelo realizado, es un apoyo para la toma de decisiones a lo largo de la cadena de abastecimiento para exportación de feijoa, dado que tiene en cuenta los principales procesos y costos asociados a ellos, tales como los de empaque, transporte y almacenamiento. A través de él, se determinó la tecnología y los recursos necesarios para obtener una red logística eficiente en los términos establecidos, conservando la integridad del fruto, minimizando costos y teniendo en cuenta que la calidad en las entregas de la fruta es primordial para obtener competitividad en el mercado extranjero. El modelo planteado puede ser extendido para otro tipo de frutas y hortalizas que tengan potencial exportador en el país y a su vez permitir que la información necesaria para alimentar el modelo y sus resultados permite el análisis a cadenas de suministro agroindustriales y proyectar su evolución de acuerdo a las políticas sugeridas por el modelo. Así mismo se espera extender esta investigación para el desarrollo de más modelos de simulación y optimización que permitan probar diferentes políticas para guiar cambios planeados en las mismas.

## Referencias

- [1] S.J. Allen and E.W. Schuster, *Controlling the risk for an agricultural harvest*, *Manufacturing & Service Operations Management* **6(3)** (2004), 225–236.
- [2] J.V. Caixeta-Filho, *Orange harvesting scheduling management: A case study*, *Journal of the Operational Research Society* **57(6)** (2006), 637–642.
- [3] CCI Corporación Colombia Internacional, *Oportunidades de exportación para frutas y hortalizas, región caribe colombiana*, Estudio de Mercados hortofrutícolas Estados Unidos, 2010a.
- [4] ———, *Francia, importador de productos agropecuarios*, Departamento de Inteligencia de Mercados, 2010b.
- [5] DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas, *Informe de exportaciones*, 2010.
- [6] G. Fisher et al., *Cultivo, poscosecha y exportación de la feijoa (Acça sellowiana berg)*, Produmedios (2003).
- [7] S.K. Goyal and B.C. Giri, *Recent trends in modeling of deteriorating inventory*, *European Journal of Operational Research* **134** (2001), no. 1, 1–16.
- [8] A. Higgins, P. Thorburn, A. Archer, and E. Jakku, *Opportunities for value chain research in sugar industries*, *Agricultural Systems* **94** (2007), 611–621.

- [9] H. López, *Introducción a GAMS y su aplicación en la solución de modelos matemáticos de optimización*, Memorias del XXII Coloquio Distrital de Matemáticas y Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2006.
- [10] H. Min and G. Zhou, *Supply chain modeling: Past, present and future*, Computers & Industrial Engineering **43** (2002), 231–249.
- [11] PROEXPORT-Colombia, *Invierta en Colombia*, 2010.
- [12] A.P.H. Saedt, T.H.B. Hendriks, and F.M. Smits, *A transition planning method applied in a decision support system for pot-plant nurseries*, European Journal of Operations Research **52** (1991), 142–154.
- [13] D.J. Thomas and P.M. Griffin, *Coordinated supply chain management*, European Journal of Operations Research **94** (1996), 1–15.