



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Modelo de asignación de centros de acopio para una plantación de palma de aceite**

**Carlos Andrés Fontanilla Díaz**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial  
Bogotá, Colombia  
Abril de 2012

# **Modelo de asignación de centros de acopio para una plantación de palma de aceite**

**Carlos Andrés Fontanilla Díaz**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Industrial**

Director:  
Ing. Gustavo Alfredo Bula, MSc. Ingeniería Industrial

Línea de Investigación:  
Gestión de Operaciones

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial  
Bogotá, Colombia  
Abril de 2012

# **Dedicatoria**

A mi esposa, a mis padres y a mis hermanos quienes con sus muestras de afecto acompañaron este proceso de formación.

# **Agradecimientos**

El autor manifiesta su agradecimiento a quienes contribuyeron con sus invaluable aportes para el desarrollo y culminación de este trabajo de grado. Especialmente, a las entidades Centro de investigación en palma de aceite (Cenipalma) y a Unipalma, S.A.. También a Eloina Mesa, a Gustavo Bula, Rafael García y Juan Sepúlveda.



# Resumen

En este trabajo de grado se plantea un modelo de optimización matemática de programación lineal entera mixta (PLEM) para la asignación de puntos de acopio internos requeridos (PAIs) para la cosecha y transporte de fruto en una plantación de palma de aceite. La función objetivo integra la relación entre la cantidad de mallas con racimos de fruta fresca (RFF) que los operarios de cosecha deben disponer en cada acopio y el número de acopios a habilitar de acuerdo con la cantidad de fruto disponible en los lotes de cosecha, minimizando el costo de la pérdida de productividad de los trabajadores para desplazarse hacia un PAI y el costo de recolección causado por el equipo de transporte interno para evacuar los RFF desde un PAI hasta un acopio externo (PAE). El modelo permite reducciones en el costo de transporte interno de hasta un 11% y en condiciones de altas producciones puede disminuir los saldos en campo hasta en un 33%.

**Palabras clave:** Programación lineal entera mixta, Análisis de Series de tiempos, Palma de aceite, costos de producción, Cosecha, Transporte.

# Abstract

In this Graduate Project a Mixed Integer Linear Programming model is proposed in order to use mathematical optimization for allocating Internal Collection Points (ICPs) required to lump together Fresh Fruit Bunches (FFBs) after harvesting oil palm plots. Afterwards, FFBs will be picked up from ICPs by an internal transportation truck at an oil palm state. The model's objective function minimizes the end cost by diminishing cost of labor's productivity lost imposed by the walks required to reach the closest ICP available; and by reducing FFBs gathering cost caused by internal transportation vehicle which moves FFBs from ICPs to external collection points (ECPs). The relationship among the amount of nets that must be drop off in each collection point and the number of collection points that should be allowed in accordance with the availability of FFBs at harvesting plots are matched in the model. As main results, this approach showed reductions on internal transportation cost up to 11% and also suggest that when seasons of higher production become, model issues reduce the non-collected fruit by 33%.

**Keywords:** Mixed Integer Linear Programming, Time Series Analysis, Oil Palm, Production costs, Harvesting, Transportation.

# Contenido

## Tabla de contenido

1. Introducción.....	11
1.1. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia .....	11
1.2. Implicaciones técnicas y económicas de la evacuación de los racimos de fruta fresca a la planta de beneficio .....	12
2. Optimización de recursos y transporte de fruto en palma de aceite.....	15
3. Marco teórico.....	18
3.1. El modelo del problema de transporte .....	18
3.2. Problema de recogida y entrega (Pickup and Delivery Problem- <i>PDP</i> ) .....	18
3.3. Pronósticos.....	20
3.4. Análisis de series de tiempo.....	22
3. Metodología.....	26
3.1. Descripción del proceso logístico de transporte de fruto desde el campo hasta la planta de beneficio.....	26
3.2. Estimación del costo de transporte .....	27
3.3. Definición de la red de puntos de acopio óptima, en una plantación de Unipalma, por medio de un modelo matemático. ....	27
4. Descripción del proceso de cosecha y transporte de fruto en Unipalma S.A.....	29
4.1. Evacuación de fruto a las vías.....	31
4.2. Alce de mallas con pluma.....	34
4.3. Alce de caja contenedora y transporte a planta de beneficio .....	38
5. Planteamiento del modelo.....	42
5.1. Planteamiento del problema y supuestos .....	42
5.2. Procedimiento de estimación de los parámetros .....	48
5.3. Resultados arrojados por el modelo .....	53
6. Variabilidad de la producción en la asignación de acopios .....	57
6.1. Pronósticos a partir de series de tiempo de la producción .....	57
6.2. Costo de transporte interno .....	65

6.3. Sensibilidad de la asignación de acopios en los saldos de campo cuando existen altas producciones .....	67
7. Conclusiones.....	70
8. Anexos.....	71
9. Bibliografía.....	74

# Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Composición y descripción del personal de cosecha en Unipalma. ....	30
<b>Tabla 2.</b> Personal de apoyo al proceso de cosecha en Unipalma.....	30
<b>Tabla 3.</b> Diagrama de operaciones del operario de cosecha, en Unipalma .....	34
<b>Tabla 4.</b> Diagrama de operaciones del sistema de evacuación y alce de fruto en Unipalma.....	37
<b>Tabla 5.</b> Diagrama de operaciones del transporte de fruto en Unipalma.....	40
<b>Tabla 6.</b> Definición de los parámetros <i>TAC</i> , <i>TAD</i> y <i>TCargM</i> .....	50
<b>Tabla 7.</b> Tiempo de desplazamiento del camión-pluma de un acopio a otro (en segundos).....	52
<b>Tabla 8.</b> Costo de penalización del cosechero por desplazarse desde un recorrido a un punto de acopio.....	53
<b>Tabla 9.</b> Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,10; 0,20; 0,25).....	54
<b>Tabla 10.</b> Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,26; 0,28; 0,29).....	55
<b>Tabla 11.</b> Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,30; 0,40; 0,50).....	55
<b>Tabla 12.</b> Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,60; 0,70; 0,80).....	56
<b>Tabla 13.</b> Descripción de los modelos de pronóstico de producción.....	61
<b>Tabla 14.</b> Estadísticas de los modelos de pronóstico .....	62
<b>Tabla 15.</b> Pruebas de normalidad para los residuales de los modelos de pronóstico.....	62
<b>Tabla 16.</b> Pronósticos de producción e intervalos de confianza .....	63
<b>Tabla 17.</b> Probabilidad de tener una densidad de cosecha .....	65

# Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Proceso de transporte de racimos de fruta fresca de palma de aceite .....	12
<b>Figura 2.</b> Flujo metodológico.....	28
<b>Figura 3.</b> Instalación de malla.....	33
<b>Figura 4.</b> Desplazamiento y búsqueda de racimo maduro.....	33
<b>Figura 5.</b> Corte de racimo .....	34
<b>Figura 6.</b> Encalle de hoja y corte de pedúnculo .....	34
<b>Figura 7.</b> Alce de racimo maduro.....	35
<b>Figura 8.</b> Recolección de fruto suelto .....	35
<b>Figura 9.</b> Cierre de malla .....	35
<b>Figura 10.</b> Descargue de malla.....	35
<b>Figura 11.</b> Enganche de malla.....	36
<b>Figura 12.</b> Alce de malla.....	37
<b>Figura 13.</b> Descargue de malla.....	37
<b>Figura 14.</b> Soltar malla.....	37
<b>Figura 15.</b> Descargue de Caja contenedora .....	38
<b>Figura 16.</b> Alce de caja contenedora .....	38
<b>Figura 17.</b> Descargue de caja contenedora.....	40
<b>Figura 18.</b> Desenganche de guaya.....	40
<b>Figura 19.</b> Tensionado de guaya .....	40
<b>Figura 20.</b> Pesaje de fruto .....	41
<b>Figura 21.</b> Posicionamiento en tolva.....	41
<b>Figura 22.</b> Volqueteo .....	41
<b>Figura 23.</b> Esquema de evacuación de RFF desde el lote hacia los puntos de acopio interno (PAI)	48

<b>Figura 24.</b> Velocidad media de desplazamiento con respecto al número de palmas recorridas .....	51
<b>Figura 25.</b> Serie de tiempos de la Producción de RFF y valores ajustados por modelo de pronóstico de los lotes CH7, CH17, CH20, CH22, CH25, CH42 .....	58
<b>Figura 26.</b> Serie de tiempos de la Producción de RFF y valores ajustados por modelo de pronóstico de los lotes CH50, CH52, CH53, CH59, CH86, CH87 .....	59
<b>Figura 27.</b> Serie de tiempos de la Producción de RFF y valores ajustados por modelo de pronóstico de los lotes CH88, CH89, CH93, CH96, CH99 .....	60
<b>Figura 28.</b> Costo de transporte interno en función de la densidad de cosecha y la producción del modelo de pronóstico generado para el lote CH7 .....	66
<b>Figura 29.</b> Costo de transporte interno en función de la densidad de cosecha y la producción del modelo de pronóstico generado para el lote SB99 .....	66
<b>Figura 30.</b> Costo de transporte interno y saldos de campo en función de la cantidad mínima de mallas agrupadas por acopio interno con una densidad de cosecha de 0,74.....	68
<b>Figura 31.</b> Costo de transporte interno y saldos de campo en función de la cantidad mínima de mallas agrupadas por acopio interno con una densidad de cosecha de 0,74.....	68

# 1. Introducción

## 1.1. La agroindustria de la palma de aceite en Colombia

Por su versatilidad, la agroindustria de la palma de aceite es la principal fuente de aceites vegetales en el mundo. En el 2010, de los 133,6 millones de toneladas de aceite producidas por las diferentes fuentes vegetales, los aceites de palma y de palmiste participaron con el 37% y el 4%, respectivamente (LMC, 2010).

Los principales productores de aceite crudo de palma (ACP) en el mundo son Indonesia y Malasia, quienes aportan el 87,7% de la producción de ACP (LMC, 2010). Colombia, por su parte, es el principal productor de América latina y participa con el 1,6% de la producción mundial de ACP (en 2010 produjo 753.117 toneladas de ACP, Fedepalma 2011).

La palma de aceite fue introducida a escala comercial en Colombia, por la empresa Magdalena Fruit Company en 1.945 con un área inicial de 100 hectáreas. Desde entonces, los cultivos se han expandido rápidamente. En los últimos diez años las áreas sembradas con palma de aceite en el país han aumentado a una tasa del 10% anual, alcanzando las 406.012 hectáreas en el 2010 (Fedepalma, 2011). Este incremento sostenido obedece a las políticas diseñadas por el gobierno para el fomento del cultivo como estrategia de creación de negocios inclusivos que involucren a productores de pequeña escala y a la confianza que ha ganado el sector para la producción de biodiesel, lo que, a su vez, ha incrementado la demanda.

Como consecuencia de lo anterior, el sector palmicultor se ha venido consolidando como un importante motor del sector agroindustrial en Colombia que genera más de 118 mil empleos<sup>1</sup>. Tiene presencia en más de 120 municipios del territorio nacional distribuidos en los departamentos de Santander, Norte de Santander, Cesar, Bolívar, Magdalena, Antioquia, La Guajira, Córdoba, Chocó, Atlántico, Meta, Casanare, Caquetá, Cundinamarca y Nariño. Es uno de los sectores identificados por el Gobierno como de talla mundial y fue incluido en el Programa de Transformación Productiva, junto con otros tres sectores agropecuarios (Carne bovina, Chocolatería, y Camaronicultura), lo que le permitirá alcanzar las 480 mil hectáreas sembradas en tres años.

En la actualidad, el sector palmicultor colombiano enfrenta un problema de disminución de su productividad, desde 2007 se viene reduciendo la producción de aceite por hectárea a una tasa del 6,8% anual. Esta caída es impulsada por las problemáticas fitosanitarias, el crecimiento de nuevas siembras de palma (que en los primeros años son improductivas y requieren de siete años para alcanzar el rendimiento esperado), y la carencia de una adecuada agronomía de las nuevas siembras.

Esto, por supuesto, ha afectado la cantidad de aceite de palma producido en el país así como su costo de producción. Como muestra de esto, a pesar de que en el 2010 el área sembrada con palma de aceite en el país registró un incremento del 12,8% con respecto al año anterior, durante el mismo

---

<sup>1</sup> Juan Manuel Santos, Presidente de la república de Colombia. XXXIX Congreso Nacional de cultivadores de

periodo redujo la producción de aceite en un 6% llegando a 753 mil toneladas de ACP. En efecto, en la clasificación mundial de costos de producción de ACP, Colombia descendió del quinto al sexto lugar, lo que ha aumentado la brecha de competitividad con los países líderes de la agroindustria. El costo promedio de producción de una tonelada de ACP en Colombia para 2010 fue \$524,9 USD, mientras que el mundial fue de \$320 USD, y el de Indonesia fue de \$263,5 USD (LMC, 2010).

Por lo anterior, existe entonces un llamado a la mejora de la productividad, que se puede abarcar desde diferentes frentes partiendo desde lo inmediato (problemática fitosanitaria) y abarcando temáticas que permitan la optimización de la utilización de los recursos.

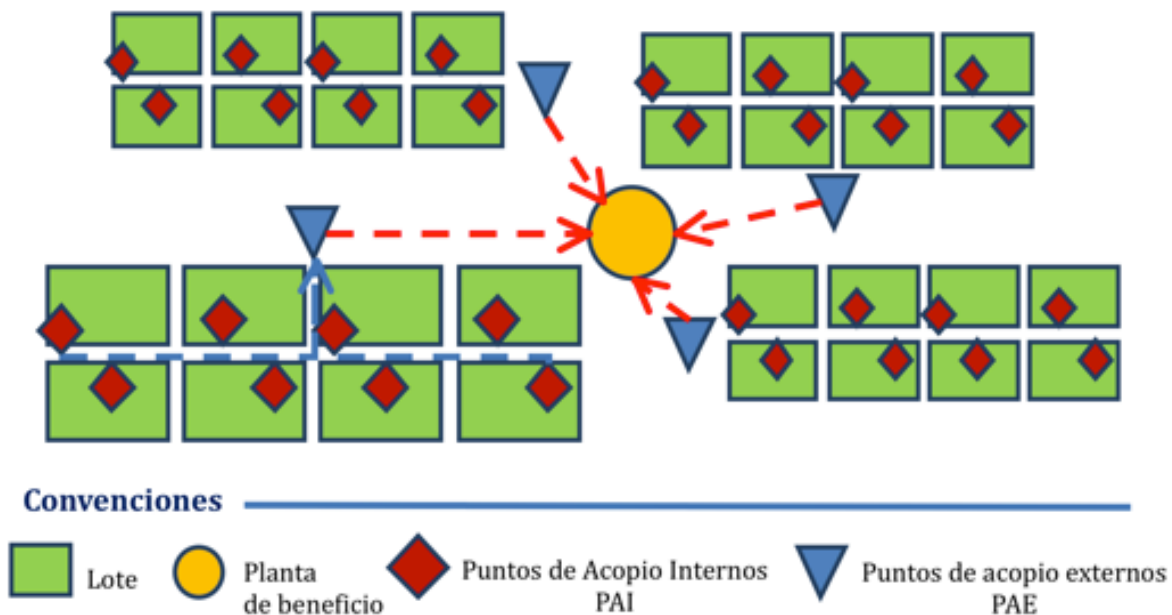
## **1.2. Implicaciones técnicas y económicas de la evacuación de los racimos de fruta fresca a la planta de beneficio**

Los racimos de fruta fresca (RFF), producidos en los cultivos de palma de aceite, son la materia prima a partir de la cual se extrae el ACP. Estos deben ser transportados el mismo día en que son cosechados desde las fincas productoras hasta las plantas de beneficio (también llamadas extractoras), para que allí sean sometidos a procesos mecánicos que conducen a la extracción del ACP y otros derivados.

El proceso genérico de transporte de los RFF comienza después de que los racimos son dejados por los operarios de cosecha en unos puntos de acopio internos (PAI), localizados en las fincas o lotes. Un vehículo intermedio los recoge allí y los transporta hasta un punto de acopio externo (PAE), desde donde son despachados a la planta de beneficio (**Figura 1**)

**Figura 1.** Proceso de transporte de racimos de fruta fresca de palma de aceite





Fuente: Fontanilla, *et al.* 2010.

Al respecto, se pueden presentar variaciones dependiendo de la maquinaria, vehículos y esquemas operativos que se utilicen. Entre las opciones utilizadas se destacan: los camiones de autocarga (Jerez y Amézquita, 2004) que llegan a los PAIs o a los PAEs recogen un contenedor de RFF que llevan a planta de beneficio, dejando en su lugar uno vacío; los camiones de carrocería cargados manualmente o por mecanismos hidráulicos de alce de mallas; tractores y zorras de tres o cinco toneladas (Fontanilla, et al., 2010) y los cable vías (Fontanilla y Castiblanco, 2009) sobre los que se transportan mallas cargadas con RFF desde el campo hasta la planta de beneficio.

Al no hacer parte del objetivo principal de los procesos de producción agronómica y de beneficio primario en la extracción de aceite, la logística de transporte de RFF desde las fincas hacia la planta de beneficio ha sido relegada a un segundo plano. Sin embargo, debido a que esta afecta la calidad y cantidad de aceite a extraer, la utilización de los recursos disponibles para la cosecha, y el costo mismo del transporte, es un tema que merece la atención en ambas etapas productivas.

Evaluaciones realizadas en diferentes plantaciones del país han revelado diferencias mayores a cinco puntos porcentuales entre la tasa de extracción potencial de aceite de los racimos (PAR) y la tasa de extracción de aceite real (TEA) en las plantas de beneficio. Se estima que las plantas de beneficio son responsables de entre 1,6 y 2,0 puntos de la diferencia. Cárdenas, et al. 2002, sugieren que la diferencia remanente de 3,0 a 3,4 puntos podría tener su origen en la cosecha y poscosecha del fruto. En cuanto a la calidad del aceite a obtener, se requiere que los RFF sean despachados en el menor tiempo posible para evitar la pérdida de humedad de los RFF y el incremento en la formación de ácidos grasos libres (AGL), que impacta la calidad del aceite causando la disminución del precio de venta.

Desde el punto de vista de la cosecha, en las empresas palmicultoras existe un número limitado de herramientas y equipos para realizar la evacuación de los RFF (por ejemplo, mallas y cajas contenedoras, entre otros). Para maximizar el uso de las herramientas y equipos de evacuación en una jornada laboral, se requiere que los RFF sean despachados a la planta de beneficio en el menor tiempo posible. De no ser así, la oferta de la herramienta disponible no logra satisfacer la demanda y esto conlleva a la disminución del rendimiento de la mano de obra, sobrecostos por el no uso o uso tardío de la tecnología asignada al proceso, pérdidas por peso y por calidad de los racimos, y pérdida de jornadas laborales porque los operarios se niegan a trabajar en condiciones adversas, entre otros.

En Colombia, a diferencia de los países líderes de la agroindustria de la palma, el costo de la mano de obra es elevado, participa con el 25,5% de los costos de la fase de cultivo. Cabe aclarar que buena parte de ese costo, el 60% es consecuencia de las labores de cosecha. Por su parte, el transporte de los RFF tiene una participación del 5% en los costos de producción del ACP (Duarte y Guterman, 2009). Sin embargo, la interrelación del transporte con la cosecha y la extracción de aceite en la planta de beneficio, lo puede llevar a afectar un 37% adicional del costo de producción (16% de la cosecha y 21% de la extracción), a lo que se le debe sumar las pérdidas por calidad de fruto.

Debido a que es en los puntos de acopio donde se enlaza la fase de campo con el transporte que llevará los RFF para su procesamiento en la planta de beneficio, con este proyecto se propone un modelo matemático de asignación de puntos de acopio para una plantación de palma de aceite (Unipalma S.A.), que permita encontrar el uso apropiado de los recursos asociados al transporte de RFF para minimizar el costo del sistema.

## 2. Optimización de recursos y transporte de fruto en palma de aceite

Las herramientas de optimización como soporte a la toma de decisiones pueden ser aplicadas en el largo, mediano y corto plazo, según si se utilizan para la planeación estratégica, táctica u operacional, respectivamente (Ahumada y Villalobos, 2008). Autores como Shapiro (2001) Harrison, *et al.* (2003) afirman que las decisiones estratégicas son las más importantes, sin embargo, éstas deben estar acompañadas por una apropiada planeación táctica y operativa, para evitar que se incurra en sobrecostos por una deficiente utilización de los recursos.

Para el caso de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia existe la necesidad de orientar la competitividad del sector hacia la reducción de costos a través de la optimización de la cadena de suministro del aceite de palma. Con la utilización de modelos de programación matemática es posible obtener recomendaciones sobre la ubicación más apropiada para la construcción de una planta de beneficio y las rutas óptimas y racionales para la recolección de racimos de fruta fresca (Tinsay, 2007).

Algunos ejemplos de ello y de otras herramientas para el apoyo en la toma de decisiones pueden encontrarse en trabajos como los de Ademosun (1982), García, *et al.* (2007), Yandra, *et al.* (2007), Ibrahim (2008), Gutiérrez, *et al.* (2008), Sauian (2008), Fontanilla, *et al.* (2010) y Adarme, *et al.* (2011) entre otros. A continuación, se presenta una breve reseña sobre sus aportes:

- Ademosun (1982), propone un modelo de localización para la producción de palma de aceite en Nigeria en el que se determina el número, la capacidad y la ubicación de plantas de beneficio, así como el direccionamiento de los productos, de tal manera que el costo sea minimizado.
- García, *et al.* (2007), quienes desarrollan un modelo matemático (no lineal, mixto entero) para optimizar los eslabones de cosecha y de extracción de aceite en la cadena de abastecimiento de la palma de aceite. Los autores reportan que con el modelo propuesto, se minimizan los costos fijos de infraestructura logística, así como los variables de inventario de materias primas, carga y alce de fruto, transporte y cosecha, y la extracción de los productos derivados.
- Yandra, *et al.* (2007), desarrollan un sistema integrado de soporte de decisiones, basado en algoritmos genéticos multi-objetivo y lógica difusa, para la optimización de la cadena de abastecimiento de la industria de biodiesel, en Indonesia. El modelo desarrollado, es aplicable tanto para palma de aceite como para palma de coco, e involucra a los diferentes proveedores de fruto, la agroindustria transformadora y consumidores. Los objetivos en los que se basó el modelo fueron minimizar el costo total de la cadena de abastecimiento, y minimizar el número esperado de producto deteriorado, mientras que las variables optimizadas son la cantidad de aceite de los proveedores enviada a las plantas de biodiesel, la cantidad de biodiesel enviado desde las plantas a las zonas de consumo, y los inventarios en las plantas.

- Ibrahim (2008), presenta en su tesis doctoral el desarrollo de modelos matemáticos de programación entera para resolver un problema de transporte de aceite crudo de palma y aceite de palmiste, en la región peninsular del norte de Malasia. Usando como función objetivo la minimización de la distancia, resolvió dos problemas de transporte para obtener la asignación óptima desde las plantas de beneficio a las refinerías o a los molinos.
- Gutiérrez *et al.* (2008), plantean un modelo matemático de programación lineal entera mixta, para la planificación estratégica del sector del biodiesel en Colombia. Los resultados del modelo, sobre producción, distribución de productos intermedios y finales y la puesta en marcha de plantas de producción de biodiesel, obtenidos con el apoyo de GAMS – CPLEX, permiten hacer un análisis de la eficiencia de la cadena actual, y establecer las posiciones logísticas de las plantas de producción de biodiesel establecidas para ese momento.
- Sauian (2008), presenta un trabajo desarrollado en una plantación de palma de aceite de 450 hectáreas, en el que a través de un modelo de asignación del personal de cosecha a los lotes, basado en las competencias individuales de cada cosechero, se logra incrementar el rendimiento de los operarios en un 6,4%, con respecto a la asignación manual que se venía realizando.
- Fontanilla, *et al.* (2010), presentan una revisión bibliográfica sobre modelos de optimización aplicados en la cadena de abastecimiento de la palma de aceite. También proponen un modelo matemático alimentado con datos simulados que arroja reducciones en el costo de transporte desde el campo a la planta de beneficio.
- Adarme, *et al.* (2011), proponen dos modelos matemáticos de optimización de transporte de fruto de palma a partir de una función objetivo que minimiza el costo de la operación, el primer modelo garantiza la recolección de los racimos de todos los puntos de acopio internos y su envío a los puntos de acopio externos disponibles; mientras que en el segundo se restringe el despacho del fruto de un mismo lote a un solo punto de acopio (single sourcing) para facilitar acciones de inspección del fruto.

Adicionalmente, debido a que el cultivo de la palma de aceite no presenta producciones constantes de RFF a lo largo del año, sino que según la época éstas se acrecientan o reducen (fenómeno de estacionalidad), cualquier asignación de recursos debe considerar la variación de producción en el año. Ante esto Fleming (1969) sugiere identificar los picos de producción según la época del año, teniendo en cuenta que éstos se pueden retrasar o adelantar debido a las condiciones climáticas. Con base en lo anterior, en las épocas de alta producción (alta cosecha - pico) se utilizarían todos los recursos en su máxima capacidad, para atender la demanda de la cosecha, transporte y procesamiento de fruto, y en los periodos de baja producción (baja cosecha), el personal dedicado a éstas actividades, debería destinarse a realizar labores diferentes, por ejemplo, para el caso de la cosecha podrían ser de mantenimiento del cultivo. Así mismo, la planta de beneficio que está diseñada para procesar todo el fruto que produzca el cultivo en pico de producción, en épocas de baja producción deberá disminuir su tasa de producción y operar continuamente, o mantenerla igual y operar la planta en un número menor de turnos de trabajo.

Otra decisión importante en el proceso logístico de transporte de RFF es el tipo de sistema a implementar, que depende de factores tales como: la distancia a recorrer, la superficie de la

carretera, el volumen de fruta a transportar, el tipo de terreno y las facilidades de recepción del fruto en la planta de beneficio (Turner y Gillbanks, 1982).

Algunos trabajos de optimización del proceso logístico de transporte de RFF en Colombia, adicionales al de García, et al. 2007, se citan a continuación:

- Jerez y Amézquita (2004) describen la implementación logística del proceso de transporte utilizado en la plantación del Roble (Zona Norte) a Unipalma (Zona Oriental). Este sistema consiste en cajas contenedoras con capacidad de 10 toneladas, camión-plataforma con winche hidráulico y alce con autocargador y radioteléfonos. Los resultados obtenidos de este estudio arrojaron que el sistema implementado representa una buena alternativa para la reducción de costos por tonelada, disminuyendo el número de vehículos utilizados en esta labor y aumentando la capacidad de almacenamiento en más de un 100% por la facilidad de utilizar las cajas metálicas en el campo como bodega. Además recomiendan que se debe establecer un programa de mantenimiento preventivo para la maquinaria.
- Mosquera y Valenzuela (2006), mediante metodologías de tiempos y movimientos y costeo de actividades llevaron a cabo un estudio en una empresa de la Zona Bananera considerada punto de referencia para el transporte de RFF en Colombia. Este estudio determinó la factibilidad de disminuir el costo de producción en la evacuación de fruto en 42% pasando de \$7.400/Ton RFF a \$4.600/Ton RFF. La modificación planteada fue la de realizar el cargue manual de los contenedores por parte de la cuadrilla de cosecha, aboliendo el uso de un tractor con góndola que recogía en las guardarrayas de los lotes para llevar los racimos a las cajas contenedoras.

## **3. Marco teórico**

### **3.1. El modelo del problema de transporte**

El modelo del problema de transporte es una clase de modelo de programación lineal que se ocupa de la optimización del transporte de bienes (Hillier y Lieberman, 2005) que sirve para representar la distribución de cualquier producto desde cualquier grupo de centros de abastecimiento, llamados fuentes, a cualquier grupo de centros de recepción, llamados destinos, de tal forma que se minimice el costo total de distribución. Para ello, cada fuente tiene una cantidad conocida de unidades para distribuir a los destinos y cada destino tiene una demanda conocida de unidades a ser recibidas de las fuentes y su formulación se aferra al supuesto del costo unitario, en el que distribuir unidades desde una fuente particular a un destino es directamente proporcional al número de unidades distribuidas.

### **3.2. Problema de recogida y entrega (Pickup and Delivery Problem-*PDP*)**

Según Salvendy y Sol (1995), en el Problema General de Recogida y Entrega (*GDPD*) se debe construir un conjunto de rutas que satisfagan los requerimientos de transporte. Un grupo de vehículos está disponible para hacer los recorridos. Cada vehículo tiene una capacidad dada, un punto de partida y un punto de llegada. Cada requerimiento de transporte especifica el tamaño de la carga a ser transportada, el origen donde debe ser recogida la carga y el destino a donde debe ser despachada. Cada carga debe ser transportada por un vehículo desde su origen hasta su destino sin que haya lugar a transbordo.

Existen tres problemas de ruteo reconocidos como casos especiales de *GDPD*. En el Pickup and Delivery Problem (*PDP*), cada requerimiento especifica un único origen y un único destino y todos los vehículos parten y retornan a un mismo depósito central. El Dial-a-Ride Problem (*DARP*) es un *PDP* en el que las cargas a ser transportadas representan la gente. El Vehicle Routing Problem (*VRP*) es un *PDP* en el que o todos los orígenes o todos los destinos están ubicados en el depósito.

Una característica importante de los problemas de ruteo es la forma en la que se da el requerimiento de transporte. En una situación estática, todos los requerimientos son conocidos al momento en que las rutas son construidas. En una situación dinámica, algunos requerimientos son conocidos al momento en que las rutas son construidas y los demás requerimientos son conocidos durante la ejecución de las rutas. Consecuentemente, en una situación dinámica, cuando se da un nuevo requerimiento de transporte, por lo menos una ruta debe cambiar para poder satisfacer este nuevo requerimiento. La mayoría de problemas de ruteo son estáticos, mientras que la mayoría de problemas de recogida y despacho son dinámicos.

En la práctica, un problema dinámico es resuelto por una secuencia de problemas estáticos. Cada vez que se da un nuevo requerimiento el conjunto actual de rutas se actualiza. Esto generalmente se conoce como algoritmo en-línea. Sin embargo, usualmente la actualización de las rutas se hace solamente cuando existe una cantidad que supere cierta cifra acordada.

Otro concepto importante en problemas de ruteo es el depósito. Un depósito es el lugar donde usualmente el los vehículos comienzan y terminan sus rutas. Debido a que la mayoría de problemas de recogida y despacho son dinámicos, regularmente con un horizonte de planeación largo, el concepto de depósito se desvanece. Los conductores duermen en el último lugar que visitaron o en la primera ubicación que deben visitar al siguiente día. Para problemas con un horizonte de planeación corto, como un día, donde los vehículos comienzan y terminan en un depósito central la respuesta a la demanda daría problemas sin depósitos. Cuando aparecen nuevos requerimientos de transporte y el conjunto actual de rutas debe ser actualizado, los vehículos se despliegan por fuera del área planeada.

Adicional a las restricciones de capacidad de los vehículos y a las de precedencia intrínsecas relacionadas con la recogida y despacho, existen restricciones para cumplir con un tiempo en la mayoría de problemas. Este tipo de restricciones se han convertido en parte integral de estos modelos. Entre otras razones, porque el problema más estudiado de despacho y recogida es el *dial-a-ride*, en el que se transportan personas que requieren especificidad en los tiempos de recogida y despacho.

También existen restricciones relacionadas con el intervalo de tiempo (ventana de tiempo) en el que el servicio en una ubicación  $i$  debe ocurrir. Para evitar que los clientes sean atendidos antes o después de su tiempo deseado, se pueden crear ventanas de tiempo cerradas o construir una función que penalice desviaciones del tiempo deseado de servicio. Existen otros problemas en los que los inconvenientes con el cliente pueden ser controlados considerando la respuesta a la demanda, por ejemplo, si un cliente  $j$  tiene una ubicación que geográficamente está alejada, este cliente será programado de último en la ruta del vehículo. Esta situación no cambia a pesar que entren nuevos clientes y para prevenir una espera infinita debe incluirse una ventana de tiempo que cierra el sistema. Otra ventana que surge como respuesta a los inconvenientes con los clientes en los sistemas *dial-a-ride* son las restricciones de tiempo máximo de viaje: el límite en que el cliente permanecerá en el vehículo, no se permite tiempo de espera cuando el cliente esta en el vehículo. Finalmente, las ventanas de tiempo también pueden ser aplicadas a los vehículos pensando en que no están disponibles todo el día.

En cuanto a las funciones objetivo utilizadas para los problemas de recogida y despacho, las más comunes relacionadas con un solo vehículo son (Savelsbergh y Sol, 1995):

- Minimizar la duración: la duración de una ruta es el tiempo total que el vehículo necesita para ejecutar la ruta. La duración de la ruta incluye los tiempos de viaje, tiempos de espera, tiempos de cargue y descargue y tiempos de receso.
- Minimizar el tiempo de terminación: el tiempo de terminación de la ruta es el tiempo en el que la última ubicación es completada. En el caso en que el tiempo de inicio del vehículo se fije como el tiempo cero, el tiempo de terminación coincide con el de la duración de la ruta.

- Minimizar el tiempo de viaje: el tiempo de viaje de la ruta se refiere al tiempo total gastado en un viaje actual entre ubicaciones diferentes.
- Minimizar la distancia de la ruta: la distancia de la ruta es la distancia total de viaje entre diferentes ubicaciones.
- Minimizar los inconvenientes con el cliente: En sistemas *dial-a-ride*, los inconvenientes con los clientes son medidos en términos de la desviación del tiempo de recogida (la diferencia entre el tiempo de recogida actual y el deseado), desviación del tiempo de despacho (la diferencia entre el tiempo de despacho actual y el deseado), y el tiempo de exceso de viaje (la diferencia entre el tiempo de viaje realizado y el tiempo de viaje directo). En las situaciones de respuesta a la demanda donde los clientes requieren servicio inmediato (tan pronto como sea posible), la diferencia entre el tiempo de recogida y el tiempo en el que el requerimiento tiene lugar contribuye con la definición del inconveniente con el cliente. Diferentes tipos de funciones, lineales como no lineales han sido propuestos para modelar los inconvenientes con los clientes.

En cuanto a las funciones objetivo relacionadas con problemas de recogida y entrega para múltiples vehículos cabe mencionar: minimizar el número de vehículos, maximizar la utilidad, entre otros.

Por otra parte, los procedimientos de solución se pueden clasificar de acuerdo a si el problema es estático o dinámico (porque sus características y aproximaciones de solución difieren considerablemente), y si el problema se refiere a un solo vehículo o a múltiples (con un solo vehículo, todos los requerimientos de transporte son asignados a este; mientras que con múltiples vehículos, los requerimientos son divididos entre el conjunto de vehículos. Asignar vehículos en *PDP* es más difícil que asignar requerimientos de transporte en el *VRP*. En el *VRP* todos los orígenes de los requerimientos de transporte son ubicados en el depósito. Entonces los requerimientos de transporte geográficamente cercanos son usualmente atendidos por el mismo vehículo. En el *PDP*, los destinos geográficamente cercanos pueden tener orígenes que están geográficamente apartados y no se puede concluir que puedan ser atendidos con el mismo vehículo.

### **3.3. Pronósticos**

Un pronóstico es una predicción de uno o varios eventos. Los problemas de pronóstico son usualmente clasificados como de corto (días, semanas, meses), mediano (uno o dos años) o largo plazo (más de dos años) (Montgomery, et al. 2008).

Los pronósticos de corto y mediano plazo se basan en la identificación, modelamiento y extrapolación de patrones encontrados en datos históricos. La mayoría de problemas de pronóstico incluye el uso de series de tiempo. Una serie de tiempos es una secuencia cronológica de observaciones de una variable de interés.

La importancia de pronosticar radica en que la predicción de eventos futuros es el insumo crítico en procesos de toma de decisiones y de planeación, con aplicación en áreas como la administración de



operaciones, mercadeo, administración financiera y de riesgo, economía, control de procesos industriales, y demografía.

A pesar de la variedad de aplicaciones en las que pueden ser usados los pronósticos, solo existen dos enfoques para llegar a un pronóstico: métodos cuantitativos y métodos cualitativos (Montgomery, et al. 2008).

Por una parte, las técnicas de pronóstico cualitativas son por naturaleza subjetivas y requieren el juicio de un panel de expertos. Se utilizan en situaciones donde no existe o hay poca información histórica. La técnica más formal y conocida de pronósticos cualitativos es el **Método Delphi**.

En cuanto a los métodos cuantitativos, estos hacen formal el uso de los datos históricos y de los modelos de pronóstico. Los modelos resumen los patrones de los datos y los expresa mediante una relación estadística de entre los actuales valores y los anteriores. Es decir, que el modelo de pronóstico es usado para extrapolar el comportamiento previo y el actual en el futuro.

Los modelos más comúnmente usados para el pronóstico son los modelos de regresión, los modelos de suavización, y los modelos generales de series de tiempo. Los modelos de regresión hacen uso de las relaciones entre la variable de interés y una o más variables predictivas (el método de los mínimos cuadrados es la base formal de los modelos de regresión). Los modelos de suavización emplean una función simple de observaciones previas para dar un pronóstico de la variable de interés, su uso es justificado porque son fáciles de usar y proveen resultados satisfactorios. El modelo general de series de tiempo emplea las propiedades estadísticas de los datos históricos para especificar un modelo y estimar los parámetros desconocidos usando el método de mínimos cuadrados.

Dado que el pronóstico es un valor que representa una estimación del valor futuro de la variable de interés y que generalmente éste dista del valor real, se debe acompañar de un estimador que indique tan amplio será el error del pronóstico. Una forma de hacerlo es a través del intervalo de predicción (PI). También, para enmarcar las condiciones para las que será utilizado el pronóstico, se debe aclarar cuál es el horizonte del pronóstico y su intervalo: el horizonte de pronóstico (o también llamado lead time) se refiere al número de periodos futuros para los cuales los pronósticos serán calculados; y el intervalo del pronóstico se refiere a la frecuencia con la que serán preparados los pronósticos (es el periodo básico para el cual es hecho cada pronóstico).

Según Montgomery (2008) el proceso para la elaboración de un pronóstico requiere de las siguientes etapas: 1) la definición del problema, 2) recolección de los datos, 3) análisis de los datos, 4) selección del modelo y ajustes, 5) validación del modelo y ajustes:

- 1) **Definición del problema.** Incluye el entendimiento de cómo el pronóstico será usado para cumplir con las expectativas del usuario. Se debe plantear el lead time y el intervalo del pronóstico.
- 2) **Recolección de datos.** Consiste en obtener historia relevante de las variables que se pronosticarán, incluyendo la información histórica de las variables predictoras en potencia. Se debe pensar también en la facilidad para recoger estos datos en el futuro cuando el modelo de pronóstico esté funcionando.

- 3) **Análisis de los datos.** Se deben calcular las estadísticas descriptivas básicas como la media, desviación estándar, percentiles y autocorrelaciones. El propósito de este paso es identificar si existen tendencias o estacionalidades.
- 4) **Selección del modelo y ajustes.** Consiste en escoger uno o más modelos de pronóstico y ajustar el modelo a los datos.
- 5) **Validación del modelo.** Consiste en la evaluación del modelo de pronóstico para estimar como este se desempeña. Se debe examinar la magnitud de los errores de pronóstico cuando en el modelo se utilizan datos nuevos.

### 3.4. Análisis de series de tiempo

El análisis de series de tiempo permite detectar regularidades en las observaciones y derivar leyes sobre las mismas, y o extraer su información para predecir eventos futuros sobre la variable de estudio. La base metodológica detrás de este tipo de análisis es que es posible descomponer una serie de tiempo en un número finito de componentes independientes no observables que se desarrollan frecuentemente y que pueden ser calculados y que tienen un impacto en la variable.

De acuerdo con Kirchgässner y Wolters (2007): “El método de descomposición en los componentes no observables que dependen de diferentes factores causales, fue desarrollado por Persons (1919) e incluye cuatro diferentes componentes:

1. Una tendencia en el largo plazo (es la dirección de la serie)
2. Un componente cíclico con periodos mayores a un año (ciclo de negocio)
3. Un componente que contiene altos y bajos en un mismo año (ciclo estacional)
4. Un componente que contiene todos los movimientos que no pertenecen ni a la tendencia, el ciclo de negocio ni al componente estacional y que es impredecible. (el residual)”

Bajo el supuesto de que los diferentes factores no observables son independientes, su traslape aditivo origina la serie de tiempos que se puede observar como un todo. Para obtener información sobre el proceso de generación de los datos se deben hacer supuestos sobre los componentes no observables.

En el análisis clásico se asume que los componentes sistemáticos (tendencia, ciclo de negocio y ciclo estacional) no son influenciados por disturbios estocásticos y que pueden ser representados por funciones determinísticas de tiempo. El impacto estocástico es restringido a los residuales, que entre otros, no contienen movimientos sistemáticos. Por consiguiente, este es modelado como una serie de variables aleatorias independientes y no correlacionadas con valor esperado cero y varianza constante.

La metodología moderna asume que existe un impacto estocástico en todos los componentes de una serie de tiempo. En 1970 Box y Jenkins publicaron un libro que introducía modelos univariados

para series de tiempo que predican el comportamiento futuro de esta variable (este procedimiento es conocido como análisis Box-Jenkins). Ellos abandonaron el análisis clásico y asumieron que existía un modelo estocástico común para la generación del proceso de la serie de tiempo. Recientemente, la idea de descomponer una serie de tiempos ha surgido de nuevo, particularmente para modelar variaciones estacionales. Sin embargo, contrario a la propuesta clásica ahora se asume que todos los componentes de la serie de tiempos pueden ser representados por modelos estocásticos simples.

Una guía importante de las propiedades de una serie de tiempos es provista por la muestra de coeficientes de autocorrelación, los cuales miden la correlación entre las observaciones ubicadas en diferentes distancias (esto es la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas). El valor del índice de correlación varía en el intervalo  $[-1,1]$ :

- Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en proporción constante.
- Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.
- Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.
- Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa.
- Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en proporción constante.

En cuanto a la validez del modelo para análisis de series de tiempo, Donald Cochrane y Guy Orcutt (1949) (reportado por Kirchgässner y Wolters, 2007) mostraron que si los residuales de una ecuación de regresión se correlacionan positivamente, las varianzas de los parámetros son subestimadas y por lo tanto, los valores de los estadísticos F y t son sobreestimados. Este problema puede ser solucionado por lo menos para el caso de la autocorrelación de primer orden haciendo una transformación adecuada. Adicionalmente, para hacer inferencia estadística basada en series de tiempo se requiere que las varianzas y covarianzas entre los elementos de las series sean independientes del tiempo.

### **Series de tiempo estacionarias**

Se considera que una serie de tiempo es estacionaria cuando su distribución de probabilidad no cambia a pesar que cambien los periodos de observación. Esto es, si no existe un cambio sistemático en la media (sin tendencia), si no existe un cambio sistemático en la varianza y si las variaciones periódicas han sido removidas (Chatfield, 1996).

La descripción gráfica de la serie de tiempos ofrece información importante sobre tendencia, estacionalidad y discontinuidades, entre otros. Esto puede sugerir que se deben hacer transformaciones, por ejemplo utilizando logaritmos o raíces cuadradas: para estabilizar la varianza, para convertir el efecto estacional en aditivo y para hacer que los datos se distribuyan normalmente, entre otros, (Chatfield, 1996):

- Si existe una tendencia en la serie y la varianza se incrementa cuando lo hace la media se debe transformar los datos. Si la desviación estándar es directamente proporcional a la media, se sugiere una transformación logarítmica.
- Si existe una tendencia en la serie y el tamaño del efecto estacional se incrementa con la media, se deben transformar los datos para mostrar el efecto estacional constante de año a año. Esto se refiere a hacer el efecto estacional aditivo (que preserva las operaciones de adición). En particular, si el tamaño del efecto estacional es directamente proporcional a la media, se dice que el efecto estacional es multiplicativo y se requiere de una transformación logarítmica para hacerlo tomar un efecto aditivo. Sin embargo, esta transformación solamente estabilizará la varianza si el error también es multiplicativo.
- La construcción de modelos y los pronósticos se desarrollan sobre la base de que los datos se distribuyen normalmente.

### **Análisis de series que contienen tendencia**

De acuerdo con Chatfield (1996), se puede acudir a los siguientes métodos para analizar una serie de tiempos que contiene una tendencia:

- **Ajustes de curva:** un método tradicional para trabajar con datos no estacionales que contienen una tendencia, es el ajuste a funciones como curvas polinomiales (lineales, cuadráticas), a la curva Gompertz, o curva logística.
- **Filtrado:** un segundo procedimiento para trabajar con una tendencia es usar un “filtrado lineal” (linear filter, que convierte una serie de tiempos, en otra mediante una operación lineal, dándole cierto peso al orden de las observaciones. Entre estos procedimientos se destaca la suavización por medias móviles (por ejemplo la de Spencer, la de Henderson) .
- **Diferenciación:** un tipo especial de filtrado, particularmente útil para remover tendencia, es diferenciar una serie de tiempo dada hasta que se convierte en estacionaria. Este método es parte integral de los procedimientos utilizados por Box y Jenkins (1970). Para datos no estacionales, la diferenciación de primer orden es suficiente para conseguir la aparente estacionariedad. Ocasionalmente, la diferenciación de segundo orden es requerida.

### **Análisis de series que contienen variación estacional**

Se debe diferenciar entre estacionalidad aditiva (que es constante año a año) y estacionalidad multiplicativa. Para series que muestran una baja tendencia es adecuado estimar el efecto estacional para un periodo particular (por ejemplo enero) hallando el promedio para cada observación de enero menos el promedio anual correspondiente en el caso aditivo, o la observación de enero dividida entre el promedio anual, para el caso multiplicativo.

Para series que contienen una tendencia sustancial, se requiere de un procedimiento más sofisticado. El efecto estacional también puede ser eliminado por diferenciación (Box y Jenkins).

Los componentes de una serie de tiempos: tendencia (T), ciclo (C), estacionalidad (S), y el error (E), pueden ser combinados en diferentes formas.

Un modelo aditivo se presenta de la siguiente forma:  $y=T+S+E$ , donde los tres componentes son sumados para formar la serie de observaciones.

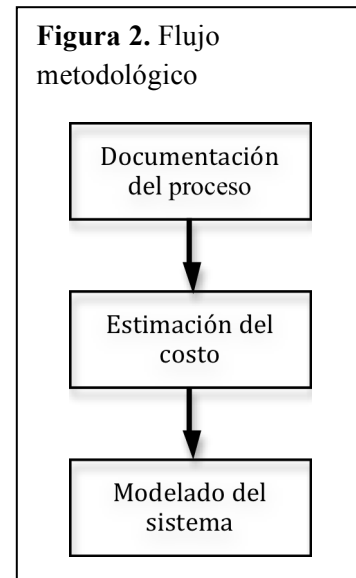
Un modelo multiplicativo se presenta de la siguiente forma:  $y=T \times S \times E$ , donde los datos son formados a partir del producto de los tres componentes.

Una serie estacionalmente ajustada se obtiene al extraer el componente estacional de los datos, dejando únicamente la tendencia y el componente del error. En el modelo aditivo, la serie estacionalmente ajustada es  $y-S$ , mientras que en el modelo multiplicativo es  $y/S$ .

## 4. Metodología

El proyecto se desarrolló con el respaldo de la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite – Cenipalma y la empresa productora de palma de aceite (Unipalma S.A.) ubicada en los departamentos del Meta y Cundinamarca. Además, contó con la participación de un estudiante de Ingeniería Industrial bajo la modalidad de pasantía para la recolección de datos en campo y la documentación del proceso.

A continuación se presentan las actividades desarrolladas para el cumplimiento de los objetivos (Figura 2):



### 4.1 Descripción del proceso logístico de transporte de fruto desde el campo hasta la planta de beneficio.

Se hizo una documentación del proceso de logístico de transporte de fruto desde el campo, hasta la planta de beneficio. En ella, se describió la secuencia cronológica de todas las operaciones que comprometen el transporte del fruto desde los puntos de acopio internos (PAIs), pasando por los (PAEs) puntos de acopio externos ubicados en las fincas, hasta su llegada a la planta de beneficio.

Dicha documentación incluyó dos componentes: la descripción de los pasos requeridos para realizar el transporte, complementada con el inventario de herramientas y los requerimientos de personal destinados a la labor; y la estimación del tiempo requerido para cada etapa del proceso.

En el primer componente, la información demandada fue recogida en una visita de campo de dos semanas, en las que mediante observación directa de las actividades de la evacuación de fruto de la cosecha y el transporte de fruto, se consiguió elaborar los diagramas de flujo del proceso utilizando la simbología de la ASME, considerando los macromovimientos de los procesos (operaciones, transportes, almacenamientos, demoras e inspecciones), bajo el siguiente criterio:

- Operación: Se produce o se realiza algo.
- Transporte: Se cambia de lugar o se mueve el fruto.
- Inspección: Se verifica la calidad o cantidad del fruto.
- Demora: Se interfiere o se atrasa el paso siguiente.
- Almacenamiento: Se guarda o se protege el fruto.

Para la estimación del tiempo requerido en cada etapa del proceso, se contrató un estudiante de Ingeniería Industrial quien realizó un acompañamiento por un periodo de dos meses a los equipos de alce de fruto, cronometrando los tiempos de desplazamiento entre acopios internos, el tiempo de alistamiento para recolección de las mallas, el tiempo de recolección de las mallas y el tiempo de alistamiento para desplazamiento. Para ello se utilizaron técnicas de medición de tiempos con cronómetro y de captura y manipulación de sistemas de posicionamiento satelital, lo que permitió geo-referenciar los puntos de acopio interno (PAIs) y de los puntos de acopio externos PAEs.

## **4.2 Estimación del costo de transporte**

En la estimación de los costos relacionados con el transporte de fruto se contemplaron el costo de adquisición de la maquinaria, los animales y las herramientas, su vida útil, costo de operación y mantenimiento, y valor de reposición.

Inicialmente con el apoyo de los ingenieros de la plantación se realizó el inventario de las herramientas y maquinaria requerida para el proceso de alce y transporte, se indagó por los precios de adquisición, el valor de salvamento y el costo de la mano de obra involucrada en las etapas de cosecha, alce de fruto y transporte. Posteriormente, se recogió de los libros de campo de la plantación la información histórica del costo de operación (combustible, aceites, alimentación para el caso de animales, entre otros) y mantenimiento de las herramientas y maquinaria (mantenimientos preventivos, correctivos, costo de la mano de obra de taller, entre otros).

Dicha información fue procesada utilizando la metodología que Duarte y Guterman ha utilizado para la estimación de costos de cultivo contratados por Fedepalma desde 2004. Con ello, se consiguió el costo de operación mensual de los equipos bajo una jornada de operación de 12 y 8 horas en el caso de la maquinaria de alce de fruto y de los equipos de cosecha, respectivamente.

## **4.3 Definición de la red de puntos de acopio óptima, en una plantación de Unipalma, por medio de un modelo matemático.**

En Unipalma la red de acopios externa fue definida con anterioridad a este estudio. Existe un punto de acopio externo (PAE) en la intersección de dos vías secundarias que separan dos lotes contiguos. Sin embargo, no existe una definición de los puntos de acopio internos, esto es, el número mínimo de PAIs que se deben habilitar por lote, que está en función de la cantidad de fruto y de la cantidad mínima de mallas a ubicar en cada acopio. Esto causa inconvenientes a los operarios de cosecha quienes deben desplazarse distancias adicionales para disponer los racimos en los PAIs cuando se habilitan unos pocos en el lote y, al equipo de alce que demanda un mayor tiempo en alistamientos para cargue y descargue, cuando para recoger una sola malla debe hacer una parada, lo que disminuye la capacidad de alce de fruto en una jornada laboral y se pueden generar saldos en campo si no se extienden los tiempos de recolección.

El planteamiento del modelo corresponde a un problema de transporte del tipo Pick up and deliver

para un solo vehículo. En Unipalma la cosecha se realiza en barrido por bloques, existe un orden predeterminado para la cosecha de los lotes que responde a la necesidad de la concentración de los recursos en una zona para minimizar costos y garantizar la supervisión de las labores de cosecha. Es de aclarar que el vehículo de alce de fruto que recoge las mallas con RFF en los PAIs y de allí los transporta a los PAEs sigue este mismo recorrido, sin embargo, para evitar tiempos muertos, el vehículo de alce de fruto se ocupa solamente de los bloques que han sido cosechados con anterioridad por lo que el modelo no exige una priorización sobre cuál acopio interno o lote se debe recoger primero, ya que esto es predefinido por el recorrido de la cosecha.

Dadas las condiciones anteriores, se consideró un modelo Lineal Mixto Entero, donde la función objetivo planteada fue la de minimizar el costo del transporte interno (entre los acopios interno y externo), respetando los tiempos máximos de permanencia de fruto en campo y la disponibilidad de recursos de la empresa. Este modelo fue resuelto con el Software LINGO v10 para diferentes escenarios de producción de fruto, atendiendo a la condición de estacionalidad de la producción en los cultivos de palma de aceite.

Para condicionar los resultados arrojados por el modelo a las condiciones particulares de cada lote, se construyó una serie de tiempos con las producciones de históricas de los mismos (del periodo enero 2006 a mayo de 2011) y utilizando SPSS v17.0 se construyeron modelos univariados de pronóstico para el mes inmediatamente siguiente, los cuales arrojaron el intervalo de confianza al 95% en el que se ubica la producción.



## **5. Descripción del proceso de cosecha y transporte de fruto en Unipalma S.A.**

Unipalma tiene implementado el sistema de evacuación y alce de fruto con pluma y mallas en una finca de 630 hectáreas y otra de 711 hectáreas. Estas fincas son cosechadas por cuatro grandes grupos de cosecheros que en su totalidad tienen aproximadamente 60 corteros y 40 ayudantes en épocas pico (Enero a Abril), y 50 corteros y 27 ayudantes en época de baja cosecha (Mayo a Diciembre).

La cosecha con este sistema se hace de lunes a viernes de 6 a.m. a 3 p.m., aunque algunas veces se trabaja los sábados hasta el medio día cuando existe bastante fruto.

Para la cosecha, se tiene un recorrido establecido para las cuadrillas, que se sigue de acuerdo con el avance del día anterior. Al inicio de la jornada los cosecheros llegan al lugar donde han dejado el zorrillo y sus herramientas la tarde anterior y encuentran los búfalos (llevados allí por el vaquero), los aperan, instalan las mallas en las que se recogen los RFF y comienzan la jornada. Algunos cosecheros (35% aproximadamente) realizan la cosecha individualmente (corte, recolección y descarga) mientras otros (65% aproximadamente) van por parejas, uno corta mientras el otro recoge y descarga el fruto en la malla. En épocas pico trabaja generalmente cada cortero con ayudante y a veces pepero.

Cuando se completa la capacidad de una malla con RFF (900kg), esta es llevada a la vía más próxima y descargada en un PAI (espacio disponible para descargar la malla, corresponde a la entrada o salida de una calle de cosecha). Al final de la jornada los cosecheros desaperan y sueltan el zorrillo del búfalo en el lugar donde terminaron de cosechar, llegando al día siguiente a ese mismo sitio para continuar con la cosecha. El búfalo es recogido por el vaquero y llevado a la bufalera donde descansa.

Después de cosechado el lote, y por lo tanto, de que han sido dispuestas las mallas de RFF en los PAIs, un vehículo de auto-carga destinado al transporte interno (que lleva acoplado una pluma para el alce de las mallas y para el intercambio de las cajas contenedoras) visita los PAIs, en ellos recoge las mallas y descarga los RFF en la caja contenedora. En este proceso participan el conductor del vehículo quien además de conducirlo opera el sistema de alce, y dos ayudantes: el primero encargado de soltar los nudos de las mallas, y el segundo, del registro del peso de cada malla, de enganchar y soltar las mallas vacías en campo, así como de hacer la recolección de fruto suelto. Cuando se han cargado aproximadamente 15 mallas, se descarga la caja contenedora en PAEs establecidos previamente, allí el conductor notifica a báscula sobre la ubicación de esta y alza una vacía para seguir recogiendo el fruto. Desde báscula notifican a los conductores de los camiones de transporte a planta de beneficio (Chevrolet Kodiak) sobre la caja contenedora cargada para que uno de ellos la recoja, y deje una vacía, normalmente en el mismo lugar en que se recoge la caja contenedora con fruto. Cuando el fruto llega a la planta de beneficio es pesado en la báscula y descargado en la tolva que alimenta el proceso industrial.

## Personal

A continuación se presenta la asignación del personal para una cuadrilla con el sistema de cosecha de pluma y mallas, en Unipalma:

**Tabla 1.** Composición y descripción del personal de cosecha en Unipalma.

<b>Labor</b>	<b>No Personas</b>	<b>Herramientas Utilizadas en la labor</b>	<b>Descripción de labores</b>
<b>Cosechero</b>	40	<ul style="list-style-type: none"><li>• Machete</li><li>• Zorrillo</li><li>• Búfalo</li></ul>	Corta las hojas en 2 o 3 partes y las apila en la palera, corta el pedúnculo del racimo maduro y lo recoge y carga en el zorrillo, además hace la recolección de fruto suelto. Cuando se llena la capacidad de las mallas las descarga en acopios o en la vía.
<b>Cortador</b>	60	<ul style="list-style-type: none"><li>• Cuchillo malayo</li><li>• Piedra de afilar</li></ul>	Se encarga de buscar y cortar el racimo maduro. Al final de la jornada se devuelve por las calles cosechadas recogiendo el fruto suelto en cada palma cosechada.

**Tabla 2.** Personal de apoyo al proceso de cosecha en Unipalma.

<b>Labor</b>	<b>No Personas</b>	<b>Herramientas Utilizadas en la labor</b>	<b>Descripción de labores</b>
<b>Supervisor</b>	1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Moto</li></ul>	Encargado de coordinar y planificar la cosecha.
<b>Capataz</b>	1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Moto</li></ul>	Hace los reportes diarios de cosecha, e informa sobre las mallas a recoger, además controla la labor de cosecha de los cosecheros.
<b>Auxiliar de supervisión de Alce</b>	1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Moto</li></ul>	Coordina el transporte para el alce y descargue de cajas y el mantenimiento del sistema.
<b>Vaquero</b>	1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sogas</li></ul>	Alimenta a los búfalos, los cuida y los entrega en el lote de cosecha.
<b>Conductor y operador</b>	1	<ul style="list-style-type: none"><li>• Camión y pluma</li></ul>	Conduce el camión por las vías de la plantación recogiendo las mallas cargadas con fruto operando la pluma.

<b>Registrador</b>	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guantes</li> </ul>	Registra peso de las mallas, engancha y desengancha las mallas a la pluma. Recoge el fruto suelto en la vía o acopios.
<b>Suelta nudos</b>	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guantes</li> </ul>	Se encarga de desamarrar las mallas en la caja contenedora que carga el camión para hacer el descargue del fruto contenido en ellas.
<b>Transportadores de mallas</b>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tractor</li> <li>• Guantes</li> </ul>	Encargados de recoger y dejar las mallas en los lotes durante la cosecha.
<b>Conductores de doble troque</b>	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chevrolet Kodiak</li> <li>• Guantes</li> </ul>	Encargados de cargar las cajas contenedoras al camión y transportarlos a la planta extractora. También los descargan en los acopios.
<b>Basculero</b>	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Computador</li> <li>• Báscula</li> </ul>	Registra el peso contenido en cada caja contenedora cargado de fruto.

Este sistema de evacuación, alce y transporte de fruto deja ver tres etapas:

- Evacuación de fruto a las vías
- Alce de fruto por pluma y descargue en acopios
- Transporte a planta extractora

A continuación se describen las actividades realizadas en cada fase:

### 5.1 Evacuación de fruto a las vías

En la plantación existen varias formas de cosecha: Individual de corrido (hace todas las labores seguidas), individual por partes (primero se cortan varios racimos y luego se pasa con el búfalo y el zorrillo recogiendo el fruto cortado), pareja con sólo cortero (uno se encarga de cortar los racimos y el otro hace las demás labores), pareja con sólo recolector (uno corta el racimo, las hojas y el pedúnculo, mientras el otro recoge los racimos y el fruto suelto). Se describirá la primera forma de cosecha:

- 1. Instalación de malla:** Es necesario instalar una malla vacía en el zorrillo para comenzar con las labores de cosecha de fruto maduro (Figura 3).



**Figura 3.** Instalación de malla



**Figura 4.** Desplazamiento y búsqueda de racimo maduro

2. **Desplazamiento y búsqueda de racimo maduro:** Es el desplazamiento que se hace dentro del lote en busca de racimo maduro para recolectar. (Figura 4).

3. **Corte de racimo maduro:** Es el corte de racimo apto para la cosecha con el cuchillo malayo. (Figura 5).

4. **Encalle de hoja y corte de pedúnculo:** En esta actividad el cosechero corta las hojas en dos o tres partes para luego apilarlas en la palera, después corta el pedúnculo de los racimos (Figura 6).

5. **Alce de racimo maduro:** Es el alce de los racimos que se han cortado previamente para descargarlos en el zorrillo que llevan los búfalos (Figura 7).

6. **Recolección de fruto suelto:** Es la recolección del fruto que se ha desprendido del racimo en el plato de la palma o alrededores (Figura 8).



**Figura 5.**Corte de racimo



**Figura 6.** Encalle de hoja y corte de pedúnculo



**Figura 7.** Alce de racimo maduro

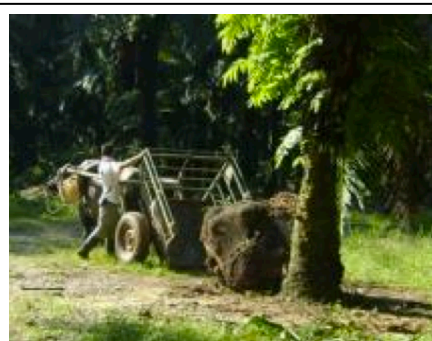


**Figura 8.** Recolección de fruto suelto

7. **Cierre de malla:** Cuando se llena la malla se amarra y se cierra para que no se salga ningún racimo ni se pierda fruto (Figura 9).
8. **Desplazamiento a vía o acopio:** Se hace para descargar la malla donde será alzada por la pluma.



**Figura 9.** Cierre de malla



**Figura 10.** Descargue de malla

9. **Descargue de la malla:** Es el descargue de la malla en la vía o acopio, la malla caerá al suelo donde será alzada por la pluma. Algunas veces cuando la pluma está muy cerca en el momento del descargue esta operación se omite, ya que la pluma la alza directamente desde el zorrillo que carga el búfalo (Figura 10).
10. **Registro de información:** Se hace para registrar el lote y la cuadrilla de trabajo a la que corresponde la malla en el ápice de una hoja de palma cortada. Cuando la pluma esta cerca en el momento del descargue también se omite, porque es innecesaria ya que el registrador presencia el alce.

**Tabla 3.** Diagrama de operaciones del operario de cosecha, en Unipalma S.A.

Diagrama de operación	Número de actividad	Descripción de la actividad	Operario(s)	Observaciones
	05	Instalación de malla.	Cosechero	
	10	Desplazamiento y búsqueda de racimos maduros.	Cosechero	
	15	Corte de racimo maduro	Cosechero	
	20	Encalle de hojas y corte de pedúnculo.	Cosechero	
	25	Alce de racimos al zorrillo.	Cosechero	
	30	Recolección de fruto suelto	Cosechero	
	35	¿El zorrillo está lleno? Si: pasar a la actividad 35. No: volver a la actividad 05.		
	40	Cierre de la malla.	Cosechero	
	45	Desplazamiento a la vía o acopio.	Cosechero	En algunos lotes el acopio está definido.
	50	Descargue de la malla	Cosechero	
	55	Registro de información	Cosechero	
	60	¿Fin de la jornada? Si: pasar a la actividad 70. No: volver a la actividad 15.		
	65	Desapero de búfalo.	Cosechero	

## 5.2 Alce de mallas con pluma

- Desplazamiento por los PAIs:** Desplazamiento que se hace a los PAI donde se encuentran las mallas descargadas por los cosecheros.
- Anclaje del sistema:** Es el anclaje de la pluma al suelo para dar estabilidad en el momento del alce de las mallas.



**Figura 11.** Enganche de malla



3. **Enganche de malla:** Se engancha la malla a ser alzada por la pluma, la cual opera el conductor. El enganche lo hace el registrador. (Figura 11).



**Figura 12.** Alce de malla.



**Figura 13.** Descargue de malla.

4. **Alce de malla:** Es el alce que se hace a través de la pluma para ser descargada en la caja contenedora que lleva el camión. El registrador va recogiendo el fruto suelto que se encuentra en el suelo (Figura 12).

5. **Desamarre de malla:** Para descargar la malla se desamarran los nudos hechos por los cosecheros antes de ser descargada en la caja contenedora, esta operación la hace el “suelta nudos”.

6. **Descargue de malla:** Una vez desamarrada la malla el “suelta nudos” hace señas al conductor para que haga el descargue del fruto a través del movimiento y jaloneo de la pluma (Figura 13).



**Figura 14.** Soltar malla

7. **Soltar malla:** Cuando se termina el descargue de fruto contenido en la malla, el operador de la pluma la dirige al suelo donde el registrador soltará la malla vacía de la pluma (Figura 14).

8. **Desplazamiento a PAE:** Ya cargado la caja contenedora con aproximadamente 15 mallas, se dirigen al PAE más cercano donde se descargará.

9. **Posicionamiento:** Es necesario posicionar bien el camión para descargar la caja contenedora en el PAE sin que ocasione problemas en el alce.

10. **Descargue de caja contenedora:** Es el descargue de la caja contenedora cargada con fruto en el PAE establecido para ello (Figura 15).



**Figura 15.** Descargue de Caja contenedora.

11. **Desenganche de guaya:** Una vez se descarga la caja contenedora, se desenganchan las guayas que unen el sistema de alce a él.

12. **Posicionamiento de cargue:** Es el posicionamiento necesario para alzar la caja contenedora vacía.

13. **Enganche y tensada de guaya:** Se engancha la guaya que une el sistema de alce con la caja contenedora para luego tensarlo y poder alzarlo.

14. **Alce de caja contenedora:** Es el que se hace a través del sistema de alce. (Figura 16).



**Figura 16.** Alce de caja contenedora

15. **Alistamiento (Brazo):** Antes de desplazarse a los lotes por mallas, ubica y posiciona el brazo dentro de la caja contenedora. Además se comunica con báscula para notificar la posición de la caja contenedora cargado y el alce del vacío.



**Tabla 4.** Diagrama de operaciones del sistema de evacuación y alce de fruto en Unipalma S.A.

Diagrama de operación	Número de actividad	Descripción de la actividad	Operario(s)	Observaciones
	05	Desplazamiento por los PAIs en búsqueda de mallas.	Conductor	
	10	Anclaje del sistema	Conductor	
	15	Enganche de malla	Conductor y registrador	
	20	Alce de malla.	Conductor	
	25	Desamarre y descargue de malla.	Conductor y suelta nudos	
	30	Soltar malla.	Conductor y registrador	
	35	Hay mas mallas por descargar en ese acopio? Si: Volver a 15. No: Ir a 40		
	40	Volco esta lleno? Si: Ir a 45. No: Volver a 05		La mayoría de las veces carga 15 mallas
	45	Desplazamiento a PAE.	Conductor	
	50	Posicionamiento	Conductor	
	55	Descargue de Volco	Conductor	
	60	Desenganche de guaya	Suelta nudos	
	65	Posicionamiento para cargue.	Conductor	
	70	Enganche y tensionamiento de guaya.	Conductor y Suelta nudos	
	75	Alce de volcó	Conductor	
	80	Alistamiento	Conductor, suelta nudos y registrador	
	85	Quedan mallas en campo? Si: Ir a 05. No: Ir a 90		Algunas veces quedan mallas en campo.
	90	FIN		

### 5.3 Alce de caja contenedora y transporte a planta de beneficio

1. **Desplazamiento a PAE:** Este desplazamiento se hace cuando se notifica a los conductores dónde recoger una caja contenedora cuando ésta se encuentra llena.

2. **Posicionamiento para descargue:** Cuando se llega al PAE, el camión se tiene que posicionar dando reversa y ubicándose de tal forma que quede fácil para el descargue de la caja contenedora vacía y el alce de la llena.

3. **Descargue de Caja contenedora vacía:** Los camiones llevan cajas contenedoras vacías para descargar en acopios asignados y luego hacer el cargue de uno lleno, por ello el camión acciona el sistema hidráulico para hacer esta operación y ubicarlo en el PAE notificado previamente. (Figura 17).

4. **Desenganche de guaya:** Una vez se descarga la caja contenedora, se desenganchan las guayas que unen el sistema de alce a ella (Figura 18)

5. **Posicionamiento para cargue:** Cuando se llega al acopio, el camión se posiciona en forma tal que quede de espaldas a la caja para efectuar el enganche de ésta.

6. **Enganche y tensionado de guaya:** Es el enganche de la guaya que lleva el sistema a la caja contenedora para que luego tensionada efectúe el alce. Se recoge la información de cosecha en la caja contenedora (Figura 19).



**Figura 17.** Descargue de caja contenedora



**Figura 18.** Desenganche de guaya



**Figura 19.** Tensionado de guaya

7. **Alce de caja contenedora:** Una vez enganchada la caja se acciona el sistema para que inicie el alce de la caja contenedora al camión, y así transportarlo a la planta extractora.

8. **Alistamiento:** El conductor se prepara para iniciar el desplazamiento a la planta.

9. **Desplazamiento a báscula:** Se hace para descargar el fruto contenido en la caja contenedora en la planta extractora para que sea procesado.



**Figura 20.** Pesaje de fruto

10. **Pesaje de fruto:** En báscula se pesa el camión con la caja contenedora cargada con fruto antes de ir a la tolva de la planta (Figura 20).

11. **Desplazamiento a tolva:** Cuando se ha pesado el fruto se desplaza hacia la tolva para descargar el fruto contenido en la caja contenedora.



**Figura 21.** Posicionamiento en tolva

12. **Posicionamiento:** En la tolva el camión se ubica de espaldas a ella, y se abre la compuerta de la caja contenedora para descargar el fruto (Figura 21).

13. **Volqueteo:** Es el descargue de fruto en la tolva, para ello es necesario inclinar con el sistema de alce la caja contenedora y halar el sistema para que caiga todo el fruto (Figura 22).



**Figura 22.** Volqueteo

14. **Alistamiento:** Se ubica la caja contenedora en posición horizontal y el camión para desplazarse a báscula.

15. **Desplazamiento a Báscula**

16. **Pesaje de caja contenedora vacía:** Es necesario pesar el camión con la caja contenedora vacía para saber exactamente cuánto fruto venía contenido en éste.

**Tabla 5.** Diagrama de operaciones del transporte de fruto en Unipalma S.A.

Diagrama de operación	Número de actividad	Descripción de la actividad	Operario(s)	Observaciones
	05	Desplazamiento a acopio asignado	Conductor	Previamente se le ha indicado a dónde dirigirse.
	10	Posicionamiento para descargue de volco vacío.	Conductor	
	15	Descargue de volco vacío.	Conductor	
	20	Desenganche de guaya	Conductor	
	25	Posicionamiento para cargue de volco con fruto.	Conductor	Normalmente se hace en el mismo acopio donde descargo antes.
	30	Enganche de volco y tensionamiento de guaya.	Conductor	En esta operación recoge la información sobre el fruto contenido en el volco.
	35	Alce de volco.	Conductor	
	40	Alistamiento	Conductor	
	45	Desplazamiento a Báscula	Conductor	
	50	Pesaje de volco cargado.	Conductor	Algunas veces espera mientras pesan otro camión.
	55	Desplazamiento a Tolva.	Conductor	
	60	Posicionamiento en tolva.	Conductor	
	65	Volqueteo	Conductor	
	70	Alistamiento	Conductor	
	75	Desplazamiento a Báscula.	Conductor	
	80	Pesaje de volco vacío	Conductor	

Cabe destacar, que de acuerdo con reuniones realizadas con el personal técnico de Unipalma, el cuello de botella del proceso se presenta en el alce de fruto, razón por la cual en este trabajo se encaminaron los esfuerzos para encontrar, a través de la asignación de puntos de acopio internos (PAI), la manera de agilizar el sistema y disminuir sus costos de operación, evitando afectar el

rendimiento de los operarios de cosecha. Lo anterior, porque los recorridos extensos de los cosecheros para depositar el fruto en acopios internos disminuye su rendimiento y por ende se incrementa el requerimiento de mano de obra; de otra parte, un mayor número de paradas del sistema de alce disminuye su rendimiento.

## 6. Planteamiento del modelo.

### 6.1 Planteamiento del problema y supuestos

El modelo que se presenta a continuación integra la disposición de mallas por parte de los cosecheros en los PAIs, la recolección de éstas y su transporte hacia un PAE. Este modelo fue construido bajo los siguientes supuestos:

- Los operarios de cosecha recorren los lotes en forma de “O”: ingresan por una calle de cosecha y regresan por la inmediatamente siguiente.
- El orden de las rutas de recolección de RFF en los lotes son definidos con anterioridad para el vehículo de alce.
- Se garantiza que el vehículo de alce ingresa a los lotes que han sido cosechados con anterioridad.

#### **CONJUNTOS:**

*S*: Conjunto de lotes

*U*: Conjunto de recorridos de cosecha

*A*: Conjunto de nodos (acopios)

#### **ÍNDICES:**

*s*: Índice de lote  $\{1, 2, \dots, L\}$

*u*: Índice de recorridos de cosecha  $\{1, 2, \dots, R\}$

*i, j*: Índice de localización del punto de acopio interno  $\{1, 2, \dots, N\}$

#### **PARÁMETROS:**

*BperN*: Racimos por malla

*CdesP<sub>ui</sub>*: Costo de penalización por el desplazamiento del cosechero desde el *u*-ésimo recorrido hasta el *i*-ésimo acopio [\$/desplazamiento]

*Cextra*: Costo por tiempo extra de trabajo del equipo de alce de fruto (sistema de alce) [\$/h]

*DC<sup>s</sup>*: Densidad de cosecha asociada al lote *s* (número de RFF cosechados/número de palmas recorridas).

*DEM*: Tiempo de demora de aceleración y frenado por recorrido asociado al número de acopios que se habiliten [h].

*K*: Capacidad de almacenamiento de los puntos de acopio.

*JT*: Tiempo máximo de operación establecido para el sistema de alce [h]

*M*: Número muy grande

*NMC*: Número de mallas que puede cargar una caja contenedora

*NP*: Número de palmas por lote

*NR*: Número de recorridos por lote

$P_u^s$ : RFF producidos y recogidos en el  $u$ -ésimo recorrido de cosecha del  $s$ -ésimo lote (expresado en mallas) (número real)

$TAC$ : Tiempo de alistamiento del camión pluma (sistema de alce) para el cargue de mallas en un punto de acopio interno [ $h$ ]

$TAD$ : Tiempo de alistamiento del camión pluma (sistema de alce) para desplazamiento [ $h$ ]

$TCargM$ : Tiempo requerido para el cargue de una malla al camión pluma [ $h$ ]

$TdescC$ : Tiempo requerido para que el camión pluma (sistema de alce) descargue de una caja contenedora, una vez completa su contenido [ $h$ ]

$TFC$ : Tiempo fijo de recorrido de camión por lote ( $h$ ).

$W_{perN}$ : Peso medio de malla

$\overline{X}^s$ : Número máximo de puntos de acopio internos que se pueden localizar en  $s$ -ésimo lote.

$\underline{X}^s$ : Número mínimo de puntos de acopio internos que se pueden localizar en el  $s$ -ésimo lote.

## VARIABLES

### Tipo 1. Binarias:

$$x_i^s = \left\{ \begin{array}{l} 1 : \text{si el } i\text{-ésimo acopio del } s\text{-ésimo lote se habilita} \\ 0 : \text{en caso contrario} \end{array} \right\}$$

Variable binaria que indica la apertura del  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote.

$$y_i^s = \left\{ \begin{array}{l} 1 : \text{si } dae_s^i - 1 \geq 2 \\ 0 : \text{en caso contrario} \end{array} \right\}$$

Variable binaria que indica si del  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote se despacha más de una caja.

$$q = \left\{ \begin{array}{l} 1 : \text{si } top \geq JT \\ 0 : \text{en caso contrario} \end{array} \right\}$$

Variable binaria que indica si el tiempo de operación es superior a la jornada de trabajo.

### Tipo 2. Enteras:

$a_i^s$ : Número de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote

$d_u^s$ : Cantidad de mallas almacenadas en los acopios que provienen del  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote.

$dae_i^s$ : Número de cajas contenedoras que se despachan desde el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote

$$pa_i^s = \left\{ \begin{array}{l} dae_i^s - 1 : \text{si } dae_i^s > 1 \\ 0 : \text{en caso contrario} \end{array} \right\}$$

Número de veces adicionales que el camión-pluma (sistema de alce) debe regresar al  $i$ -ésimo acopio para continuar con el alce de mallas, luego de despachar la primera caja contenedora de ese acopio.

$t_i^s$  : Cantidad de mallas disponibles para ser despachadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote (número de mallas almacenadas en  $i$ , más las mallas transportadas por el camión de alce desde el acopio inmediatamente anterior).

$y_{ui}^s$  : Número de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote, provenientes del  $u$ -ésimo recorrido.

$w_i^s$  : Cantidad de mallas que serán transportadas por el camión pluma (sistema de alce) desde el  $i$ -ésimo acopio al siguiente del  $s$ -ésimo lote.

### Tipo 3. No Enteras:

$e_u^s$  : Sobrante luego del almacenamiento, en los acopios internos, de las mallas provenientes del  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote (expresado en mallas) (número real).

$m_u^s$  : Cantidad de RFF recogidos al terminar el  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote (se expresa en número de mallas) (número real).

$te$ : tiempo adicional a la jornada de trabajo que se requiere para recoger todo el fruto disponible en los lotes de cosecha.

$top$ : tiempo de operación en horas del equipo de alce de fruto en una jornada de trabajo (número real).

## MODELO MATEMÁTICO

**Función Objetivo:** Minimizar Z

$$Z = te * Cextra + \sum_{s=1}^L \sum_{i=1}^N \sum_{u=1}^R y_{ui}^s * CdesP_{ui}$$

**Sujeto a:**

$$t_i^s = a_i^s + w_{i-1}^s \quad \forall s > 1 \in S, i > 1 \in A \quad (1R1)$$

$$t_{i=1}^{s=1} = a_{i=1}^{s=1} \quad (1R2)$$

$$t_{i=1}^s = a_{i=1}^s + w_{i=N}^{s-1} \quad \forall s > 1 \in S, \quad (1R3)$$

$$a_i^s \leq Kx_i^s \quad \forall s \in S, i \in A \quad (2R1)$$

$$a_i^s \geq x_i^s \quad \forall s \in S, i \in A \quad (2R2)$$

$$\underline{X}^s \leq \sum_{i=1}^N x_i^s \leq \bar{X}^s \quad \forall s \in S \quad (3)$$

$$m_u^s = p_u^s + e_{u-1}^s \quad \forall s \in S, u \in U \quad (4)$$

$$e_u^s = m_u^s - d_u^s \quad \forall s \in S, u \in U \quad (5)$$

$$e_u^s < 1 \quad \forall s \in S, \forall u \in U \quad (6)$$

$$a_i^s = \sum_{u=1}^R y_{ui}^s \quad \forall s \in S, i \in A \quad (7)$$



$$d_u^s = \sum_{i=1}^N y_{ui}^s \quad \forall s \in S, u \in U \quad (8)$$

$$w_i^s = t_i^s - NMC * dae_i^s \quad \forall s \in S, i \in A \quad (9)$$

$$w_i^s < NMC \quad \forall s \in S, i \in A \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N (dae_i^s * NMC) + w_{i=N}^s = \sum_{u=1}^R d_u^s \quad \forall s = 1 \in S \quad (11R1)$$

$$\sum_{i=1}^N (dae_i^s * NMC) + w_{i=N}^s = \sum_{u=1}^R d_u^s + w_{i=N}^{s-1} \quad \forall s > 1 \in S \quad (11R2)$$

$$top = \sum_{s=1}^L \left[ TFC + \sum_{i=1}^N (x_i^s * DEM) + \sum_{i=1}^N (x_i^s + pa_i^s) * (TAC + TAD) + \sum_{i=1}^N a_i^s * TC \arg M + \sum_{i=1}^N dae_i^s * TDescC \right] \quad (12)$$

$$top \leq JT + M * q \quad (13)$$

$$te \geq (q - 1) * M + top - JT \quad (14)$$

$$dae_i^s \leq 1 + y_i^s * M \quad (15)$$

$$pa_i^s \geq (y_i^s - 1) * M + dae_i^s - 1 \quad (16)$$

### Restricciones de no negatividad

$$a_i^s, d_u^s, dae_i^s, pa_i^s, y_{ui}^s, w_i^s, e_u^s, m_u^s, t_i^s, te, top, q \geq 0$$

### Definición de variables

$$a_i^s, d_u^s, dae_i^s, pa_i^s, t_i^s, y_{ui}^s, w_i^s \in \mathbb{Z}$$

$$e_u^s, m_u^s, te, top \in \mathbb{R}$$

## DESCRIPCIÓN DE LAS RESTRICCIONES

### Restricciones estructurales

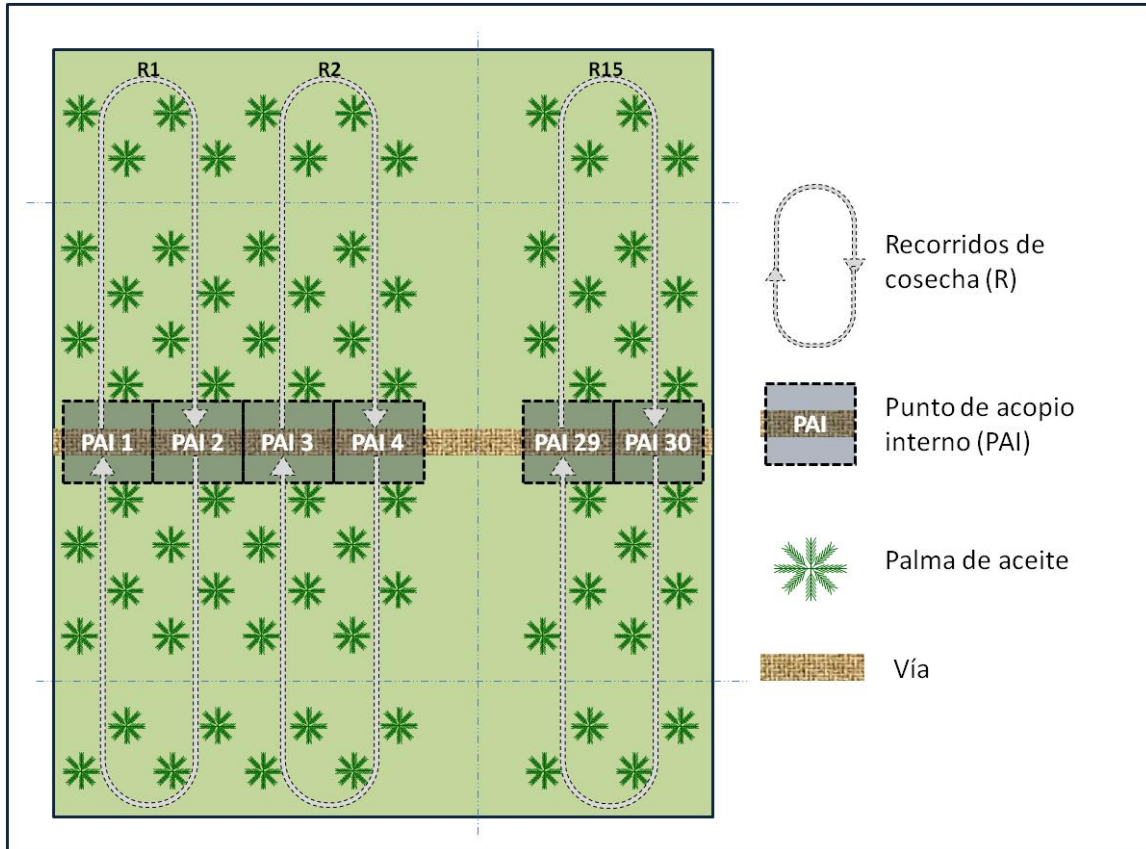
- **1R1.** Balance de masa: el número de mallas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote, que determinan si se puede completar la capacidad del vehículo para que pueda descargar la(s) caja(s) contenedora(s) en un acopio externo, es igual al número de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote más el número de mallas provenientes del acopio inmediatamente anterior del mismo lote.

- **1R2.** Balance de masa para inicio de lote, para el caso en que el sistema de alce inicie la operación en un nuevo lote, el número de mallas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote, que determinan si se puede completar la capacidad del vehículo para que pueda descargar la(s) caja(s) contenedora(s) en un acopio externo, es igual al número de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote más el número de mallas provenientes del acopio inmediatamente anterior del mismo lote.
- **2R1.** La cantidad de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote será menor o igual a la capacidad de almacenamiento de los acopios.
- **2R2.** Para que el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote pueda almacenar mallas este debe estar abierto..
- **3.** El número de acopios a habilitar estará dentro de los límites de un número de acopios mínimo y máximo permitidos.
- **4.** El número de mallas cosechadas al finalizar el  $u$ -ésimo recorrido será igual a la producción de RFF (expresada en mallas) de dicho recorrido más el sobrante de mallas proveniente del recorrido anterior.
- **5.** Así, el sobrante (número real) del  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote es igual al número de mallas cosechadas al finalizar dicho recorrido menos la cantidad de mallas almacenadas en algún acopio provenientes del  $u$ -ésimo recorrido (expresado en mallas).
- **6.** El sobrante del  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote debe ser inferior a una malla
- **7.** Balance de masa de acopio, la cantidad de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote es igual a la sumatoria de todas las mallas provenientes de todos los recorridos del  $s$ -ésimo lote para dicho acopio, si éste es habilitado.
- **8.** Balance de masa de recorrido, el número de mallas aprovisionadas por el  $u$ -ésimo recorrido es igual a la sumatoria de todas las mallas enviadas a todos los acopios del  $s$ -ésimo lote desde dicho recorrido.
- **9.** La cantidad de mallas a transportar desde el  $i$ -ésimo acopio al siguiente es igual al sobrante después de despachar a los acopios externos las cajas completadas con capacidad  $NMC$ .
- **10.** La cantidad de mallas que se transporten desde el  $i$ -ésimo acopio al siguiente deberá ser menor a la capacidad de carga  $NMC$
- **11R1.** Balance de masa que relaciona las mallas aprovisionadas desde todos los recorridos de un lote y la cantidad de mallas recogidas por el camión pluma (sistema de alce) (variación para el primer lote que se recoge en un día). La cantidad de mallas aprovisionadas por todos los recorridos del  $s$ -ésimo lote debe ser igual al total de mallas descargadas en los acopios externos (llevadas a éstos en las cajas contenedoras) más el número de mallas cargadas en el sistema de alce al ubicarse en el último acopio de dicho lote.
- **11R2.** Balance de masa que relaciona las mallas aprovisionadas desde todos los recorridos de un lote y la cantidad de mallas recogidas por el camión pluma (sistema de alce). La cantidad de mallas aprovisionadas por todos los recorridos del  $s$ -ésimo lote sumadas a al número de mallas cargadas en el último acopio del lote inmediatamente anterior, debe ser igual al total de mallas descargadas en los acopios externos (llevadas a éstos en las cajas contenedoras) más el número de mallas cargadas en el sistema de alce al ubicarse en el último acopio de dicho lote.
- El tiempo de operación del equipo de alce es igual a la suma del tiempo fijo de recorrido de todos los lotes más el tiempo extra por apertura de puntos de acopio más el tiempo de cargue de todas las mallas más el tiempo de despacho de todas las cajas contenedoras.
- **13 y 14.** Indica que el tiempo extra de operación es igual a cero cuando la jornada de trabajo es mayor que el tiempo de operación del equipo de alce.

- **15 y 16.** Indica que el número de veces que debe regresar el camión pluma a un mismo punto de acopio después de haber despachado una caja contendedora.

## Procedimiento de estimación de los parámetros

**Figura 23.** Esquema de evacuación de RFF desde el lote hacia los puntos de acopio interno (PAI)



Fuente: Elaboración propia

### ***B<sub>perN</sub>*: Racimos por malla**

Debido a que el peso medio de racimos de Unipalma es de 25kg, se requieren 36 racimos para completar una malla de 900kg.

### ***DC<sup>s</sup>*: Densidad de cosecha asociada al lote s (número de RFF cosechados/número de palmas recorridas)**

La densidad de cosecha es un índice que relaciona los RFF cosechados del lote con la cantidad de palmas del mismo. Este se calcula sacando el cociente del total de racimos cosechados entre el número de palmas del lote. En esta aproximación se considera como parámetro de entrada.

### ***JT*: Tiempo máximo de operación establecido para el sistema de alce [h]**

El tiempo máximo de operación propuesto es de 8 horas efectivas de trabajo.

### ***K*: Capacidad de almacenamiento de los puntos de acopio**

Debido a que no existe infraestructura que imponga barreras físicas a los puntos de acopio interno, no existe un referente para poder establecer la capacidad de los mismos. A pesar de ello, en este

ejercicio se propone una aproximación utilizando las dimensiones del brazo hidráulico del equipo de alce de fruto, de las mallas en las que se recoge el fruto y del área que idealmente ocupa un acopio interno.

La longitud que tiene un PAI sobre la vía es de 15,6 m, debido a que el espacio requerido por un cosechero para depositar una malla es de 2 metros, se pueden acopiar 8 mallas a cada lado de la vía, por lo que cada acopio interno tiene una capacidad de almacenamiento de 16 mallas.

***NMC*: Número de mallas que puede cargar una caja contenedora**

El número promedio de mallas que se cargan en una caja contenedora en Unipalma es de 15

***NP*: Número de palmas por lote**

Dado que los lotes tienen un área sembrada de 20 ha y que la densidad de siembra es de 143 palmas/ha, existen 2.860 palmas por lote.

***NR*: Número de recorridos por lote**

Debido a que cada recorrido ocupa dos calles de cosecha (4 líneas de palmas) a cada lado de la vía, se tienen 192 palmas por recorrido y 15 recorridos de cosecha por lote.

***WperN*: Peso medio de malla**

El peso medio de la malla identificado fue de 900kg.

**$\overline{X^s}$  : Número máximo de puntos de acopio internos que se pueden localizar en *s*-ésimo lote**

El número máximo de puntos de acopio responde a las dimensiones del lote. Con base en la información reportada por Unipalma, los lotes (fincas) tienen un área rectangular de 20 hectáreas y son atravesados por una vía terciaria de tal manera que a cada lado de la vía existen 10 hectáreas.

En esta aproximación se propone un PAI por cada calle de cosecha que representa la entrada o la salida de un recorrido de cosecha. Si se considera que, dado el diseño de los lotes de Unipalma el número máximo de calles de cosecha y por tanto de PAIs es de 30.

**$\underline{X^s}$  : Número mínimo de puntos de acopio internos que se pueden localizar en el *s*-ésimo lote**

El número mínimo de puntos de acopio que se pueden localizar es uno, considerando que del lote se obtendrá alguna producción.

**Parámetros estimados a partir de registros de tiempos con cronómetro**

Los parámetros que se mencionan a continuación fueron estimados a partir de registro de tiempos con cronómetro en campo:

- *TAC*: Tiempo de alistamiento del camión pluma (sistema de alce) para el cargue de mallas en un punto de acopio interno [s]
- *TAD*: Tiempo de alistamiento del camión pluma (sistema de alce) para desplazamiento [s]

- *TCargM*: Tiempo requerido para el cargue de una malla al camión pluma [s]
- *TdescC*: Tiempo requerido para que el camión pluma (sistema de alce) descargue de una caja contenedora, una vez completa su contenido[s]

La siguiente tabla sintetiza el tratamiento que se le dio a los registros, que incluye básicamente la eliminación de elementos extraños y un análisis de estadística descriptiva, que permitió construir intervalos de confianza al 99%.

**Tabla 6.** Definición de los parámetros *TAC*, *TAD* y *TCargM*

Parámetro	Muestra	Media	Procedimiento	Intervalo de confianza	Submuestra	Valor
<i>TAC</i>	42	18,6	Se eliminó de la muestra los registros correspondientes con la "Cuadrilla B" y aquellos en jornada "Nocturna", se aplicó intervalo de confianza y obtuvo nueva media a partir de la submuestra.	99%	35	17
<i>TAD</i>	51	24,0	Se eliminó de la muestra los registros correspondientes con la "Cuadrilla B" y aquellos en jornada "Nocturna", se aplicó intervalo de confianza y obtuvo nueva media a partir de la submuestra.	99%	36	20
<i>TCargM</i>	156 162 145	29,3 28,1 64,8	Se tomó las muestras de "Enganche y desenganche de malla", "Alce de malla" y "Descargue de malla" correspondientemente, se realizó el mismo procedimiento que para los dos parámetros anteriores para el caso de "Alce de malla" dado a que el sistema es menos tecnológico para la "Cuadrilla B", y para los otros dos, se obtuvo el promedio de la muestra, así, se sumó y se obtuvo el valor del parámetro	- 99% -	156 109 145	118

Fuente: Sepúlveda, 2010.

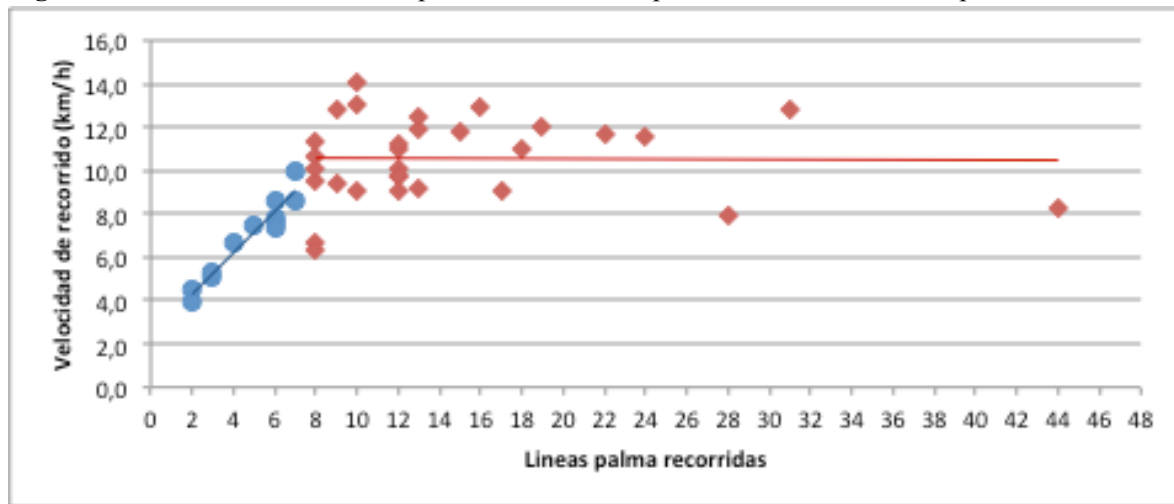
## Parámetros estimados a partir del registro de recorridos con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (Sepúlveda, 2010)

**$T_{DespA_{ij}}$ : Tiempo requerido para que el camión pluma (sistema de alce) se desplace entre el  $i$ -ésimo y  $j$ -ésimo acopio**

El tiempo de desplazamiento entre el acopio “ $i$ ” y el acopio “ $j$ ” cuantifica los tiempos en desplazamiento inter-acopios, que considera las velocidades medias de desplazamiento que alcanza el vehículo de acuerdo a las distancias de recorrido.

Para definirlo, se usaron los registros obtenidos mediante geo-referenciación, calculando las distancias entre distintos puntos y los tiempos asociados al recorrido del vehículo de alce entre ellos. La relación entre ellos permitió hallar velocidades medias para el desplazamiento del camión-pluma, cuyos valores ilustran el siguiente comportamiento:

**Figura 24.** Velocidad media de desplazamiento con respecto al número de líneas palma recorridas



De acuerdo con la **Figura 24**, se puede observar que la velocidad de recorrido del camión tiene dos comportamientos, uno creciente que sucede en el intervalo de dos a siete líneas palma<sup>2</sup> y otro estable, que sucede cuando el camión avanza más de siete líneas palma. Para facilitar la estimación de los parámetros, y con base en la información suministrada por la figura tal, se decidió estimar dos velocidades, promediando las velocidades registradas para cada uno de los intervalos identificados.

Con base en las velocidades calculadas y la distancia entre dos puntos de acopio internos, se procedió a construir la siguiente tabla, en la que se presenta el valor esperado del tiempo de desplazamiento del camión pluma entre un punto de acopio “ $i$ ” y otro “ $j$ ”:

<sup>2</sup> Una línea de palmas es la conformación lineal de palmas que se extiende desde el borde de la carretera hacia adentro del lote.

**Tabla 7.** Tiempo de desplazamiento del camión-pluma de un acopio a otro (en segundos)

a/b	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123	128	134	139	144	149	154	159
2	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123	128	134	139	144	149	154
3	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123	128	134	139	144	149
4	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123	128	134	139	144
5	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123	128	134	139
6	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123	128	134
7	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123	128
8	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118	123
9	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113	118
10	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108	113
11	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103	108
12	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97	103
13	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92	97
14	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87	92
15	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82	87
16	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77	82
17	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71	77
18	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66	71
19	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61	66
20	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56	61
21	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51	56
22	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46	51
23	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40	46
24	200	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35	40
25	208	200	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30	35
26	217	208	200	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25	30
27	225	217	208	200	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17	25
28	233	225	217	208	200	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8	17
29	241	233	225	217	208	200	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0	8
30	249	241	233	225	217	208	200	192	184	176	168	160	151	143	135	127	119	111	103	94	86	78	70	62	54	46	37	25	12	0

En cuanto a los desplazamientos en reversa el tiempo de desplazamiento aumenta, lo que hace más conveniente reocurrir los trayectos en una dirección.

**TFC: Tiempo fijo de recorrido de camión por lote (h).**

Resulta de calcular el tiempo de viaje a partir de la longitud del lote y la función de velocidad del vehículo (0,0443 horas).

**DEM: Tiempo de demora de aceleración y frenado por recorrido asociado al número de acopios que se abran [h].**

Resulta del promedio de las diferencias encontradas en el tiempo de desplazamiento del vehículo al atravesar el lote con y sin paradas.

**Parámetros de tipo económico**

**CdesPui: Costo de penalización por el desplazamiento del cosechero desde el u-ésimo recorrido hasta el i-ésimo acopio [\$/s]**

El costo de penalización por desplazamiento del cosechero busca medir la pérdida económica en la que incurre la empresa por la pérdida de productividad del trabajador al realizar los desplazamientos hacia los PAIs para descargar las mallas con RFF.

Para calcularlo, a partir de registros de tiempo con cronómetro, se estimó el tiempo que demanda al cosechero desplazarse de un recorrido de cosecha  $u$  a un punto de acopio interno  $i$ . Con base en este y teniendo en cuenta que el costo de un puesto de trabajo de un cosechero en una jornada para



Unipalma es de \$13.038/día<sup>3</sup>, se extrapoló el costo de la jornada de acuerdo con el tiempo demandado por los desplazamientos, los valores calculados se presentan a continuación:

**Tabla 8.** Costo de penalización del cosechero por desplazarse desde un recorrido a un punto de acopio.

u/a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3	188,9	201,5	214,1	226,7	239,3	251,9	264,5	277,1	289,7	302,3	314,9	327,5	340,1	352,7
2	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3	188,9	201,5	214,1	226,7	239,3	251,9	264,5	277,1	289,7	302,3	314,9	327,5
3	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3	188,9	201,5	214,1	226,7	239,3	251,9	264,5	277,1	289,7	302,3
4	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3	188,9	201,5	214,1	226,7	239,3	251,9	264,5	277,1
5	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3	188,9	201,5	214,1	226,7	239,3	251,9
6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3	188,9	201,5	214,1	226,7
7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3	188,9	201,5
8	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1	163,7	176,3
9	201,5	188,9	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0	138,6	151,1
10	226,7	214,1	201,5	188,9	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8	113,4	126,0
11	251,9	239,3	226,7	214,1	201,5	188,9	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6	88,2	100,8
12	277,1	264,5	251,9	239,3	226,7	214,1	201,5	188,9	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4	63,0	75,6
13	302,3	289,7	277,1	264,5	251,9	239,3	226,7	214,1	201,5	188,9	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2	37,8	50,4
14	327,5	314,9	302,3	289,7	277,1	264,5	251,9	239,3	226,7	214,1	201,5	188,9	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0	12,6	25,2
15	352,7	340,1	327,5	314,9	302,3	289,7	277,1	264,5	251,9	239,3	226,7	214,1	201,5	188,9	176,3	163,7	151,1	138,6	126,0	113,4	100,8	88,2	75,6	63,0	50,4	37,8	25,2	12,6	0,0	0,0

**Cextra: Costo por tiempo extra de trabajo del camión pluma (sistema de alce) [\$/h]**

El costo por tiempo extra de trabajo del equipo de alce de fruto totaliza los costos asociados a una hora de operación del equipo de alce, pero no incluye el costo pagado al contratista (que se paga por tonelada de RFF alzada).

Para calcularlo se identificó la herramienta y maquinaria utilizadas en el alce de fruto, se indago sobre su valor comercial y vida útil, los costos de mantenimiento preventivo y correctivo de las mismas y los costos operativos. Se sumaron los costos y se llevaron a una hora de trabajo, tomando como base un tiempo diario de operación de 16 horas. Lo anterior arrojó que una hora de trabajo del equipo de alce le cuesta a Unipalma \$24.631.

**6.2 Resultados arrojados por el modelo**

El modelo propuesto arroja el número de acopios a habilitar en cada lote de acuerdo con la producción que se introduzca como parámetro de entrada para una jornada de trabajo. De la razón entre el número de mallas cosechadas en cada lote y el número de acopios abiertos resulta el número mínimo de mallas a que se deben agrupar para minimizar la función objetivo.

Con el modelo se plantearon varios escenarios en los que se proponen diferentes densidades de cosecha (número de racimos cosechados/número de palmas del lote en cosecha). Inicialmente, se indujo al modelo que se resolviera con una producción baja, esto es una densidad de cosecha de

<sup>3</sup>Es de resaltar que este costo no representa el valor pagado por tonelada de RFF al personal de cosecha. Para calcularlo se identificaron las herramientas utilizadas en la cosecha, se indago sobre su valor comercial y vida útil, los costos de mantenimiento preventivo y correctivo de las mismas, los gastos operativos; así como por los costos administrativos adicionales por la contratación de un operario.

0,10 generalizada para todos los lotes de cosecha y se plantearon siete escenarios en los que la densidad de cosecha aumentaba en 0,10 hasta llegar a 0,80.

En los resultados arrojados por el modelo, se consideró la moda del número mínimo de mallas a agrupar en cada acopio habilitado. Para los escenarios planteados de densidades de cosecha de 0,10 y 0,20 el modelo arrojó que se puede acopiar mínimo una malla en cada PAI habilitado. Sin embargo, cuando esta aumenta a 0,30, el modelo sugiere que se deben acopiar mínimo ocho mallas por cada PAI habilitado.

Estos resultados responden al planteamiento de la función objetivo y de las restricciones. Se debe recordar que la función objetivo integra el costo de penalización del cosechero por desplazamientos desde la calle de cosecha donde se encuentre hasta el PAI habilitado más próximo y el costo de las horas extras que se generen para el equipo de alce (vehículo de transporte de fruto interno) partiendo de una jornada de trabajo establecida. De esta manera, el modelo favorece la acomodación de las mallas a la entrada o salida de las calles de cosecha en las que fueron conseguidas mientras que el vehículo de transporte interno no exceda su jornada de trabajo (esto sucede con bajas producciones), pero cuando la cantidad de fruto aumenta y el vehículo de alce se ve obligado a extender su jornada para recoger todo el fruto disponible en campo, el modelo favorece a que se acopien varias mallas en un mismo PAI con el objetivo que el vehículo de alce pueda recoger toda la cosecha.

Debido al salto en el número mínimo de mallas de las densidades de cosecha de 0,20 y 0,30, se plantearon escenarios intermedios para registrar hasta qué densidad de cosecha los cosecheros pueden acopiar una sola malla. Este escenario correspondió a una densidad de cosecha del 0,26.

**Tabla 9.** Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,10; 0,20; 0,25)

Lote	Densidad de fruto 0,10			Densidad de fruto 0,20			Densidad de fruto 0,25		
	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN
1	7	7	1	15	16	1	15	19	1
2	7	7	1	15	16	1	15	19	1
3	7	7	1	15	16	1	15	19	1
4	7	7	1	15	16	1	15	19	1
5	7	7	1	15	16	1	15	19	1
6	7	7	1	15	16	1	15	19	1
7	7	7	1	15	16	1	15	19	1
Mallas cosechadas	49			112			133		
Producción recogida (kg RFF/día)	44.100			100.800			119.700		
Tiempo de operación (horas /día)	3,1			6,7			7,6		

AR: Acopios abiertos por lote; MR: Mallas recogidas por lote; MMIN: Número mínimo de mallas requeridos por acopio habilitado.

**Tabla 10.** Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,26; 0,28; 0,29)

Lote	Densidad de fruto 26%			Densidad de fruto 28%			Densidad de fruto 29%		
	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN
1	15	20	1	7	22	3	4	23	6
2	15	20	1	7	22	3	4	23	6
3	15	20	1	8	22	3	4	23	6
4	15	20	1	6	22	4	5	23	5
5	15	20	1	8	22	3	4	23	6
6	15	20	1	6	22	4	4	23	6
7	15	20	1	8	22	3	4	23	6
Mallas cosechadas	140			154			161		
Producción recogida (kg RFF/día)	126.000			138.600			144.900		
Tiempo de operación (horas /día)	7,6			8,0			8,0		

AR: Acopios abiertos por lote; MR: Mallas recogidas por lote; MMIN: Número mínimo de mallas requeridos por acopio habilitado.

**Tabla 11.** Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,30; 0,40; 0,50)

Lote	Densidad de fruto 30%			Densidad de fruto 40%			Densidad de fruto 50%		
	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN
1	3	24	8	3	31	10	4	40	10
2	3	24	8	9	31	3	4	40	10
3	3	24	8	3	31	10	6	40	7
4	3	24	8	3	31	10	4	40	10
5	3	24	8	3	31	10	5	40	8
6	3	24	8	3	31	10	4	40	10
7	3	24	8	3	31	10	4	40	10
Mallas cosechadas	168			217			280		
Producción recogida (kg RFF/día)	151.200			195.300			252.000		
Tiempo de operación (horas /día)	8,4			10,7			13,6		

AR: Acopios abiertos por lote; MR: Mallas recogidas por lote; MMIN: Número mínimo de mallas requeridos por acopio habilitado.

**Tabla 12.** Asignación de acopios según densidad de cosecha (DC: 0,60; 0,70; 0,80)

Lote	Densidad de fruto 60%			Densidad de fruto 70%			Densidad de fruto 80%		
	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN	AA	MR	MMIN
1	4	48	12	4	55	14	5	64	13
2	4	48	12	4	55	14	5	64	13
3	5	48	10	5	55	11	5	64	13
4	7	48	7	4	55	14	5	64	13
5	5	48	10	4	55	14	5	64	13
6	6	48	8	4	55	14	6	64	11
7	4	48	12	5	55	11	5	64	13
Mallas cosechadas	336			385			448		
Producción recogida (kg RFF/día)	302.400			346.500			403.200		
Tiempo de operación (horas /día)	16,4			18,5			21,5		

AR: Acopios abiertos por lote; MR: Mallas recogidas por lote; MMIN: Número mínimo de mallas requeridos por acopio habilitado.

## **7. Variabilidad de la producción en la asignación de acopios**

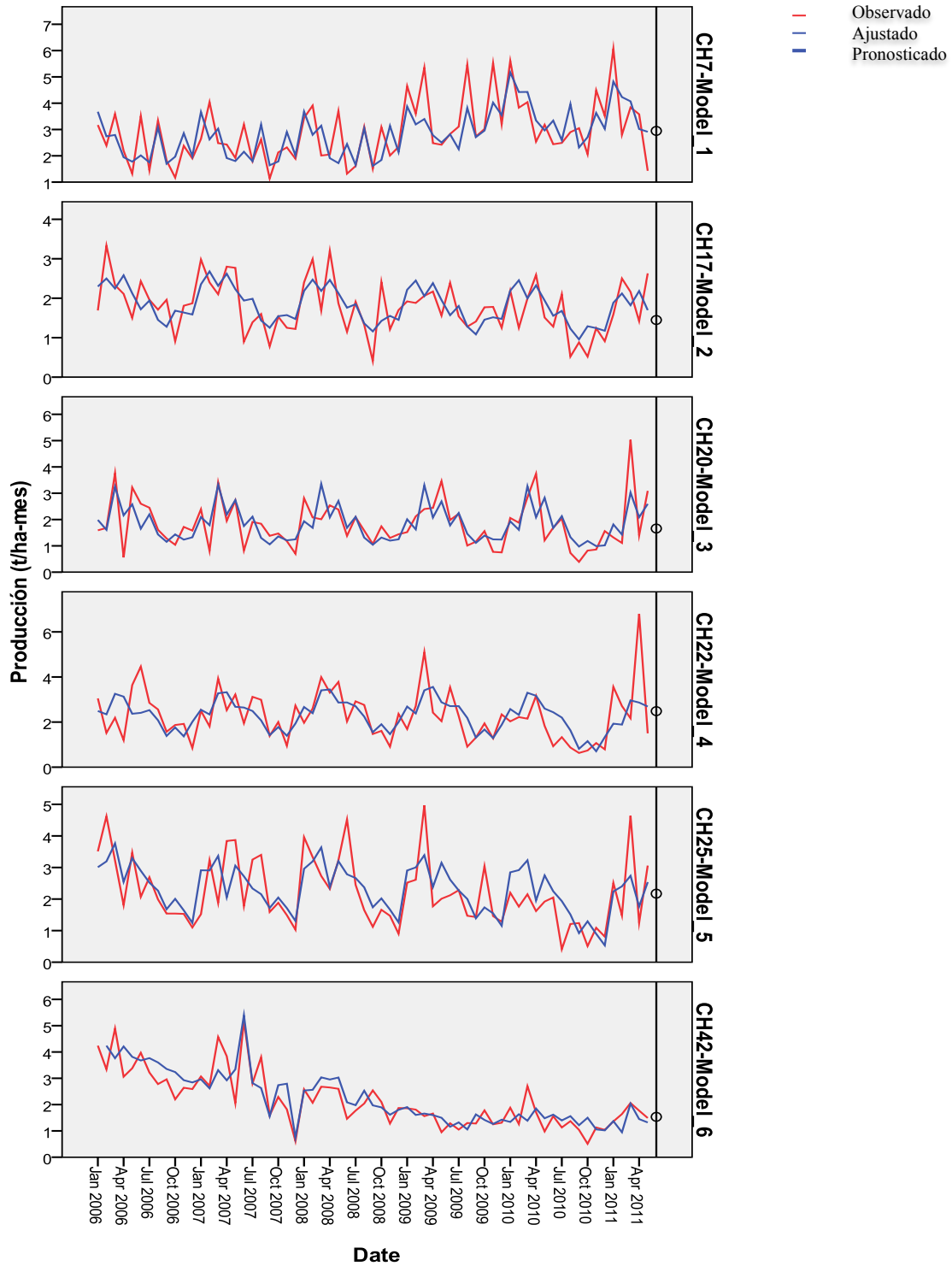
### **7.1 Pronósticos a partir de series de tiempo de la producción**

La producción de racimos de los lotes de palma de aceite varía mensualmente. Usualmente en el primer semestre del año se consigue cerca del 60% de la producción de todo el año, mostrando un efecto de estacionalidad. Para que los resultados arrojados por el modelo sean útiles se requiere predecir la cantidad de fruto que se producirá en el mes y de acuerdo con ello, aplicar la regla de decisión sobre la cantidad de acopios que deben ser habilitados en cada lote.

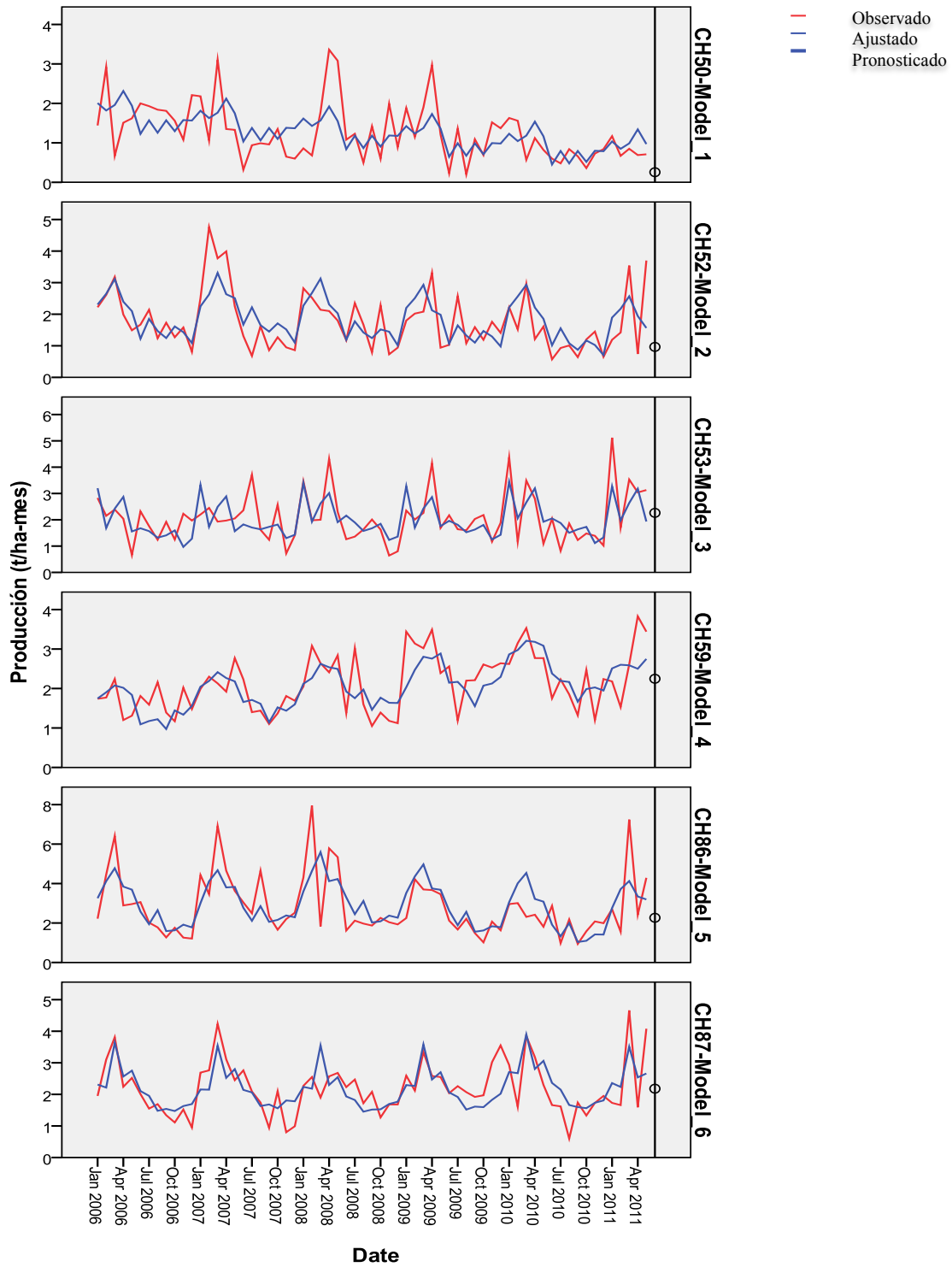
A continuación se presenta la serie de tiempo de la producción mensual de RFF (expresada en toneladas por hectárea) de varios lotes de Unipalma (en línea roja). Uno de los criterios para la escogencia de esos lotes fue que existieran registros ininterrumpidos de la producción, ya que cada serie está conformada por 65 observaciones que inician en enero de 2006 y terminan en mayo de 2011. Esta información fue utilizada para generar un modelo de predicción (línea azul) que pronostica la producción de RFF del mes de interés, en este caso, se generó el pronóstico para el mes de junio de 2011 para cada uno de los lotes.

Vale la pena aclarar que los modelos de pronósticos que aquí se presentan no hacen parte de los objetivos de este trabajo, sin embargo se realizaron para explorar los patrones que sigue la producción de los lotes en la plantación de palma de aceite. Otras metodologías para predecir el comportamiento de la producción como lo son los censos de producción trimestrales o semestrales, la marcación previa de palmas con racimos maduros y el censo previo a la cosecha, entre otros, también tienen cabida.

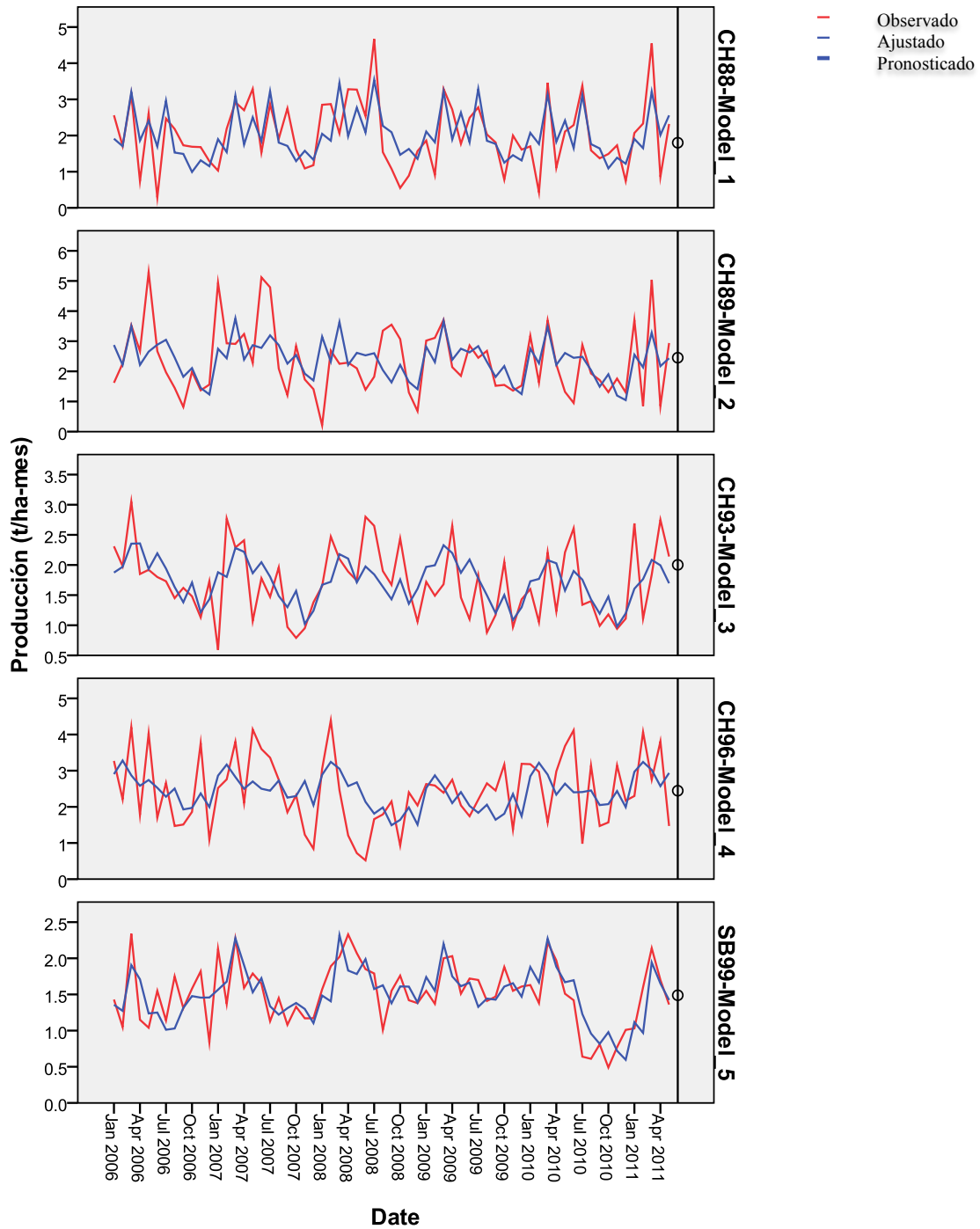
**Figura 25.** Serie de tiempos de la Producción de RFF y valores ajustados por modelo de pronóstico de los lotes CH7, CH17, CH20, CH22, CH25, CH42



**Figura 26.** Serie de tiempos de la Producción de RFF y valores ajustados por modelo de pronóstico de los lotes CH50, CH52, CH53, CH59, CH86, CH87



**Figura 27.** Serie de tiempos de la Producción de RFF y valores ajustados por modelo de pronóstico de los lotes CH88, CH89, CH93, CH96, SB99





Los modelos fueron construidos con el paquete estadístico SPSS V17. Estos difieren en cuanto a sus componentes de tendencia y estacional, a continuación se presentan los modelos ajustados a cada serie de tiempos:

**Tabla 13.** Descripción de los modelos de pronóstico de producción

Descripción del modelo			Tipo de modelo
Modelo ID	CH7	Model_1	Estacional Simple
	CH17	Model_2	Estacional Simple
	CH20	Model_3	Estacional Simple
	CH22	Model_4	Estacional Simple
	CH25	Model_5	Estacional Simple
	CH42	Model_6	ARIMA(0,1,1)(0,0,1)
	CH50	Model_7	Winters' Aditivo
	CH52	Model_8	Estacional Simple
	CH53	Model_9	Estacional Simple
	CH59	Model_10	Estacional Simple
	CH86	Model_11	Estacional Simple
	CH87	Model_12	Estacional Simple
	CH88	Model_13	Estacional Simple
	CH89	Model_14	Estacional Simple
	CH93	Model_15	Estacional Simple
	CH96	Model_16	Estacional Simple
	SB99	Model_17	Estacional Simple

En todos los casos se verificó la independencia de los residuales con el estadístico de Ljung-Box, así como su ajuste a una distribución normal.

**Tabla 14.** Estadísticas de los modelos de pronóstico

Modelo	Estadísticas de ajuste de modelo				Ljung-Box Q(18)			Número de Outliers
	R-cuadrado estacionario	MAPE	MAE	MaxAPE	Estadístico	GL	Sig.	
CH7-Model_1	.732	23.186	.636	103.740	23.581	16	.099	0
CH17-Model_2	.823	29.629	.405	182.717	24.517	16	.079	0
CH20-Model_3	.813	33.726	.464	285.641	16.666	16	.408	0
CH22-Model_4	.682	36.770	.709	161.865	10.324	16	.849	0
CH25-Model_5	.752	34.362	.616	371.983	18.066	16	.320	0
CH42-Model_6	.641	21.730	.411	194.156	18.361	16	.303	4
CH50-Model_7	.793	48.283	.476	237.261	15.150	15	.441	0
CH52-Model_8	.676	35.099	.515	226.013	17.667	16	.344	0
CH53-Model_9	.725	30.325	.547	135.795	10.555	16	.836	0
CH59-Model_10	.760	22.524	.439	82.294	15.330	16	.501	0
CH86-Model_11	.788	30.920	.810	205.601	13.945	16	.603	0
CH87-Model_12	.659	26.175	.470	177.146	22.770	16	.120	0
CH88-Model_13	.707	45.240	.573	484.697	18.749	16	.282	0
CH89-Model_14	.773	57.774	.752	1400.080	18.422	16	.300	0
CH93-Model_15	.780	26.954	.397	218.540	9.434	16	.894	0
CH96-Model_16	.699	43.042	.760	311.036	23.654	16	.097	0
SB99-Model_17	.703	18.390	.236	99.682	24.538	16	.078	0

MAPE: Porcentaje del error absoluto medio; MAE: Error absoluto medio; RMSE: Raíz del error cuadrado medio

**Tabla 15.** Pruebas de normalidad para los residuales de los modelos de pronóstico

	CH7	CH17	CH20	CH25	CH42	CH50	CH52	CH53	CH59	CH86	CH87	CH88	CH89	CH93	CH96	SB99
Kolmogorov-Smirnov Z	.739	.420	.785	1.007	1.071	.766	.969	1.229	.649	1.482	.784	.583	.838	.636	.512	.603
Significancia. (2-colas)	.646	.995	.568	.262	.202	.601	.304	.098	.793	.025	.570	.886	.484	.814	.956	.860

Para cada lote se obtuvo el valor pronosticado de la producción de fruto para el mes de junio, así como el intervalo de confianza al 95%:

**Tabla 16.** Pronósticos de producción e intervalos de confianza

Modelo		Jun 2011
CH7-Model_1	Pronóstico	2.95
	UCL	4.60
	LCL	1.30
CH17-Model_2	Pronóstico	1.45
	UCL	2.45
	LCL	.44
CH20-Model_3	Pronóstico	1.66
	UCL	2.93
	LCL	.38
CH22-Model_4	Pronóstico	2.48
	UCL	4.39
	LCL	.58
CH25-Model_5	Pronóstico	2.17
	UCL	3.78
	LCL	.57
CH42-Model_6	Pronóstico	1.53
	UCL	2.62
	LCL	.45
CH50-Model_7	Pronóstico	.26
	UCL	1.46
	LCL	-.95
CH52-Model_8	Pronóstico	.96
	UCL	2.36
	LCL	-.43
CH53-Model_9	Pronóstico	2.26
	UCL	3.67
	LCL	.85

Modelo		Jun 2011
CH59-Model_10	Pronóstico	2.25
	UCL	3.35
	LCL	1.15
CH86-Model_11	Pronóstico	2.26
	UCL	4.58
	LCL	-.05
CH87-Model_12	Pronóstico	2.18
	UCL	3.41
	LCL	.95
CH88-Model_13	Pronóstico	1.80
	UCL	3.19
	LCL	.41
CH89-Model_14	Pronóstico	2.45
	UCL	4.48
	LCL	.43
CH93-Model_15	Pronóstico	2.00
	UCL	3.02
	LCL	.99
CH96-Model_16	Pronóstico	2.45
	UCL	4.27
	LCL	.62
SB99-Model_17	Pronóstico	1.49
	UCL	2.09
	LCL	.89

UCL: Límite de control superior; LCL: Límite de control inferior; ambos para el intervalo de confianza (2 desviaciones estándar)

Los valores de producción fueron transformados a la variable densidad de cosecha que es la que alimenta el modelo de optimización mediante la siguiente ecuación:

$$DC = \frac{\frac{P}{CM}}{NPh}$$

Donde:

*P: Es la producción mensual expresada en toneladas de fruto por hectárea,*

*CM: Es el número de cosechas que se realizan al mes, para este caso se utilizó el valor de 3, debido a que con una regularidad de 10 días se cosecha e mismo lote.*

*PMR: Es el peso medio de racimo expresado en toneladas, que para este caso equivale a 25kg.*

*NPh: Es el número de palmas que existen en una hectárea sembrada de palma de aceite, usualmente este valor es 143.*

Después de realizar pruebas de normalidad a los residuales del modelo y verificar que los datos se ajustaran a la misma, se utilizaron los límites inferior y superior de los intervalos de confianza arrojados por el modelo de pronóstico y con ellos se estimó la probabilidad de dos eventos: 1) que el lote tenga una densidad de fruto inferior al 0,26; y 2) que ésta sea superior a 0,3. Cuando para el primer caso la probabilidad del evento se estima superior al 50% se sugiere que la decisión sobre la habilitación de los PAIs sea permitir que los operarios de cosecha dispongan las mallas en aquel PAI que coincida con el ingreso o salida del recorrido de cosecha más cercano. Así mismo, cuando la probabilidad del segundo evento es superior al 50%, la sugerencia es que se habilite un PAI por cada agrupación de un número no menor a 8 mallas. Si adicionalmente, cuando se cumple el segundo evento, también se cumple que la probabilidad que la densidad de fruto sea superior a 0,40 es superior al 50%, la decisión será que cada PAI deberá tener por lo menos 10 mallas.

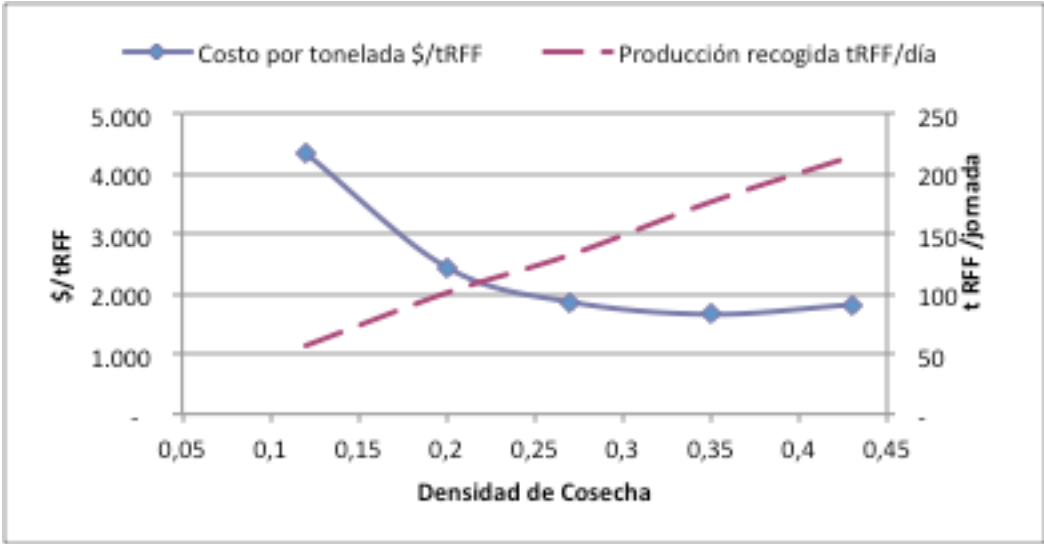
**Tabla 17.** Probabilidad de tener una densidad de cosecha

Lote	P(x<0,26)	P(0,30<x)	P(0,40<x)
CH7-Model_1	42%	37%	5%
CH17-Model_2	100%	0%	0%
CH20-Model_3	96%	1%	0%
CH22-Model_4	63%	22%	3%
CH25-Model_5	78%	10%	0%
CH42-Model_6	98%	0%	0%
CH50-Model_7	100%	0%	0%
CH52-Model_8	100%	0%	0%
CH53-Model_9	77%	9%	0%
CH59-Model_10	84%	4%	0%
CH86-Model_11	67%	20%	4%
CH87-Model_12	84%	5%	0%
CH88-Model_13	92%	2%	0%
CH89-Model_14	63%	22%	3%
CH93-Model_15	94%	1%	0%
CH96-Model_16	65%	20%	2%
SB99-Model_17	100%	0%	0%

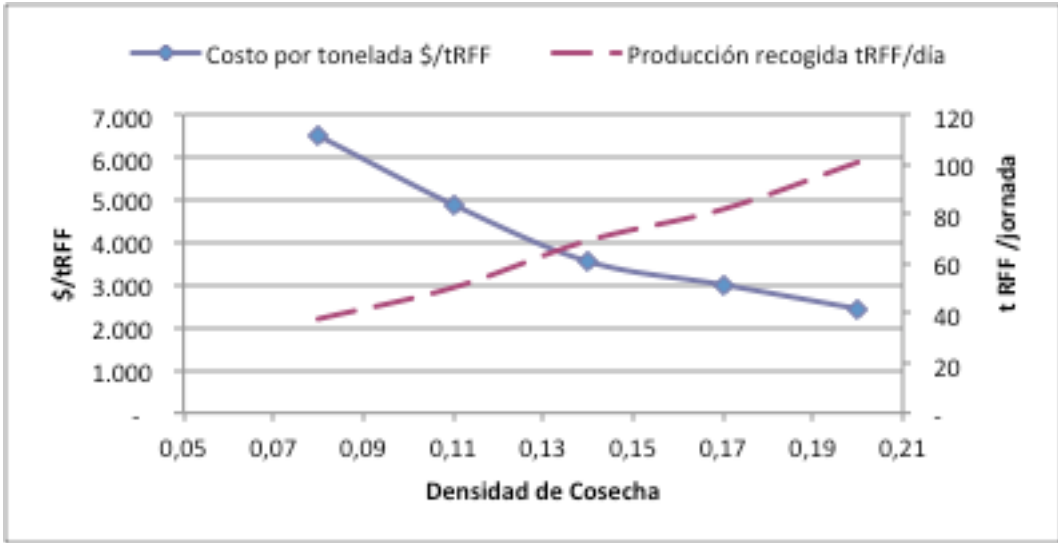
## 7.2 Costo de transporte interno

A continuación se presenta el costo de transporte interno por tonelada de RFF en función de la densidad de cosecha. Para construirla se utilizaron las predicciones de la producción en dos de los modelos de pronóstico presentados anteriormente (Modelos 1 y 17), tomando como valores de la variable densidad de cosecha el valor pronosticado y los correspondientes a una y dos desviaciones estándar.

**Figura 28.** Costo de transporte interno en función de la densidad de cosecha y la producción del modelo de pronóstico generado para el lote CH7



**Figura 29.** Costo de transporte interno en función de la densidad de cosecha y la producción del modelo de pronóstico generado para el lote SB99



En ambos casos se muestra una reducción en el costo de transporte interno unitario (por tonelada) asociada a una mayor recolección de RFF y mejor aprovechamiento del vehículo de alce y transporte interno. También se observa que la tasa de decremento del costo de transporte unitario se reduce a medida que se incrementa la producción en los lotes, causando que el costo por tonelada muestre una tendencia asintótica cuando se superan densidades de cosecha superiores a 0,3.

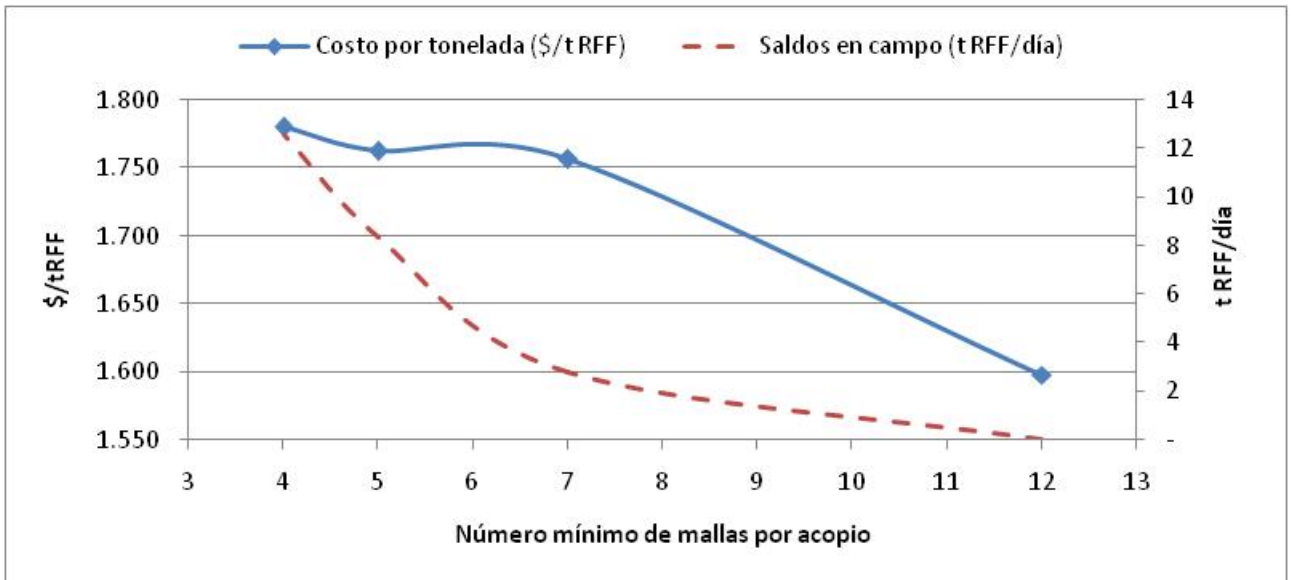
Lo anterior se explica porque con densidades iguales o inferiores a 0,26 el tiempo requerido para recoger todos los racimos cosechados es inferior a la jornada efectiva de trabajo (8 horas), por lo que el vehículo de alce y transporte interno no opera todo el tiempo. En la medida en que se presenta una mayor la producción, el vehículo incrementa su tiempo de operación para recoger el fruto disponible y el costo fijo de la jornada de trabajo se divide entre una mayor producción disminuyendo el costo unitario de transporte proporcionalmente. Sin embargo, esta disminución proporcional se interrumpe cuando la producción supera la densidad de cosecha equivalentes a 0,27 porque además del costo fijo de utilización del vehículo, se incurre en un costo de operación adicional por cada hora extra, el cual al llevarlo a costo unitario por tonelada de fruto solo es reducido como efecto de la optimización de la colocación del número de mallas por acopio y de la habilitación de un número limitado de acopios internos.

### **7.3 Sensibilidad de la asignación de acopios en los saldos de campo cuando existen altas producciones**

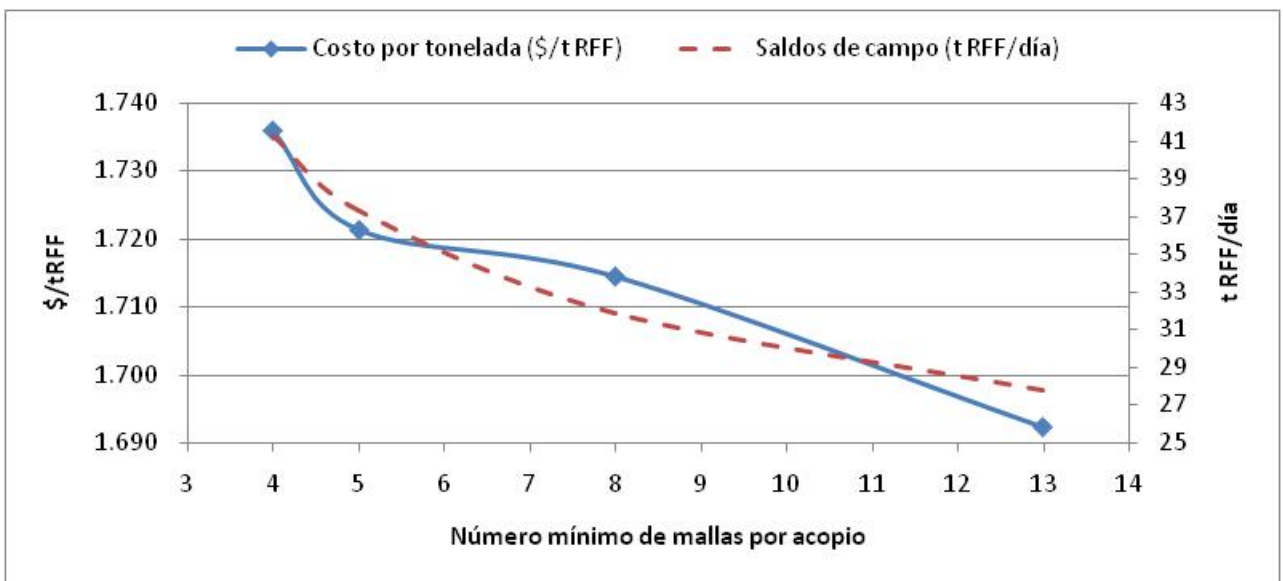
Los cultivos de palma de aceite tienen periodos donde la producción se incrementa abruptamente (picos de producción), cuando esto ocurre (en condiciones normales de operación) la oferta de fruto supera la capacidad del equipo de alce de fruto. Es en ese momento donde cobra mayor importancia la regla de decisión de cuántos puntos de acopio habilitar o cuál es el número de mallas que debe acopiarse en cada uno de ellos, porque esta ya no va a influir únicamente en el costo directo sino también afectará los saldos en campo (fruto que no pudo ser despachado el mismo día que se cosechó).

A continuación se presenta la relación de los saldos en campo y los costos de transporte sujetos a dos densidades altas de cosecha: 0,74 y 0,8.

**Figura 30.** Costo de transporte interno y saldos de campo en función de la cantidad mínima de mallas agrupadas por acopio interno con una densidad de cosecha de 0,74.



**Figura 31.** Costo de transporte interno y saldos de campo en función de la cantidad mínima de mallas agrupadas por acopio interno con una densidad de cosecha de 0,74.



En ambos casos se observa la sensibilidad del costo de transporte y de los saldos en campo al número mínimo de mallas que se ubican por acopio interno habilitado. Para el primer caso



(densidad de cosecha de 0,74) la decisión de ubicar al menos 12 mallas por punto de acopio habilitado favorece que no existan saldos de fruto en campo. Sin embargo, cuando la decisión del número mínimo de mallas a ubicar se vuelve menos estricta, se generan saldos de fruto en campo que pueden estar en el orden de las 3 a las 13 toneladas de RFF. De la misma manera, los costos de transporte interno pueden verse reducidos hasta en un 11%, cuando se utiliza la configuración óptima.

Cuando se alcanzan densidades de cosecha de 0,8, la capacidad del sistema trabajando 24 horas no permite recoger la totalidad del fruto disponible en cosecha. Sin embargo, a pesar de con una configuración óptima para la habilitación de acopios internos acompañado de la demanda de un número mínimo de mallas por acopio habilitado la reducción en el costo del transporte es tan solo del 3%, se puede lograr puede reducir los saldos en campo entre el 13 y el 33 por ciento.

## 8. Conclusiones

Se documentó el proceso logístico de transporte de fruto desde el campo hasta la planta de beneficio de Unipalma en un área de 1341 hectáreas que utiliza mallas para almacenar el fruto después de la cosecha y un camión pluma para evacuar los RFF desde los acopios internos a los acopios externos. Esta documentación incluyó el registro de los trayectos de los vehículos y de los tiempos de recorrido, la ubicación de los acopios internos y externos y los tiempos de operación del vehículo de transporte interno, lo que permitió esbozar el modelo de optimización que se propone en este trabajo y estimar los parámetros que lo alimentan.

La información recogida en campo permitió estimar en \$24.631 el costo de transporte del vehículo de transporte interno por hora de trabajo y establecer una relación en función de la cantidad de RFF transportados que condujo a los costos de transporte por tonelada de RFF.

Se planteó un modelo de programación lineal entera mixta (PLEM) que describe la relación óptima en una plantación de palma de aceite para la disposición de los RFF en los PAI por parte de los operarios de cosecha y su recolección por parte del equipo de alce con el vehículo de transporte interno para su despacho a los PAEs. El modelo es alimentado con la producción esperada (expresada en densidad de cosecha) y genera como salida el número de PAIs a habilitar por lote y el número de mallas que los operarios de cosecha deben disponer en cada uno de ellos.

También, se analizó el efecto de la volatilidad de la producción de los lotes sobre la configuración óptima de la red de acopios modelada, su impacto en los costos de operación y en los saldos de fruto en campo, sugiriendo que con densidades de cosecha iguales o inferiores a 0,26 los cosecheros pueden ubicar una malla por PAI habilitado, pero que con densidades mayores a este valor y en la medida en que se presenten mayores producciones se debe restringir el número de PAIs a habilitar por lote, aumentando el número mínimo de mallas que deben ubicarse por PAI.

Debido a que existe una jornada de trabajo mínima para el equipo de transporte interno que implica un costo fijo de operación diario, la forma más rápida de minimizar el costo de transporte interno por tonelada de RFF es utilizar al máximo el vehículo en el alce y transporte de RFF, acción que se logra con densidades de cosecha iguales o superiores a 0,27. Se encontró que la densidad de cosecha influye sensiblemente en los costos de transporte interno: una mayor cantidad de RFF producidos en los lotes incrementa la demanda de transporte y a su vez del uso de los vehículos y equipos. Por otra parte, cuando se utiliza la asignación óptima de los PAIs, se pueden lograr reducciones en el costo de transporte de hasta un 11%.

Finalmente, los resultados arrojados por el modelo sugieren que en condiciones de alta producción la asignación óptima de los PAIs y del número de mallas a disponer en los mismos disminuye los saldos en campo (para el caso de una densidad de cosecha de 0,8 la reducción puede ser hasta de un 33%).

## 9. Anexos

### 9.1 Código de programación en Lingo

Model:

Title Alce\_Unipalma;

sets:

!Conjuntos primitivos;

LOTES / LOT1..LOT7/: XMAX !MAXIMO DE ACOPIOS POR LOTE;, XMIN !MINIMO DE ACOPIOS POR LOTE;;

RECORRIDOS / U1..U15/ ;

ACOPIOS / A1..A30/: K !CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE PUNTOS DE ACOPIO;;

!conjuntos derivados;

SETSI (LOTES, ACOPIOS): dae\_si !número de cajas descargadas al ubicarse en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote; , pa\_si !Variable que indica si el camión-pluma (sistema de alce) debió regresar al  $i$ -ésimo acopio para continuar con el alce de mallas, luego de descargar una caja contenedora; , a\_si !Número de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote; , w\_si !Cantidad de mallas que serán transportadas, por el camión pluma (sistema de alce) desde el  $i$ -ésimo acopio al siguiente, del  $s$ -ésimo lote; , t\_si !Cantidad de mallas disponibles en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote (número de mallas almacenadas en  $i$ , más las mallas transportadas por el camión pluma (sistema de alce) desde el acopio inmediatamente anterior) (número real); , x\_si !Variable que indica la apertura del  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote; , y;

SETSU (LOTES, RECORRIDOS): e\_su !Sobrante luego del almacenamiento, en los acopios internos, de las mallas provenientes del  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote (expresado en mallas) (número real); , m\_su !Cantidad de RFF recogidos al terminar el  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote (se expresa en número de mallas) (número real); , d\_su !cantidad de mallas almacenadas en los acopios que provienen del  $u$ -ésimo recorrido del  $s$ -ésimo lote; , p\_su !RFF producidos y recogidos en el  $u$ -ésimo recorrido de cosecha del  $s$ -ésimo lote (expresado en mallas) (número real);

SETSUI (LOTES, RECORRIDOS, ACOPIOS): y\_sui !Número de mallas almacenadas en el  $i$ -ésimo acopio del  $s$ -ésimo lote, provenientes del  $u$ -ésimo recorrido;;

SUBSETPRODCOSECHA !SUBCONJUNTO PÉRDIDA DE PRODUCTIVIDAD EN COSECHA; (RECORRIDOS, ACOPIOS): CdesP\_sui !Costo de penalización por el desplazamiento del cosechero desde el  $u$ -ésimo recorrido hasta el  $i$ -ésimo acopio [\$/desplazamiento]; ;

## Endsets

### Data:

!Parámetros;

!Valores de los atributos;

BperN !racimos por malla; = 36;

Cextra !Costo por tiempo extra de trabajo del camión pluma (sistema de alce)[\$/h]; = 24631;

DEM !Tiempo perdido en la aceleración del vehículo de alce cada vez que se detiene en un punto de acopio [h]; =0,0012;

JT !Tiempo máximo de operación establecido para el sistema de alce [h]; = 8;

NMC !Número de mallas que puede cargar una caja contenedora [mallas]; = 15;

NP !Número de palmas por recorrido; = 192 ;

NR !Número de recorridos por lote; = 15;

TAC!Tiempo de alistamiento del camión pluma (sistema de alce) para el cargue de mallas en un punto de acopio interno [h]; = 0.00472;

TAD !Tiempo de alistamiento del camión pluma (sistema de alce) para desplazamiento [h]; = 0.00556;

TCargM !Tiempo requerido para el cargue de una malla al camión pluma [h]; = 0.03556;

TdescC !Tiempo requerido para que el camión pluma (sistema de alce) descargue de una caja contenedora, una vez completa su contenido[h]; = 0.16666;

TFC !Tiempo de desplazamiento del vehículo de alce para recorrer un lote sin realizar ninguna parada [h]; = 0,0443;

M !Numero muy grande; = 100000;

XMAX, XMIN, CdesP\_sui, K, p\_su = @OLE ( 'Z:\Documents\Parametros\_Unipalma\_LINGO.xls ', 'XMAX', 'XMIN', 'CdesP\_sui', 'K', 'p\_su' );

@OLE ( 'Z:\Documents\Parametros\_Unipalma\_LINGO.xls ' , 't\_si', 'w\_si', 'a\_si', 'dae\_si', 'x\_si', 'd\_su', 'm\_su', 'e\_su', 'y\_sui' ) = t\_si, w\_si, a\_si, dae\_si, x\_si, d\_su, m\_su, e\_su, y\_sui;

## Enddata

!Función Objetivo;

[objetivo] min = te\*CExtra + @sum ( LOTES(s):

@sum ( SUBSETPRODCOSECHA(u,i): CdesP\_sui \* y\_sui(s,u,i) ) );

@for(SETSI(s,i) | s #EQ# 1 #AND# i#EQ# 1: [R1R2] t\_si(s, i) =a\_si(s,i));

```

@for(SETSI(s,i) | s #GT# 1 #AND# i#EQ# 1: [R1R1] t_si(s, i) = w_si(s-1, @size(ACOPIOS)) +
a_si(s,i));
@for(SETSI(s,i) | s #GE# 1 #AND# i#GT#1: [R1R3] t_si(s, i) = a_si(s,i) + w_si(s, i-1));
@for (SETSUI(s,u,i): [R2] y_sui(s,u,i) <= x_si(s,i) * K(i));
@for (SETSI(s,i): [R21] a_si(s,i) >= x_si(s,i));
@for (LOTES(s): [R3] XMIN(s) <= @sum(acopios(i):x_si(s,i)); @for (LOTES(s):
@sum(acopios(i): x_si(s,i) <= XMAX(s));
@for (SETSU(s,u): [R4] m_su(s,u) = @if(u #GT# 1, p_su(s,u) +e_su(s,u-1) , p_su(s,u) ) );
@for (SETSU: [R6] e_su = m_su - d_su);
@for (SETSU: [R7] e_su <= .9999);
@for (SETSI(s,i): [R8] @sum (RECORRIDOS(u): y_sui(s,u,i) ) = a_si(s,i) );
@for (SETSU(s,u): [R9] d_su(s,u) = @sum (ACOPIOS(i): y_sui(s,u,i) ) );
@for (SETSI(s,i): [R11] w_si(s,i) = t_si(s,i) - dae_si(s,i) * NMC);
@for (SETSI(s,i): [R12] w_si(s,i) < (NMC-1));
@for(LOTES(s) | s #EQ# 1: [R13R1] @sum(ACOPIOS (i): dae_si(s,i) * NMC) + w_si(s, @size
(ACOPIOS)) = @sum (RECORRIDOS (u): d_su(s,u) ) );
@for(LOTES(s) | s #GT# 1: [R13R2] @sum(ACOPIOS (i): dae_si(s,i) * NMC) + w_si(s, @size
(ACOPIOS)) = @sum (RECORRIDOS (u): d_su(s,u)) + w_si(s-1,@size(ACOPIOS)));

top = @sum( LOTES(s) : TFC + @sum( Acopios(i): x_si (s,i) * DEM)+ @sum(ACOPIOS(i):
x_si(s,i) + pa_si(s,i) * (TAC + TAD) + @sum(ACOPIOS(i): a_si(s,i)* TCargM) +
@sum(ACOPIOS(i): dae_si(s,i) * TDescC) ) ;
top <= JT +M*z;
te ![R17];!; >= (z-1)*M + top - JT;

@for(SETSI(s,i):[R19] dae_si(s,i)<=1+y(s,i)*M);
@for(SETSI(s,i):[R19R1] pa_si(s,i)>=(y(s,i)-1)*M+dae_si(s,i)-1);
@for (SETSUI(s,u,i): [R20] y_sui(s,u,i) <= x_si(s,i) * K(i));

@bin(z); @for(SETSI(s,i): @bin(x_si(s,i))); @for(SETSI(s,i): @gin(a_si(s,i) ) );
@for(SETSU(s,u): @gin(d_su(s,u))); @for(SETSI(s,i): @gin(dae_si(s,i)));
@for(SETSUI(s,u,i): @gin(y_sui(s,u,i))); @for(SETSI(s,i) : @gin(w_si(s,i))); ![R18];

```

**End**

## 10. Bibliografía

Adarme, W.; Fontanilla, C.; Arango, M. 2011. Modelos logísticos para la optimización del transporte de racimos de fruto fresco de palma de aceite en Colombia. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Vol. 21, No. 1, 89-114p.

Ademosun, O. C. 1982. Location-allocation models for oil palm production in Nigeria based on the feasible set approach. En: International Journal of production Research. Vol. 20, No. 2, 211–226p.

Ahumada, O.; Villalobos R. 2008. Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. En: European Journal of Operational Research. Vol.196, No. 1, 1-20p.

Cárdenas, L.; Padilla, P.; García, J.; Ayala, M.; Yañez A. E. 2002. Evaluación de las pérdidas de aceite en campo. En: Memorias de la Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, Bogotá (Colombia).

Chatfield, C. 1996. The analysis of time series: An introduction. Fifth edition. Chapman and Hall/CRC. 304 p.

Duarte y Guterman, 2009. Informe de actualización de costos de producción del aceite de palma. Bogotá, Colombia: Fedepalma.

Fedepalma. 2011. Anuario estadístico de Fedepalma. Colombia.

Fleming, T. 1969. Coordination of harvesting, transport and processing of oil palm crop. En: Proceedings of the Second Malaysian Oil Palm Conference. Kuala Lumpur.

Fontanilla, C; Adarme, W; Arango, M. 2010. Programming Tools, an alternative to optimize the logistics at the transportation process of the oil palm fresh fruit bunches. En: THORSTEN BLECKER, WOLFGANG KERSTEN, CHRISTIAN LÜTHJE. 2010. Innovative Process Optimization Methods in Logistics, Emerging trends, concepts and technologies. En: Operations and Technology Management. En: Alemania. ed: Erich Schmidt Verlag ISBN: 978-3-503-12683-5 v 13, 424 páginas.

Fontanilla, C; Pachón, S; Castiblanco, J; Mosquera M; Sánchez, C. 2010. Referenciación Competitiva a los Sistemas de Evacuación y Alce de Fruto. Bogotá, Colombia: Área 51 Publicidad y Comunicación.

Fontanilla, C. Castiblanco, J. 2009. Cable vía en la cosecha de Palma de Aceite. En: Revista Palmas. Vol. 30 No 4. 53-64p.

García, R; Martínez M; y Palacios F. 2007. Tactical and operative optimization of the supply chain in the oil palm industry. En: Disertación de tesis Doctoral en Ingeniería Industrial, titulada: "Integral optimization and some supply chain developments", por Rafael Guillermo García Cáceres. Universidad de Los Andes.

Gutiérrez, E; Cadena, A; Palacios, F; y García R. 2008. Planificación estratégica del biodiesel en Colombia. Book of Extended Abstracts. XIV Latin Ibero-American Congress on Operation Research (CLAIO).

Hillier, F; Lieberman, G. 2005. Introduction to Operations Research. 8<sup>th</sup> Edition. Mc Graw-Hill. New York. 1088p.

Hyndman, R; Koehler, A; Ord, K; y Snyder, R . 2008. Forecasting with exponential smoothing: The state space approach. Springer; 1 edition. 376 p.

Iannoni, M; Morabito, R. 2006. A discrete simulation analysis of a logistics supply system. En: Transportation Research Part E. 191-210 p.

Ibrahim, S. 2008. Transportation optimization model of palm oil products for northern peninsular Malaysia. En: Tesis Doctoral. Universiti Sains Malaysia.

Jerez, J; Amézquita, M. 2004. Transporte de fruta en cajas en Unipalma S.A. En: Revista Palmas. Vol. 25, No. Especial 2, 472-175 p.

Kirchgässner, G.; Wolters, J. 2007. Introduction to Modern Time Series Analysis. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

LMC International Ltd, 2010. The LMC Oilseeds and Oils Report.

Montgomery, D.; Jennings, C.; Kulahci, M. 2008. Time Series Analysis and forecasting. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA. 469p. ISBN 978-0-471-65397-4

Mosquera, M; Valenzuela, J. 2006. Estudio de logística para el proceso de transporte de fruto de aceite en Colombia. En: Revista Palmas. Vol. 27, No. 4, 55-64 p.

Salvelsbergh, M.W.P.; Sol, M. 1995. The General Pickup and Delivery Problem. Transportation Science. Vol 29. No 1.

Sauian. 2008, OR in Agriculture: The Use of Assignment Model. Proceedings of the Third Meeting of the EURO Working Group on Operational Research (OR) in Agriculture and Forest Management (EWG-ORAFM).

Sepúlveda, J. 2010. Informe de pasantía del proyecto Optimización del proceso logístico de transporte de fruto. Documento interno de trabajo, Cenipalma.

Tinsay, E. 2007. Introducción a la red logística en el aceite de palma. En: Revista Palmas. Vol. 28, No. Especial, 321-327p.

Turner, P; y Gillbanks, R. 1982. Oil palm cultivation and management. En: The incorporated society of planters. Kuala Lumpur.

Yandra; Marimin; Jamaran, I; Eriyatno; Tamura, H. 2007. An integration of multi-objective genetic algorithm and fuzzy logic for optimization of agroindustrial supply chain design. En: Proceedings of the 51st Annual meeting of the ISSS. Tokyo, Agosto 5-10.