

ESTUDIO DE MÉTODOS Y TIEMPOS PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD
EN EL SISTEMA DE COSECHA DE UN INGENIO AZUCARERO.



Presentado por:

VALENTINA POSADA BALLESTEROS

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PALMIRA

2014

ESTUDIO DE MÉTODOS Y TIEMPOS PARA MEJORAR LA PRODUCTIVIDAD
EN EL SISTEMA DE COSECHA DE UN INGENIO AZUCARERO.



Presentado por:

VALENTINA POSADA BALLESTEROS

Trabajo de Grado

Director:

JAIRO ARBOLEDA ZÚÑIGA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PALMIRA

2014

Trabajo de Grado sustentado por
Valentina Posada Ballesteros
Como requisito parcial para obtener el título de
Ingeniero Industrial
Aceptada por la Facultad de Ingeniería

Jairo Arboleda Zúñiga
Director

Jurado 1
Jurado

Jurado 2
Jurado
Noviembre de 2014

Este trabajo va dedicado
primeramente a DIOS por ser mi
compañero y amigo en todo
momento, y permitirme salir adelante
con mi carrera, a mis padres y a
todas las personas que me
acompañaron y me apoyaron
durante todo este proceso.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
OBJETIVOS	4
<i>Objetivo General</i>	4
<i>Objetivos Específicos</i>	4
MARCO TEÓRICO	5
<i>Descripción del proceso productivo</i>	5
<i>Proceso de cosecha en un ingenio azucarero</i>	5
<i>Corte mecanizado de la caña de azúcar</i>	8
<i>Descargue en patios</i>	10
<i>Teoría de Métodos y Tiempos</i>	11
<i>Diseño del trabajo</i>	12
<i>Productividad, un objetivo prioritario</i>	12
<i>Mejoramiento de procesos</i>	13
<i>Optimización</i>	14
<i>¿Cómo abordar un problema real de optimización?</i>	15
<i>Programas lineales</i>	15
<i>Modelización</i>	15
<i>Uso de modelos y métodos de optimización</i>	16
<i>Representación de un modelo</i>	16
<i>Pasos del Método científico en Investigación de operaciones</i>	18
METODOLOGIA	19
<i>Parámetros de los eventos</i>	19
<i>Análisis de los datos</i>	19
<i>Método de mejoramiento</i>	20
<i>Caracterización del proceso de cosecha del ingenio azucarero en estudio</i>	21

<i>Proceso de cosecha mecanizada de la caña de azúcar</i>	<i>21</i>
<i>Proceso de recepción de la caña de azúcar en los patios del ingenio</i>	<i>29</i>
DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS	32
<i>Análisis estadístico de los datos tomados en los patios de fábrica</i>	<i>32</i>
<i>Análisis estadístico de los datos tomados en campo</i>	<i>40</i>
<i>Evaluación de las cosechadoras en el proceso de corte en campo.....</i>	<i>46</i>
<i>Análisis de los datos tomados al proceso de llenado de la tractomula</i>	<i>48</i>
FORMULACIÓN DEL MODELO DE MEJORAMIENTO.....	50
<i>Justificación del modelo.....</i>	<i>50</i>
<i>Descripción del sistema a modelar</i>	<i>51</i>
<i>Supuestos del modelo.....</i>	<i>52</i>
<i>Notación del Modelo</i>	<i>52</i>
<i>Variables</i>	<i>52</i>
<i>Parámetros.....</i>	<i>52</i>
<i>Limitaciones</i>	<i>53</i>
<i>Modelo matemático del proceso de cargue con autovolteo de un tren cañero conformado por cuatro vagones de 24 toneladas DL</i>	<i>53</i>
<i>Formulación verbal.....</i>	<i>53</i>
<i>Modelamiento.....</i>	<i>54</i>
<i>Modelo matemático del proceso de cargue de un tren cañero conformado por 1 vagón de 20 toneladas y 5 vagones de 12 toneladas haciendo cadeneo</i>	<i>55</i>
<i>Formulación verbal.....</i>	<i>55</i>
<i>Modelamiento.....</i>	<i>56</i>
<i>Análisis de los resultados del modelo</i>	<i>61</i>
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	67
BIBLIOGRAFÍA	68
ANEXOS	70

<i>Anexo 1. Formularios para registrar los tiempos de las diferentes actividades de los procesos de corte, cargue y recepción de la caña de azúcar.</i>	<i>70</i>
--	-----------

LISTA DE CUADROS

<i>Cuadro 1 Cantidad de datos tomados de los procesos del sistema de cosecha</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 2 Tiempos promedio de las actividades del proceso de recepción de caña en patios de fábrica.....</i>	<i>33</i>
<i>Cuadro 3 Estadística descriptiva: Moda, desviación estándar, mínimo y máximo.</i>	<i>35</i>
<i>Cuadro 4 Relación de los tiempos promedio, máximos y mínimos de las actividades del proceso de recepción de caña picada</i>	<i>39</i>
<i>Cuadro 5 Relación de los tiempos promedio, máximos y mínimos de las actividades del proceso de recepción de caña larga.....</i>	<i>39</i>
<i>Cuadro 6 Tiempos promedio de las actividades del proceso de cargue de caña picada en campo</i>	<i>40</i>
<i>Cuadro 7 Estadística descriptiva: Moda, desviación estándar, mínimo y máximo.....</i>	<i>41</i>
<i>Cuadro 8 Tiempo total promedio de llenado de la cosechadora</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 9 Tiempos promedio de las actividades del proceso de cargue de los vagones de la tractomula en campo.....</i>	<i>48</i>
<i>Cuadro 10 Modelamiento del proceso de cargue con autovolteo de un tren conformado por cuatro vagones de 24 toneladas DL (descarga lateral), trabajando con tres máquinas cosechadoras.....</i>	<i>58</i>
<i>Cuadro 11 Resultados del modelo matemático trabajando con 3 máquinas cosechadoras.....</i>	<i>58</i>
<i>Cuadro 12 Modelamiento del proceso de cargue con autovolteo de un tren conformado por cuatro vagones de 24 toneladas DL (descarga lateral), trabajando con 2 máquinas cosechadoras.....</i>	<i>59</i>
<i>Cuadro 13 Resultados del modelo matemático trabajando con 2 máquinas cosechadoras.....</i>	<i>59</i>
<i>Cuadro 14 Modelamiento del cargue haciendo cadeneo de un tren conformado por un vagón 20000 (20 ton) y cinco vagones 12000 (12 ton), trabajando con 3 máquinas cosechadoras.</i>	<i>60</i>
<i>Cuadro15 Resultados del modelo matemático</i>	<i>61</i>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Dinámica del proceso de suministro de caña de azúcar a la fábrica.</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2 Estudio de transferencia de caña para Molienda</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3 Representación de un modelo.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4 Diagrama de operaciones del proceso de cargue de caña picada en campo</i>	<i>25</i>
<i>Figura 5 Diagrama de operaciones del proceso de volteo de los vagones de autovolteo.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 6 Diagrama de operaciones del proceso de desenganche/enganche de los vagones semi-remolque (20 ton) y remolque (12 ton).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 7 Diagrama de recorrido de los vagones de autovolteo en el campo</i>	<i>28</i>
<i>Figura 8 Diagrama de recorrido de los vagones semi-remolque (20 ton) y remolque (12 ton) en el campo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 9 Diagrama de operaciones del proceso de suministro de la caña de azúcar a fábrica.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 10 Diagrama de recorrido de los trenes con caña picada en los patios de la fábrica.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 11 Diagrama de recorrido de los trenes con caña larga en los patios de la fábrica.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 12 Distribución de los porcentajes globales de las actividades del proceso de corte de la cosechadora en el cargue con autovolteo.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13 Distribución de los porcentajes globales de las actividades del proceso de corte de la cosechadora en el cargue haciendo cadeneo.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 14 Representación del modelo matemático propuesto</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15 Comparación de la demanda del alce frente a las toneladas maximizadas tanto en el proceso de autovolteo como en el proceso de cadeneo</i>	<i>63</i>

GLOSARIO

Acotar: Reservar, prohibir o limitar de otro modo.

Alce: Zona donde se cosecha y se hace el cargue de la caña. Equipo que se encarga del corte, alce o cargue de la caña de azúcar en campo.

Brechar: Abrir brecha, es el inicio de la cosecha utilizando un tractor y una cosechadora.

Cadeneo: Operación efectuada con un tractor preferiblemente que sea articulado, y un vagón contiguo a la máquina cosechadora, con el fin de transportar y a la vez cargar los vagones.

Constructo: Construcción teórica para resolver un problema científico determinado.

Diseño de campo: Hace referencia al conjunto de normas que se deben seguir para facilitar el desplazamiento de la maquinaria en el campo de cultivo.

Diseño de métodos: Es la técnica que tiene por objeto aumentar la productividad del trabajo, mediante la eliminación de todos los desperdicios de materiales, tiempo, esfuerzo.

Estaciones meteorológicas: Es decir, es un lugar que nos permite la observación de los fenómenos atmosféricos y donde hay aparatos que miden las variables atmosféricas.

Inter fase: Superficie de separación entre dos fases.

Melga: Sistema de giro dentro de un lote de caña que aumenta la eficiencia de la máquina y evita daños ocasionados por giros forzados en las máquinas y en la suerte.

Optimizar: Buscar la mejor manera de realizar una actividad.

Proceso Bach: Se conoce como sistema por lotes o modo *batch*, a la ejecución de un programa sin el control o supervisión directa del usuario (que se denomina procesamiento interactivo).

Proceso de cosecha: Se consideran en el proceso de cosecha los costos de corte, alce, transporte, beneficio de los subproductos de cosecha.

Pacha: Conjunto de vagones que conforman un tren cañero.

Productividad: Es el grado de rendimiento con que se emplean los recursos disponibles para alcanzar objetivos predeterminados.

Remolque: Equipo conformado por un chasis revestido de lámina que tiene tiro y transporta caña de azúcar.

Semiremolque: Equipo conformado por un chasis revestido de lámina que transporta caña y va enganchado a un automotor, que no tiene tiro.

Sinfines: Tornillos tipo “sinfin” para canalizar la caña caída hacia la zona de corte.

Sistema de volteo: Descargue de caña con vagones de diseño de descarga lateral.

Suerte: Divisiones grandes de sembrado de caña.

Surco: Sembrado de caña en línea, a lo largo del área de corte.

Tablones: Divisiones de suertes. Área más pequeña 120*200.

Tara: Peso del continente de un vehículo vacío, que se rebaja en la pesada total con el contenido.

Topográfico: Conjunto de particularidades que presenta un terreno en su configuración superficial.

Tren: Conjunto de vagones compuestos de semiremolque y remolques, los cuales cumplen con las normas del ministerio de transporte.

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en el estudio de métodos y tiempos de los procesos de corte y cargue de caña de azúcar picada, y del proceso de recepción de caña de azúcar larga y picada del sistema de cosecha de un ingenio. Este trabajo está vinculado al proyecto CATE “Corte, alce, transporte y entrega de la caña de azúcar”, el cual está siendo desarrollado por Cenicaña (Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia). En el año 2008, fue desarrollado un estudio llamado *Caracterización de tiempos perdidos de los equipos de cosecha de un ingenio azucarero colombiano*. Desde este año no se han realizado trabajos relacionados al estudio de métodos y tiempos.

La finalidad principal de este trabajo consiste en evaluar las operaciones desarrolladas en los procesos de corte y cargue de caña de azúcar picada, y del proceso de recepción de caña de azúcar larga y picada del sistema de cosecha de un ingenio y en identificar los tiempos muertos y las restricciones que se presentan, para proponer medidas de control y mejoramiento, que causen el mejoramiento de la productividad y una disminución en los costos operativos.

La toma de tiempos se hizo en el campo, donde se hace el corte y cargue de la caña y en los patios de fábrica del ingenio, donde se descarga y se suministra a molienda. El análisis estadístico de los tiempos tomados permitió identificar las causas de la disminución de la productividad del sistema de cosecha. A partir de las conclusiones obtenidas en el análisis se decidió el desarrollo de un modelo matemático para obtener una solución óptima de acuerdo a las condiciones que presenta el problema.

Los resultados obtenidos del modelo matemático desarrollado permiten aplicar una metodología que ayuda a estimar una mejora en la productividad del proceso de cargue en campo.

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera en el Valle del Cauca tiene gran importancia dentro de la región debido a su relevancia económica y social en el campo. A principios del Siglo XX existían tan solo 3 ingenios azucareros: Manuelita, Providencia y Riopaila; hoy en día la industria se ha expandido hasta completar alrededor de 12 ingenios: Carmelita, Central Tumaco, Incauca, La Cabaña, Manuelita, María Luisa, Mayagüez, Pichichí, Providencia, Riopaila Castilla, Risaralda y San Carlos.

La cosecha en un ingenio azucarero es la etapa del proceso productivo de azúcar y/o alcohol que se encarga del abastecimiento de caña a las fábricas, desde el momento de la programación del corte hasta la entrega en los patios del ingenio con las características de calidad acordado.

Para cumplir con el suministro de caña de azúcar requerida por molienda, es fundamental enfocar esfuerzos en la optimización del sistema de corte, carga y transporte. El aprovechamiento del tiempo es una labor importante dentro de este proceso de optimización.

A través del estudio de tiempos y movimientos de las operaciones se mide el trabajo y se evalúa el rendimiento de los recursos utilizados en el proceso. En la medición del trabajo se investiga en qué condiciones, bajo qué métodos y en qué tiempo se ejecuta un trabajo determinado, logrando identificar tiempos improductivos, subutilización de los recursos, movimientos innecesarios, recursos requeridos, entre otros.

El método de programación lineal entera mixta usado en este trabajo se basa en un modelo matemático de optimización, con el cual se obtiene un resultado que se convierte en un respaldo cuantitativo de las decisiones frente a las condiciones del sistema, con el fin de mejorar la productividad.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El ingenio en estudio está ubicado en la región del Valle del Cauca desde la primera década del siglo XX. A través del tiempo ha tenido un crecimiento en la producción de azúcar y grandes avances tecnológicos, logrando tener un papel importante en el progreso de la región. Actualmente es productor de azúcares, alcoholes, abono orgánico, entre otros productos comerciales. Dentro de sus principales procesos están: campo, cosecha, fábrica, cogeneración de energía y alcohol carburante.

La Cosecha es la encargada de realizar la programación y ejecución de las labores de corte, alce y transporte de aproximadamente 10 mil toneladas de caña por día a la fábrica, es decir alrededor de 420 ton/hora con las especificaciones de calidad establecidas. El tratamiento de la caña después del corte se compone del apilamiento en campo, apilamiento en vagones y el apilamiento en patios antes de entrar a molienda. El tiempo transcurrido entre corte y molienda afecta la calidad de la caña, generando la pérdida de sacarosa entre 0.014 y 0.02 puntos porcentuales por cada hora que transcurre entre la quema o corte y la molienda. Debido a esto es importante reducir el tiempo que transcurre entre el corte de la caña y la molienda.

Actualmente el tiempo de permanencia de las tractomulas en los patios de la fábrica es aproximadamente de una hora y media. En el campo este tiempo de permanencia es aproximadamente de una hora y media a dos horas para el proceso de autovoltéo y aproximadamente de dos a cuatro horas para el proceso de cadeneo. El tiempo de permanencia de las tractomulas tanto en la zona de cargue (campo) como en la zona de descargue (patios de la fábrica) es uno de los factores que afecta la secuencia del ciclo de transporte en el proceso de suministro de caña a la fábrica, por lo que se debe identificar sus causas; para ello se hace necesario el desarrollo de un estudio de métodos y tiempos, que permita determinar los tiempos muertos como tiempos de espera en las zonas de cargue (campo) y en las zonas de descargue (patio), los cuellos de botella y los tiempos de permanencia de la caña en los diferentes sitios de apilamiento. La prolongación de los tiempos de permanencia de las tractomulas tanto en la zona de cargue (campo) como en la zona de descargue (patios de la fábrica) puede generar retrasos en el suministro y en el peor de los casos el desabastecimiento de la caña de azúcar a fábrica.

El estudio de métodos y tiempos es de gran importancia porque a través de esta labor se evalúan los componentes de cosecha, con el fin de conocer a profundidad tanto la metodología aplicada en la realización de las operaciones como los recursos utilizados en el proceso de suministro de la caña. Tomando en cuenta los resultados del estudio de métodos y tiempos realizado en este trabajo, se pretende desarrollar un modelo matemático que permita el cálculo del número de ciclos por tractor que se pueden realizar de acuerdo a las restricciones del

sistema, para llenar los vagones de la tractomula en menos tiempo y así lograr disminuir el tiempo de permanencia de la tractomula en el campo y mejorar la productividad de los procesos de corte y cargue de caña picada.

OBJETIVOS

Objetivo General

- Elaborar un estudio de métodos y tiempos para proponer un método de mejoramiento de la productividad del proceso de cosecha en un ingenio azucarero en el Valle del Cauca con una capacidad de molienda de aproximadamente 10.000 toneladas.

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis de los tiempos tomados de las actividades de los procesos de corte y cargue de caña picada en el campo y del proceso de recepción tanto de caña larga como de caña picada en los patios de la fábrica para hacer una evaluación de estos procesos e identificar los cuellos de botella y los tiempos muertos que se pueden estar presentando.
- Proponer un método que permita mejorar la productividad del ciclo de cosecha, a través del uso más eficiente de los recursos (máquinas cosechadoras, tractores con vagones y tractomulas).
- Socializar los resultados obtenidos del estudio de métodos y tiempos realizado a los procesos de corte y cargue de caña picada en el campo y al proceso de recepción tanto de caña larga como de caña picada en los patios de la fábrica.

MARCO TEÓRICO

En el desarrollo del siguiente trabajo se tienen en cuenta los aportes realizados en el sector azucarero tales como: **Evaluación de tiempos y movimientos indicadores de control** realizado por Luis Guillermo Amú. También **Modelo de optimización y asignación de equipo de transporte y cosecha en el sistema de abastecimiento de caña** realizado por el autor anteriormente mencionado. Igualmente se tuvieron en cuenta trabajos realizados por autores internacionales como: **Supply optimization for the production of raw sugar** del autor M Grunow e **Improving harvesting and transport planning with in a sugar value chain** del autor AJ Higgins.

Descripción del proceso productivo

Proceso de cosecha en un ingenio azucarero

En el periodo de cosecha, el abastecimiento continuo de materia prima para los ingenios de producción de caña de azúcar depende del gerenciamiento del sistema de corte, carga y transporte (Amú, Evaluación de tiempos y movimientos indicadores de control, 2010).

A continuación se muestra desde un punto de vista general el ciclo de suministro de la caña de azúcar a la fábrica. Este ciclo se da desde que salen de fábrica las tractomulas con los vagones vacíos hasta que regresan cargados con caña picada o caña larga de las distintas suertes cosechadas.

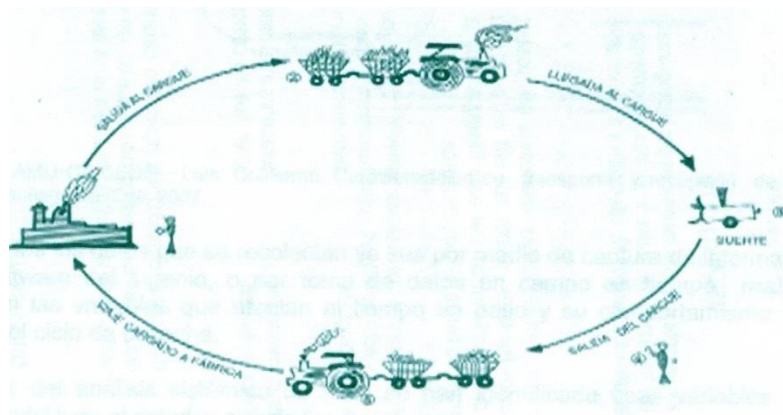


Figura 1 Dinámica del proceso de suministro de caña de azúcar a la fábrica¹.

El ciclo anteriormente observado, es lo que sucede todos los días en los ingenios de la región. Los estudios relacionados con este proceso deben aplicar metodologías que permitan obtener datos estimados del comportamiento del ciclo de cosecha y así poder tomar las decisiones más acertadas para su mejoramiento.

La investigación sobre optimización de la cosecha de la caña de azúcar se ha enfocado en la optimización de tiempos y recorridos del corte, alce y transporte. También hay estudios que analizan temas relacionados con la programación y cantidad de recursos utilizados.(Amú, Evaluación de tiempos y movimientos indicadores de control, 2010)

La obtención del comportamiento del ciclo vía datos estimados, unido al estudio y análisis detallado de la dinámica del ciclo de cosecha que se muestra en la figura 2, validado por la apreciación estadística del tratamiento de los diferentes datos recolectados dentro de un intervalo de confianza facilita comprender lo que realmente está pasando en el ciclo.(Pantoja Ojeda, 2008)

¹Fuente: Buenaventura O, Carlos E, 3er Congreso Sociedad Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar y 1er congreso Asociación de Técnicos Azucareros de América latina y del Caribe, Santiago de Cali: Tecnicaña, p. 89

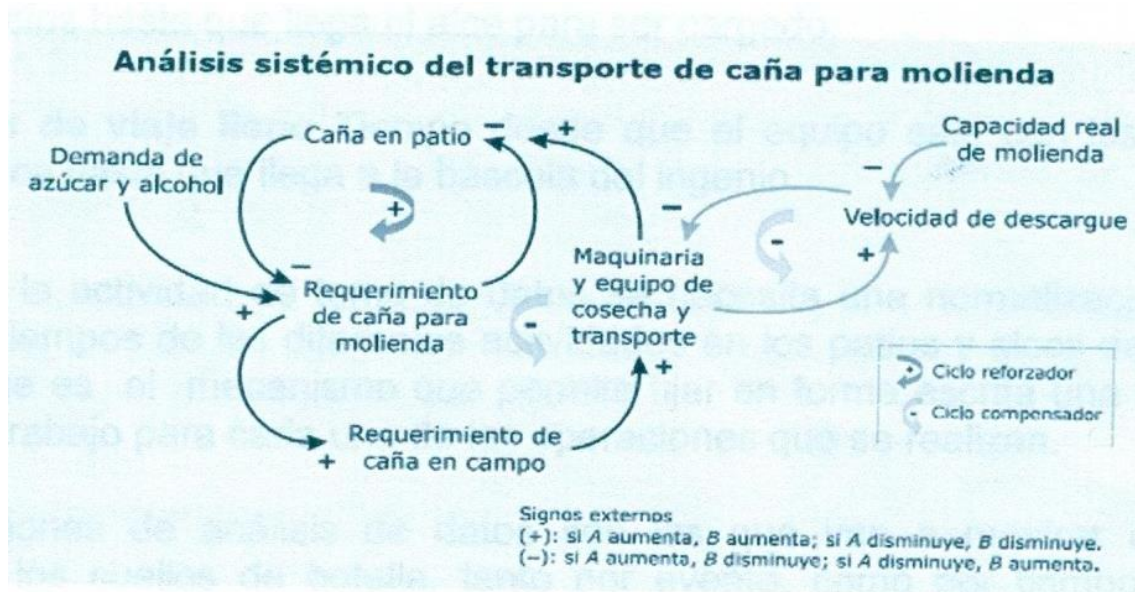


Figura 2 Estudio de transferencia de caña para Molienda

Fuente: Amú Caicedo, Luis Guillermo. Caracterización del transporte y recepción de caña. Santiago de Cali, 2007.

Los ingenios azucareros en Colombia trabajan las 24 horas y se abastecen de caña de diferentes sitios ubicados en el campo (sitio donde se recolecta la caña) a distancias que varían entre 2 y 100 km desde la fábrica (sitio donde se procesa la caña). Antes de la recolección, la caña puede ser cosechada de dos formas: corte manual, el cual es realizado por un trabajador (cortero) que con la ayuda de un machete corta los tallos de caña a ras del suelo, los descogolla (corte de la parte superior de la caña) y los acomoda en forma de esterilla a lo largo de los surcos. La otra forma es el corte mecanizado, para lo cual se utiliza una máquina especializada (cosechadora) que entra a los campos y entre los surcos corta la caña en trozos y la deposita directamente en los vagones.(Cenicaña, 2010)

El transporte de la caña se realiza con tractores o tracto mulas que halan vagones de diferentes tipos. Un tren es un conjunto formado por un vehículo y un número definido de vagones. Una cantidad de estos se asignan diariamente a los frentes de cosecha o grupo de máquinas y personal ubicados en el sitio donde se realiza el cargue de caña, de acuerdo con las distancias y la cantidad de caña a transportar. Después de que la caña llega a la fábrica, los vagones de cada tren son descargados antes de regresar al campo donde son cargados nuevamente.(Amú, Modelo de optimización y asignación de equipo de transporte y cosecha en el sistema de abastecimiento de caña , 2009)

Los costos de cosecha en los diferentes países donde se cultiva caña, representan una gran proporción de los costos totales de producción, alcanzando entre 25% y 35% del costo total (Weekes, 2004). La clave en la disminución de los costos de cosecha está en usar solo la maquinaria necesaria y en maximizar las toneladas transportadas por cada viaje.

La definición de las actividades y de los tiempos de las etapas del ciclo de cosecha se mencionan se da a continuación:

- **Tiempo en patio:** Es el tiempo que transcurre desde que el equipo pasa cargado por la báscula hasta que queda disponible para su retorno al campo.
- **Tiempo en alce:** Tiempo desde que el equipo llega al alce vacío, hasta que sale con los vagones llenos hacia la fábrica.
- **Tiempo de viaje vacío:** tiempo desde que el equipo sale del ingenio con los vagones vacíos hasta que llega al alce para ser cargado.
- **Tiempo de viaje lleno:** Tiempo desde que el equipo sale de los vagones llenos del alce hasta que llega a la báscula del ingenio.

Corte mecanizado de la caña de azúcar

El corte mecanizado integral de la caña de azúcar está en función de las siguientes variables: Diseño de campo, atributos de las variedades, la máquina cosechadora, el operario de la máquina, el mantenimiento y la logística del corte y del transporte.

Indicadores de desempeño de las cosechadoras

El desempeño de la cosechadora es afectado por diferentes condiciones que pueden ser controlables: variedad, labores culturales, diseño de campo, modificaciones o mejoramiento de la tecnología de los equipos o la logística, entre otros; y no controlables: algunas condiciones del suelo y clima, principalmente. Con la evaluación del desempeño de las cosechadoras se pretende cuantificar el impacto que dichos cambios ejercen en el sistema de cosecha.(Villegas, 2010)

Para evaluar el desempeño de una cosechadora se debe llevar acabo un registro continuo de todos los eventos relacionados con el desplazamiento de las máquinas y sus respectivos tiempos durante la operación de cosecha. Estos eventos son:

- Inicio cosecha de surco (IS)
- Inicio llenado del vagón (IV)
- Termina cosecha de surco (TS)
- Paro por atascamientos (PA)
- Espera de vagones, fábrica (EF)
- Paro por mantenimiento (PM)
- Paso por callejones (PC)
- Reinicio labor (RL)
- Paro por otras causas (OP)

Posteriormente, mediante la confrontación de eventos, se obtienen los tiempos totales por diferentes conceptos durante el periodo de evaluación de la cosechadora en una suerte, por variedad, o por cualquier condición particular de la máquina. Esos conceptos son:

- Trabajando (T)
- Giros (G)
- Tiempo perdido en callejones (C)
- Reparación (R)
- Espera de vagones, fábrica (F)
- Mantenimiento (M)
- Atascamiento (A)
- Otras pérdidas de tiempo (P)

El cadeneo en la suerte

El ciclo de cadeneo es de gran importancia debido a que de él depende la eficiencia de los equipos de alce o de corte, según sea el caso.

Cadeneo es una operación de cosecha que se realiza para el transporte en tracto mulas tanto de caña larga como de caña picada. Esta labor se da debido a que estos equipos de transporte no pueden entrar en los campos que están cosechando, para lo cual se utilizan tractores adicionales. El cadeneo se puede realizar directamente con los vagones que son transportados por las tracto mulas (CADENEO DIRECTO), o mediante el uso de vagones de autovolteo (CADENEO CON AUTOVOLTEO).

Actividades del ciclo de cadeneo

- Enganche de vagones de transporte vacíos.
- Transporte de vagones vacíos a sitio de descargue.

- Llenado de vagones.
- Transporte de vagones llenos a sitio de armado de tren y
- Desenganche de transporte llenos.

Actividades del ciclo de autovolteo.

- Transporte de vagones de autovolteo vacíos a sitios de descargue.
- Llenado de vagones de autovolteo.
- Transporte de vagones llenos a sitio de volteo y
- Llenado de vagones de transporte con vagones de autovolteo.

El número de tractores para el cadeneo en la suerte depende del tipo de cosecha, manual o mecanizado, la distancia de arrastre o distancia entre el sitio de llenado de los vagones y el sitio de donde se conforma el tren para ser transportados, la cantidad de alzadores o cosechadoras en la suerte, la capacidad de los vagones y el número de vagones que se halan por cada tractor de cadeneo.

El cálculo del número de tractores cadeneros por cada frente de cosecha se realiza teniendo en cuenta que las máquinas utilizadas para el alce y para el corte PIERDAN el MENOR TIEMPO POSIBLE, para lo cual es también importante contar con vagones adicionales en la suerte, trenes de avance, que se usan como amortiguador en el llenado de vagones mientras llegan equipos de transporte vacíos a la suerte. (Cenicaña, 2010)

Descargue en patios

El patio de caña es el sitio donde finaliza e inicia el ciclo de transporte. A este sitio llegan los vehículos cargados y son despachados a los frentes de cosecha.

En algunos ingenios se utilizan vagones adicionales en patio para la liberación de equipos y reducir los tiempos perdidos por espera en cargue y descargue. La práctica de usar estos vagones tanto en la suerte como en el patio es conocida como uso del tren de avance.

Actividades de un ciclo de patios

- Pesaje en báscula
- Muestreo
- Descargue o desenganche / enganche de vagones, si se usa tren de avance.
- Estación de servicios
- Tare y Despacho.

Durante la recolección de los datos, ya sea por medio de captura de información del software del ingenio, o por toma de datos en tiempo real, se deben estimar las variables que afectan el tiempo tanto en los patios de fábrica como en el campo y su comportamiento durante el ciclo de cosecha.

Algunas de las variables que se deben tener en cuenta son las siguientes:

- Capacidad de vagones (discreta). Afectada por la logística y legislación vial.
- Condiciones particulares por ingenio.
- Tasa de molienda.
- Tamaño y capacidades de grúas y mesas.
- Número de puntos de descarga.
- Tiempo de las diferentes actividades
- Tiempos perdidos
- Distancia entre sitios de corte y cargue
- Distancia entre los diferentes sitios donde se realizan las actividades

Variables en mesas

- Ancho
- Velocidad
- Inclinación 40-50 grados y 20 y 35 grados
- Opción de lavado
- Opción de limpieza en seco.

Teoría de Métodos y Tiempos

Método es la manera de hacer alguna tarea para obtener determinado resultado. Al observar metódicamente cada operación ejecutada por los operarios, Taylor, quien desarrolló esta teoría vio la posibilidad de descomponer cada tarea y cada operación de la misma en una serie ordenada de movimientos más sencillos. Eliminó los movimientos inútiles y simplificó, racionalizó o fusionó con otros movimientos los inútiles, para que el operario economizara tiempo y esfuerzo.

El estudio de tiempos y movimientos permite la racionalización de los métodos de trabajo del operario y la fijación de los tiempos estándar para la ejecución de tareas.

Ventajas del estudio de movimientos y tiempos

- Eliminación del desperdicio de esfuerzo humano y de movimientos inútiles.
- Racionalización de la selección y adaptación de los operarios a la tarea.

- Facilidad de entrenamiento para los operarios y mejoramiento de la eficiencia y el rendimiento de la producción gracias a la especialización de actividades.
- Distribución uniforme del trabajo para que no haya periodos en que este falle o sea excesivo.
- Definición de métodos y establecimiento de normas para la ejecución de las tareas.
- Tener una base uniforme para fijar salarios equitativos y conceder premios de producción. (Velandia & Garcia, 2012)

Diseño del trabajo

Por definición se establece que el objetivo del diseño del trabajo es aumentar la productividad con los mismos o menores recursos.

Los costos se establecen o se presentan cuando los recursos invertidos se utilizan a un nivel determinado de productividad: entonces, cuando la productividad crece, los costos disminuyen.

Este es el objetivo final que se persigue cuando se aplica la ingeniería de métodos o el estudio del trabajo en las empresas.

Productividad, un objetivo prioritario

El principal motivo para estudiar la productividad en la empresa es encontrar las causas que la deterioran y una vez conocidas, establecer las bases para incrementarla.

La productividad no es medida de la producción ni de la cantidad que se ha fabricado, sino de la **eficiencia** con que se han combinado y utilizado los recursos para lograr los resultados específicos deseables.

Por tanto la productividad puede ser medida según el punto de vista:

1° Productividad = Producción/ insumos

2° Productividad = Resultados logrados / recursos empleados

3° Productividad = Eficacia/ eficiencia → Valor (cliente) / costo (productor)

La eficiencia implica la obtención de resultados deseados y puede ser un reflejo de cantidades, calidad percibida o ambos. La eficiencia se logra cuando se obtiene un resultado deseado con el mínimo de insumos; es decir, se genera cantidad y calidad y se incrementa la productividad. De ello se desprende que la **eficacia** es

hacer lo correcto y la **eficiencia** es hacer las cosas correctamente con el mínimo de recursos.(García, 2005)

	Definición	Indicadores
Eficiencia	Es la capacidad disponible horas- hombre, horas- máquina para lograr la productividad. Se obtiene según los turnos que trabajaron en el horario correspondiente.	• Tiempos muertos • Desperdicio • Porcentaje utilización de la capacidad instalada.
Eficacia	Grado de cumplimiento de los objetivos, metas o estándares, etc.	• Grado de cumplimiento de los programas de producción o de ventas. • Demoras en los tiempos de entrega.

Las causas de los tiempos muertos, tanto en horas hombre- como en horas- máquina son las siguientes:

- Falta de material
- Falta de personal
- Falta de energía
- Manufactura
- Mantenimiento
- Producción
- Calidad
- Falta de información
- Otros

Mejoramiento de procesos

Una acción de mejora es toda acción destinada a cambiar la “forma en que queremos que ocurra” un proceso. Estas mejoras lógicamente se deben reflejar en una mejora de los indicadores del proceso. La gestión según los principios de Calidad Total utiliza un sinfín de técnicas y herramientas para provocar la mejora de los procesos de la organización. Algunas son creativas y basadas en la imaginación, otras se basan en técnicas estadísticas o en metodologías concretas, pero todas tienen en común el propósito de mejorar los procesos sobre los que se aplican.

Para mejorar un proceso hay que aplicar el ciclo de mejora PDCA (Plan, Do, Check, Act):

- **Planificar** los objetivos de mejora para el mismo y la manera en que se van a alcanzar.
- **Ejecutar** las actividades planificadas para la mejora del proceso.
- **Comprobar** la efectividad de las actividades de mejora.
- **Actualizar** la “nueva forma de hacer ocurrir el proceso” con las mejoras que hayan demostrado su efectividad.

También se deben seguir una serie de pasos tales como:

- Definir la forma de ejecutar el proceso: Definir un conjunto de pautas o de instrucciones sobre cómo debe ser ejecutado el proceso.
- Ejecutar las actividades del proceso; según las instrucciones anteriormente establecidas.
- Comprobar que el proceso se ha desarrollado según estaba previsto (según las instrucciones).
- Garantizar que la próxima repetición del proceso se va a desarrollar de acuerdo con las instrucciones.

Este ciclo de actividades garantiza que hay una “forma definida o estabilizada” de hacer las cosas y que efectivamente el proceso se ajusta a esta “forma estabilizada”.(EUSKALIT, 2008)

Optimización

La optimización, también denominada programación matemática, sirve para encontrar la respuesta que proporciona el mejor resultado, la que logra mayores ganancias, mayor producción, o la que logra el menor costo. Con frecuencia, estos problemas implican utilizar de la manera más eficiente los recursos, tales como dinero, tiempo, maquinaria, personal, existencias, etc. Los problemas de optimización generalmente se clasifican en lineales y no lineales, según las relaciones del problema con respecto a las variables. Existe una serie de paquetes de software para resolver problemas de optimización. Por ejemplo, LINDO o WinQSB resuelven modelos de programas lineales y LINGO y MATLABTM resuelven problemas lineales y no lineales.(Arsham, 1994)

¿Cómo abordar un problema real de optimización?

El término mejor resultado, aquí depende del contexto en el que se trabaje. Por ejemplo, en un contexto operativo atinente a las utilidades, la optimización del sistema constituye la maximización de los resultados, todo lo contrario a los costos o las distancias, casos en los cuales la optimización dependerá de la minimización de los resultados.

Programas lineales

La Programación Lineal corresponde a un algoritmo a través del cual se resuelven situaciones reales en las que se pretende identificar y resolver dificultades para aumentar la productividad respecto a los recursos (principalmente los limitados y costosos), aumentando así los beneficios. El objetivo primordial de la Programación Lineal es optimizar, es decir, maximizar o minimizar funciones lineales en varias variables reales con restricciones lineales (sistemas de inequaciones lineales), optimizando una función objetivo también lineal (Salazar, 2013)

Los resultados y el proceso de optimización se convierten en un respaldo cuantitativo de las decisiones frente a las situaciones planteadas. Decisiones en las que sería importante tener en cuenta diversos criterios administrativos como:

- Los hechos
- La experiencia
- La intuición
- La autoridad.

La presencia de una única función no lineal hace que el problema no pueda clasificarse como problema de programación lineal (Castillo, Conejo, Pedregal, García, & Alguacil, 2002). A veces, algunas variables pueden ser enteras y otras continuas, en este caso hablamos de programación lineal entera mixta.

Modelización

Un modelo es una abstracción o una representación de la realidad o un concepto o una idea con el que se pretende aumentar su comprensión, hacer predicciones y/o controlar/analizar un sistema. Cuando el sistema no existe, sirve para definir la estructura ideal de ese sistema futuro indicando las relaciones funcionales entre sus elementos. En la actualidad un modelo se define como un constructo basado en nuestras propias percepciones pasadas y actuales.

Los modelos se pueden clasificar según su grado de abstracción en:

- Modelos Abstractos (no físicos)
- Modelos Concretos (físicos)

Y se pueden clasificar igualmente si son matemáticos en:

- Estáticos
- Dinámicos
- Determinísticos
- Estocásticos (no determinísticos).



Figura 3 Representación de un modelo²

Uso de modelos y métodos de optimización

Representación de un modelo

Modelos Matemáticos

Se aplica una técnica matemática y se obtiene una representación simbólica del mismo. Un modelo matemático consta al menos de tres conjuntos básicos de elementos:

² Fuente: James, G. (16 de marzo de 2011). Investigación Operativa. Recuperado el junio de 2014, de Investigación Operativa: <http://germanjames.wordpress.com/2011/03/16/la-investigacion-de-operaciones-uso-de-modelos-y-metodos-de-optimizacion/>

Variables de decisión y parámetros

Las variables de decisión son incógnitas que deben ser determinadas a partir de la solución del modelo. Los parámetros representan los valores conocidos del sistema o bien que se pueden controlar.

Tipos de Variable

Variable discreta: son todos los enteros positivos y negativos. Por ejemplo el número de estudiantes.

Variable continua: son todos los reales. Por ejemplo la estatura y el peso.

Tipos de Decisión

Determinísticas: Son determinísticas cuando hay certeza de que va a ocurrir. Por ejemplo: ¿Hay sol mañana? Siempre hay sol a cualquier hora.

Probabilísticas: Son probabilísticas cuando no hay certeza de que ocurra. Por ejemplo ¿Cuántos pandebonos vendo mañana? No existe certeza ya que el resultado puede variar.

Restricciones

Las restricciones son relaciones entre las variables de decisión y magnitudes que dan sentido a la solución del problema y las acotan a valores factibles. Son las limitaciones de recursos.

Por ejemplo si una de las variables de decisión representa el número de empleados de un taller, es evidente que el valor de esa variable no puede ser negativo.

Función Objetivo

La función objetivo es una relación matemática entre las variables de decisión, parámetros y una magnitud que representa el objetivo o producto del sistema.

Esta se puede utilizar para maximizar o minimizar la función objetivo (Z).

Por ejemplo si el objetivo del sistema es minimizar los costos de operación, la función objetivo debe expresar la relación entre el costo y las variables de decisión. La solución ÓPTIMA se obtiene cuando el valor del costo sea mínimo para un conjunto de valores factibles de las variables. Es decir hay que determinar las variables $x_1, x_2, \dots, x_n$ que optimicen el valor de $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sujeto a restricciones de la forma $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ multiplicado por el costo b ; donde $x_1, x_2, \dots$,

x_n son las variables de decisión Z es la función objetivo, f es una función matemática.

Pasos del Método científico en Investigación de operaciones

1. Definición del problema.

Desde el punto de vista de la Investigación de operaciones (IO), esto indica tres aspectos principales: (a) Una descripción de la meta o el objetivo del estudio, (b) Una Identificación de las alternativas de decisión y (c) Un reconocimiento de las limitaciones, restricciones y requisitos del sistema.

2. Construcción del Modelo.

Dependiendo de la definición del problema, se deberá decidir sobre el modelo más adecuado para representar el sistema (modelo matemático, modelo de simulación; combinación de modelos matemáticos, de simulación y heurísticos).

3. Solución del Modelo.

En modelos matemáticos esto se logra usando técnicas de optimización bien definidas y se dice que el modelo proporciona una solución óptima. Si se usan los modelos de simulación o heurísticos el concepto de optimización no está bien definido, y la solución en estos casos se emplea para obtener evaluaciones aproximadas de las medidas del sistema.

4. Validación del Modelo.

Un modelo es válido si, independientemente de sus inexactitudes al representar el sistema, puede dar una predicción confiable del funcionamiento del sistema.

5. Implantación de los resultados Finales.

Esto básicamente implicaría la traducción de estos resultados en instrucciones de operación detallada, emitidas en una forma comprensible a los individuos que administraran y operaran el sistema después. (James, 2011)

Una solución eficiente y exacta con este problema depende no sólo del tamaño del problema en términos del número de restricciones y variables de diseño sino también de las características de la función objetivo y sus restricciones. (Omela & Williams, 2007)

METODOLOGIA

Esta investigación es descriptiva, porque busca conocer las situaciones a través de la descripción exacta de las actividades, objetos y procesos. Su meta no se limita a la descripción de datos sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables. Tiene fuentes primarias porque los datos se toman en campo directamente y también fuentes secundarias porque se toma información de textos y escritos ya elaborados.

La primera actividad del proyecto fue la impresión de los formatos donde están especificadas las actividades de los procesos en estudio, para iniciar con la toma de tiempos.

Para la recolección de los datos, inicialmente se realizó la definición de las condiciones de trabajo:

- Método de toma de tiempos
- En qué intervalo de tiempo
- En qué condiciones de trabajo

Parámetros de los eventos

Después de haber definido y verificado las condiciones de trabajo, se inició con la toma de los tiempos en las zonas de cargue (campo) y descargue (fábrica), mediante la observación del comportamiento de los equipos y de las operaciones realizadas en los alces estudiados y en los patios de fábrica. Se tomó el tiempo de cada actividad realizada por las tractomulas en el patio del ingenio, desde que entran al patio hasta que vuelven a salir al alce nuevamente. En campo, se tomó el tiempo de cada una de las actividades correspondientes al cargue de los trenes cañeros y el tiempo de las diferentes operaciones que realiza la cosechadora.

Paralelo a lo anterior se generaron reportes diarios y semanales de los datos y de las observaciones realizadas.

Análisis de los datos

Se realizó un análisis estadístico de los datos tomados por actividad de los procesos: recepción de caña picada y caña larga en los patios de fábrica, cargue con autovolteo, cargue haciendo cadeneo y corte de la cosechadora. Se registró la información en cuadros, y se hizo una representación gráfica, para mostrar de manera clara el comportamiento de los datos obtenidos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis estadístico, se identificaron los cuellos de botella y los tiempos muertos que afectan la productividad de los procesos del sistema de cosecha estudiados y a partir de esto, se definió el problema para plantear una solución óptima.

Método de mejoramiento

Para obtener una solución del problema se elaboró un modelo de programación lineal entera mixta.

Para la realización del modelo, se inició con el planteamiento de la función objetivo, las variables de decisión y las restricciones del modelo; luego se hizo el modelamiento matemático para ingresar los datos al software seleccionado y finalmente se obtuvo una solución.

Caracterización del proceso de cosecha del ingenio azucarero en estudio

El área de Cosecha es la encargada de realizar la programación y ejecución de las labores de corte, alce y transporte de aproximadamente 10.000 toneladas de caña por día, cumpliendo con los estándares de calidad, oportunidad, legislación ambiental y bajo costo.

La programación de las cañas a cosechar se hace seleccionando los cultivos con mayor grado de madurez, con base en los resultados de muestreos hechos en el campo. Una vez seleccionado un campo para la cosecha, se determina si se realiza la quema del lote o suerte dando cumplimiento a la legislación ambiental y al protocolo para efectuar una quema de caña, o si se corta verde.

Esta labor de quema del lote o suerte, se hace con el apoyo de una red de 34 estaciones meteorológicas, que son consultadas en tiempo real para determinar la velocidad, la dirección del viento y la hora apropiada para realizar la quema de manera segura.

En el proceso de corte de caña se utilizan técnicas manuales y mecanizadas.

En este trabajo sólo se estudió la cosecha mecanizada correspondiente al corte de caña picada.

Proceso de cosecha mecanizada de la caña de azúcar

El proceso de cosecha mecanizada inicia cuando la hacienda ya tiene su punto de corte. Por lo tanto el ingenio programa a los diferentes alces para ir a cosechar la caña de azúcar. El alce se encarga de realizar el traslado a dicha hacienda por medio de una logística que cuenta con un equipo de apoyo que le facilita el servicio. Para esto, se cuenta con dos equipos de cama baja, tres tracto mulas, tres cosechadoras por alce, dos tractores por cosechadora y dos carros los cuales se convierten en escoltas que permiten hacerle un seguimiento del proceso. También se cuenta con un supervisor del alce, doce repicadores de caña que ayudan al proceso de la máquina cosechadora y dos ayudantes de oficios varios.

Cuando se llega a la hacienda, los supervisores de campo miran el terreno y buscan donde alojar los vagones (conocido como patio en los alces). Después buscan la mejor opción para abrir brecha (es el inicio de la cosecha), utilizando un tractor y una cosechadora. Después de abrir brecha, ya tranzas un programa de cómo va hacer la cosecha en el alce.

Maquinaria utilizada

- Cosechadora de caña con potencia entre 300 y 380 HP.
- Tractor Cadenero con potencia de 225 HP.
- Motoniveladora con potencia de 140 HP.
- Tractomula con potencia de 350 HP.

Equipos utilizados

- Góndola: Transporte del personal que participa en el proceso.
- Tanque de agua para lavado del equipo.
- Tanque de combustible.
- Remolque
- Semiremolque
- Dollys
- Equipo de oxicorte
- Compresor
- Semáforos con batería, conos reflectivos, avisos preventivos.
- Canasta autovolteo.
- Camabaja para transporte de maquinaria.
- Pala metálica con enganche.
- Tanque de riego para vías.
- Extintor multipropósito ABC de 10 lbs.
- Botiquín

Herramientas utilizadas

- Llaves: Bocafiga, pesto, estrella (pulgada, milimétrica).
- Destornillador.
- Alicates
- Taladro
- Pistola Neumática
- Juego de Copas milimétrica
- Juego de Copas cuadrante de media
- Linterna
- Machete.
- Radio teléfonos.
- Cepillos con cerdas metálicas.

Materiales utilizados

- ACPM Para combustible de las cosechadoras, tractores, tractomula.
- Grasa para lubricar articulaciones de la maquinaria.
- Aceite hidráulico
- Aceite de Motor
- Agua
- Libretas
- Lapiceros
- Gasolina
- Bolsas para residuos

Cargue del tren cañero con caña picada

Labor de autovolteo

Esta labor consiste en el uso de un tractor y un vagón con un sistema de descarga lateral de capacidad de 8 toneladas para llenar los vagones del tren cañero.

Labor de cadeneo

El tractor hace la labor de cadeneo. El cadeneo está conformado por un tractor y un remolque (vagón de 12 toneladas) o semi-remolque (vagón de 20 toneladas).

Este equipo tanto para la labor de autovolteo como para la labor de cadeneo, va siempre de la mano de la cosechadora. El tractor va al lado de la cosechadora, mientras el vagón se llena con la estera de la cosechadora. Mientras el vagón se está llenando, hay otro tractor esperando, cuando se termina de llenar el vagón, la cosechadora reposa x unos instantes mientras llega el tractor que estaba en espera y se repite el ciclo.

Una vez se llene el vagón sigue el proceso de transporte. El vagón llega al patio donde se encuentran otros vagones tanto llenos como vacíos y gracias a un grupo de ayudantes van llenando los vagones del tren (en el caso de la labor de autovolteo) o formando el tren (en el caso de la labor de cadeneo)

Cargue de un tren conformado por cuatro vagones 24000 (vagones de 24 toneladas) de descarga lateral (labor de autovolteo).

Un vagón 24000 se llena con tres vagones de autovolteo de 8 toneladas. El tractor con el vagón de 8 toneladas cargado se acomoda al lado del vagón 24000 del tren y descarga la caña en su interior.

Después la tractomula con los vagones llenos sale del alce con ayuda de los guardavías que le facilita la entrada y la salida del alce a las carreteras e inicia su ruta hacia el ingenio.

Formación de un tren conformado por tres remolques (vagón de 12 toneladas) y un semi-remolque (vagón de 20 toneladas).

El tren cañero se inicia con los remolques de atrás hacia adelante hasta completar con el semi-remolque. Cuando este ya esté armado con los vagones cargados, llega una tractomula y los engancha a un kinpin y revisan que todo quede bien asegurado. Después la tractomula sale del alce con ayuda de los guardavías que le facilita la entrada y la salida del alce a las carreteras e inicia su ruta hacia el ingenio.

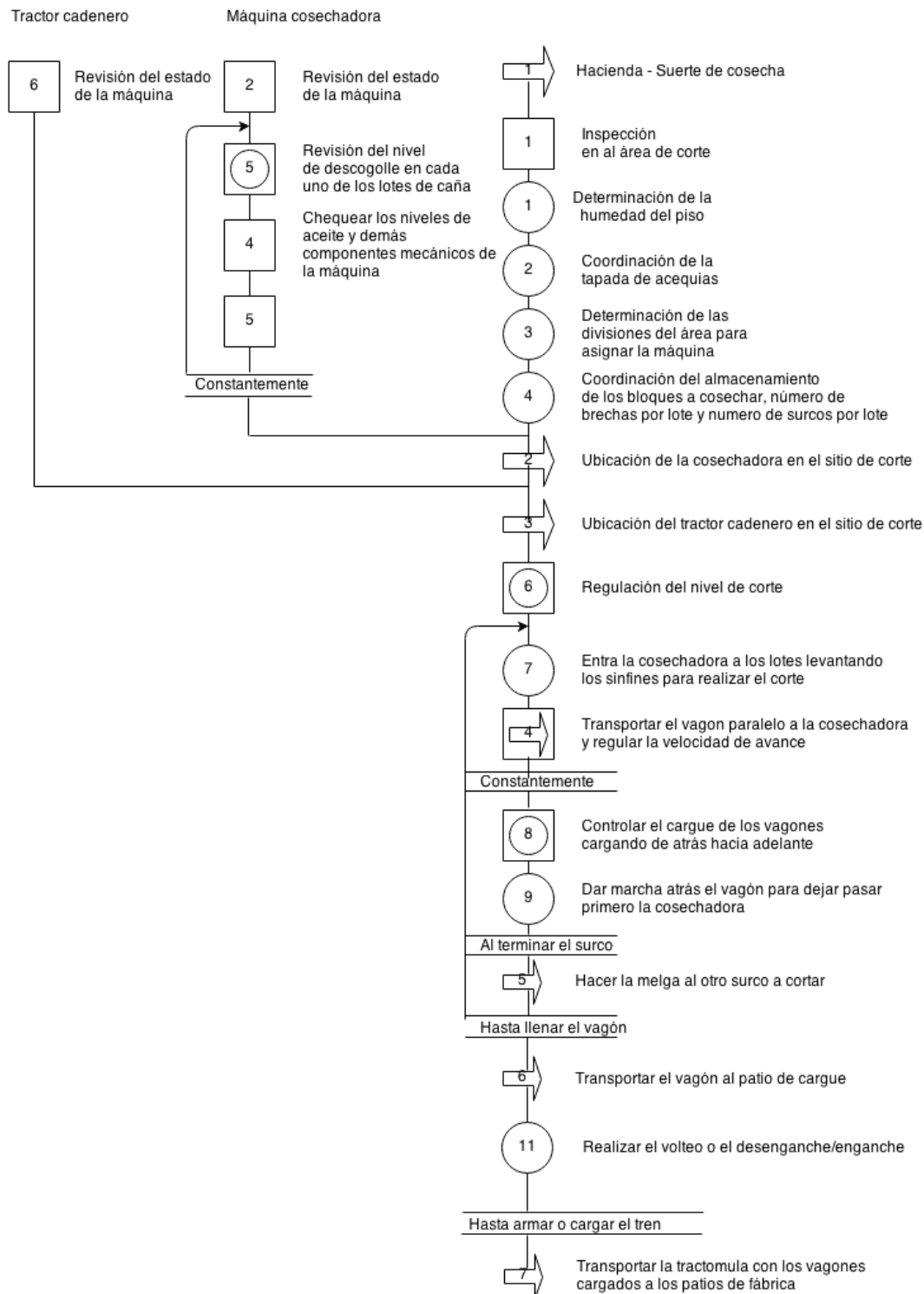


Figura 4 Diagrama de operaciones del proceso de cargue de caña picada en campo

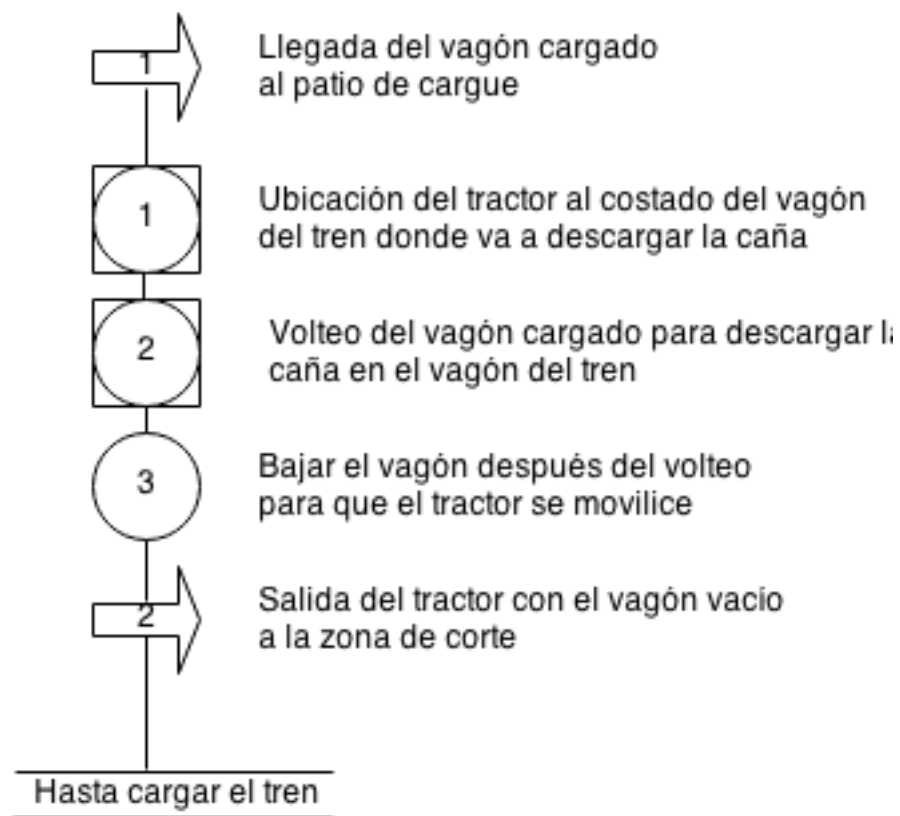


Figura 5 Diagrama de operaciones del proceso de volteo de los vagones de autovolteo.

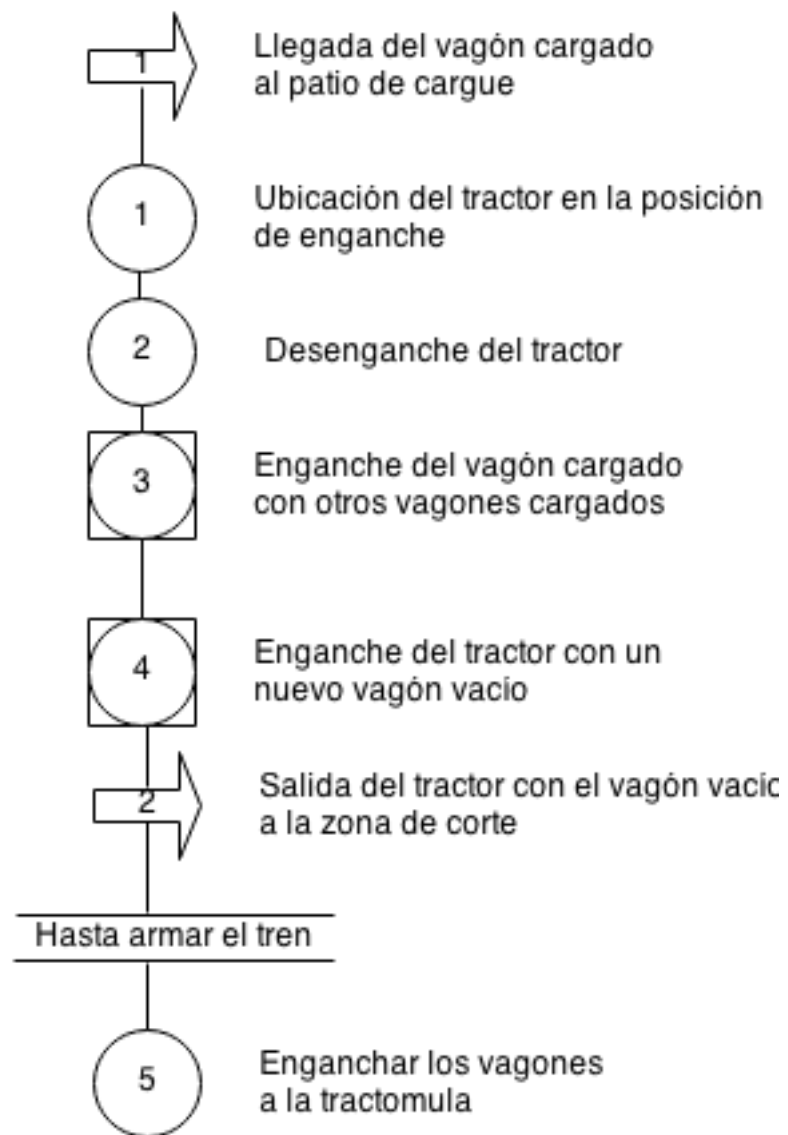


Figura 6 Diagrama de operaciones del proceso de desenganche/enganche de los vagones semi-remolque (20 ton) y remolque (12 ton).

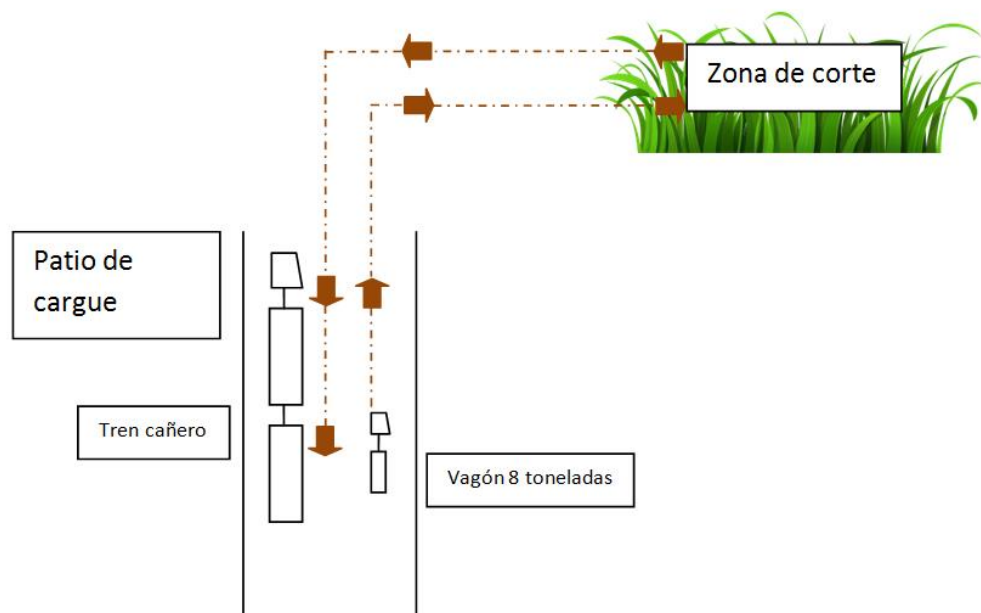


Figura 7 Diagrama de recorrido de los vagones de autovolteo en el campo

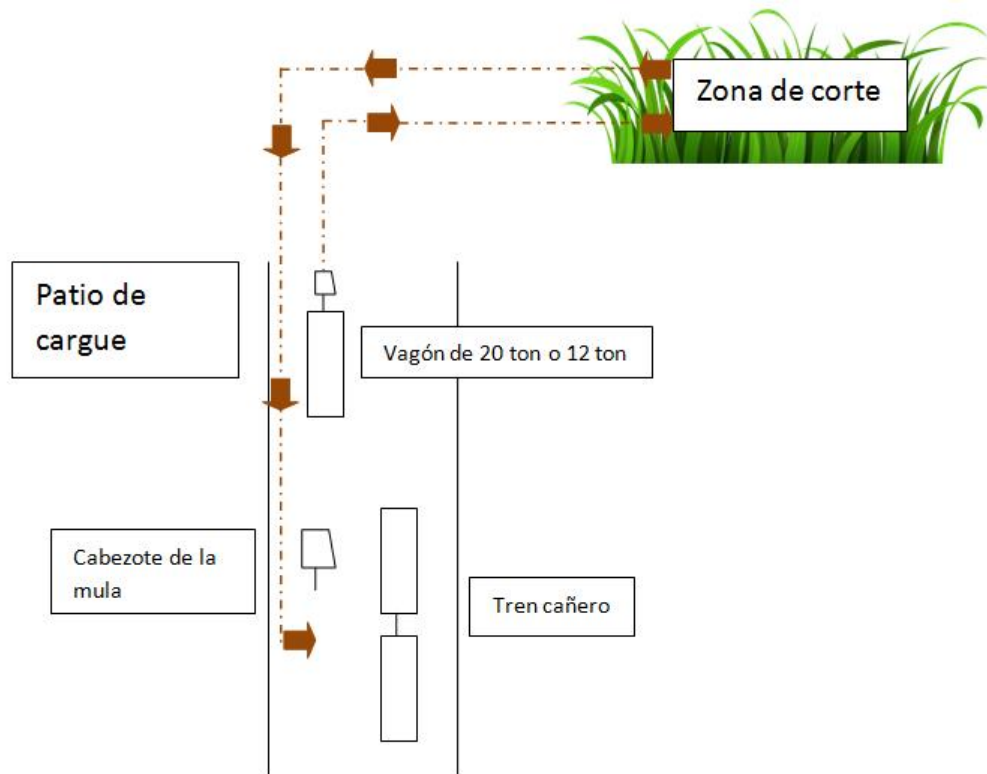


Figura 8 Diagrama de recorrido de los vagones semi-remolque (20 ton) y remolque (12 ton) en el campo

Proceso de recepción de la caña de azúcar en los patios del ingenio

La caña que llega del campo se pesa en las básculas del ingenio, luego se muestra en el Core Sampler con el propósito de conocer su calidad, por último se almacena en los patios o se dispone en las mesas de caña para ser llevada al molino a través de los conductores de caña.

En su camino hacia el molino, la caña es preparada por una picadora y una desfibradora que entregan la caña al molino con mejor índice de preparación, para facilitar la extracción del jugo y mejorar la eficiencia de la misma.

Equipos utilizados

- Básculas
- Core Sampler
- Mesas
- Grúas
- Equipos de alce de caña

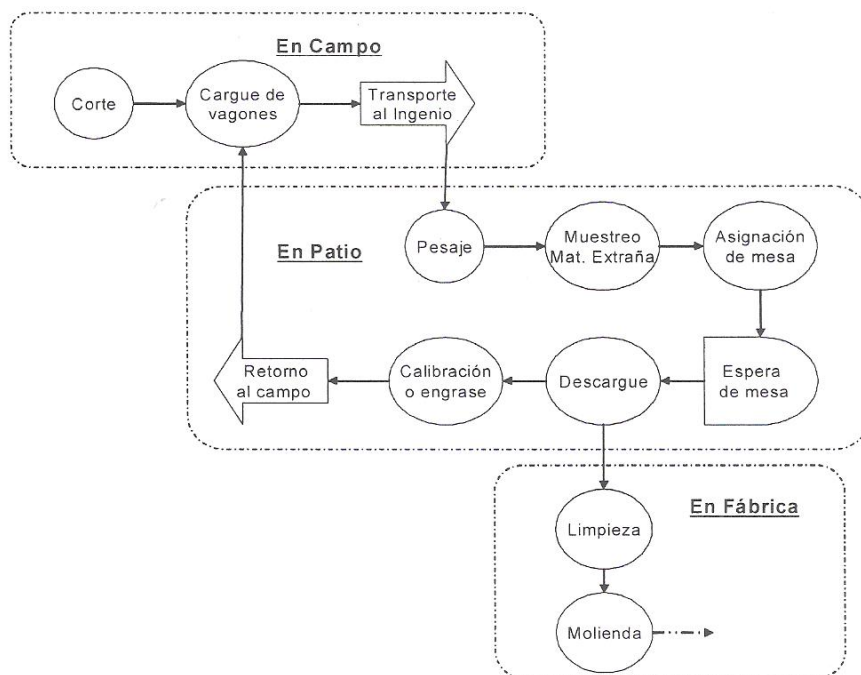


Figura 9 Diagrama de operaciones del proceso de suministro de la caña de azúcar a fábrica.³

³ Autor: Luis Guillermo Amú

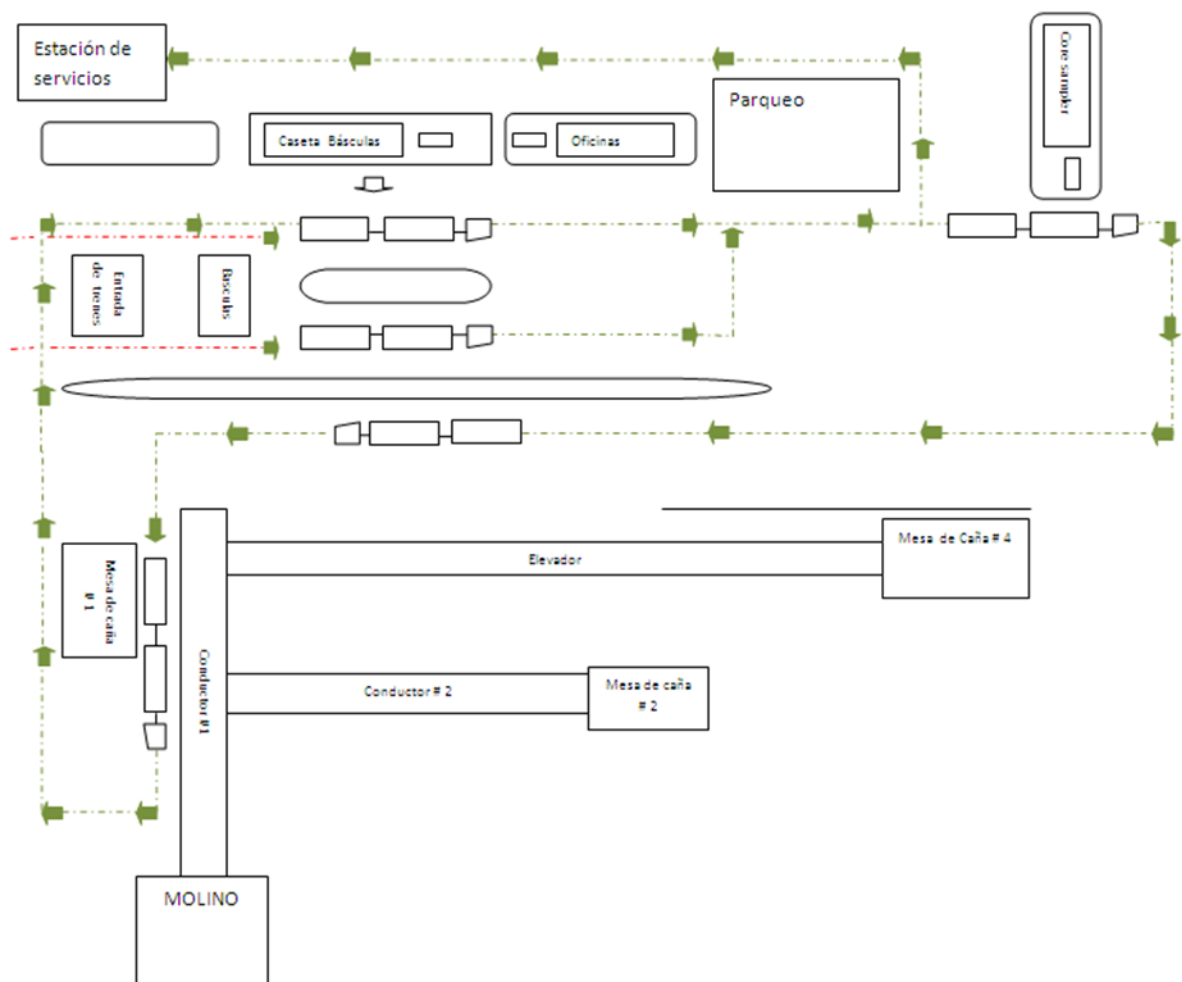


Figura 10 Diagrama de recorrido de los trenes con caña picada en los patios de la fábrica

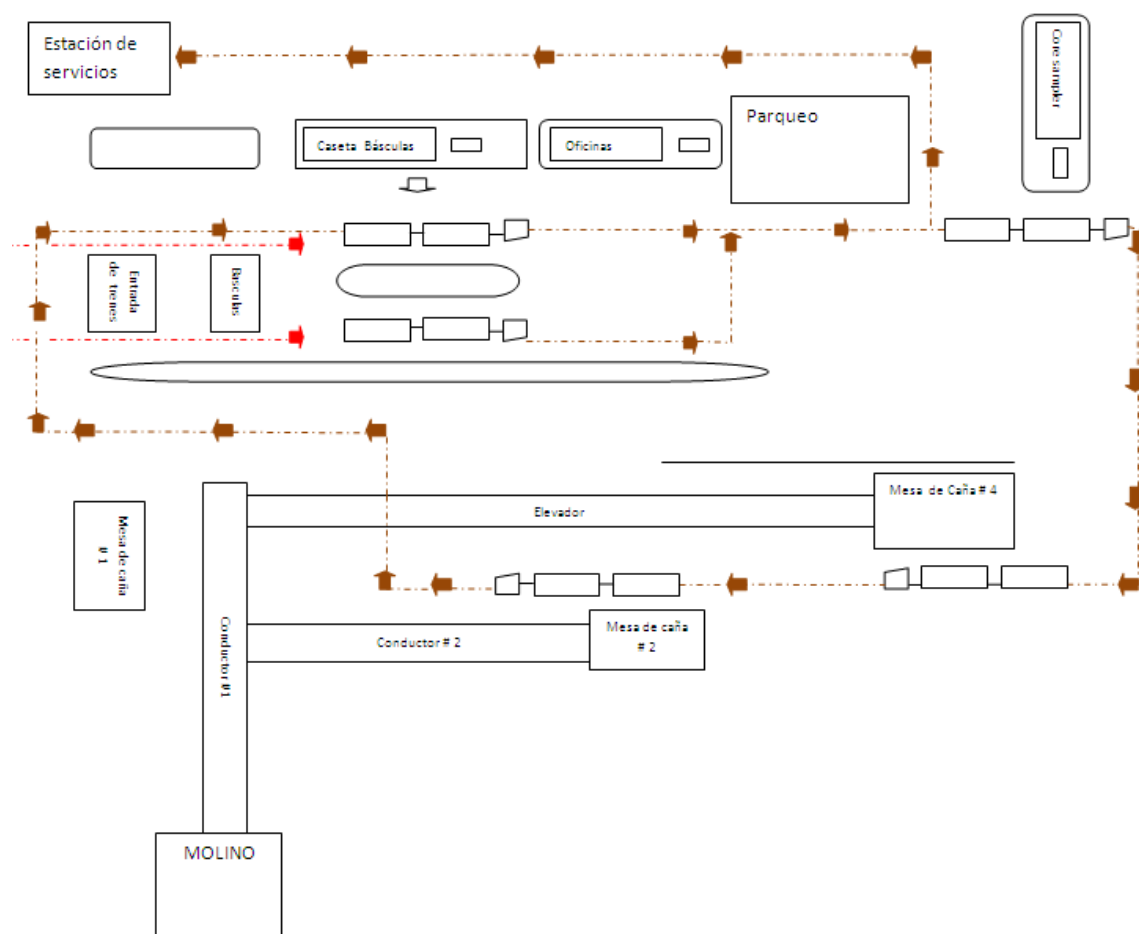


Figura 11 Diagrama de recorrido de los trenes con caña larga en los patios de la fábrica.

El recorrido de las tractomulas en los patios de fábrica inicia con la entrada a báscula, luego a muestreo y seguidamente a los lugares de almacenamiento de la caña o a la zona de descarga correspondiente a la caña picada (mesa # 1) o el correspondiente a la caña larga (mesa #2). Después de que la tractomula descarga, se dirige nuevamente a la báscula para tarar (pesaje de los vagones vacíos) y por último se dirige a la estación de servicios para calibrar, tanquear o lavar la tractomula. Finalmente sale del ingenio al alce nuevamente.

DIAGNÓSTICO Y ANÁLISIS

La recolección de los datos se realizó durante 3 meses y 3 días (febrero/2014 a abril/2014).

Cuadro 1 Cantidad de datos tomados de los procesos del sistema de cosecha

Lugar	Descripción	Cantidad de datos	Número de ciclos	Total N° de datos	Total N° de ciclos
Patios de Fábrica	Descargue de caña picada	790	95	1.179	183
	Descargue de caña larga	323	39		
	Estación de Servicios	66	49		
Campo	Autovolteo	442	88	3.372	276
	Cadeneo	520	63		
	Cosechadoras	2351	106		
	Tractomulas	59	19		

Análisis estadístico de los datos tomados en los patios de fábrica

El análisis estadístico de los datos tomados en los patios del ingenio, se relaciona a continuación:

Cuadro 2 Tiempos promedio de las actividades del proceso de recepción de caña en patios de fábrica

	Tiempo total en báscula (min)	Tiempo total de movilización a muestreo (min)	Tiempo total en muestreo (min)	Tiempo total de espera para descargue (min)	Tiempo total de descargue (min)	Tiempo total de despacho (min)	Tiempo total de ciclo (min)	Tiempo total de ciclo en horas
Caña Picada	4.77	0.97	2.59	30.30	17.51	10.53	89.26	1.49
Caña Larga	6.17	0.92	2.57	60.08	36.65	8.87	147.91	2.47
General: (caña picada y larga)	5.19	0.96	2.59	38.93	22.62	10.05	106.33	1.77

En el cuadro 2: Tiempos promedio de las actividades del proceso de recepción de caña en patios de fábrica, se muestra el tiempo promedio de cada actividad del proceso de recepción de la caña en los patios de fábrica. De la información registrada en el cuadro anteriormente mencionado es importante destacar que el tiempo promedio del ciclo total de recepción de la caña larga (2.47 horas) es mayor que el de la caña picada (1.49 horas). Esto se debe en parte, a que el tiempo promedio de espera para descargue de la caña larga es el doble del tiempo promedio de espera para descargue de la caña picada, ya que el descargue de la caña picada tiene prioridad porque pierde en el tiempo mayor porcentaje de sacarosa. Teniendo en cuenta lo anterior y que se cuenta con un solo conductor para la entrada de la caña al molino, el tiempo promedio del descargue de la caña larga también es mayor al tiempo promedio del descargue de la caña picada; lo cual también genera que el ciclo sea mayor.

De acuerdo a los datos tomados en un día normal de trabajo, donde se hace recepción de caña larga y caña picada, el promedio del tiempo total del ciclo es de una hora y cuarenta y seis minutos. Este tiempo de ciclo es afectado principalmente por el tiempo de permanencia de las tractomulas en la zona de descargue y en la estación de servicios; lo cual influye el número de viajes que estas realizan.

Del tiempo promedio de ciclo en patios para el caso de la caña picada el 33.89 % corresponde a tiempo improductivo. Para el caso de la caña larga representa el 40.53%. Este tiempo improductivo corresponde a los tiempos de espera que se generan principalmente en la zona de descargue.

Respecto a los tiempos promedio por actividad se dedujo lo siguiente:

- El tiempo promedio de la caña larga en báscula es mayor al tiempo promedio de la caña picada en báscula. Esto se debe a que generalmente el número de vagones de las tractomulas que transportan caña larga es mayor que el de las tractomulas que transportan caña picada; y se hace el pesaje de varios de ellos.
- Los tiempos promedios de movilización a muestreo y de muestreo de caña picada y caña larga no presentan diferencias significativas.
- El tiempo promedio más alto en el ciclo de recepción de la caña picada, es el tiempo promedio de espera para descargar. Esto se debe a que el tiempo de llegada de las tractomulas ocurre aleatoriamente y no hay un mecanismo estandarizado que permita liberar las tractomulas para generar mayor flujo del transporte. También hay que tener en cuenta que fábrica marca el ritmo de molienda y que esta puede aumentar o disminuir, haciendo que el tiempo de descargue aumente o disminuya.
- El tiempo promedio de espera para el descargue de la caña larga es alto. Debido a que la caña picada representa alrededor del 70% del ingreso de caña a la fábrica, el descargue se da en mayor cantidad haciendo más lento el descargue de la caña larga y aumentando el tiempo de espera para descargar.
- El tiempo promedio de despacho de la tractomula para caña larga es menor que el tiempo de despacho de la tractomula para caña picada. Esto se debe a que generalmente las tractomulas que transportan caña larga no taran para salir al alce nuevamente. Contrariamente, las tractomulas que transportan caña picada taran generalmente antes de salir y en ocasiones deben esperar a que la báscula esté disponible.
- Los tiempos de espera para el descargue (36,7%del tiempo total promedio de ciclo) y el tiempo de permanencia de las tractomulas en la estación de servicios (24,4%del tiempo total promedio de ciclo) representan la mayor parte del tiempo de las tractomulas en los patios de fábrica.

Cuadro 3 Estadística descriptiva: Moda, desviación estándar, mínimo y máximo.

CAÑA PICADA	Tiempo total en báscula (min)	Tiempo total de Movilización a muestreo (min)	Tiempo total en muestreo (min)	Tiempo total de espera para descargue (min)	Tiempo total de descargue (min)	Tiempo total de despacho (min)	Tiempo total de ciclo (min)	Tiempo total de ciclo en horas
Moda	3	1	2	22	17	1	55	0.92
Desviación estándar	2.11	1.65	0.96	29.48	6.24	10.42	28.05	0.47
Mínimo	1	0	0	1	6	1	29	0.48
Máximo	18	11	6	216	56	67	222	3.70
CAÑA LARGA								
Moda	7	1	2	10	28	2	51	0.85
Desviación estándar	2.65	1.83	1.17	81.62	17.21	8.19	97.69	1.63
Mínimo	1	0	0	1	16	1	40	0.67
Máximo	13	14	7	401	83	29	463	7.72
GENERAL: (CAÑA PICADA Y LARGA)								
Moda	3	1	2	22	18	1	64	1.07
Desviación estándar	2.36	1.70	1.03	51.98	13.36	9.83	63.23	1.05
Mínimo	1	0	0	1	6	1	29	0.48
Máximo	18	14	7	401	83	67	463	7.72

En el cuadro 3: Estadística descriptiva: Moda, desviación estándar, mínimo y máximo, se muestran los cálculos de la moda, la desviación estándar, el máximo y el mínimo de los tiempos tomados a las actividades del proceso de la recepción de la caña en los patios de fábrica. De acuerdo a los resultados obtenidos lo más relevante a destacar, es que los tiempos de espera para descargar presentan la mayor dispersión de los tiempos tomados en los patios de fábrica. Este tiempo de espera puede ser desde 1 minuto hasta 4 horas para el descargue de la caña picada y desde 1 minuto hasta 7 horas para el descargue de la caña larga.

El aumento de estos tiempos de espera tiene relación directa con la prolongación del tiempo de descargue. Esto depende del estado de funcionalidad de la fábrica, la habilidad del operador de las mesas, la entrada de la caña en el conductor, entre otras.

De acuerdo a la estadística descriptiva de los tiempos tomados por actividad lo más relevante a mencionar es:

Tiempo total en Báscula

- El tiempo más frecuente del evento en báscula para caña picada es de 3 minutos, para caña larga 7 minutos y tomando en general los tiempos de caña picada y caña larga, el tiempo más frecuente es 3 minutos.
- La dispersión promedio de los tiempos del evento en báscula con respecto a la media es de aproximadamente 2 minutos para caña picada, 3 minutos para caña larga y tomando en general caña picada y caña larga es de aproximadamente 2 minutos.
- El valor mínimo de tiempo del evento en báscula tanto para caña picada como para caña larga es 1 minuto.
- El valor máximo de tiempo del evento en báscula para caña picada es 18 minutos y para caña larga 13 minutos.

Movilización a muestreo

- El tiempo más frecuente de movilización de la tractomula a muestreo tanto con caña picada como con caña larga es de 1 minuto.
- La dispersión promedio de los tiempos de la movilización de la tractomula a muestreo con respecto a la media es de aproximadamente 2 minutos tanto para caña picada como para caña larga.
- El valor mínimo de tiempo de movilización de la tractomula a muestreo tanto con caña picada como con caña larga es 0 minutos; es decir que el tiempo de la movilización pueden ser segundos.
- El valor máximo de tiempo de movilización de la tractomula a muestreo con caña picada es 11 minutos y con caña larga es 14 minutos. Estos valores son de esta magnitud, debido a la generación de una cola en la entrada a muestreo o porque el conductor de la mula paró antes de entrar a muestreo.

Tiempo total en muestreo

- El tiempo más frecuente del evento en muestreo tanto para caña picada como para caña larga es de 2 minutos.
- La dispersión promedio de los tiempos del evento en muestreo con respecto a la media es de aproximadamente 1 minuto tanto para caña picada como para caña larga.
- El valor mínimo de tiempo del evento en muestreo tanto para caña picada como para caña larga es 0 minutos; es decir que el tiempo de la movilización pueden ser segundos.

Tiempo de espera para descargue

- El tiempo de espera más frecuente para el descargue de caña picada es de 22 minutos y de caña larga 10 minutos.
- La dispersión promedio de los tiempos de espera para descargue con respecto a la media es de aproximadamente 30 minutos para caña picada, 82 minutos (1 hora y 22 minutos) para caña larga y tomando en general caña picada y caña larga es de aproximadamente 52 minutos.
- El valor mínimo de tiempo de espera para descargue tanto de caña picada como de caña larga es 1 minuto.
- El valor máximo de tiempo de espera para descargue de caña picada es 216 minutos (3 horas y 36 minutos) y el de caña larga 401 minutos (6 horas y 41 minutos).

Tiempo total de descargue

- El tiempo más frecuente de descargue de caña picada es de 17 minutos, de caña larga 28 minutos y tomando en general caña picada y caña larga, el tiempo más frecuente es 18 minutos.
- La dispersión promedio de los tiempos de descargue con respecto a la media es de aproximadamente 6 minutos para caña picada, 17 minutos para caña larga y tomando en general caña picada y caña larga es de aproximadamente 13 minutos.
- El valor mínimo de tiempo de descargue de caña picada es 6 minutos y el de caña larga 16 minutos.

- El valor máximo de tiempo de descargue de caña picada es 56 minutos y el de caña larga 83 minutos (1 hora y 23 minutos).

Tiempo de despacho de la tractomula

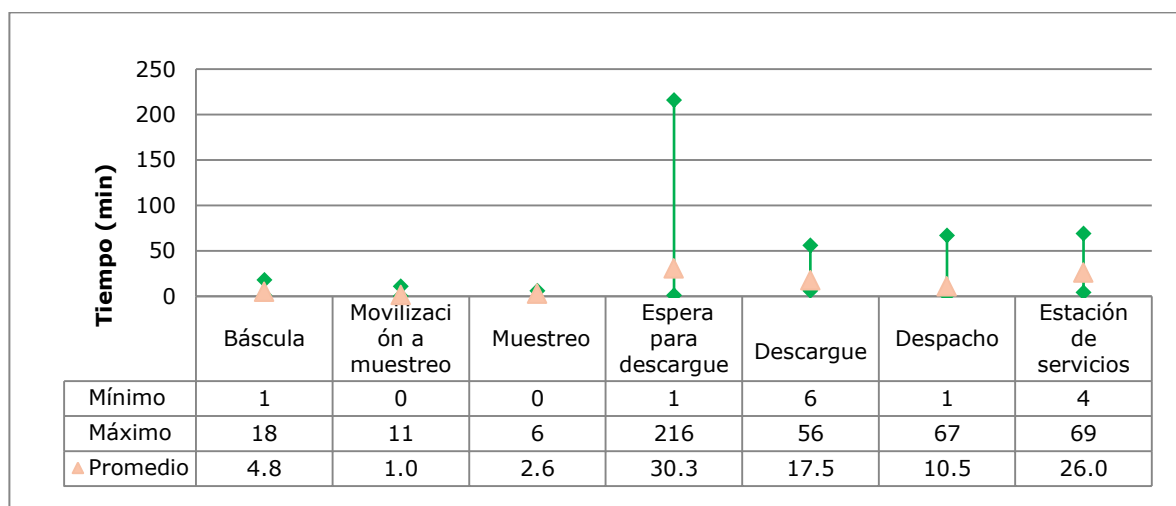
- El tiempo más frecuente de despacho de la tractomula para caña picada es de 1 minuto, para caña larga 2 minutos y tomando en general caña picada y caña larga, el tiempo más frecuente es 1 minuto.
- La dispersión promedio de los tiempos de despacho de la tractomula con respecto a la media es de aproximadamente 10 minutos para caña picada, 8 minutos para caña larga y tomando en general caña picada y caña larga es de aproximadamente 10 minutos.
- El valor mínimo de tiempo de despacho de la tractomula tanto para caña picada como para caña larga es 1 minuto.
- El valor máximo de tiempo de despacho de la tractomula para caña picada es 67 minutos (1 hora y 7 minutos) y para caña larga 29 minutos.

Tiempo total de ciclo

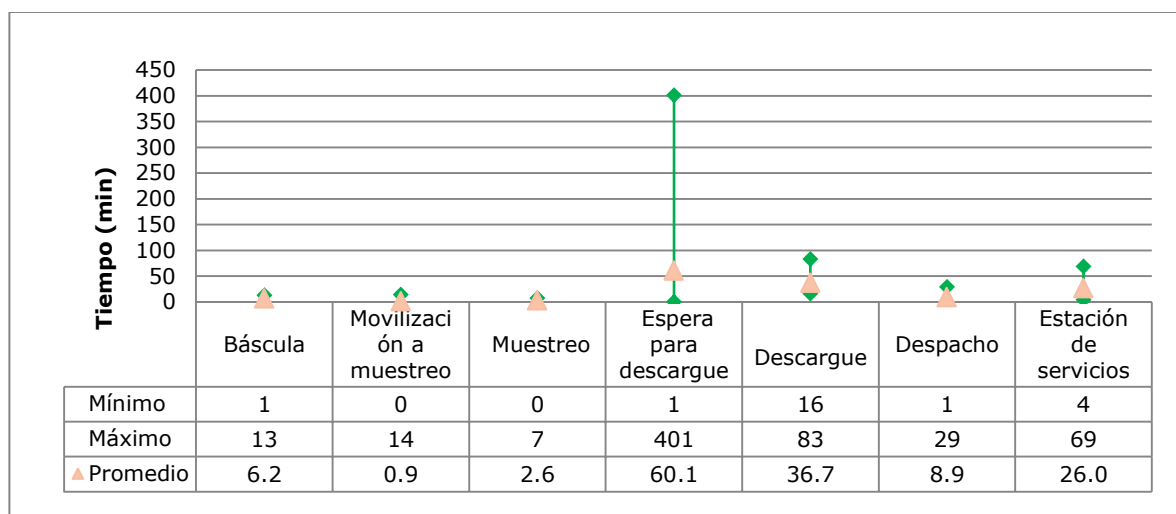
- El tiempo total de ciclo más frecuente de recepción de caña picada es de 55 minutos, de recepción de caña larga 51 minutos y tomando en general los tiempos totales de ciclo de recepción de caña picada y caña larga, el tiempo más frecuente es 64 minutos (1 hora y 4 minutos).
- La dispersión promedio de los tiempos totales de ciclo de recepción de caña con respecto a la media es de aproximadamente 28 minutos para caña picada, 98 minutos (1 hora y 38 minutos) para caña larga y tomando en general caña picada y caña larga es de aproximadamente 63 minutos (1 hora y 3 minutos).
- El valor mínimo de tiempo total de ciclo de recepción de caña picada es 29 minutos y el de caña larga 40 minutos.
- El valor máximo de tiempo total de ciclo de recepción de caña picada es 222 minutos (3 horas y 42 minutos) y el de caña larga 463 minutos (7 horas y 43 minutos).

En los cuadros mostrados a continuación están relacionados los tiempos promedio y los tiempos máximos y mínimos por actividad del proceso de recepción tanto de caña picada como de caña larga.

Cuadro 4 Relación de los tiempos promedio, máximos y mínimos de las actividades del proceso de recepción de caña picada⁴



Cuadro 5 Relación de los tiempos promedio, máximos y mínimos de las actividades del proceso de recepción de caña larga⁵



⁴ Autor: Alejandro Estrada Bedón, Ingeniero logístico Proyecto CATE Cenicaña

⁵ Autor: Alejandro Estrada Bedón, Ingeniero logístico Proyecto CATE Cenicaña

Análisis estadístico de los datos tomados en campo

El análisis estadístico de los datos tomados en campo, se relaciona a continuación:

Cuadro 6 Tiempos promedio de las actividades del proceso de cargue de caña picada en campo

	Tiempo total de recorrido en vacío (min)	Tiempo total de espera para cargar (min)	Tiempo total de cargue (min)	Tiempo total de recorrido cargado (min)	Tiempo total volteo /desenganche (min)	Tiempo total de ciclo (min)	Tiempo total de ciclo en horas
Autovolteo	2.60	13.31	10.57	4.44	1.77	32.49	0.54
Cadeneo	3.62	32.63	25.63	5.22	3.25	68.17	1.14

En el cuadro 6: Tiempos promedio de las actividades del proceso de cargue de caña picada en campo, se muestran el tiempo promedio de cada actividad del proceso de cargue de caña picada en campo. De la información registrada en el cuadro anteriormente mencionado se puede destacar que el tiempo total promedio del ciclo de cargue haciendo cadeneo (68.17 minutos) es mayor que el tiempo total promedio del ciclo de cargue con autovolteo (32.49 min). Esto se debe a que la capacidad de los vagones utilizados para el cargue haciendo cadeneo es mayor a la de los vagones que se utilizan para el cargue con autovolteo, generando que el tiempo de cargue sea mayor. También es importante destacar que el tiempo de espera para cargar es el tiempo más alto dentro del tiempo total del ciclo de cargue haciendo cadeneo. Este tiempo de espera se genera por la falta de cosechadoras, generalmente por daños o mantenimiento de las mismas, por la descoordinación de los tractores para entrar a cargar, es decir que no entran en el orden en el que llegan al sitio de cargue, o porque normalmente otro vagón está siendo cargado.

En el cargue con autovolteo también se presentan tiempos de espera por estas causas, sin embargo el tiempo de espera para cargar es mucho menor.

La prolongación de los tiempos de espera son la principal causa del aumento del tiempo de ciclo del proceso de cargue tanto con autovolteo (41% del tiempo promedio de ciclo) como haciendo cadeneo (49% del tiempo promedio de ciclo).

Respecto a los tiempos promedio por actividad se dedujo lo siguiente:

- El tiempo de recorrido varía en relación a la distancia entre los patios de cargue y el sitio de corte. Generalmente los patios de cargue están alejados del sitio de corte. El tiempo promedio de recorrido en vacío y recorrido cargado para cadeneo es mayor que el tiempo promedio de recorrido en vacío y recorrido cargado para autovolteo, debido a que las haciendas asignadas para cadeneo tienen más alejados los patios de cargue. El diseño de campo influencia en gran manera el rendimiento de las operaciones y en general afecta la productividad del proceso.
- El tiempo promedio de recorrido cargado es mayor que el tiempo promedio de recorrido en vacío debido a que el tractor trae un mayor peso y anda más despacio.
- El tiempo promedio de volteo del vagón en el cargue con autovolteo es menor al tiempo promedio de desenganche del vagón en el cargue haciendo cadeneo. Esto se debe a que en la operación de desenganche se ejecutan más movimientos y se debe tener mayor cuidado al realizarse por el riesgo que implica. En ocasiones el volteo del vagón puede tomar más tiempo, debido a la precisión que requiere la ubicación del tractor para introducir la caña en el vagón de la mula.

Cuadro 7 Estadística descriptiva: Moda, desviación estándar, mínimo y máximo

AUTOVOLTEO	Tiempo total de recorrido en vacío (min)	Tiempo total de espera para cargar (min)	Tiempo total de cargue (min)	Tiempo total de recorrido cargado (min)	Tiempo total volteo (min)	Tiempo total de ciclo (min)	Tiempo total de ciclo en horas
Moda	2	1	8	4	1	20	0.33
Desviación estándar	2.64	13.84	4.92	3.06	1.69	15.74	0.26
Mínimo	0	0	4	0	0	13	0.22
Máximo	24	67	26	16	11	91	1.52

CADENEO	Tiempo total de recorrido en vacío (min)	Tiempo total de espera para cargar (min)	Tiempo total de cargue (min)	Tiempo total de recorrido cargado (min)	Tiempo total desenganche (min)	Tiempo total enganche (min)	Tiempo total de ciclo (min)	Tiempo total de ciclo en horas
Moda	2	1	13	4	2	1	29	0.48
Desviación estándar	4.35	32.89	13.52	4.17	1.39	0.51	33.03	0.55
Mínimo	0	1	11	0	0	0	29	0.48
Máximo	36	152	92	26	6	3	189	3.15

En el cuadro 7: Estadística descriptiva: Moda, desviación estándar, mínimo y máximo, se muestran los cálculos de la moda, la desviación estándar, el máximo y el mínimo de los tiempos tomados a las actividades del proceso de cargue de caña picada en campo. De acuerdo a los resultados obtenidos lo más relevante a destacar, es que los tiempos de espera para cargar presentan la mayor dispersión de los tiempos tomados en campo para los procesos de autovolteo y cadeneo. Este tiempo de espera puede ser mayor a una hora en el proceso de autovolteo y desde 1 minuto hasta 2.5 horas en el proceso de cadeneo.

De acuerdo a la estadística descriptiva de los tiempos tomados por actividad lo más relevante a mencionar es:

Tiempo total de recorrido en vacío

- El tiempo más frecuente de recorrido en vacío tanto para el cargue haciendo cadeneo como para el cargue con autovolteo es de 2 minutos
- La dispersión promedio de los tiempos de recorrido en vacío con respecto a la media es de aproximadamente 3 minutos para el cargue con autovolteo y de 4 minutos para el cargue haciendo cadeneo.
- El valor mínimo de tiempo de recorrido en vacío tanto para el cargue haciendo cadeneo como para el cargue con autovolteo es 0 minutos; es decir que el tiempo de recorrido pueden ser segundos.
- El valor máximo de tiempo de recorrido en vacío para el cargue con autovolteo es 24 minutos y para el cargue haciendo cadeneo 36 minutos.

Tiempo de espera para cargar

- El tiempo de espera más frecuente tanto para realizar el cargue con autovolteo como para realizar el cargue haciendo cadeneo es de 1 minuto.
- La dispersión promedio de los tiempos de espera para cargar con respecto a la media es de aproximadamente 14 minutos para el cargue con autovolteo y de 33 minutos para el cargue haciendo cadeneo.
- El valor mínimo de tiempo de espera para realizar el cargue con autovolteo es 0 minutos y para realizar el cargue haciendo cadeneo es 1 minuto.
- El valor máximo de tiempo de espera para realizar el cargue con autovolteo es 67 minutos y para realizar el cargue haciendo cadeneo es 152 minutos (2 horas y 32 minutos).

Tiempo total de cargue

- El tiempo de cargue con autovolteo más frecuente es de 8 minutos y haciendo cadeneo es 13 minutos.
- La dispersión promedio de los tiempos de cargue con respecto a la media es de aproximadamente 5 minutos para el cargue con autovolteo y de 14 minutos para el cargue haciendo cadeneo.
- El valor mínimo de tiempo de cargue con autovolteo es 4 minutos y haciendo cadeneo es 11 minutos.
- El valor máximo de tiempo de cargue con autovolteo es 26 minutos y haciendo cadeneo es 92 minutos (1 hora y 32 minutos).

Tiempo total de recorrido cargado.

- El tiempo de recorrido cargado más frecuente tanto para el cargue con autovolteo como para el cargue haciendo cadeneo es de 4 minutos.
- La dispersión promedio de los tiempos de recorrido cargado con respecto a la media es de aproximadamente 3 minutos para el cargue con autovolteo y de 4 minutos para el cargue haciendo cadeneo.
- El valor mínimo de tiempo de recorrido cargado tanto con autovolteo como haciendo cadeneo es 0 minutos; es decir que el tiempo de recorrido pueden ser segundos.
- El valor máximo de tiempo de recorrido cargado para el cargue con autovolteo es 16 minutos y para el cargue haciendo cadeneo es 26 minutos.

Tiempo total de volteo del vagón en el proceso de cargue con autovolteo

- El tiempo más frecuente de volteo del vagón es de 1 minuto.
- La dispersión promedio de los tiempos de volteo del vagón es de aproximadamente 2 minutos.
- El valor mínimo de tiempo de volteo del vagón es 0 minutos; es decir que el tiempo de volteo pueden ser segundos.
- El valor máximo de tiempo de volteo del vagón es 11 minutos.

Tiempo total de desenganche/enganche en el proceso de cargue haciendo cadeneo

- El tiempo más frecuente de desenganche del vagón cargado es de 2 minutos y el más frecuente de enganche del vagón vacío es de 1 minuto.
- La dispersión promedio de los tiempos tanto del desenganche del vagón cargado como del enganche del vagón vacío con respecto a la media es de aproximadamente 1 minuto.
- El valor mínimo de tiempo tanto de desenganche del vagón cargado como de enganche del vagón vacío es 0 minutos; es decir que el tiempo de desenganche y de enganche pueden ser segundos.
- El valor máximo de tiempo de desenganche del vagón cargado es 6 minutos y el de enganche del vagón vacío es 3 minutos.

Tiempo total de ciclo

- El tiempo total más frecuente de ciclo de cargue con autovolteo es de 20 minutos y de cargue haciendo cadeneo 29 minutos.
- La dispersión promedio de los tiempos totales de ciclo de cargue con autovolteo con respecto a la media es de aproximadamente 16 minutos y de ciclo de cargue haciendo cadeneo de 33 minutos.
- El valor mínimo de tiempo total de ciclo de cargue con autovolteo es 13 minutos y el de cargue haciendo cadeneo 29 minutos.
- El valor máximo de tiempo total de cargue con autovolteo es 91 minutos (1 hora y 31 minutos) y el de cargue haciendo cadeneo 189 minutos (3 horas y 9 minutos).

Evaluación de las cosechadoras en el proceso de corte en campo.

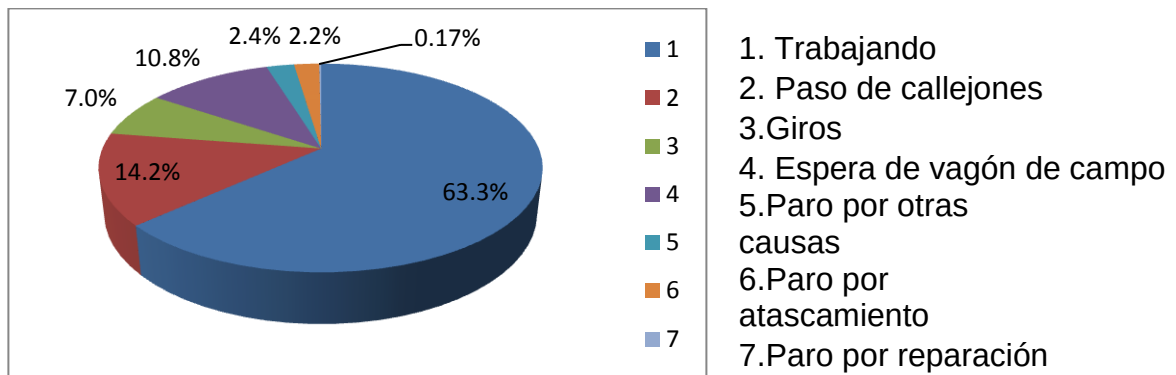


Figura 12 Distribución de los porcentajes globales de las actividades del proceso de corte de la cosechadora en el cargue con autovolteo.

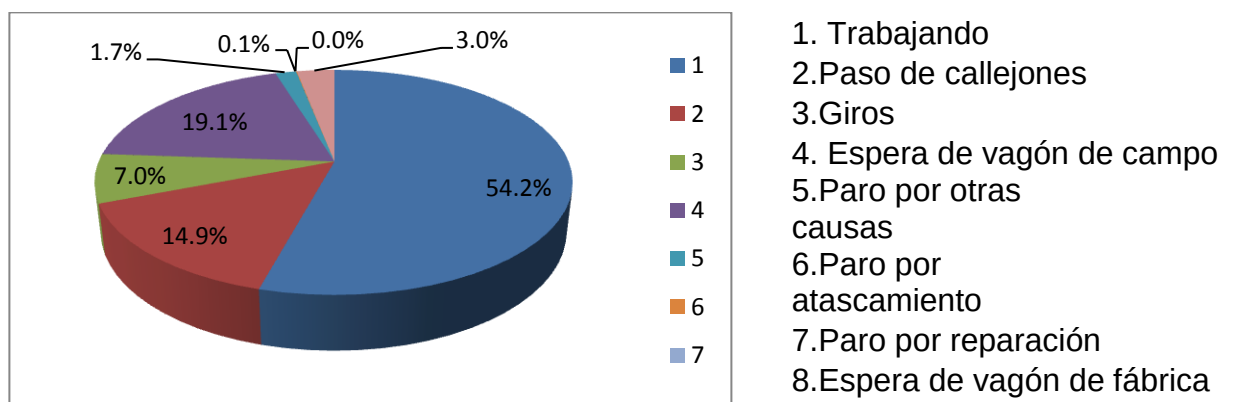


Figura 13 Distribución de los porcentajes globales de las actividades del proceso de corte de la cosechadora en el cargue haciendo cadeneo.

Respecto a las figuras 12 y 13, donde se muestra la distribución de los porcentajes globales por actividad del proceso de corte de la cosechadora tanto para el cargue con autovolteo como para el cargue haciendo cadeneo, lo más importante a destacar es:

- Comparando los dos sistemas de cargue, la cosechadora trabaja un 9.1% menos en el cargue haciendo cadeneo que en el cargue con autovolteo.
- El porcentaje del paso de callejones corresponde al 14% de la labor realizada por la cosechadora tanto para el cargue con autovolteo como para el cargue haciendo cadeneo. Este valor es significativo en el proceso de corte, debido a que este recorrido que hace la cosechadora y el tractor es frecuente y genera un tiempo improductivo.
- El porcentaje de los giros realizados por la cosechadora corresponde al 7% del tiempo total del proceso de corte tanto para el cargue con autovolteo como para el cargue haciendo cadeneo. El número de giros está relacionado con la forma y la longitud de los surcos, entre más largos sean los surcos y su forma sea más parecida a la de una recta, la cosechadora hará menos giros. Estas condiciones dependen del diseño de campo que se haya hecho.
- El porcentaje correspondiente a la espera de vagones de campo es uno de los tres valores más altos de las actividades realizadas por la cosechadora, es un 8.3% más alto en el cargue haciendo cadeneo que en el cargue con autovolteo. Los tiempos de espera de vagón de campo más prolongados se deben generalmente a la falta de tractores. Debido a que la distancia entre el sitio de corte y el patio de cargue generalmente es grande, el tiempo de recorrido es mayor al tiempo de cargue del vagón, lo que afecta que haya una continuidad en el proceso. Estos tiempos prolongados también se deben a la falta de coordinación de los tractoristas para llegar a la cosechadora que necesita vagón.
Hay otros tiempos de espera de vagón de campo que son cortos. Estos se dan mientras el vagón da la vuelta para ubicarse al lado de la cosechadora o en la operación como tal.
- Los menores porcentajes corresponden a paros por atascamiento, reparación, espera de vagones de fábrica o paros por otras causas que ocurren con menos frecuencia. La ocurrencia de estos, depende de variables como el estado de la caña, la máquina, el suelo y otras causas independientes de la operación.
- El tiempo improductivo de la cosechadora corresponde al 36.7% del tiempo total de las operaciones que realiza en el proceso de autovolteo y al 45.8% en el proceso de cadeneo.

Cuadro 8 Tiempo total promedio de llenado de la cosechadora

Tipo de cargue	Tiempo promedio de llenado del vagón (seg)	Tiempo en minutos
Autovolteo	942,08	15,70
Cadeneo	1572,91	26,22

En el cuadro 8: Tiempo total promedio de llenado de la cosechadora, se muestra el tiempo promedio de llenado de un vagón tanto en el proceso de autovolteo como en el proceso de cadeneo por la cosechadora. De la información registrada en el cuadro anteriormente mencionado se puede destacar que el tiempo promedio de llenado del vagón con autovolteo (15,70 min) es menor al tiempo promedio de llenado del vagón haciendo cadeneo (26,22 min). Esto se debe en parte a que la capacidad de los vagones utilizados para el cargue haciendo cadeneo es mayor a la de los vagones que se utilizan para el cargue con autovolteo, trayendo como consecuencia que el tiempo de llenado del vagón sea mayor. Existen otros factores que influyen en que el tiempo de llenado sea mayor tales como el estado de la caña, el diseño del campo, la habilidad del operador, la habilidad del tractorista, la coordinación de estos dos últimos en la operación y el estado del suelo.

Análisis de los datos tomados al proceso de llenado de la tractomula

Cuadro 9 Tiempos promedio de las actividades del proceso de cargue de los vagones de la tractomula en campo

	Tiempo total de espera para el cargue (min)	Tiempo total de cargue de vagones (min)	Tiempo total de salida (min)	Tiempo total de ciclo (min)	Tiempo total de ciclo en horas
Autovolteo	46.14	77.2	2.67	128.5	2.14
Cadeneo	80.8	173.4	5.4	259.6	4.33
General: (autovolteo y cadeneo)	55.26	101.25	3.35	163	2.72

En el cuadro 9: Tiempos promedio de las actividades del proceso de cargue de la tractomula en campo se muestran el tiempo promedio de cada actividad del proceso de cargue de la tractomula tanto con autovolteo como haciendo cadeneo.

De la información registrada en el cuadro anteriormente mencionado se puede destacar que el tiempo promedio de ciclo de cargue de la tractomula haciendo cadeneo (4 horas y 19 minutos) es el doble que el de cargue con autovolteo (2 horas y 8 minutos). Esto se debe a que el cargue de la tractomula haciendo cadeneo casi en todas las actividades requiere un poco más del doble del tiempo que el cargue con autovolteo. Hay que tener en cuenta que las condiciones de operación pueden variar debido a factores como el estado de la caña, estado de la máquina, estado del suelo, la habilidad del operador, la habilidad del tractorista, la coordinación de estos dos últimos en la operación, entre otros, haciendo que el tiempo varíe; es decir que el tiempo total de ciclo del proceso de cargue de la tractomula puede aumentar o disminuir.

Los tiempos promedio más altos corresponden al tiempo de espera para cargar y al tiempo de cargue tanto en el proceso de autovolteo como en el de cadeneo. En este caso, estos tiempos se generan generalmente por la falta de cosechadoras o tractores. La falta de cosechadoras se da cuando la máquina presenta fallas generalmente por daños en las cuchillas, debido a la cantidad de piedras presentes en el suelo y entra a reparación; o porque se encuentra en mantenimiento. La falta de tractores también se da debido a fallas que presenta la máquina y por no aplicar una logística efectiva que coordine la asignación de estos equipos respecto a las variadas condiciones que se presentan en el campo. Las condiciones climáticas también afectan en gran medida los tiempos de operación, generando que estos sean más altos, debido a condiciones tales como el suelo húmedo.

Tomando los tiempos de las actividades del proceso de cargue de la tractomula con autovolteo y del cargue haciendo cadeneo de manera general, el tiempo promedio de ciclo de cargue de caña picada en campo es de 163 minutos (2 horas y 43 minutos). Esto se debe a que se presentan daños en las máquinas, también se debe a que no se cuenta con los tractores suficientes y las máquinas se detienen, al clima lluvioso, al peso de la caña, entre otros.

Del tiempo promedio total de ciclo de cargue de la tractomula tanto con autovolteo como haciendo cadeneo tomando de manera general los dos procesos, el 62.04% es tiempo productivo.

FORMULACIÓN DEL MODELO DE MEJORAMIENTO

Justificación del modelo

De acuerdo al estudio de tiempos que se realizó, se pudieron identificar los tiempos muertos que se presentan en el proceso de cargue de caña picada en campo, tanto con autovolteo como haciendo cadeneo. Estos tiempos muertos corresponden principalmente a tiempos de espera.

Dentro de los tiempos de espera que se dan en el proceso en campo está el tiempo de espera de las tractomulas en el patio de cargue, y tiene relación directa con el tiempo de cargue de los vagones. Con el modelo matemático se pretende obtener una solución óptima para utilizar de manera más eficiente los recursos como el tiempo y la maquinaria, es decir, aumentar la productividad respecto a los recursos (principalmente los limitados y costosos) aumentando así los beneficios para el ingenio.

El modelo matemático está en función de maximizar la función objetivo Z , en varias variables reales como en este caso el número de ciclos (proceso de cargue) del vagón i (variable de decisión x_i) para el cargue o el armado de cada tren cañero y las restricciones que presenta el sistema. El cálculo del número de ciclos que deben realizar los tractores asignados al alce en un mes, de acuerdo a un tiempo promedio de ciclo y a la capacidad de las máquinas cosechadoras asignadas (tiempo promedio de llenado de un vagón), permite el cálculo del número de trenes que se pueden cargar y despachar.

Con el modelo propuesto se puede evidenciar que con 2 máquinas cosechadoras se consigue satisfacer la demanda del alce y se puede maximizar la producción pasando de 21600 toneladas a 22008 toneladas lo cual representa un aumento del 1.9 % en la productividad, para el proceso de autovolteo.

En el proceso de cadeneo se puede evidenciar que con 3 máquinas cosechadoras se consigue satisfacer la demanda del alce y se puede maximizar la producción pasando de 21600 toneladas a 22800 toneladas lo cual representa un aumento del 5.6 % en la productividad.

Descripción del sistema a modelar

La función objetivo de este modelo es la maximización de la cantidad de toneladas de caña por mes que los alces tanto de autovolteo como de cadeneo suministran a la fábrica. Las variables de entrada corresponden a X_i , donde X es el número de ciclos (proceso de cargue) que realiza un vagón i de una determinada capacidad (la capacidad es la constante que hace parte de la función objetivo), y a las restricciones que se tienen del sistema. Las variables de salida son los resultados del modelamiento realizado a través del software utilizado en relación a la función objetivo y a las restricciones formuladas.

Los vagones que se usan para el proceso de autovolteo tienen una capacidad de 8 toneladas, y los que se usan en el proceso de cadeneo tienen una capacidad de 12 y 20 toneladas. El tiempo promedio de ciclo de cargue de un vagón de 8 toneladas es de 0.54 horas (32.49 min). El proceso de cargue de un tren cañero conformado por cuatro vagones 24000 DL (descarga lateral) en el proceso de autovolteo consta de 12 ciclos de este vagón.

En el caso del proceso de cargue haciendo cadeneo el tiempo promedio de ciclo de cargue de un vagón de 20 toneladas es de 1.26 horas y de un vagón de 12 toneladas es de 1.13 horas. En este caso el tren consta de un vagón 20000 (20 ton) y de 5 vagones 12000 (12 ton).

Para el proceso de autovolteo, actualmente el ingenio cuenta con dos vagones de 8 toneladas por máquina cosechadora y se trabaja con tres máquinas cosechadoras por alce, es decir que hay 6 vagones para realizar el cargue del tren.

Para el proceso de cadeneo, el ingenio cuenta con tres máquinas cosechadoras para cargar los 6 vagones del tren.

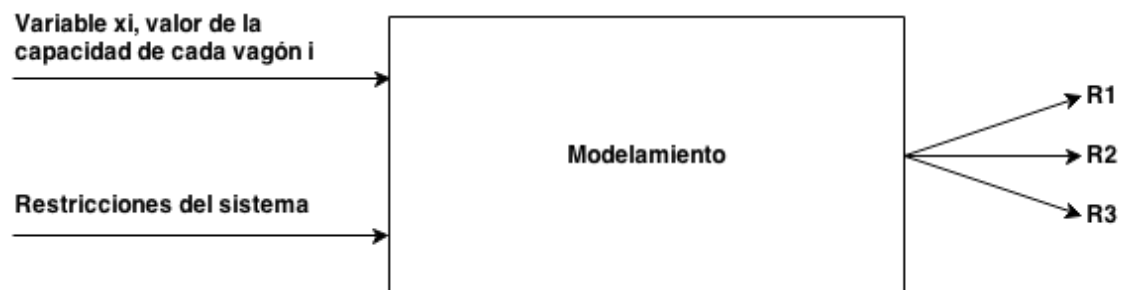


Figura 14 Representación del modelo matemático propuesto

Supuestos del modelo

El modelo matemático presenta los siguientes supuestos:

- Supuesto de proporcionalidad: Implica que la medida de efectividad y/o consumo de recursos tiene que ser proporcional al nivel de actividad. Por ejemplo: El tren se llena con 12 ciclos (proceso de cargue) de un tractor con un vagón de 8 toneladas; si se aumenta el número de ciclos al doble, el tren se cargará en la mitad del tiempo.
- Supuesto de aditividad: Este supuesto consiste en que las actividades sean aditivas. Esto quiere decir que si una variable X_1 produce un efecto α_1 cuando está sola y una variable X_2 produce un efecto α_2 cuando está sola, entonces X_1+X_2 produce un efecto $\alpha_1 + \alpha_2$. Por ejemplo: Las toneladas suministradas en un turno de 12 horas son la suma de las toneladas suministradas por cada alce por separado.
- Supuesto de no negatividad de actividades: Este supuesto refleja la mayoría de las actividades del mundo real, donde no tienen sentido los niveles negativos de actividad. Por ejemplo: Los valores utilizados en el modelo tales como: los tiempos, los pesos y las cantidades no pueden ser negativos.

Notación del Modelo

Variables

La variable de decisión del modelo corresponde al número de ciclos (proceso de cargue) que hacen los vagones de 8 toneladas en el proceso de autovolteo y los vagones 20000 (20 ton) y 12000 (12 ton) en el proceso de cadeneo.

Parámetros

Los parámetros que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del modelo son: número de vagones en el proceso de cargue y la capacidad de cada uno de ellos, el tiempo (360 horas/mes) con el que se cuenta para cumplir la meta de molienda mensualmente (21600 ton), tiempo promedio de ciclo de cargue de los vagones por tipo de vagón y la capacidad de llenado por máquina cosechadora (cantidad de toneladas por un número de horas promedio de llenado).

En el caso del proceso de cargue haciendo cadeneo se tiene en cuenta que el número de ciclos (proceso de cargue) de los vagones 12000 (12 ton) debe ser el mismo número de ciclos (proceso de cargue) del vagón 20000 (20 ton), ya que para que el tren salga del campo hacia la fábrica deben estar cargados todos los vagones que lo conforman. En este caso el tren está conformado por un vagón 20000 (20 ton) y 5 vagones 12000 (12 ton).

Limitaciones

Las limitaciones del modelo matemático están en que el software donde se desarrolla el modelo supone que siempre hay un tren para cargar. Lo cual es una condición óptima que en la realidad no siempre sucede, debido a que la secuencia de llegada de las tractomulas depende del tiempo de permanencia de las tractomulas en los patios de fábrica y de los tiempos de recorrido de la tractomula del campo a la fábrica y viceversa.

Hay que considerar también que el software no tiene en cuenta situaciones que pueden afectar el proceso, como el daño de una máquina, las condiciones del suelo que afectan la movilización de los equipos, el estado de la caña que aumenta el tiempo de llenado, entre otras.

Modelo matemático del proceso de cargue con autovolteo de un tren cañero conformado por 4 vagones 24000 DL (descarga lateral).

Formulación verbal

Función objetivo => Maximizar Z.

$$\text{Max } Z = 8 \text{ ton/ciclo } X_i [\text{ciclo/vagón}] = \text{Ton/vagón}$$

Variables => X_i , donde i es el número de vagón de 8 toneladas con los que se transporta la caña, desde el sitio de corte hasta el patio de cargue donde se carga un tren cañero de 96 toneladas [Ciclos/vagón].

Nota: Un tren cañero con una capacidad de 96 toneladas, se llena con 12 vagones de 8 toneladas.

Restricciones:

1. Turno de 12 horas = 360 horas/mes
2. Demanda del alce 21600 ton/mes

3. Capacidad de llenado por máquina cosechadora (96 toneladas por un número de horas promedio de llenado).

Cantidad de máquinas cosechadoras	Tiempo promedio de llenado del tren cañero (horas)
1	3.14
2	1.57
3	1.0466

Trabajando con tres máquinas cosechadoras

$$\frac{96 \text{ ton}}{1.0466 \text{ horas}} * \frac{360 \text{ horas}}{\text{mes}} = 33019 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}$$

Trabajando con dos máquinas cosechadoras

$$\frac{96 \text{ ton}}{1.57 \text{ horas}} * \frac{360 \text{ horas}}{\text{mes}} = 22012 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}$$

Modelamiento

Función objetivo

$$z = 8 \sum_{i=1}^6 x_i$$

Variables de decisión

X_i = Número de ciclos que hace el vagón i

Sujeto a:

$$1. 0.54 \sum_{i=1}^6 x_i \leq 360 \frac{\text{horas}}{\text{mes}} \quad \forall i=1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ (vagones)}$$

Tiempo promedio de ciclo del cargue un vagón de 8 toneladas = 0.54 horas, para el cargue de un tren cañero conformado por vagones 24000 DL.

$$2. 8 \sum_{i=1}^6 x_i \geq 21600 \text{ Ton/mes}$$

$$3. a. 8 \sum_{i=1}^6 x_i \leq 33019 \text{ Ton/mes}$$

$$b. 8 \sum_{i=1}^6 x_i \leq 22012 \text{ Ton/mes}$$

Modelo matemático del proceso de cargue de un tren cañero conformado por 1 vagón de 20 toneladas y 5 vagones de 12 toneladas haciendo cadeneo

Formulación verbal

Función objetivo $\longrightarrow$ Maximizar Z.

$$\text{Max } Z = 20 \text{ ton/ciclo } X_i \text{ [ciclo/vagón]} = \text{Ton/vagón}$$

$$12 \text{ ton/ciclo } X_i \text{ [ciclo/vagón]} = \text{Ton/vagón}$$

Variables $\Rightarrow X_i$, donde i es el número de vagón que conforman el tren (1 vagón 20000 de 20 toneladas y 5 vagones 12000 de 12 toneladas) con los que se transporta la caña, desde el sitio de corte hasta el patio de cargue donde se carga un tren cañero de 80 toneladas [ciclos/vagón].

Restricciones

1. Turno de 12 horas = 360 horas/mes
2. Demanda del alce 21600 ton/mes

3. Capacidad de llenado por máquina cosechadora (80 toneladas por un número de horas promedio de llenado).

Cantidad de máquinas cosechadoras	Tiempo promedio de llenado del tren cañero (horas)
1	2.745
2	1.373
3	0.915

Trabajando con tres máquinas cosechadoras

$$\frac{80 \text{ ton}}{0.915 \text{ horas}} * \frac{360 \text{ horas}}{\text{mes}} = 31475 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}$$

Trabajando con dos máquinas cosechadoras

$$\frac{80 \text{ ton}}{1.373 \text{ horas}} * \frac{360 \text{ horas}}{\text{mes}} = 20975 \frac{\text{ton}}{\text{mes}}$$

Con dos máquinas cosechadoras no alcanzan a cumplir la demanda del alce por una diferencia de 624.034 toneladas, por lo que tienen que utilizar la tercera máquina cosechadora.

Modelamiento

Función objetivo

$$Max. Z = 12 \sum_{i=1}^5 x_i + 20x_6$$

Variables de decisión

X_i = Número de ciclos que hace el vagón i

Sujeto a:

$$1. \quad 1.26 \sum_{i=1}^5 x_i \leq 360 \text{ horas/mes} \quad \forall i=6 \text{ (vagón)}$$

$$1.13 \sum_{i=1}^5 x_i \leq 360 \text{ horas/mes} \quad \forall i=1, 2, 3, 4, 5 \text{ (vagones)}$$

Tiempo promedio de ciclo del cargue un vagón de 20 toneladas = 1.26 horas. Este vagón de 20 toneladas es el primer vagón del tren.

Tiempo promedio de llenado de un vagón de 12 toneladas = 1.13 horas.

Estos vagones de 12 toneladas son los que le siguen al vagón de 20 toneladas.

$$2. \quad 12 \sum_{i=1}^5 x_i + 20x_6 \geq 21600 \text{ Ton/mes}$$

$$3. \quad 12 \sum_{i=1}^5 x_i + 20x_6 \leq 31475 \text{ Ton/mes}$$

$$4. \quad x_i = x_6 \quad \forall i = (1,2,3,4,5) \Rightarrow x_i - x_6 = 0 \quad \forall i (1,2,3,4,5)$$

Para resolver el modelo de optimización se utilizó el paquete de software WinQSB VERSION 2.0

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Cuadro 10 Modelamiento del proceso de cargue con autovoltaje de un tren cañero conformado por 4 vagones 24000 DL (descarga lateral).

Variable -->	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Direction	R. H. S.
Maximize	8	8	8	8	8	8		
C1	0.54						<=	360
C2		0.54					<=	360
C3			0.54				<=	360
C4				0.54			<=	360
C5					0.54		<=	360
C6						0.54	<=	360
C7	8	8	8	8	8	8	>=	21600
C8	8	8	8	8	8	8	<=	33019
LowerBound	0	0	0	0	0	0		
UpperBound	M	M	M	M	M	M		
VariableType	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer		

Cuadro 11 Resultados del modelo matemático trabajando con 3 máquinas cosechadoras

	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status
1	X1	666,0000	8,0000	5.328,0000	0	basic
2	X2	666,0000	8,0000	5.328,0000	0	basic
3	X3	666,0000	8,0000	5.328,0000	0	basic
4	X4	666,0000	8,0000	5.328,0000	0	basic
5	X5	666,0000	8,0000	5.328,0000	0	basic
6	X6	666,0000	8,0000	5.328,0000	0	basic
	Objective	Function	(Max.) =	31.968,0000		
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price
1	C1	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
2	C2	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
3	C3	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
4	C4	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
5	C5	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
6	C6	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
7	C7	31.968,0000	>=	21.600,0000	10.368,0000	0
8	C8	31.968,0000	<=	33.019,0000	1.051,0000	0

Cuadro 12 Modelamiento del proceso de cargue con autovolteo de un tren cañero conformado por 4 vagones 24000 DL (descarga lateral), trabajando con 2 máquinas cosechadoras.

Variable -->	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Direction	R. H. S.
Maximize	8	8	8	8	8	8		
C1	0.54						<=	360
C2		0.54					<=	360
C3			0.54				<=	360
C4				0.54			<=	360
C5					0.54		<=	360
C6						0.54	<=	360
C7	8	8	8	8	8	8	>=	21600
C8	8	8	8	8	8	8	<=	22012
LowerBound	0	0	0	0	0	0		
UpperBound	M	M	M	M	M	M		
VariableType	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer		

Cuadro 13 Resultados del modelo matemático trabajando con 2 máquinas cosechadoras.

	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status
1	X1	0	8,0000	0	8,0000	at bound
2	X2	666,0000	8,0000	5.328,0000	8,0000	at bound
3	X3	666,0000	8,0000	5.328,0000	8,0000	at bound
4	X4	666,0000	8,0000	5.328,0000	8,0000	at bound
5	X5	666,0000	8,0000	5.328,0000	8,0000	at bound
6	X6	87,0000	8,0000	696,0000	8,0000	at bound
	Objective	Function	(Max.) =	22.008,0000		
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price
1	C1	0	<=	360,0000	360,0000	0
2	C2	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
3	C3	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
4	C4	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
5	C5	359,6400	<=	360,0000	0,3600	0
6	C6	46,9800	<=	360,0000	313,0200	0
7	C7	22.008,0000	>=	21.600,0000	408,0000	0
8	C8	22.008,0000	<=	22.012,0000	4,0000	0

Cuadro 14 Modelamiento del cargue haciendo cadeneo de un tren conformado por un vagón 20000 (20 ton) y cinco vagones 12000 (12 ton), trabajando con 3 máquinas cosechadoras.

Variable -->	X1	X2	X3	X4	X5	X6	Direction	R. H. S.
Maximize	12	12	12	12	12	20		
C1	1.13						<=	360
C2		1.13					<=	360
C3			1.13				<=	360
C4				1.13			<=	360
C5					1.13		<=	360
C6						1.26	<=	360
C7	12	12	12	12	12	20	>=	21600
C8	12	12	12	12	12	20	<=	31475
C9	1					-1	=	0
C10		1				-1	=	0
C11			1			-1	=	0
C12				1		-1	=	0
C13					1	-1	=	0
LowerBound	0	0	0	0	0	0		
UpperBound	M	M	M	M	M	M		
VariableType	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer	Integer		

Cuadro 15 Resultados del modelo matemático

	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status
1	X1	285,0000	12,0000	3.420,0000	0	basic
2	X2	285,0000	12,0000	3.420,0000	0	basic
3	X3	285,0000	12,0000	3.420,0000	0	basic
4	X4	285,0000	12,0000	3.420,0000	0	basic
5	X5	285,0000	12,0000	3.420,0000	0	basic
6	X6	285,0000	20,0000	5.700,0000	0	basic
	Objective	Function	(Max.) =	22.800,0000		
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price
1	C1	322,0500	<=	360,0000	37,9500	0
2	C2	322,0500	<=	360,0000	37,9500	0
3	C3	322,0500	<=	360,0000	37,9500	0
4	C4	322,0500	<=	360,0000	37,9500	0
5	C5	322,0500	<=	360,0000	37,9500	0
6	C6	359,1000	<=	360,0000	0,9000	0
7	C7	22.800,0000	>=	21.600,0000	1.200,0000	0
8	C8	22.800,0000	<=	31.475,0000	8.675,0000	0
9	C9	0	=	0	0	-68,0000
10	C10	0	=	0	0	12,0000
11	C11	0	=	0	0	12,0000
12	C12	0	=	0	0	12,0000
13	C13	0	=	0	0	12,0000

Análisis de los resultados del modelo

De los resultados obtenidos del modelamiento del proceso de cargue con autovolteo de un tren cañero conformado por cuatro vagones de 24 toneladas DL (descarga lateral), trabajando con tres máquinas cosechadoras, se puede observar que se maximizan las ton/mes de caña de azúcar. Haciendo 666 ciclos/vagón se pueden cargar 10.368 ton/mes adicionales a las 21600 ton/mes, que es la demanda del alce. De acuerdo a lo anterior se deduce que se hacen 133 ciclos/día, logrando llenar 11 trenes de 96 toneladas en un turno de 12 horas. Se cuenta con 3 tractomulas por alce, lo que equivale aproximadamente a 4 viajes por tren en un turno de 12 horas.

También muestra que la tercera máquina cosechadora usada puede cortar 1.051 toneladas de caña de azúcar adicionales en el mes.

De los resultados obtenidos del modelamiento del proceso de cargue con autovolteo de un tren cañero conformado por cuatro vagones de 24 toneladas DL (descarga lateral), trabajando con dos máquinas cosechadoras, se puede observar que se maximizan las ton/mes de caña de azúcar. Utilizando 5 tractores con vagón, de los cuales 4 hacen 666 ciclos/vagón y el quinto hace 87 ciclos, se pueden cargar 408 ton/mes adicionales a las 21600 ton/mes, que es la demanda del alce. De acuerdo a lo anterior se deduce que se hacen aproximadamente 92 ciclos/día, logrando llenar aproximadamente 8 trenes de 96 toneladas en un turno de 12 horas. Se cuentan con 3 tractomulas por alce, lo que equivale aproximadamente a 3 viajes por tren en un turno de 12 horas.

También muestra que las dos máquinas cosechadoras utilizadas usan casi la totalidad de su capacidad. Una de las máquinas cosechadoras usadas puede cortar 4 toneladas de caña de azúcar adicionales en el mes.

De los resultados obtenidos del modelamiento del proceso de cargue haciendo cadeneo de un tren conformado por un vagón 20000 (20 ton) y cinco vagones 12000 (12 ton), trabajando con tres máquinas cosechadoras, se puede observar que se maximizan las ton/mes de caña de azúcar. Haciendo 285 ciclos/vagón se pueden cargar 1.200 ton/mes adicionales a las 21600 ton/mes, que es la demanda del alce. De acuerdo a lo anterior se deduce que se hacen 57 ciclos/día, logrando llenar aproximadamente 10 trenes de 80 toneladas en un turno de 12 horas. Se cuenta con 3 tractomulas por alce, lo que equivale aproximadamente a 3 viajes por tren en un turno de 12 horas.

También muestra que la tercera máquina cosechadora usada puede cortar 8.675 toneladas de caña de azúcar adicionales en el mes.

Con dos máquinas cosechadoras no alcanzan a cumplir la demanda del alce por una diferencia de 624.034 toneladas, por lo que tienen que utilizar la tercera máquina cosechadora.

Finalmente se puede asumir que con la implementación del modelo matemático desarrollado se podría mejorar la productividad del proceso de cargue de caña de azúcar en campo tanto con autovolteo como haciendo cadeneo. En la siguiente figura se muestra para el proceso de autovolteo utilizando 2 y 3 máquinas cosechadoras la mejora en la cantidad de toneladas suministradas que se podría conseguir con la implementación del modelo frente a la demanda actual por alce. Igualmente para el proceso de cadeneo utilizando 3 máquinas cosechadoras se muestra la mejora que se podría conseguir en la cantidad de toneladas suministradas frente a la demanda del alce.

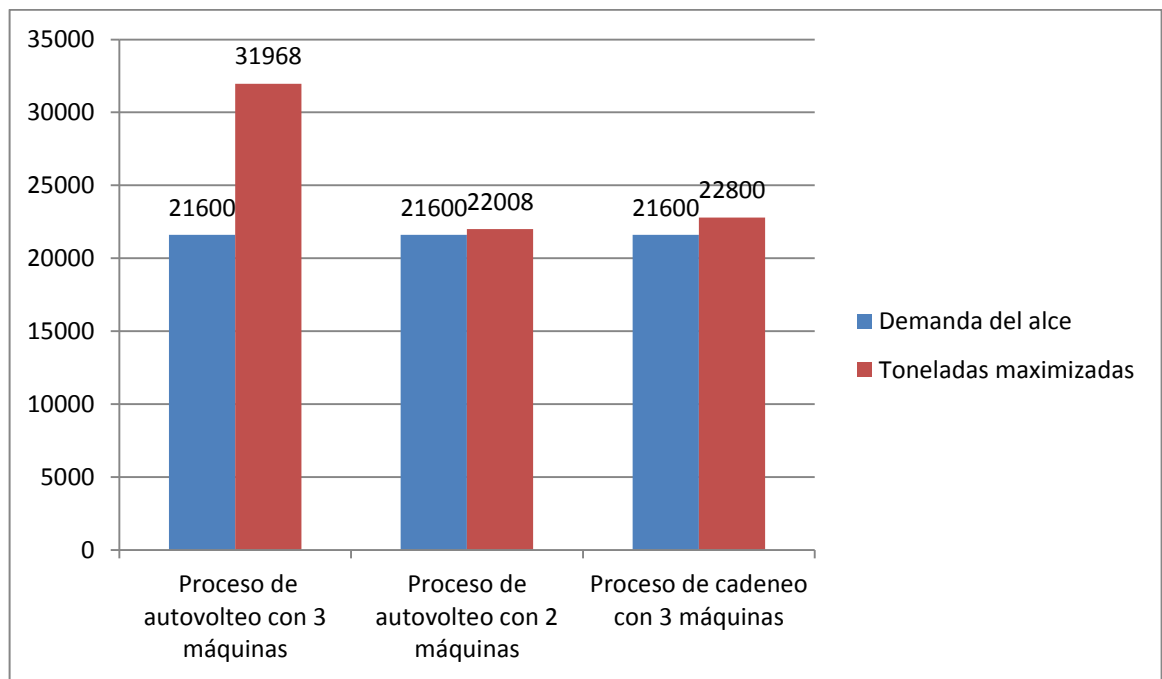


Figura 15 Comparación de la demanda del alce frente a las toneladas maximizadas tanto en el proceso de autovolteo como en el proceso de cadeneo.

SOCIALIZACIÓN DEL ESTUDIO DE MÉTODOS Y TIEMPOS

Para socializar los resultados obtenidos del estudio de métodos y tiempos realizados en el ingenio, se realizó una presentación el día 3 de julio del 2014. A dicha reunión asistió el jefe de Servicio de Cooperación Técnica y de Transferencia de Tecnología, el ingeniero de logística del proyecto CATE y un profesor académico; todos miembros del centro de investigación de la caña de azúcar en Colombia Cenicaña.

En esta reunión se presentaron los resultados del análisis estadístico de los datos tomados. Se inició con la exposición de los tiempos promedio por actividad de los procesos en estudio. De este análisis se destacó que los tiempos de espera tanto en el proceso de cargue en campo como en el proceso de descargue en los patios de fábrica son tiempos significativos en el ciclo total de estos procesos.

Posterior a esto se compararon los tiempos promedios totales de ciclo del proceso de recepción de caña picada con el proceso de recepción de caña larga y del proceso de autovolteo con el proceso de cadeneo. Estas comparaciones se hicieron con la finalidad de determinar la eficiencia de cada uno de estos procesos en el ciclo de suministro de caña de azúcar.

Con la aplicación de la estadística descriptiva se analizaron las medidas de la moda (el dato más frecuente), la desviación estándar (dispersión de los datos) y los máximos y mínimos de los tiempos. Estas medidas se analizaron por cada actividad de los procesos de corte, cargue y recepción de la caña.

Finalmente de acuerdo a las conclusiones resultantes se determinó que se debe implementar un método de mejoramiento que conlleve al aumento de la productividad, para incrementar los beneficios del ingenio en estudio.

CONCLUSIONES

- El estudio de tiempos y movimientos generó una información muy valiosa del estado de los procesos de corte y cargue de caña picada, y de la recepción tanto de caña larga como de caña picada. Esta información es útil para la estandarización de los tiempos de operación de las actividades realizadas en cada uno de estos procesos. Los estándares de tiempo contribuyen en gran medida a la reducción y control de costos, la eliminación de desperdicios, el mejoramiento de las condiciones de trabajo y el entorno, así como en la motivación de las personas, haciendo que la organización logre una ventaja competitiva y mayores utilidades.
- De acuerdo a los resultados obtenidos del análisis estadístico de los tiempos tomados en los patios de fábrica se concluye que el tiempo de ciclo del proceso de recepción de caña picada y caña larga están afectados principalmente por los tiempos de espera para descargar y la prolongación del tiempo de las tractomulas en la estación de servicios. El tiempo de espera que se genera en la zona de descargue tiene relación con el tiempo de descargue y con la aleatoriedad de llegada de las tractomulas. En este sentido, es importante mencionar que las condiciones que se presentan en los patios de fábrica, tales como el ritmo de molienda, la capacidad de las mesas utilizadas, el gerenciamiento y la coordinación del proceso, entre otras, repercuten en el aumento del tiempo de permanencia de las tractomulas en la zona de descargue. La prolongación del tiempo en la estación de servicios se debe a tiempos perdidos en espera o a tiempos de operación no estandarizados.
- De acuerdo a los resultados obtenidos del estudio de métodos y tiempos realizado en campo, se concluye que el tiempo de ciclo del proceso de cargue de la caña de azúcar con autovolteo y haciendo cadeneo está afectado principalmente por el paro frecuente de las cosechadoras, generalmente por daños que se presentan en las máquinas. Estos paros causan una escasez de maquinaria que directamente repercute en la secuencia del ciclo y generan tiempos de espera prolongados en el cargue de los vagones. El estado del suelo y de la caña también influyen en gran manera en que el tiempo de ciclo del proceso de cargue aumente.
- Respecto al proceso de corte de la cosechadora, es importante mencionar, que cuando las distancias entre el sitio de corte y el patio de cargue son grandes, la cosechadora para generalmente por falta de vagón, ya que no se cuenta con la cantidad de tractores necesarios para estas condiciones específicas, para así dar continuidad al proceso de corte.

- La aplicación de los conceptos de programación lineal permitió el desarrollo de un modelo matemático a través del cual se hace una representación del proceso de cargue de caña picada en campo, logrando así aumentar la comprensión de éste, hacer predicciones, controlar y analizar el sistema de cosecha.
- El modelo matemático desarrollado es dinámico porque puede usarse para obtener nuevas soluciones de acuerdo a cambios presentados en los tiempos de operación, la capacidad de molienda, la disponibilidad de la maquinaria, entre otras condiciones.

RECOMENDACIONES

- Determinar el número óptimo de trenes de avance tanto en los patios de fábrica como en el campo para liberar las tractomulas; y de esta manera disminuir los tiempos de espera y lograr aumentar el número de viajes.
- Ejercer más control en la estación de servicios a través de la asignación de turnos de atención y del registro del tiempo de permanencia y del tipo de actividad realizada por la tractomula, con el fin de reducir los tiempos improductivos de las tractomulas en la estación de servicios.
- Asignar el número de tractores por cosechadora teniendo en cuenta las distancias entre el patio de cargue y la zona de corte, para evitar que la cosechadora pare por falta de vagón.
- Desarrollar un formato donde se registren las condiciones del campo como: pistas de cargue, callejones, distancias, estado del terreno, entre otros; que afectan directamente la eficiencia de los procesos de corte y cargue en campo.
- En el corte de los surcos de caña de azúcar de mayor longitud, realizar el cargue de dos vagones enganchados al tractor para eliminar un tiempo de recorrido.
- Para el desarrollo de futuros modelos de optimización del proceso de cosecha se puede tener en cuenta la solución obtenida a través del modelo desarrollado, para determinar el impacto que tiene el mejoramiento de la productividad de los procesos de campo en el ciclo completo de suministro de caña de azúcar picada.

BIBLIOGRAFÍA

- Amú, L. G. (2009). Modelo de optimización y asignación de equipo de transporte y cosecha en el sistema de abastecimiento de caña . *VIII congreso Tecnicaña*. Cali.
- Amú, L. G. (2010). Evaluación de tiempos y movimientos indicadores de control. En S. Cenicaña, *seminario internacional de cosecha de caña de azúcar del 2010*.
- Arsham, H. (1994). *Modelos Deterministas: Optimización Lineal*. Recuperado el Mayo de 2014, de <http://home.ubalt.edu/ntsbarsh/opre640S/SpanishD.htm>
- Asocaña. (2012). *Asocaña*. Recuperado el julio de 2014, de Asocaña: <http://www.asocana.org/publico/historia.aspx>
- Castillo, E., Conejo, A., Pedregal, P., García, R., & Alguacil, N. (2002). *Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia*.
- Cenicaña, S. (2010). *seminario internacional de cosecha de caña de azúcar del 2010*.
- EUSKALIT, F. V. (2008). *GESTIÓN Y MEJORA DE PROCESOS*. Recuperado el julio de 2014, de <http://www.euskalit.net/pdf/folleto5.pdf>
- García, R. (2005). *Estudio del Trabajo Ingeniería de Métodos y Medición del Trabajo*. Ciudad de Mexico: McGraw-Hill.
- Grunow, M., & Westinner, R. (2007). supply optimization for the production of raw sugar, department of production management. *Science Direct*, 224-239.
- Higgins Laredo, A. (2006). improving harvesting and transport planning with in a sugar value chain. *journal of the Operational Research society*, 367-376.
- James, G. (16 de marzo de 2011). *Investigacion Operativa*. Recuperado el junio de 2014, de Investigacion Operativa: <http://germanjames.wordpress.com/2011/03/16/la-investigacion-de-operaciones-uso-de-modelos-y-metodos-de-optimizacion/>
- Omelas, C., & Williams, M. (julio de 2007). *Optimización y la Programación Lineal*. Recuperado el junio de 2014, de <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/RPT2007-07.pdf>
- Pantoja Ojeda, A. C. (2008). *Caracterización de tiempos perdidos de los equipos de cosecha de un ingenio azucarero colombiano*. Cali.

- Real Academia Española. (s.f.). *Real academia Española*. Recuperado el 2014, de <http://www.rae.es>
- Salazar, B. A. (2013). *Ingenieros Industriales*. Recuperado el febrero de 2014, de <http://ingenierosindustriales.jimdo.com>
- Velandia, D. C., & Garcia, Y. (febrero de 2012). *Guía Teorías Administrativas*. Recuperado el febrero de 2014, de <http://guiateoriasadministrativas.blogspot.com/2012/02/estudio-de-tiempos-y-movimientos.html>
- Villegas, F. (2010). Eficiencia de las cosechadoras y calidad del corte mecanizado. En S. Cenicaña, *seminario internacional de cosecha de caña de azúcar*.
- Wilson, K. (s.f.). *investigación de operaciones*. Recuperado el febrero de 2014, de investigación de operaciones: <http://investigaciondeoperacionesind331.blogspot.com/p/metodo-de-transporte.html>

ANEXOS

Anexo 1. Formularios para registrar los tiempos de las diferentes actividades de los procesos de corte, cargue y recepción de la caña de azúcar⁶.

Formato 1: Toma de tiempos y movimientos Trenes de Patio

Datos tomados por: _____ Ingenio: _____

Fecha: _____ Estado del tiempo: _____

	Hora de entrada a patio	Tractomula número	Tractor número	Número de vagones	Tipo de vagón (HD8, HD12, HD20, HD24 O HD30)	Tipo de caña (picada o larga)	Tiempo báscula (min)		Tiempo muestreo (min)		Hora de inicio de descargue	Hora final de descarga	Hora de salida de patio	Peso neto tren (ton)
							Inicio	Final	Inicio	Final				
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														

Observaciones

1 Formulario para registrar el tiempo de los diferentes eventos realizados en el proceso de recepción de la caña de azúcar.

⁶Formularios diseñados por Cenicaña para el estudio de métodos y tiempos del sistema de cosecha.

Datos tomados por: _____ Fecha: _____ Hora: _____

Turno: (1 o 2) _____ Hacienda-Suerte: _____ Longitud del surco: _____

Distancia de siembra _____ Ancho Callejones: _____ Distancia de recorrido vacío/cargado _____

Estado del tiempo: _____ Tractor: _____ Vagones por tractor: _____

Otros: _____

[illegible]

71

Ingenio _____ Hacienda _____ Código hacienda _____ Código suerte _____ Código tablón: _____
 Área tablón (ha): _____ Suelo húmedo _____ Suelo seco _____ Caña verde _____ Quemada _____
 Fecha evaluación (dd/mm/aaaa): _____ Hora inicio cosecha (hh:mm): _____ Hora final (hh:mm): _____
 Marca cosechadora: _____ Modelo: _____ Código identificación: _____
 Horómetro cosechadora. Inicial (hh:mm:ss): _____ Final: _____ Galones ACPM consumidos: _____

[illegible]

Eventos:	IS	Inicio surco	RL	Reinicia labor	EC	Espera de vagones-campo
	TS	Termina surco	PM	Para por mantenimiento	EF	Espera de vagones-fábrica
	IV	Inicio vagón	PA	Para por atascamiento	PC	Paso de callejones
	TV	Termina vagón	PR	Para por reparación	OP	Para por otras causas
Conceptos:	T	Trabajando	M	Mantenimiento	F	Espera de vagones-fábrica
	G	Giros	R	Reparación	C	Tiempo perdido en callejones
	A	Atascamientos	E	Espera de vagones-campo	P	Otras pérdidas de tiempo
Observaciones:	1.	Otras pérdidas de tiempo	1.1	Otros objetos extraños	1.2	Otras
	2.	Causas operación anormal	2.1	Exceso humedad	2.2	Aporque
	3.	Otras observaciones	3.1	Surco desalineado	3.2	Pérdida del surco

Página ____ de ____

Datos de la persona que registró los datos en este formulario			
Nombres y apellidos:	Cédula:	Teléfono:	
Empresa:	Área:	Cargo:	

3 Formulario para registrar el tiempo de los diferentes eventos durante el trabajo de la cosechadora.

Formato: Toma de tiempos y movimientos Vagones- Campo Alce

Datos tomados por: _____ Hacienda-suerte: _____
 frente: _____ Distancia: _____ Tipo de caña (P/L) _____
 Fecha: _____ Estado de tiempo: _____
 Tipo de alce (cadeneo, Autovolteo, Directo) _____

	Hora de llegada	Tractomula número	Tractor número	Tipo de vagón (HD8,HD12,HD20,HD24 O HD30)	Cantidad de vagones	Hora inicio llenado de vagones	Hora final llenado de vagones	Hora de salida	Observaciones
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									

4 Formulario para registrar el tiempo de los diferentes eventos del proceso de cargue de las tractomulas.