

PROPUESTA DE UNA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACION DE ASIGNACION Y
RUTEO PARA LA COSECHA DE LA CAÑA DE AZUCAR EN EL VALLE DEL
CAUCA

AUTORES

OSCAR MARINO LOZANO PERDOMO
JULIAN DAVID TELLEZ HERNANDEZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA INDUSTRIAL
ZARZAL
2017

PROPUESTA DE UNA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACION DE ASIGNACION Y
RUTEO PARA LA COSECHA DE LA CAÑA DE AZUCAR EN EL VALLE DEL
CAUCA

AUTORES:

OSCAR MARINO LOZANO PERDOMO
JULIAN DAVID TELLEZ HERNANDEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR

JULIAN GONZALEZ VELASCO
Ingeniero Industrial



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA INDUSTRIAL
ZARZAL
2017

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus sinceros agradecimientos a:

La directora de la cede Zarzal, la doctora Cecilia Madriñán Polo, quien con su dedicación y compromiso por los estudiante ha permitido el desarrollo y bienestar educativo.

El coordinador del programa de ingeniería industrial y a su vez asesor de trabajo de grado Julián González Velasco, quien con su conocimiento, orientación, persistencia y motivación ha sido fundamental para la formación de este proyecto de investigación. Al docente Carlos Alberto Rojas quien con su apoyo y conocimiento permitió sobre pasar unas complicaciones en la formulación del proyecto.

Los profesores que formaron parte de esta fase, permitiéndonos consolidar el aprendizaje con su sabiduría, dedicación y paciencia, por todo el apoyo recibido para la realización de este proyecto, por la confianza que depositaron en nosotros y sobre todo por las facilidades que fueron otorgadas en momentos de dificultad.

A todos y cada uno de los integrantes que conforman las diferentes divisiones de la universidad, quienes con su apoyo y compromiso ayudaron a realizar las actividades educativas, las cuales se propusieron a realizar a lo largo de la carrera. El más sincero agradecimiento por permitirnos hoy vernos a puertas de nuestro grado y culminación de nuestra carrera profesional.

Le agradezco principalmente a Dios, por protegerme y bendecirme en cada momento, por ser el gran alimento de mi alma, por ser el todo en mi vida, darme la fortaleza, la sabiduría, la esperanza, mantener tranquilo el ambiente donde permanezco, facilitando así la armonía y concentración necesaria para la elaboración de este trabajo.

Agradezco a mis padres Martin Lozano Vergara y María Aracelly Perdomo M., por ser el motivo del comienzo y culminación de mi carrera profesional, por formar y apoyara una persona centrada en sus proyectos, dedicada a su progreso y el de toda su familia, por enseñar valores de convivencia, sin los cuales se hubiera dificultado la trayectoria de mi vida.

A mi esposa Erika Johanna Varela C., quien ha sido un pilar fundamental en todo el desarrollo de esta etapa educativa, por el acompañamiento en todas las victorias y fracasos académicos, por ser uno de mis ejemplos a seguir en términos de responsabilidad; y finalmente por darme el motivo más grande para seguir con los planes de mi vida, mi hija Saleth Mariana Lozano Varela, quien con su primer añito de vida, ha sido el motivo de mi existir y a quien dedico este trabajo y el título académico prontamente obtenido.

A todos mis compañeros, por regalarme una parte de su personalidad, con la cual he aprendido a conllevar alegrías incontenibles y diferencias, por ser el apoyo en gran parte de actividades académicas y por saber convivir con mi personalidad y forma de ser.

Oscar Marino Lozano Perdomo

Agradezco primero que todo a Dios por haberme permitido culminar esta etapa tan importante de mi vida, guiarme en los momentos de dificultad, darme las fuerzas y sabiduría necesarias para afrontar todas las adversidades y por brindarme la oportunidad de haber vivido este proceso, el cual, estuvo lleno de aprendizajes y experiencias que perduraran por siempre en mi memoria.

Le doy las gracias a mis padres Sandra Hernández y Julián Téllez por su apoyo y amor en todo momento, por ser los pilares fundamentales durante esta fase de mi vida, la cual, sin ellos no hubiera sido posible. Por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación y haber estudiado esta importante carrera.

A mis abuelos que con sus enseñanzas y consejos aportaron significativamente en mi proceso de formación, en especial a Teotiste Roncancio por creer en mí y enseñarme a ser mejor cada día, es a ella y a mi madre a quien dedico este trabajo de investigación.

A mi pareja por haber sido participe de gran parte de esta etapa de mi existencia, estar conmigo en las buenas y en las malas, por su amor incondicional, su paciencia y por ser mi complemento perfecto, la compañía y la entrega absoluta en mi camino.

A mis amigos y compañeros de estudio por haber sido parte esencial en este proceso, contribuyendo a que éste finalizara exitosamente y haber hecho de esta etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare.

Julián David Téllez Hernández

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

CONTENIDO

Pág.

1	INTRODUCCION.....	17
2	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	19
2.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
2.1.1	Descripción del Problema	19
2.1.2	Formulación del Problema	22
3	OBJETIVOS.....	23
3.1	OBJETIVO GENERAL	23
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
4	JUSTIFICACIÓN.....	24
5	MARCO REFERENCIAL	25
5.1	ESTADO DEL ARTE.....	25
5.2	MARCO TEÓRICO	29
5.3	MARCO LEGAL	33
5.4	MARCO ESPACIAL	35
6	DISEÑO DEL METODO DE INVESTIGACION	39
7	SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE UN INGENIO AZUCARERO	42
7.1	PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR.....	42
7.2	PROCESO DE ABASTECIMIENTO DE PLANTA	44
7.2.1	Corte	45
7.2.2	Alce	51
7.2.3	Transporte.....	53
8	CREACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	57
8.1	DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACION	62
8.2	FORMULACION DE LA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACION	64
8.3	MODELO ASIGNACION (PLEM).....	66
8.3.1	Conjuntos	66
8.3.2	Parámetros.....	66
8.3.3	Variables de Decisión.....	67
8.3.4	Función Objetivo	67
8.3.5	Restricciones.....	69
8.4	MODELO DE RUTEO (TSP+MTZ)	70
8.4.1	Conjuntos	70
8.4.2	Parámetros.....	70

8.4.3	Variables de Decisión.....	71
8.4.4	Función Objetivo	71
8.4.5	Restricciones.....	72
9	ANALISIS DE RESULTADOS	73
9.1	SOLUCION MODELO DE ASIGNACIÓN (PLEM)	73
9.1.1	Solución Ingenio A	74
9.2	SOLUCION MODELO RUTEO (TSP + MTZ)	78
9.2.1	Solución Ingenio A	79
10	CONCLUSIONES	86
11	BIBLIOGRAFIA	87

LISTA DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1: Marco legal.....	33
Cuadro 2: Objetivo general y específicos	39
Cuadro 3: Actividades para el cumplimiento del primer objetivo específico.....	39
Cuadro 4: Actividades para el cumplimiento del segundo objetivo específico	40
Cuadro 5: Actividades para el cumplimiento del tercer objetivo específico.....	41

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 Ubicación de los ingenios involucrados en el caso de estudio.....	57
Tabla 2 Ubicación de las suertes estudiadas.....	58
Tabla 3 Número de suertes sembradas en caña de acuerdo con el área.....	58
Tabla 4 Disponibilidad y productividad de las suertes	59
Tabla 5 Capacidad de corte del frente de alce de cada ingenio	59
Tabla 6 Demanda de cada ingenio	60
Tabla 7 Distancia de las suertes a cada uno de los ingenios	60
Tabla 8 Ingresos por tonelada cosechada	61
Tabla 9 Costo de corte de cada frente de alce	61
Tabla 10 Costos de transporte de la caña de azúcar.....	62
Tabla 11 Costo de transporte de cada frente de alce	62
Tabla 12 Asignación de suertes al ingenio A	74
Tabla 16 Ruteos para el ingenio A.....	79
Tabla 17 Nodos frente de alce 1 ingenio A.....	79
Tabla 18 Nodos frente de alce 2 ingenio A.....	80
Tabla 19 Nodos frente de alce 3 ingenio A.....	81
Tabla 20 Nodos frente de alce 4 ingenio A.....	82
Tabla 21 Nodos frente de alce 5 ingenio A.....	83
Tabla 22 Nodos frente de alce 6 ingenio A.....	84
Tabla 4 Disponibilidad y productividad de las suertes	92
Tabla 7 Distancia de las suertes a cada uno de los ingenios	95
Tabla 13 Asignación de suertes al ingenio B	98
Tabla 14 Asignación de suertes al ingenio C.....	102
Tabla 15 Asignación de suertes al ingenio D.....	107
Tabla 23 ruteos para el ingenio B.....	112
Tabla 24 Nodos frente de alce 1 ingenio B.....	113
Tabla 25 Nodos frente de alce 2 ingenio B.....	114
Tabla 26 Nodos frente de alce 3 ingenio B.....	115
Tabla 27 Nodos frente de alce 4 ingenio B.....	116
Tabla 28 Nodos frente de alce 5 ingenio B.....	117
Tabla 29 Nodos frente de alce 6 ingenio B.....	118
Tabla 30 ruteos para el ingenio C.....	119
Tabla 31 Nodos frente de alce 1 ingenio C.....	119
Tabla 32 Nodos frente de alce 2 ingenio C.....	120
Tabla 33 Nodos frente de alce 3 ingenio C.....	121
Tabla 34 Nodos frente de alce 4 ingenio C.....	122
Tabla 35 Nodos frente de alce 5 ingenio C.....	123
Tabla 36 Nodos frente de alce 6 ingenio C.....	124

Tabla 37 Ruteos para el ingenio D.....	125
Tabla 38 Nodos frente de alce 1 ingenio D.....	126
Tabla 39 Nodos frente de alce 2 ingenio D.....	127
Tabla 40 Nodos frente de alce 3 ingenio D.....	128
Tabla 41 Nodos frente de alce 4 ingenio D.....	129
Tabla 42 Nodos frente de alce 5 ingenio D.....	130
Tabla 43 Nodos frente de alce 6 ingenio D.....	131

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: Ubicación geográfica de los ingenios azucareros de la región	20
Figura 2: Problema de asignación de suertes negociables a ingenios.	21
Figura 3: Ubicación de los 13 ingenios de la región.....	30
Figura 4: Corte de la caña de azúcar.....	31
Figura 5: Distribución de fuentes a destinos	32
Figura 6: Ingenios pertenecientes al Valle del Cauca.....	36
Figura 7: Ubicación de los ingenios restantes.	37
Figura 8: Proceso de obtención de azúcar	43
Figura 9: Corte manual	50
Figura 10: Corte mecanizado.....	51
Figura 11: Transporte de la caña de azúcar	55
Figura 12: Variables involucradas.....	63
Figura 13: Operación de la herramienta de optimización.....	65
Figura 14: Diagrama de flujo de la construcción del modelo	65
Figura 15: Ubicación caso de estudio.....	73
Figura 16: Suertes del ingenio A distribuidas en el espacio.....	75
Figura 17: Acercamiento de suertes de ingenio A.	76
Figura 18: Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio A	77
Figura 19: Suertes cosechadas manualmente por el ingenio A.....	78
Figura 32: Ruta optima frente de alce 1 del ingenio A	80
Figura 33: Ruta optima frente de alce 2 del ingenio A	81
Figura 34: Ruta optima frente de alce 3 del ingenio A	82
Figura 35: Ruta optima frente de alce 4 del ingenio A	83
Figura 36: Ruta optima frente de alce 5 del ingenio A	84
Figura 37: Ruta optima frente de alce 6 del ingenio A	85
Figura 20: Suertes del ingenio B distribuidas en el espacio.....	99
Figura 21: Acercamiento de suertes de ingenio B.	100
Figura 22: Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio B	101
Figura 23: Suertes cosechadas manualmente por el ingenio B.....	102
Figura 24: Suertes del ingenio C distribuidas en el espacio	104
Figura 25: Acercamiento de suertes de ingenio C.	105
Figura 26: Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio C	106
Figura 27: Suertes cosechadas manualmente por el ingenio C.....	107
Figura 28: Suertes del ingenio D distribuidas en el espacio	109
Figura 29: Acercamiento de suertes de ingenio D.	110
Figura 30: Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio D	111
Figura 31: Suertes cosechadas manualmente por el ingenio D.....	112
Figura 38: Ruta optima frente de alce 1 del ingenio B	113

Figura 39: Ruta optima frente de alce 2 del ingenio B	114
Figura 40: Ruta optima frente de alce 3 del ingenio B	115
Figura 41: Ruta optima frente de alce 4 del ingenio B	116
Figura 42: Ruta optima frente de alce 5 del ingenio B	117
Figura 43: Ruta optima frente de alce 6 del ingenio B	118
Figura 44: Ruta optima frente de alce 1 del ingenio C	120
Figura 45: Ruta optima frente de alce 2 del ingenio C	121
Figura 46: Ruta optima frente de alce 3 del ingenio C	122
Figura 47: Ruta optima frente de alce 4 del ingenio C	123
Figura 48: Ruta optima frente de alce 5 del ingenio C	124
Figura 49: Ruta optima frente de alce 6 del ingenio C	125
Figura 50: Ruta optima frente de alce 1 del ingenio D	126
Figura 51: Ruta optima frente de alce 2 del ingenio D	127
Figura 52: Ruta optima frente de alce 3 del ingenio D	128
Figura 53: Ruta optima frente de alce 4 del ingenio D	129
Figura 54: Ruta optima frente de alce 5 del ingenio D	130
Figura 55: Ruta optima frente de alce 6 del ingenio D	131

LISTA DE ECUACIONES

Pág.

Ecuación (1) : Maximizar Ingresos por cosecha de la suerte i	67
Ecuación (2) : Restricción de capacidad de los ingenios	69
Ecuación (3) : Restricción de Capacidad de corte	69
Ecuación (4) : Restricción de un solo corte para cada suerte	70
Ecuación (5) : Minimizar costo de transporte de los frentes de alce	71
Ecuación (6) : Restricción de un ingreso por nodo	72
Ecuación (7) : Restricción de una salida por nodo	72
Ecuación (8) : Restricción de rompimiento de sub-rutas.....	72
Ecuación (9) : Restricción de rompimiento de sub-rutas.....	72

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO 1: UBICACIÓN DE LAS SUERTES ESTUDIADAS	90
ANEXO 2: DISPONIBILIDAD Y PRODUCTIVIDAD DE LAS SUERTES	92
ANEXO 3: DISTANCIA DE LAS SUERTES A CADA UNO DE LOS INGENIOS ..	95
ANEXO 4: SOLUCION MODELO ASIGNACION (PLEM).....	98
ANEXO 5: SOLUCION MODELO RUTEO (TSP + MTZ).....	112

GLOSARIO DE TERMINOS

ALZADORA: La primera definición de alzada en el diccionario es trabajador que se encarga de recoger la caña y depositarla en el medio de transporte que la lleva a la central, en este caso se utilizara el termino para las maquinas encargadas de esta función, entendiendo que se requiere una máquina para realizar este trabajo debido a la cantidad de caña y el lugar donde esta se encuentra.

ASIGNACIÓN: actividad de asignar (dar) especialmente cantidad de dinero que se asigna a una persona por realizar un trabajo o desempeñar una función. En el caso de la investigación, la asignación no es de dinero, es de cada una de las suertes (lugares sembrados) para la correcta distribución de los insumos existentes en ella a las entidades u organizaciones demandante.

ASOCAÑA: La Asociación de Cultivadores de Caña de Azúcar de Colombia, Asocaña, es una entidad gremial sin ánimo de lucro, fundada el 12 de febrero de 1959, cuya misión es representar al sector azucarero colombiano y promover su evolución y desarrollo sostenible.

BRIX: Los grados Brix son una unidad de cantidad (símbolo °Bx) y sirven para determinar el cociente total de materia seca (generalmente azúcares) disuelta en un líquido. Una solución de 25 °Bx contiene 25 g de sólido disuelto por 100 g de líquido.

CAÑA: Planta de tallo leñoso, hueco, flexible, de hojas anchas, algo ásperas y flores agrupadas en panojas muy ramosas; puede alcanzar hasta 4 m de altura.

CEPAS: es, en microbiología, población de células de una sola especie descendientes de una única célula, usualmente propagada clonalmente, debido al interés en la conservación de sus cualidades definitorias. De una manera más básica puede definirse como un conjunto de especies bacterianas que comparten, al menos, una característica.

CHULQUINES: numerosos tallos débiles que no representan algún valor para la molienda, emergentes del tallo original (caña de azúcar).

COGOLLOS: Parte interior que es la más apretada, blanca y tierna de algunas plantas. En este caso, pertenecen a cada una de las cañas de azúcar ubicadas en el terreno.

COOPETICIÓN: La coopetición es una estrategia especial y original de gestión de la competición sobre un mercado; se trata de colaborar con algunos de los competidores, para así intentar captar un beneficio común que de otra manera sería difícil de conseguir.

COSECHA: En agricultura la cosecha se basa en la recolección de los frutos, semillas u hortalizas de los campos en la época del año en que están maduros. La cosecha marca el final del crecimiento de una estación o el final del ciclo de un fruto en particular.

COSECHADORA: Se denomina cosechadora o trilladora a una máquina dedicada a realizar labores de recolección de productos agrícolas. En sus comienzos, esta máquina era accionada por un tractor y servía para trabajar en el sentido de cortar el cultivo, que posteriormente era procesado por otros medios para extraer los granos, proceso denominado *trilla* o *trillado*. Actualmente lo podemos encontrar en una sola máquina que realiza ambas operaciones y que es autopropulsada.

DEXTRANA: es un polisacárido complejo y ramificado formado por numerosas moléculas de glucosa, formando unidades en cadenas de longitud variable (de 10 a 150 kilodaltons).

MINIMIZAR: Reducir considerablemente, o al mínimo, una cosa material o inmaterial, especialmente el valor o importancia de algo o alguien. En este caso se deberá incurrir en encontrar la manera de minimizar el costo perteneciente a la distribución de las fuentes frente a su destino.

MODELO MATEMÁTICO: es uno de los tipos de modelos científicos que emplea algún tipo de formulismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables de las operaciones, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

MODELO TSP: (Traveling Salesman Problem) problema del agente viajero, responde a la siguiente pregunta: Dada una lista de ciudades y las distancias entre cada par de ellas, ¿cuál es la ruta más corta posible que visita cada ciudad exactamente una vez y regresa a la ciudad origen?, el objetivo es encontrar un recorrido completo que conecte todos los nodos de una red.

OPTIMIZACIÓN: En matemáticas e informática, método para determinar los valores de las variables que intervienen en un proceso o sistema para que el resultado sea el mejor posible, en este caso se utiliza para aumentar la utilidad del sistema, minimizando los costos ocasionados por la mala distribución de las fuentes de materia prima.

PROGRAMACIÓN LINEAL: corresponde a un algoritmo a través del cual se solucionan 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.

RUTEO: Cálculo de ruta óptima para vehículos entre un punto de origen y un punto de destino a partir de cartografía del proyecto OpenStreetMap (proyecto en el cual se colabora para crear mapas libres y editables). El encaminamiento, enrutamiento o ruteo es la función de buscar un camino entre todos los posibles en una red de paquetes cuyas topologías poseen una gran conectividad.

SACAROSA: Azúcar que se encuentra en el jugo de muchas plantas y se extrae especialmente de la caña dulce y de la remolacha; se emplea en alimentación como edulcorante nutritivo y sus ésteres como aditivos.

SUERTE: Delimitación de territorio determinado para un fin específico, en el caso de estudio se denomina como terreno cultivado de caña de azúcar.

SURCO: un surco es una zanja, una cuneta o un cauce que se realiza sobre un terreno, los surcos que se hacen con un arado o con una herramienta similar son muy importantes durante la labranza. Estas hendiduras también son empleadas para el riego del terreno.

1 INTRODUCCION

En el Valle del Cauca, ningún producto ha generado tantas transformaciones culturales como la caña de azúcar. Ellas se pueden observar desde épocas tan tempranas como en (1540) cuando por primera vez se introdujo; el sector azucarero colombiano se encuentra ubicado en el valle geográfico del río Cauca, que abarca 47 municipios desde el norte del departamento del Cauca, la franja central del Valle del Cauca, hasta el sur del departamento de Risaralda. En esta región hay 225.560 hectáreas sembradas en caña para azúcar, de las cuales, el 25% corresponde a tierras propias de los ingenios y el restante 75% a más de 2.750 cultivadores de caña (ASOCAÑA, 2015). Dichos cultivadores abastecen a 13 ingenios de la región.

Debido a las características del sector, a las relaciones de los ingenios con los cultivadores se presentan diversas situaciones en las que un ingenio debe desplazarse una gran distancia para cosechar una suerte y esto ocasiona un aumento en sus costos de cosecha¹ debido al costo por kilómetro recorrido; muchas suertes² están próximas a un ingenio pero pertenecen a otros que se encuentran ubicados a grandes distancias. Desde una perspectiva global está mal visto pues en un sistema donde todas sus partes trabajan conjuntamente por un objetivo en común es sumamente importante hacer una buena asignación de recursos pues esto asegura un buen rendimiento de los subsistemas a su vez asegurando un rendimiento más óptimo del sistema.

El presente proyecto abordara diversos temas de investigación basados en un acercamiento al análisis, diseño y desarrollo de las actividades de cosecha (corte, alce, y transporte). Enfocándose en la minimización de costos a partir de una redistribución de las hectáreas cultivables del sector objeto de estudio (zona centro norte del valle geográfico del río cauca), para así generar un impacto positivo en la competitividad global de los ingenios a estudiar gracias a la optimización de estos procesos mediante la compra-venta estratégica de sus recursos.

Para un desarrollo eficiente del proyecto se va a realizar una descripción detallada del problema en cuestión, posteriormente se identifican unos objetivos encaminados a la consecución adecuada de soluciones o propuestas que

¹ Es la etapa del proceso productivo de azúcar o alcohol que abastece de caña a los ingenios azucareros.

² Mínima extensión de tierra, en la que se dividen las haciendas cultivadas de caña, por cada ingenio.

evidencien escenarios en los que la eficiencia global del sistema sea óptima, además soluciones que permitan experimentar y ver el sistema desde diferentes perspectivas; para lo que se debe seguir una serie de pasos que conlleven al cumplimiento de los objetivos planteados, tales como diagnosticar y caracterizar el estado actual del sistema, buscar de la literatura modelos de referencia, diseñar y construir modelo del sistema que brinde los escenarios mencionados y finalmente realizar un análisis detallado de la información obtenida que exponga las ventajas de la implantación en el entorno empresarial.

Con el presente informe, se pretende generar una propuesta donde los dueños de la tierra se empoderen, procurando con ello definir el tipo de caña óptimo para cultivar según las características de la tierra, además de tener capacidad de negociación para establecer que ingenio puede ser quien adquiera la tierra, buscando con ello minimizar los costos generales asociados a la cosecha. Esta propuesta permitiría a los poseedores de la tierra alcanzar mayores ganancias en la negociación y establecería nuevos actores en el sistema de producción de caña, al establecer un verdadero clúster en la producción.

2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.1 Descripción del Problema

La industria azucarera es una de las industrias con mayor actividad económica en el sector del Valle geográfico del Río Cauca, presentando una participación importante en la generación de empleo en todo el país, pues según un estudio realizado por Fedesarrollo (2014) por cada empleo generado por los ingenios azucareros en sus plantas de producción, se generan 28,4 empleos adicionales en otros sectores de la economía; gracias a la actividad manufacturera de los ingenios, se generan 265 mil empleos a través de toda la cadena de valor. Por otro lado, además de la generación de empleo se genera una contribución tributaria reflejada en los siguientes datos: cada peso que pagan los ingenios de impuestos a la producción se traduce en 10 veces más impuestos pagados por las actividades del resto de la cadena (ASOCAÑA, 2015). De esta manera, los ingenios son grandes generadores de recursos destinados a financiar inversión pública, entre la que se encuentra la educación y la salud (Ver Figura 1: **Ubicación geográfica de los ingenios azucareros de la región**).

Sin embargo, se han venido presentando problemáticas que afectan directamente los intereses monetarios de este sector como un aumento en las importaciones debido a la globalización y crecimiento del mercado. Por ejemplo, en el año 2012 se registró el mayor volumen de importaciones de azúcar en toda la historia cuando llegaron del exterior más de 306.000 toneladas, mientras que en el 2013 sumaron 286.000. Afirma el presidente de Asocaña, Luis Fernando Londoño (Domínguez, 2014), Dichas importaciones podrían llegar a ocasionar un detrimento de la producción nacional, esta situación da pie a que la industria azucarera formule y se plantee estrategias para contrarrestar el impacto económico y social que esto acarrea, por esta razón el proyecto propone una posible acción de contingencia fundamentada en la coopecion³ de los ingenios objeto de estudio, lo que llevaría a analizar al sector desde un enfoque sistémico y tomarlos como una misma organización para así detallar las posibles asignaciones de los recursos y trabajar por el mejoramiento global de estos.

³ Es la colaboración oportunista entre diferentes actores económicos que son además competidores.

Figura 1: Ubicación geográfica de los ingenios azucareros de la región



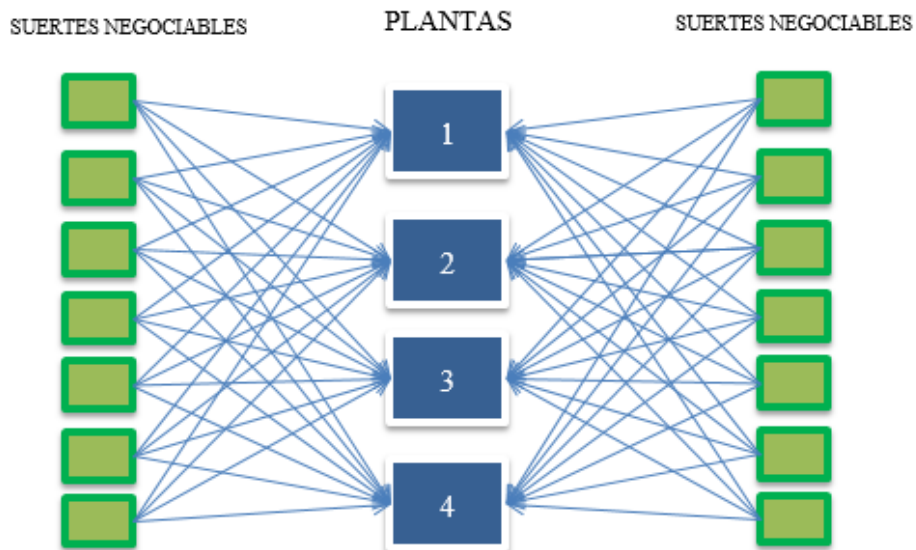
Fuente: elaboración propia

Este proyecto busca realizar un estudio que permita brindar una alternativa de solución encaminada a la maximización de los ingresos por cosecha mediante la reducción de los costos de obtención de la caña de azúcar, para así obtener procesos más eficientes y poder estar en la capacidad de competir con los valores de importación mencionados anteriormente. Para el desarrollo de esta investigación se deberá enfocar en uno de los procesos inmersos en la elaboración del azúcar asociado con la cosecha de la caña de azúcar, en el cual se presentan diversos factores que influyen directamente en los costos operativos de la compañía, de tal manera que de la optimización de estos depende el volumen total de la producción; en este proceso existen tres fases que han sido

objeto de estudio durante varios años denominados corte, alce y transporte. Sin embargo, estos estudios abordan problemáticas enfocadas en las técnicas y recursos a utilizar en el proceso, es decir, se centran en determinar cuál es el mejor tipo de corte, el frente de alce adecuado y el tipo de transporte que se debe utilizar para la optimización de dicho proceso.

No obstante, el desarrollo de este trabajo de investigación tiene como propósito la incorporación de otro factor relevante involucrado en el subproceso de transporte; dándole un alto nivel de importancia a la distancia existente entre las suertes y las plantas de procesamiento, distancias que son de gran tamaño debido a la ubicación, distribución, negociación y otros agentes propios de los terrenos existentes en la región objeto de estudio, comprendiendo que la disminución de dichas distancias ocasionaría un impacto en los costos inmersos en la cosecha de la caña de azúcar. Para el proyecto se involucran diferentes estudios relacionados con la asignación estratégica de los terrenos cultivados y cultivables comprendidos, sin dejar de lado la importancia de adoptar un enfoque sistémico en el cual se evalúe la eficiencia global del sistema comprendido por los ingenios objetos de estudio (Ver Figura 2)

Figura 2: Problema de asignación de suertes negociables a ingenios.



Fuente: elaboración propia

El desarrollo de esta investigación se llevará a cabo en el Centro y Norte del Valle geográfico del Río Cauca, en la cual se encuentran presentes cuatro de los trece ingenios que comprenden la industria azucarera de la región.

2.1.2 Formulación del Problema

De acuerdo a la problemática anteriormente expuesta surge entonces la siguiente pregunta de investigación: ¿una asignación estratégica de las suertes impactaría positivamente la efectividad global de la región caso de estudio?

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer una herramienta de optimización de asignación y ruteo que contribuya al mejoramiento de la competitividad global y particular de los ingenios del valle geográfico del río Cauca.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Caracterizar el sistema de abastecimiento de los ingenios objeto de estudio, identificando así factores críticos e información relevante acerca de estos.
- ❖ Proponer una herramienta de optimización que represente el sector en cuestión.
- ❖ Enunciar las ventajas de una herramienta de optimización y de cooperación en el valle geográfico del río Cauca.

4 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación pretende incursionar en una oportunidad de mejora observada en uno de los procesos relacionados con la cosecha de la caña de azúcar para un grupo de ingenios de la región, proceso en el cual es posible obtener una disminución en los costos pertenecientes al transporte de la materia prima hasta las plantas de procesamiento. El presente trabajo abordará una problemática específica centrando sus estudios en la disminución de costos en el transporte. Debido a que los costos relacionados con este factor tienen una gran participación en los costos totales de los ingenios objetos de estudio.

Es por esto que se hace necesario evaluar la distribución actual de las suertes de las cuales el grupo de ingenios es abastecido y así poder planear una nueva asignación óptima de dichas fuentes.

Al dar cumplimiento al objetivo principal del proyecto, se tendrá una organización estratégica de las suertes cultivadas y cultivables a cada uno de los ingenios pertenecientes a la región del valle geográfico del río Cauca, brindando así una disminución pertinente de las distancias existentes entre “fuente y destino” la cual se verá reflejada en la disminución de los costos asociados a este sector y de igual manera al adoptar un enfoque sistémico que involucra a estos ingenios, obteniendo un aumento en la eficiencia global del sistema. Es por esto que las partes directamente beneficiadas serán cada uno de los ingenios involucrados en el estudio. Sin embargo, no se puede dejar de lado una característica propia de las suertes abarcadas, referente al dominio de estas; es decir no todo el 100% de las suertes incorporadas en el estudio son de propiedad de los ingenios, lo que implica la participación de un tercero en la negociación de estas tierras. De esta manera, una optimización en los costos para los ingenios podría generar un aumento de los ingresos de los propietarios de las suertes no propias (alquiladas), debido a las nuevas negociaciones que implicaría para ellos una diferente asignación de suertes a los ingenios.

5 MARCO REFERENCIAL

5.1 ESTADO DEL ARTE

Para el problema de investigación planteado en este proyecto, fue menester iniciar con una revisión de información referente a antecedentes de material documental que soporte y oriente el trabajo en cuestión. En este proceso cabe resaltar los siguientes documentos como aproximación teórica:

(Arbelaez Restrepo & Marin Perez, 2001) En su publicación *“Sistema de Costeo ABC aplicado al Transporte de Carga”* han utilizado la implementación de un sistema de costeo para proponer un cambio en los costos del sector transporte y en particular para el transporte de carga relacionado con cada una de las rutas, obteniendo un análisis que muestra la tendencia a disminuir el costo referente a las actividades.

(Larrahondo A. & Villegas, 1995) En su trabajo *“Control y características de maduración”* presentan una descripción de las características de maduración de la caña de azúcar, los factores que pueden afectarla, una detallada información de la maduración de la caña en el valle geográfico del río Cauca y una asesoría para la determinación puntual del método para determinar el grado de maduración de la misma.

(Server Garcia, Dieguez Batista, & Fernandez Aedo, 2002) En su trabajo *“El Transporte de la Caña de Azúcar Utilizando la Modelación”* utilizan la teoría de colas para estudiar la composición óptima de pelotones en el corte mecanizado y así precisar el número necesario de camiones a contratar en cada etapa de trabajo. Llegando a la conclusión de que el estudio de la composición de los pelotones para el corte mecanizado, puede ser analizado como un fenómeno de espera y la composición “óptima” teórica es variable, dependiendo del rendimiento del campo, la eficiencia del centro de recepción, la distancia de tiro y el tipo de caminos.

(Miranda, 2004) En su trabajo *“Transporte, ruteo y asignación de vehículos”*, expone un ejemplo de solución destinado al problema general de ruteo de vehículos mediante la utilización de un caso práctico, mediante el cual expresa los diferentes tipos de ruteo, las características que debe tener un problema de

asignación de vehículos para ser tratado por el método de solución y los métodos de solución que se pueden aplicar a este problema.

(Lopez Milan , Miquel Fernandez , & Pla Aragones, 2005) En su artículo titulado *“Sugar cane transportation in Cuba, a case study”* pretenden atacar la problemática de la minimización de los costos del corte de la caña de azúcar y su transporte hasta los molinos, implementando un modelo de programación lineal entera mixta con el cual finalmente lograron desarrollar una herramienta que permite determinar las cuotas de programación diaria de transporte por carretera y cosecha de caña de corte medio, cumpliendo con el objetivo de la investigación el cual se definía por la minimización de los costos de transporte.

(Alvear V. & Rodriguez C., 2006) En la investigación *“Estimación del costo por kilómetro de una empresa de transporte de carga industria agrícola, región del Maule, Chile”* se encargan de aplicar un sistema de costeo absorbente, el cual es el método más tradicional y principalmente se utiliza para fines financieros; con el apoyo de un trabajo de campo donde recolectaron todos los datos de este trabajo, finalmente llegan al objetivo de la investigación donde ofrecen el costo por kilómetro recorrido y sus variaciones

(Barbosa, 2009), En su artículo titulado *“Aproximación a un canje de suertes de caña de azúcar a través de un modelo de programación lineal”* abordó el problema de canje de suertes entre dos ingenios hermanos, donde presenta una propuesta de modelo matemático de programación lineal entera, como herramienta donde busca asignar cada suerte a uno de los ingenios, minimizando los costos asociados a la cosecha, y a su vez asignando el modo de corte, alce y transporte óptimo para cada ingenio. Resultando así una herramienta que permite tener desde el inicio de cada periodo las posibles suertes a canjear, además se puede observar el planteamiento del modelo matemático, que por medio de conjuntos e índices permite encontrar una solución con el uso total o parcial de las tierras.

(Caicedo, 2010), En su publicación *“Logística de cosecha: Evaluación de Tiempos y Movimientos. Indicadores y Control”* profundiza en una situación relacionada con la falta de coordinación en el ciclo de transporte, trayendo como consecuencia el aumento del tiempo en cola de los vehículos, la subutilización de recursos y un desabastecimiento de caña. Implementando un estudio de tiempos y movimientos basados en datos de estudios realizados anteriormente. La elaboración de este trabajo brinda una eficiencia óptima en el ciclo de transporte, determinando una serie de condiciones y recomendaciones para el logro de un adecuado rendimiento de los recursos y una disminución en el deterioro de la caña.

(Gonzalez Parra & Teran Cantillo, 2010) En su trabajo de investigación “Diseño de un modelo para la asignación y ruteo de las bombas estacionarias desde las plantas de concreto de holcim (Colombia) S.A, zona Bogotá.” Definen un modelo que establece la asignación de la flota de vehículos a cada planta teniendo en cuenta variables como son proyecciones de venta, indicadores de consumo, costos y tiempos de transporte. Lo que permitió optimizar los recursos en este caso la flota y ubicarla en cada planta de manera gradual; El trabajo presenta una heurística de construcción de rutas basada en criterios de ubicación y tiempos de llegada a cada UPZ (áreas urbanas más pequeñas que las ciudades y más grandes que el barrio) desde la planta asignada; se identificaron los factores que afectan el proceso de asignación y ruteo de los vehículos como son: la demanda del producto y servicio, cantidad de vehículos, tiempos de recorrido y entrega, consumos de combustible, restricciones legales e indicadores de servicio.

(Adarme Jaimes, Fontanilla Díaz , & Arango Serna , 2011), En su artículo titulado “*Modelos logísticos para la optimización del transporte de racimos de fruto fresco de palma de aceite en colombia*” buscan la disminución del costo de operación logística asociado con la asignación de vehículos en las etapas de recolección y transporte de los racimos de Fruto Fresco, mediante la implementación de dos modelos logísticos uno relacionado con la operación general y otro donde se propone la condición single sourcing. El resultado de esta propuesta brinda una herramienta básica que permite medir incidencias técnicas y económicas de cambios en la forma como opera el sistema de transporte.

(Amú, 2011) Presenta un trabajo de investigación titulado “*modelo de simulación y optimización para la gestión logística del sistema de abastecimiento de caña en un ingenio sucro-alcoholero colombiano*” donde afronto el problema de asignación de número de vehículos y maquinaria a los frentes de cosecha de forma óptima; Por medio de la simulación pudo observar el impacto de cada variable de entrada sobre el objetivo, hacer análisis de sensibilidad e identificar las imitaciones y cuellos de botella del sistema; Mediante la optimización identificó la cantidad de caña y recursos que se deben asignar a cada frente, al igual que el número de vehículos requeridos para alcanzar suministros diarios de caña establecidos. La calidad y rapidez, e incluso el costo del producto, dependen altamente de la sincronización del proceso de abastecimiento en la cosecha pues son muy sensibles al tiempo de almacenamiento y transporte, antes de su procesamiento; disminuir los tiempos perdidos en la suerte y el patio fue uno de los focos a trabajar en la cadena de abastecimiento estudiada.

(Décima, Majorel Padilla, Willa, Rodríguez, & Diez, 2011) Presentan en su trabajo “*Optimización del transporte de caña de azúcar utilizando sistemas multiagentes y algoritmos genéticos grouping*” una propuesta para la optimización del tránsito de caña de azúcar desde los productores hasta los ingenios, utilizando Sistemas multiagentes por un lado y por el otro algoritmos genéticos tipo grouping. Donde

se encontró que ambos sistemas encuentran la solución en un tiempo linealmente proporcional al tamaño del problema, obteniéndose resultados completamente viables aún para los ejemplos más grandes utilizados.

(Ochoa, 2012) En su artículo denominado *“Modelo de ruteo con asignación de cargas multimodal”* plantea la problemática relacionada con las decisiones que se deben tomar sobre las actividades logísticas de aprovisionamiento o distribución dentro de una cadena de abastecimiento utilizando una flota de automóviles. Utilizando la formulación de un modelo matemático de programación lineal mediante la combinación de un modelo de ruteo con asignación de cargas y uno de transporte multimodal, obteniendo así una técnica satisfactoria para la toma de dichas decisiones las cuales optimizan los valores respecto a la reducción de los costos asociados a esta operación.

(Aguirre Otalvaro & Patiño Giraldo, 2012) En su trabajo de grado *“propuesta para reducir el costo logístico del transporte primario desde la cervecería del valle a los diferentes centros de distribución mediante un modelo matemático”* buscan la forma más óptima de distribuir el producto hasta su destino, utilizando un modelo matemático de programación lineal entera para definir el tamaño y cantidad de viajes y el auto en que se debe hacer, El modelo matemático permitirá a futuro lograr a la Cervecería del Valle minimizar los costos logísticos, utilizando la información de las cantidades a abastecer brindada por Supply Chain y de esta manera al introducir estos datos al modelo y correr el modelo.

(Zanjirani Farahani, Hekmatfar, Boloori Arabani, & Nikbakhsh, 2013) En su publicación *“Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications”*, abordan el problema de localización realizando un estudio sobre sus avances y una revisión de todas sus variantes, en particular, los modelos matemáticos, métodos de solución, las especificaciones principales y aplicaciones. Determinando finalmente las líneas de investigaciones futuras y parámetros fundamentales para su realización.

(Dominik Jena & Poggi, 2013) Presentan en su trabajo *“Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer”* una propuesta de un modelo de programación entera mixta con el cual pretenden abordar los problemas presentados al momento de realizar la planificación táctica y operativa en la producción de azúcar y alcohol en Brasil, basados en la utilización de una heurística, logran la obtención de un instrumento de gran utilidad para la optimización de dicha producción, la cual es fomentada en la implementación de un caso de estudio.

(Rivera Arroyave & Velasco Naranjo , 2014) En su artículo, llamado *“Desarrollo de un modelo de distribución urbana de mercancías con plataformas logísticas aplicado a la ciudad”* plantean el desarrollo de un modelo matemático de distribución y asignación basado en plataformas logísticas este modelo se realizó con base en el Problema de Ruteo de Vehículo (VRP por sus siglas en inglés) utilizando un algoritmo Greedy el cual se corrió en Java; al final se dará a conocer la simulación de un conjunto de puntos, determinando la gran utilidad y efectividad de esta gran herramienta para la asignación y ruteo de la distribución de la mercancía de cada empresa.

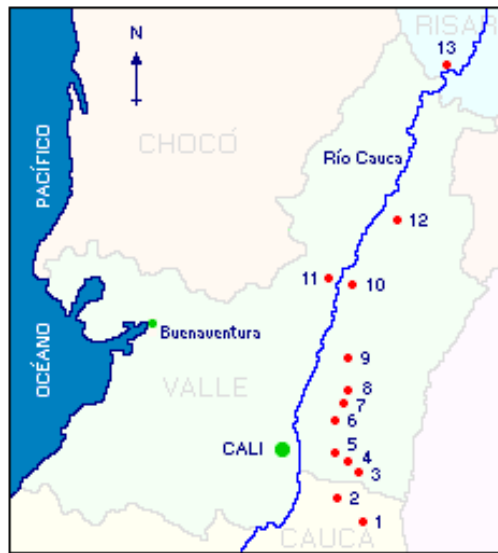
(Toro Ocampo, Bolaños, & Granada Echeverri, 2014) En su artículo *“Solución del problema de múltiples agentes viajeros resuelto mediante técnicas heurísticas”*, en el cual se presentan algunos aspectos importantes a tener en cuenta en la toma de decisiones en la gestión logística haciendo especial énfasis en la red de distribución. Bajo esa óptica se identifica el problema del m-TSP, con la aplicación de esta técnica encuentran una solución promedio para cada secuencia mejorada con cada una de las estrategias de búsqueda local.

5.2 MARCO TEÓRICO

En el valle geográfico del río Cauca, se encuentran ubicados la mayor parte de los ingenios azucareros del país colombiano, la industria azucarera latinoamericana, presenta grandes productoras dentro de las cuales existen unos que poseen las mejores y alta participaciones en la economía y alta proporción de productos en el mercado. (Ver Figura 3).

Siendo consecuentes con esto, los ingenios azucareros colombianos, no son los únicos encargados de satisfacer la demanda de las personas necesitadas de este producto endulzante. Los ingenios brasileños, son unos de los más altos y riesgosos competidores del mercado nacional, gracias a la cercanía de los dos países, al alto comercio en el país vecino y a la gran evolución de la industria brasileña, los ingenios del país vecino, están en la capacidad de ofrecer el producto final a un precio más asequible para el mercado objetivo de dichas organizaciones, con lo mencionado anteriormente, se encuentra un problema directo para los ingenios nacionales en el momento de ofrecer a sus clientes, el producto totalmente finalizado.

Figura 3: Ubicación de los 13 ingenios de la región.

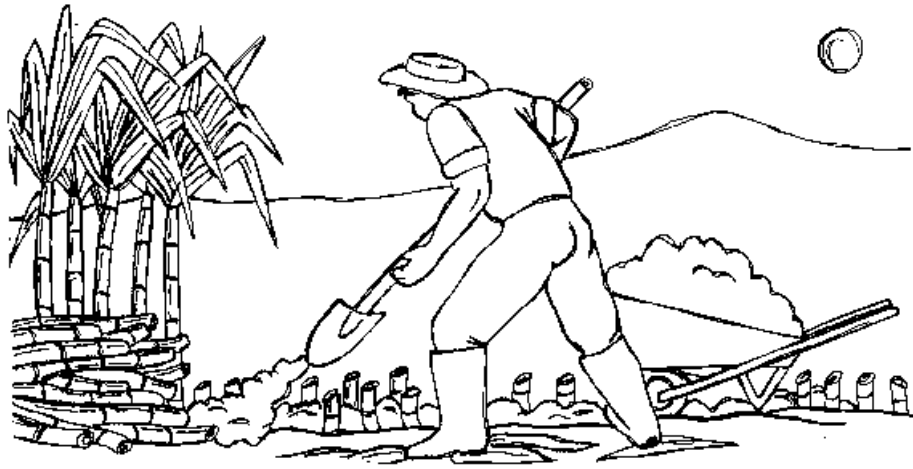


Fuente: (Azucar de caña, s.f.)

Una de las posibles soluciones al problema tratado por la investigación, es la disminución de precios del producto final (azúcar) a los consumidores o usuarios que necesiten este producto para desarrollar alguna de sus actividades pertinentes, disminución a la que se quisiera llegar sin afectar el porcentaje de utilidad planteado en su actividad económica cada organización. Una de las maneras más apropiadas para la disminución de precios del producto final por parte de los ingenios sin afectar el porcentaje de ganancia de cada uno, es conseguir la manera más adecuada de disminuir los costos asociados al proceso de producción de azúcar desde su siembra, hasta su elaboración.

En el proceso de producción de la caña de azúcar, se encuentran amarrados sub-procesos tales como: la siembra de la caña, cosecha de su materia prima, procesamiento de la caña de azúcar para su pulverización, entre otros. Uno de los sub-procesos abordados en esta investigación, es la parte de cosecha de la caña de azúcar, que es fundamental para la iniciación de la producción siendo la forma de conseguir la materia prima; dicho sub-proceso, está compuesto por tres actividades relevantes, corte de la materia prima (caña de azúcar), alce o recolección de este producto y por último el transporte de la caña de azúcar desde su fuente de cosecha, hasta el destino de elaboración del producto (ingenio).

Figura 4: Corte de la caña de azúcar.



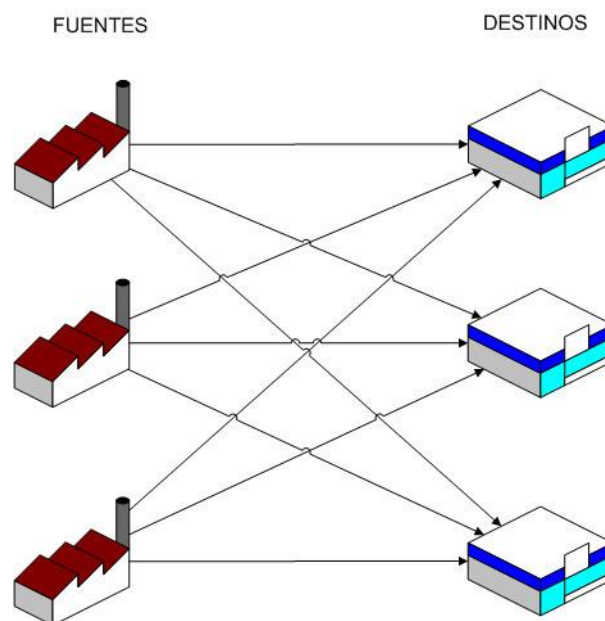
Fuente: (Caña de azucar, s.f.)

Para lograr una disminución respectiva de este sub-proceso, se tiene como objetivo asignar la suerte (fuente) más óptima en capacidad de materia prima, disposición al cabio de tipo de corte necesario y a la menor distancia recorrida para la transición de dichos objetos.

Esta asignación óptima de las fuentes que abastecen las plantas de producción se abordara mediante un modelo matemático de programación lineal entera mixta, por el motivo de que la materia prima proveniente de una única fuente que sea asignada debe ser procesada por una sola planta de procesamiento, los modelos matemáticos de asignación han sido útiles en las soluciones de varios problemas planteado en otras investigaciones como para determinar el método más óptimo para el transporte de cerveza dependiendo de la capacidad que poseían los camiones, la cantidad de producto a transportar y el número de viajes necesarios para la correcta distribución del producto a distintos lugares, también ayudo en la solución de un problema de disminución de costos de transporte de la caña de azúcar, mediante la asignación correcta de cuotas programadas para el transporte de ella y de cosecha de corte medio, de igual forma el problema de asignación también fue utilizado para solucionar una incógnita en la asignación de la flota de transporte para la distribución de un producto, teniendo en cuenta variables como son proyecciones de venta, indicadores de consumo, costos y tiempos de transporte.

Además de la asignación óptima de la suerte a el ingenio dependiendo de la oferta y demanda de materia prima y la distancia entre fuente y destino, este modelo a su vez debe de tener en cuenta para su asignación, el tipo de corte sea manual o mecánico de la caña de azúcar y ser consecuente con su asignación para poder brindarle al ingenio la restricción de mandar un frente de alce asociado con cada tipo de corte; esta asignación la hará buscando la mejor configuración de suerte, ingenio, tipo de corte y tipo de alce más económico para la organización.

Figura 5: Distribución de fuentes a destinos



Fuente: (Investigacion de Operaciones, s.f.)

Por otro lado, la investigación también brindara a sus interesados en la asignación óptima de suertes, la forma más balanceada y ordenada de abordar cada fuente asignada para cumplir con su objetivo de ser abastecido con la materia prima pero de la manera menos costosa; para la solución de este punto del problema planteado en la investigación, se hará uso de otra herramienta de la investigación de operaciones llamado modelo de ruteo, el cual tiene como objetivo buscar un camino entre todos los posibles en una red de puntos cuyas topologías poseen una gran conectividad. Dado que se trata de encontrar la mejor ruta posible, en consecuencia cuál es la "métrica" que se debe utilizar para medirla, sea distancia, ventanas de tiempo, condiciones de seguimiento, entre otras. Esta herramienta

también ha sido utilizada en diferentes investigaciones tales como: optimizar la distancia recorrida por los vehículos dedicados a la recolección de residuos sólidos en un municipio del valle del cauca, determinando condiciones relacionadas a la mínima cantidad de veces que debería pasar cada vehículo por cada calle y que ellos estaban ligados a pasar por el total de vías existente en el municipio; de igual manera, se ha utilizado para determinar la mejor manera (ruta optima) por la cual los vehículos destinados para la distribución de mercancías de cada empresa realicen su objetivo, beneficiando los intereses de la organización.

5.3 MARCO LEGAL

En la contemplación del problema de investigación se encuentran actividades comunes que por claros motivos están controladas por leyes y artículos pertenecientes a la constitución política del país. Para la disposición final de esta investigación, las organizaciones (ingenios) deberán implementar cada uno de las características asociadas a su actividad sin incurrir en algún desacato de las leyes mencionadas a continuación.

Cuadro 1: Marco legal

Ley	Articulo	Descripción
Libre Competencia	333	La actividad económica y la iniciativa privada son libres, dentro de los límites del bien común. Para su ejercicio, nadie podrá exigir permisos previos ni requisitos, sin autorización de la ley.
Ley de Cartelización	88	La ley regulará las acciones populares para la protección de los derechos e intereses colectivos, relacionados con el patrimonio, el espacio, la seguridad y la salubridad pública, la moral administrativa, el ambiente, la libre competencia económica y otros de similar naturaleza
ley 939 de 2004	1,2,3,4,5,6	Ley que tiene como objetivo hacer exenta de la retención liquida generada por el

		aprovechamiento de nuevos cultivos de tardío rendimiento, las condiciones y/o requisitos para ser exentado de la acción, el tiempo de cubrimiento, la aclaración de conceptos, entre otros.
LEY 256 DE 1996	1-33	Ley tiene por objeto garantizar la libre y leal competencia económica, mediante la prohibición de actos y conductas de competencia desleal, en beneficio de todos los que participen en el mercado
ley 155 de 1959	1-20	Por la cual se dictan algunas disposiciones sobre prácticas comerciales restrictivas. Quedan prohibidos los acuerdos o convenios (sic) que directa o indirectamente tengan por objeto limitar la producción, abastecimiento, distribución o consumo de materias primas, productos, mercancías o servicios nacionales o extranjeros, y en general, toda clase de prácticas, procedimientos o sistemas tendientes a limitar la libre competencia y a mantener o determinar precios inequitativos.
ley 446 de 1998	143	Funciones sobre competencia desleal. La Superintendencia de Industria y Comercio tendrá respecto de las conductas constitutivas de la competencia desleal las mismas atribuciones señaladas legalmente en relación con las disposiciones relativas a promoción de la competencia y prácticas comerciales restrictivas.
LEY 1328 DE 2009	1-38	Por la cual se dictan normas en materia financiera, de seguros, del mercado de valores y otras disposiciones
Ley 87 de 1993	1-16	por la cual se establecen normas para el ejercicio del control interno en las entidades y organismos del estado y se dictan otras disposiciones
Ley 26.991	1-27	La presente ley regirá con respecto a la compraventa, permuta y locación de cosas muebles, obras y servicios —sus materias primas directas o indirectas y sus insumos

Fuente: elaboración propia

5.4 MARCO ESPACIAL

El problema de investigación tratado en este trabajo, estará disponible para cada uno de los 13 ingenios azucareros, los cuales se encuentran 10 de ellos ubicados en el departamento del valle del cauca el cual cubre un territorio que va desde la costa del Pacífico y continúa hacia el oriente pasando la Cordillera Occidental, el valle del río Cauca hasta la Cordillera Central, donde alcanza límites con el departamento del Tolima, limita al norte con los departamentos de Risaralda y el Chocó, al sur con el Departamento del Cauca, al oriente con Quindío y Tolima, y al Occidente con el océano Pacífico y el Chocó.

Gentilicio: Vallecaucano

Superficie: 22.140 Km.²

Población: 4'566.875 habitantes

Densidad: 204.31 Hab/Km.²

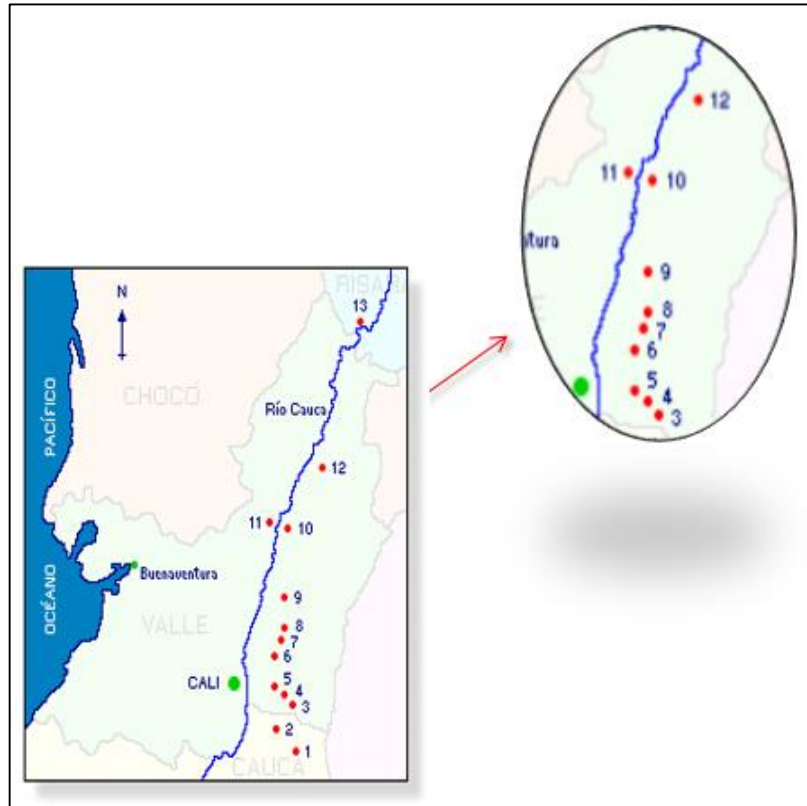
Capital: Cali 2'344.734 habitantes.

Como se puede apreciar en el mapa geológico, la región del Valle del Cauca es relativamente joven; esta región es mesozoica de origen volcánico. La temperatura promedio de la región fluctúa entre los 23 y 24 °C, que corresponde al piso térmico cálido. La humedad relativa fluctúa en el rango 65%-75%. Es una región intertropical con dos épocas lluviosas y dos secas al año. La primera época seca entre diciembre y febrero, la primera época lluviosa va de marzo a mayo, la segunda época seca de junio a septiembre y la segunda época lluviosa de octubre a noviembre. Los índices de precipitación anual son: 1.589 mm en el norte (133 días de lluvias), 1882 mm al sur (109 días de lluvias) y 938 mm en el centro (100 días de lluvias). (Ver Figura 6).

El departamento es lugar de numerosos parques nacionales, de los cuales los Farallones de Cali, la Bahía Málaga y la isla Malpelo se ubican completamente dentro de su territorio. Además, comparte áreas de otros parques nacionales naturales con más departamentos. Estos son:

- ❖ Parque nacional natural Las Hermosas, con Tolima.
- ❖ Parque nacional natural Nevado del Huila, con Huila, Tolima y Cauca.
- ❖ Parque nacional natural Tatamá, con Risaralda.

Figura 6: Ingenios pertenecientes al Valle del Cauca.



Fuente: Elaboración propia

Entre las iniciativas privadas de conservación y educación ambiental se encuentran el Jardín Botánico La Manigua, en el Pacífico vallecaucano, y el Jardín Botánico de Cali, dentro del área urbana de la capital del departamento.

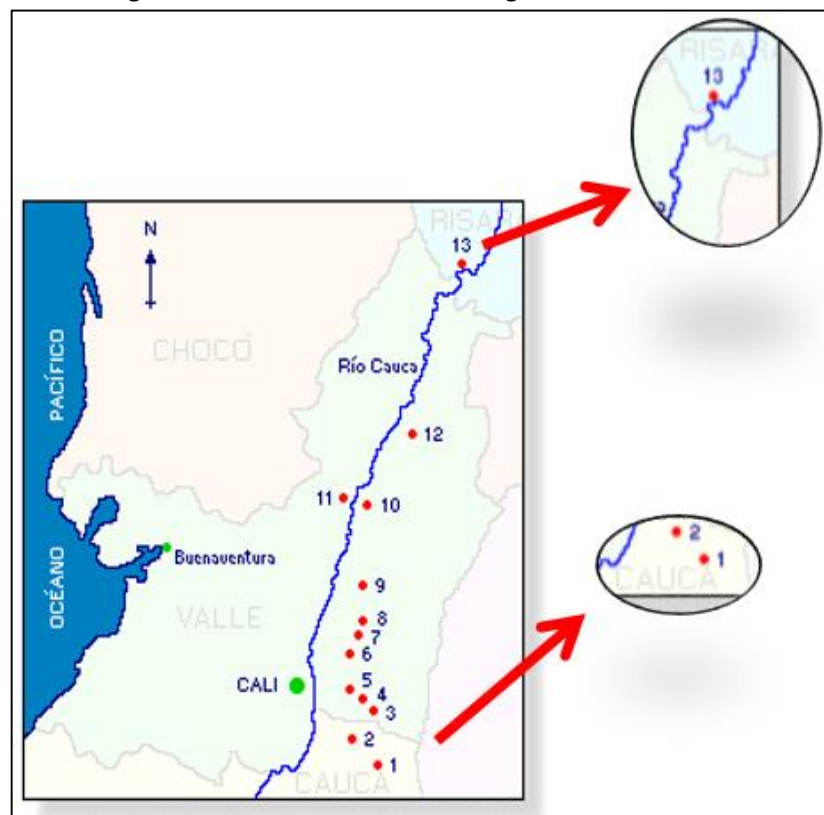
El departamento de Valle del Cauca posee un desarrollo vial importante que es consecuencia de su ubicación sobre el Océano Pacífico y su integración comercial con el mundo. En el departamento existen 8.300 km de vías de las cuales 690 km son de autopistas de doble calzada que conectan al Valle del Cauca con Colombia. La vía panamericana atraviesa todo el departamento y lo conecta con varios países de América. La red férrea del Valle del Cauca cuenta con 500 km y facilita el transporte desde el Puerto de Buenaventura a Bogotá y Medellín.

La economía del departamento del Valle del Cauca está sustentada en la prestación de servicios, le siguen la industria y las actividades agropecuarias. Entre los servicios, los más importantes son los comerciales, el transporte, la

banca y las comunicaciones. La agricultura está bastante tecnificada, el producto más relevante para la economía departamental es la caña de azúcar, donde se encuentran las plantaciones más grandes e importantes del país; le siguen la caña panelera, el sorgo, yuca, algodón, soya, maíz, café palma africana y cacao. En la industria se destacan los alimentos, particularmente el procesamiento de azúcar, la producción de químicos, fármacos, plásticos y la industria editorial. La ganadería es mayoritariamente vacuna.

En el departamento del Cauca se encuentran ubicados de los ingenios involucrados en el valle geográfico del río cauca, este departamento está localizado al suroccidente del país, su capital es Popayán y tiene una superficie de 29.308 km²; para mencionar la localización del ultimo ingenio que se encuentra en el trabajo de investigación se deberá hablar del departamento de Risaralda el cual cuenta con una población de 957.250 habitantes. La capital es Pereira que cuenta con el 49 % de su población total y los principales municipios son Dosquebradas, Santa Rosa de Cabal y La Virginia. (Ver Figura 7)

Figura 7: Ubicación de los ingenios restantes.



Fuente: Elaboración propia

Para la elaboración del caso de estudio, se tomó un pequeño grupo de ingenios cercanos al norte del valle del cauca; El Norte del Valle del Cauca es una de las cinco sub-regiones en las que está dividido el departamento colombiano del Valle del Cauca. Sus orígenes están ligados al Cauca y la región formó parte de las Ciudades Confederadas del Valle del Cauca. La región está incluida en lo que se conoce como Eje cafetero y en la declaración del Paisaje Cultural Cafetero por la Unesco como Patrimonio de la Humanidad en el año 2011, algunos de sus municipios fueron incluidos. Está rodeado por las cordilleras Occidental y Central; lo que hace que su topografía sea quebrada en los extremos, y valle en el medio, por la ribera del Río Cauca. Posee una importante riqueza hídrica y el embalse Sara Brut, que abastece la mayoría de municipios de la sub región.

6 DISEÑO DEL METODO DE INVESTIGACION

En la necesidad de alcanzar el cumplimiento del objetivo principal del proyecto, se deberá dar desarrollo a una serie de actividades las cuales estarán lideradas y soportadas por cada uno de los objetivos específicos determinados anteriormente (ver Cuadro 2: Objetivo general y específicos)

Cuadro 2: Objetivo general y específicos

Formular una herramienta de optimización de asignación y ruteo que contribuya al mejoramiento de la competitividad global y particular de los ingenios del valle geográfico del rio cauca	
1	Caracterizar el sistema de abastecimiento de los ingenios objeto de estudio, identificando así factores críticos e información relevante acerca de estos.
2	Proponer una herramienta de optimización que represente el sector en cuestión.
3	Enunciar las ventajas de una herramienta de optimización y de cooperación en el valle geográfico del rio cauca.

Fuente: Elaboración propia

Para dar cumplimiento al primer objetivo se deberá proceder a establecer un dialogo con una de las organizaciones caso de estudio para así determinar detalladamente el proceso de abastecimiento necesario para cumplir con la demanda de materia prima de cada ingenio, y además se definan factores relevantes que contribuyan al cumplimiento de este objetivo (ver Cuadro 3: Actividades para el cumplimiento del primer objetivo específico)

Cuadro 3: Actividades para el cumplimiento del primer objetivo específico

Caracterizar el sistema de abastecimiento de los ingenios objeto de estudio, identificando así factores críticos e información relevante acerca de estos.		
ACTIVIDADES	TIPO	METODO
❖ Establecer contacto con una de las organizaciones caso de	Investigación Descriptiva.	Recolección de datos en el campo.

estudio. ❖ Determinar la información más relevante necesaria para la elaboración de la caracterización ❖ Determinar los factores más importantes que puedan llegar a ser objeto de cambios, para lograr dar cumplimiento al propósito de la investigación.		
--	--	--

Fuente: Elaboración propia

Para la consecución del segundo objetivo se debe evaluar y presentar un modelo que otorgue una propuesta óptima a la asignación que se quiere llegar, buscando representar de la manera más acercada el estado del sector en cuestión; involucrando todos aquellos factores determinados en el objetivo anterior (ver Cuadro 4: Actividades para el cumplimiento del segundo objetivo específico)

Cuadro 4: Actividades para el cumplimiento del segundo objetivo específico

Proponer una herramienta de optimización que represente el sector en cuestión.		
ACTIVIDADES	TIPO	METODO
❖ Identificar las entradas necesarias para el diseño del modelo. ❖ Desarrollar la construcción del modelo, de tal forma que se obtenga un instrumento de gran utilidad para la evaluación de distintos escenarios. ❖ Determinar las restricciones a las que el sector está sometido.	Investigación Proyectiva.	Modelación matemática. Software de programación.

Fuente: Elaboración propia

Para este último propósito se entrara en la realización de un análisis detallado de los resultados arrojados de la ejecución del modelo planteado en el objetivo anterior, determinando las ventajas de su implementación y los beneficios que esta traerá al sector del valle del cauca (Ver Cuadro 5)

Cuadro 5: Actividades para el cumplimiento del tercer objetivo específico

Enunciar las ventajas de una herramienta de optimización y de cooperación en el valle geográfico del río Cauca.		
ACTIVIDADES	TIPO	METODO
❖ Consolidar la información arrojada por el modelo. ❖ Concluir sobre los beneficios y la importancia de la propuesta, con el fin de obtener una masificación de los ingresos por cosecha mediante la reducción de los costos logísticos de esta.	Investigación Descriptiva.	Herramientas estadísticas.

Fuente: Elaboración propia

7 SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE UN INGENIO AZUCARERO

Como primer objetivo específico del presente caso de estudio es menester desarrollar la caracterización del sistema de abastecimiento de los ingenios objeto de estudio, identificando los factores críticos junto con la información relevante acerca de estos; además se hace un recorrido al proceso de fabricación de azúcar acotando la investigación en un segmento del proceso que va desde corte hasta el arribo de la caña al patio. A continuación se evidencia el despliegue de este objetivo inicial:

7.1 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR

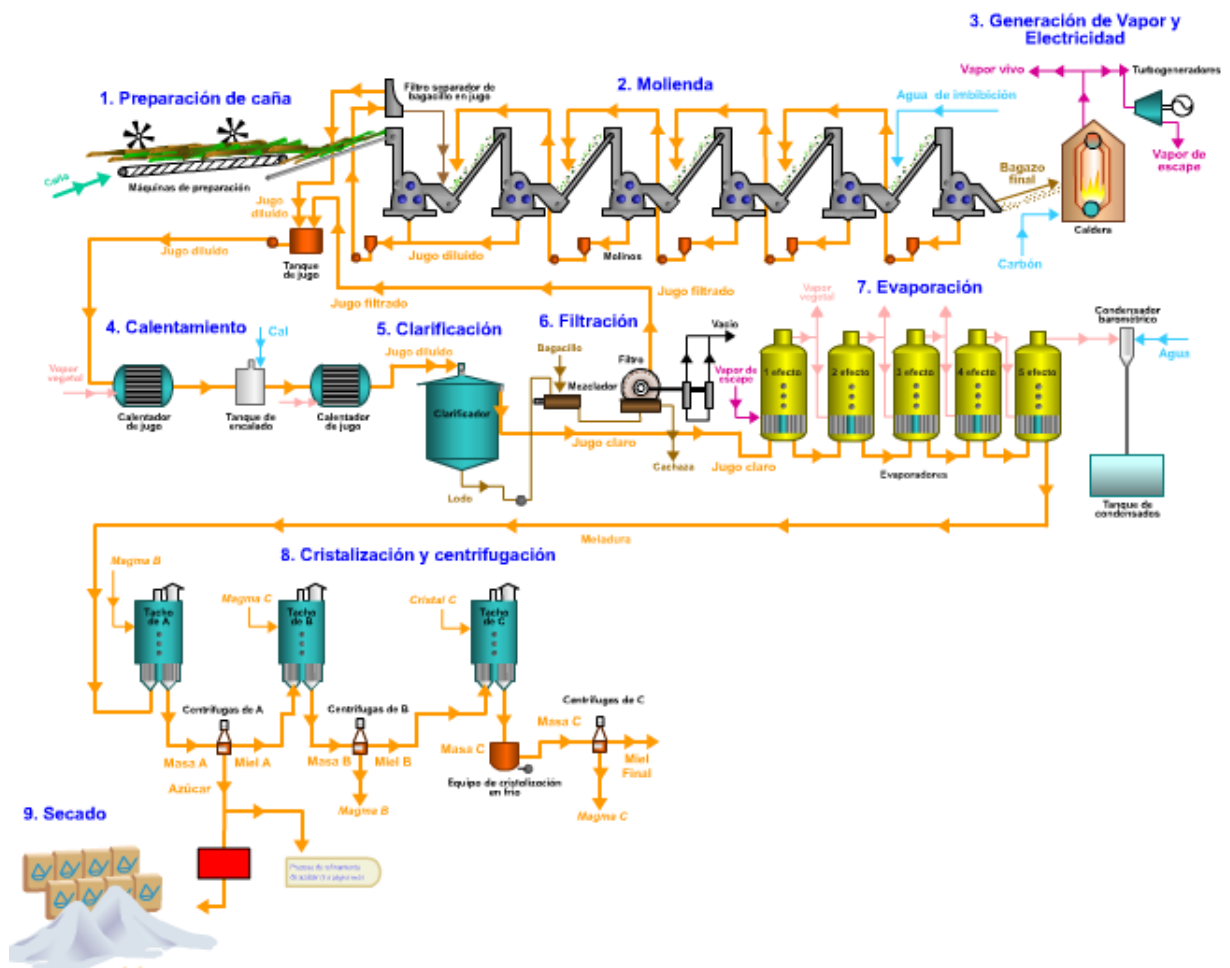
El proceso de obtención de azúcar inicia con la llegada de la caña de azúcar al patio de caña⁴ donde se pesan los vagones en básculas y esperan a ser procesados, la caña se procesa en orden de llegada para disminuir la pérdida de sacarosa⁵ por tiempo de espera después del corte, el proceso continua con la preparación de la caña, que es donde los tallos son desfibrados para mayor obtención del jugo en la molienda, donde se extrae o separa el jugo contenido en la fibra de caña. Se realiza en una serie de molinos donde se exprime y se lava el colchón de bagazo, el cual es utilizado para la generación de vapor a alta presión que es aprovechado en las turbinas que accionan los molinos y además para la generación de electricidad; una vez extraído el jugo pasa a el proceso de calentamiento donde se eleva la temperatura del jugo diluido hasta un nivel cercano a su punto de ebullición (105 °C). Luego del primer calentamiento se le agrega cal al jugo antes de bombearlo al segundo equipo calentador, posteriormente el jugo diluido pasa a clarificación proceso en el que se separan los sólidos insolubles del jugo diluido. El lodo (sólido) es evacuado por la parte inferior del clarificador mientras que el jugo clarificado, o jugo claro, es extraído por la parte superior y pasa al proceso de filtración en el que se separa el jugo de la cachaza contenida en el lodo gracias a la acción de filtros rotatorios de vacío. Estos filtros retienen la cachaza y dejan pasar el jugo filtrado. El lodo es mezclado con bagacillo antes de la filtración; una vez superada la filtración se obtiene jugo claro que pasa al proceso de evaporación que es donde se evapora la mayor cantidad del agua contenida en el jugo claro para obtener meladura, la cual pasa a

⁴ Lugar donde se almacena la caña y espera a ser procesada

⁵ Azúcar que se encuentra en el jugo de muchas plantas y se extrae especialmente de la caña dulce

crystalización que es donde se forman los cristales de sacarosa mediante el uso de material semilla esto ocurre mediante el uso de los tachos que es donde se obtienen masas con diferentes proporciones de cristales y miel, componentes que luego son separados en el proceso de centrifugación, donde los cristales de sacarosa contenidos en las masas resultantes de la cristalización son separados de la miel o licor madre para posteriormente pasar al proceso de secado donde se aplica aire caliente para retirar la mayor cantidad de humedad posible del azúcar Ver Figura 8: **Proceso de obtención de azúcar.**

Figura 8: Proceso de obtención de azúcar



Fuente: (CENICAÑA, s.f.)

7.2 PROCESO DE ABASTECIMIENTO DE PLANTA

La cadena de abastecimiento es la coordinación e integración de todas las actividades asociadas al movimiento de bienes, desde la materia prima hasta el usuario final, para crear una ventaja competitiva sustentable. Esto incluye “la administración de sistemas, fuentes, programación de la producción, procesamiento de pedidos, dirección del inventario, transporte, almacenaje y servicio del cliente (Cooke, 1997). En el caso de estudio, se observara a cada ingenio como el cliente o usuario final de aquel proceso relacionado con la cadena de abastecimiento y a las toneladas de caña como el producto (bien) que se dispone a transportar.

La administración de la cadena de abastecimiento, es el tema principal en muchas industrias con una firme idea de la importancia de una relación integrada entre clientes y proveedores. Esta administración se ha convertido en el camino para la mejora de los procesos por medio de la reducción de la incertidumbre y el mejoramiento del servicio al cliente.

Para entrar en detalle con la cadena de abastecimiento de un ingenio azucarero podemos empezar con el primer eslabón de una cadena agroindustrial de azúcar, el cual está constituido por los productores de caña, cuyas tierras pueden estar bajo el manejo directo de los cañicultores o bajo el manejo directo de los ingenios ya sean propios, bajo arrendamientos o bajo el tipo de contrato de cuentas por participación a terceros. Después de la correcta siembra de la caña de azúcar y su preciso cuidado (abonar, fertilizar), es el tiempo de iniciar con su cosecha; el tiempo apropiado para la cosecha se determina mediante el análisis del grado Brix. Que se realiza en tres partes de la caña: punta, medio y base. La caña llega a su periodo óptimo de cosecha cuando la diferencia de grado Brix entre las partes es mínima. En caso de cañas inmaduras el grado Brix en la punta es mucho menor al del medio y la base, ocurre al revés cuando la caña ha sobrepasado su periodo óptimo de cosecha. Una vez terminado este estudio, se procede a realizar el corte de la caña; esta acción puede ser: manual o mecánica. Sin importar la elección que se haga, los pasos que debe realizar un ingenio para su corte son:

7.2.1 Corte

Análisis de pre roza.

Para ser programado para su roza, a todo lote de caña de azúcar deberá realizársele un análisis que comprenderá ciertas variables técnicas y para ello, se tomarán las muestras necesarias que representen las condiciones de la caña del lote en cuestión. Dicha toma de muestras la efectuará el encargado de zona del Departamento Agrícola del Ingenio, con una antelación mínima de dos semanas a su roza programada. Las variables a evaluar serán, al menos, las siguientes:

- a) Pol por ciento cañas
- b) Brix por ciento cañas
- c) Humedad por ciento cañas
- d) Fibra por ciento cañas
- e) Porcentaje de azúcares reductores
- f) Pureza
- g) Nivel de acidez (pH).

Las variables obtenidas de la muestra de caña deberán ser informadas al respectivo productor de caña y estarán a disposición de la Comisión de Zafra.

1. De las muestras tomadas, se evaluarán los siguientes estándares:

- a) azúcares reductores menores a 1.5 %
- b) humedad en caña menor o igual a 72%
- c) pureza del jugo de la muestra extraída mayor al 75%.

Si del análisis se establece que no se cumplen los estándares anteriormente estipulados, se tomarán al menos catorcenalmente nuevas muestras hasta que mediante los análisis respectivos se determine el cumplimiento de dichos estándares para así programar la roza de dicho lote

2. El Corte de Caña podrá ser realizado por libre elección del productor, ya sea por él mismo, a través de contratistas o el Ingenio.

3. Previo al inicio del corte de caña, los productores deberán habilitar los accesos de entradas y salidas de las plantaciones, como: podar las cercas para facilitar los giros del transporte y la supervisión de recolección, limpiar y dragar canales de drenaje, contar con puentes adecuados e impedir el ingreso de aguas de riego a los campos.
4. Los Ingenios de acuerdo con el productor, establecen el periodo en el cual será realizado el corte de caña (programa de cosecha del Ingenio), según control de calidad a través de resultados de muestreos realizados.
5. Al finalizar la época lluviosa deberán hacerse las labores de prevención establecidas en áreas cañeras para evitar quemas fuera del plan de cosecha de lotes de las plantaciones.
6. En caso de una quema fuera de plan de cosecha:
 - a) Se entenderá como una quema no programada la quema de caña de azúcar fuera del programa indicado por el Ingenio y que ocurre sin existir una orden de cosecha emitida por el Ingenio.
 - b) En los casos de quema no programada, el productor de caña o su encargado deberá informar al departamento agrícola del Ingenio en un lapso no mayor de doce horas contadas a partir de la quema, lo siguiente:
 - Fecha y hora de la quema.
 - Área y ubicación de la misma.

El Ingenio, para recibir dicha caña, podrá exigirle al productor copia de la respectiva denuncia presentada ante la Policía Nacional Civil.

- c) El Ingenio, dentro de las dieciocho horas siguientes a la notificación del evento, hará una inspección del lote en cuestión y recolectará muestras de la caña quemada para el análisis del grado de acidez y nivel de dextrana. Si el contenido de dextrana supera las 1500 ppm, la polarización del jugo sufrirá una corrección aplicada a la misma, según la fórmula establecida en el artículo 25 del Reglamento del Sistema de Pago de Caña de Azúcar.

- d) El Ingenio, junto con los miembros de la Comisión de Zafra, hará todos los esfuerzos a su alcance para el recibimiento de la caña quemada no programada. De ser necesario, se reprogramarán las órdenes de roce de los productores que ya están bajo programa, así como el plan de recolección de cada proveedor cañero. Previo a la reprogramación de ese plan, el Ingenio deberá informar a cada uno de los proveedores de caña que estén programados en su roza.
7. Cuando se dividen lotes para corte de caña, estos deberán brecharse dejando áreas acorde a la cuota de roza asignada; según el programa de cosecha.
8. El Ingenio dará la orden de corte del lote programado con su respectivo instructivo, para ello se pondrá de acuerdo con el productor. Dicha orden deberá incluir la información siguiente:
- ❖ Cuota diaria de roce.
 - ❖ Alza (manual o mecánica).
 - ❖ Tipo de transporte.
 - ❖ Código del productor.
 - ❖ Código de la plantación.
 - ❖ Fecha de emisión.
 - ❖ Código y nombre del lote.
 - ❖ Tipo de roce (cruda o quemada; manual o mecanizada; larga o corta).
 - ❖ Área programada en manzanas.
 - ❖ Toneladas estimadas.
 - ❖ Fecha y hora de la quema.
 - ❖ Firma responsable.

El documento anterior será firmado de recibido por el productor de caña o, en su defecto, por la persona responsable de la plantación.

9. Cada productor rozará la cuota de caña de azúcar que se le haya asignado, con una variación máxima del 10.0%. De la misma manera, los Ingenios recibirán la caña hasta con esa variación.
10. Cada productor deberá recibir las tarifas de corte de caña por tarea o tonelada, ya sea manual o mecánica por parte del Ingenio al inicio de cada

zafra. El corte podrá ser realizado por el productor de caña, contratista, Ingenio, o la combinación de cualquiera de estos. En caso de que el corte no sea realizado por el productor, se deberá entregar planilla o crédito fiscal por dicha labor. Estos documentos deberán ser entregados a los productores de caña en cada liquidación catorcenal. El responsable del bloque de cosecha (manual o mecánico), será quien cumpla con la Ley de Salud y Seguridad Ocupacional, suministrando al cortador la hidratación adecuada y los equipos de protección básicos para realizar dicha labor.

11. El tipo de caña que se corta puede ser cruda o quemada; larga o corta y manual o mecanizada. En cualquier modalidad de corte, se deberá cumplir requisitos de calidad; los cuales serán evaluados y supervisados de acuerdo a las normas y procedimiento de cada Ingenio.
12. Requisitos mínimos a evaluar en cualquier modalidad de corte:
 - a) Corte de caña a ras del suelo.
 - b) Despunte adecuado según variedad, manejo de la plantación con madurantes y madurez natural.
 - c) Después del corte, colocar la caña de manera ordenada en carril.
 - d) Limpieza de bajera y cogollos 50 cm a ambos lados del carril de caña.
 - e) Eliminar de las plantaciones y durante la recolección, materiales que puedan ocasionar daños y accidentes a los equipos y/o personal; tales como: metales, llantas, piedras, troncos, etc.
 - f) Cuando exista infraestructura de gran tamaño como: postes de alumbrado eléctrico, pozos, infraestructura de ganadería, deben señalizarse con cal.
13. La caña cortada a entregar deberá tener buena limpieza: estar libre de hojas verdes, bajera, puntas tiernas con corcho y tierra en el corte manual, y basura o materiales extraños en cosecha mecanizada.
14. En cosecha mecanizada deberán calibrarse las cuchillas cortadoras antes del corte, efectuar un corte adecuado sin arrancar cepas de caña y realizar un adecuado mantenimiento del filo de cuchillas y cambio de las mismas y el resto de elementos del equipo.
15. En relación a la cosecha de caña, la Ley establece en el Art. 37 que los Ingenios están obligados a recibir la caña contratada en el término de 72 horas,

contadas a partir de la fecha de su corte en caña programada, no así en caña quemada fuera de programa; igual responsabilidad corresponde a los productores en cuanto a la entrega de caña especialmente al inicio de zafra, en días festivos y período de finalización de zafra. En caso de fuerza mayor o caso fortuito, la caña podrá ser recibida sin cumplir los estándares señalados en el artículo 21 del Reglamento del Sistema de Pago de Caña de Azúcar, por acuerdo entre el productor de caña, el Ingenio y la Comisión de Zafra.

Corte manual

El corte manual es una labor dispendiosa que aún se realiza en Colombia debido a la alta disponibilidad de mano de obra; se estima que genera 15.000 empleos directos y 90.000 indirectos.

Como ventajas de este sistema se puede mencionar:

- ❖ el correcto beneficio de la plantación, ya que permite cortar los tallos a ras del suelo, el descogolle entre hojas verdes y maduras y la colocación ordenada de los tallos en el suelo para el almacén mecánico.
- ❖ facilita la selección inicial del material molinable, desechando los tallos secos y podridos, y los chulquines y las malezas. No obstante, la quema y el corte manual están siendo cuestionados como resultados de la apertura de nuevos mercados y del impacto de estas prácticas sobre el medio ambiente; por lo tanto, se están evaluando nuevas alternativas para la cosecha (Giraldo, 2016)

Figura 9: Corte manual



Fuente: (Martin, s.f.)

Corte mecánico

El proceso de corte mecanizado de caña de azúcar se hace a través de frentes de alce, los cuales están formados por personas y los equipos que se utilizan para esta actividad; entre los diferentes equipos utilizados en los frentes de cosecha mecanizada son comunes los siguientes:

- ❖ Cosechadora
- ❖ Tanque de agua para lavado de máquina.
- ❖ Equipo de soldadura autógena planta eléctrica y soldadura de arco.
- ❖ Vagón de repuestos y oficina de reportes.
- ❖ Tanque de combustible y aceites.
- ❖ Tractor para transportes varios.
- ❖ Cama baja para traslados de cosechadora.

En la cosecha mecanizada la maquina cosechadora se desplaza por los surcos de las suertes cortando la caña en trozos y a su vez expulsando estos a un vagón que está alineado a la cosechadora durante el proceso de corte. Ver Figura 10

Figura 10: Corte mecanizado



Fuente: Piscanos-sas, (s.f.)

Este tipo de corte genera una mayor rapidez en el corte lo que ocasiona un menor tiempo desde la suerte hasta los patios del ingenio lo cual genera un mayor rendimiento de la caña en la producción de azúcar.

Como ventajas de la implementación de la cosecha mecanizada se puede mencionar que es una buena opción para el corte en verde, Mayor densidad de carga en el transporte (30% más), mayor agilidad en la cosecha (corte 24h) entre otros beneficios (Mantilla, 2010).

7.2.2 Alce

El procedimiento utilizado para el alce es el siguiente:

1. El alza de caña podrá ser realizado por: cargadoras del productor, contratista e Ingenio.
2. Los parámetros mínimos de calidad a evaluar en la operación de la cargadora son:
 - a) La cargadora no deberá pasar sobre el carril de caña, para no causar daño a la caña cortada cosechada.

- b) No deberá arrancar cepas de los surcos de caña cosechados, el que realiza la pila debe de situarse en el entresurco 3 o 4.
- c) Para tomar la “arañada” o bulto, situar el garfio adelante dispuesto a esperarlo, y con el apilador empujar, para lograr un mejor agarre. No debe hacerse primero el apilado y después tomarlo desde arriba, pues existe la posibilidad de dejar caer caña en el momento de la carga, lo que dificulta el trabajo de los ayudantes o querqueros y se causa desperdicio.
- d) Para el cargado del bulto o maleta, este debe ser movido con la araña o garfio en posición perpendicular al operador, el auxiliar deberá estar a una distancia prudente, en caso contrario tendrá que avisarle al conductor del transporte el momento preciso en que se encuentre bien ubicado para esta operación.

Con esto se evitará:

- ❖ golpear el equipo con la pluma o brazo
 - ❖ Ir siempre hacia adelante, evitando movimientos innecesarios y dañinos hacia cualquier otro lado.
- e) El primer bulto o maleta de caña deberá colocarse inicialmente en el fondo situándolo en el extremo anterior sin montarla sobre la pared de la rastra y apoyada sobre los paralelos o tuberías. El otro bulto se ubicará en la parte de atrás, de la misma manera, y el otro en la parte cercana a la cargadora, siempre en el extremo anterior y la otra en el posterior (atrás). De esta manera se evitarán espacios vacíos, no se saldrá la carga de la carrocería y a su vez quedara balanceada. Se recomienda que la siguiente carga sea colocada al centro, para que haya entramado siguiendo la misma técnica. De esta manera se irá distribuyendo hasta completar la carga.
 - f) Los ayudantes de cargadora o querqueros deberán ir detrás de la ella y poner la caña que va quedando en el carril siguiente.
 - g) La colocación de la caña deberá respetar la altura de carga (copete) establecida en la Resolución del Viceministerio de Transporte.
 - h) Dejar adecuadamente acondicionada la caña en las unidades de transporte, de acuerdo a los requerimientos de cantidad y calidad de fábrica en los Ingenios, de acuerdo al tipo de descarga en Ingenios y capacidad establecida por equipo según la autoridad competente.
 - i) La carga de la caña deberá quedar bien equilibrada, para poder hacer un buen amarre y disminuir sus pérdidas en el transporte al Ingenio.

- j) Las cargadoras deberán estar en adecuadas condiciones de operación y servicio de mantenimiento, para evitar tiempos perdidos por desperfectos mecánicos. (Zafra, 2015-2016)
3. La coordinación del alza de caña, deberá realizarse de acuerdo a la programación de cosecha de cada Ingenio. En el caso que el productor proporcione el personal de chequeros y alce, deberán de estar disponibles a la hora programada.
 4. En el caso de que el Ingenio envíe la alzadora, el productor deberá estar comunicado de tal circunstancia y con la debida anticipación, esto con el propósito de disponer de los ayudantes (querqueros). El Ingenio debe cumplir con el número de alzadoras y horarios establecidos de carga, para que el productor no incurra en pagos de salarios por llegadas tardías de los equipos.

7.2.3 Transporte

Procedimiento de transporte de caña

1. El transporte puede ser realizado por: el productor, el contratista, el Ingenio o la combinación de ellos.
2. El transporte a contratar, deberá someterse a las políticas de contratación de cada Ingenio y cumplir con lo establecido en la resolución emitida por el Viceministerio de Transporte.
3. En el campo, las normas a seguir por el transporte de caña son las siguientes:
 - a) Respetar las calles y accesos habilitados en cada propiedad, evitando “cortar camino” por los campos, pues esto causa daño innecesario a la cepa y al suelo.
 - b) Permanecer en espera de su turno respetando las disposiciones del chequero, sin hacer movimientos innecesarios.
 - c) Conducirse al momento de la carga, sobre una dirección establecida, entre los dos cuerpos cercanos al carril de caña o entre surco, para facilitar el cargado; también el motorista deberá obedecer al cargador cuando le avise que se mueva o detenga, manteniéndose siempre a la par de la cargadora.

- d) Los equipos de transporte se moverán hacia otro carril saliendo del área de cultivo, por los accesos para el cargado.
 - e) Los equipos evitarán virajes o movimientos fuera de los entresurcos para evitar mayores daños a las cepas.
 - f) Después de cargar las unidades de transporte, se deberá asegurar un buen plomeado o corte de las cañas salientes; cortándolas de una vez al ras sin fraccionarla mucho; pues esto implica perdidas de caña. Esta operación se hará a la salida y cerca del carril vecino, para facilitar su traslado a dicho carril.
 - g) Para amarrar la carga de caña, se podrán utilizar cadenas, ratchs con su respectivo lazo o faja para evitar que la caña se caiga cuando esta se asiente. Antes de salir a la carretera, deberá asegurarse nuevamente el amarre de carga.
 - h) El conductor al manejar su equipo deberá tener prudencia y respeto a las leyes de tránsito en las carreteras.
 - i) Los conductores del transporte de caña deberán mantener disciplina y dentro del Ingenio; seguir las instrucciones del controlador, no soltar los amarres antes de tiempo y evitar en todo lo posible que no se derrame caña de su equipo de transporte.
 - j) El equipo de transporte después de haberlo descargado, de inmediato se le hará la limpieza necesaria para evitar botar basura en la carretera.
 - k) Los motoristas no podrán acompañarse en sus viajes de trabajo, de personas no autorizadas por los Ingenios y además deben cumplir con los tiempos estimados de llegada a los lugares de carga indicados según programa de cosecha.
 - l) Los transportistas además de este procedimiento, deberán cumplir con las normas y reglamentos propios del Ingenio.
4. Cada cargamento de caña de azúcar que sea entregado en un Ingenio, deberá estar amparado con un documento denominado “Comprobante de Envío de Caña”, que se emitirá en duplicado y cuyo formulario será emitido por el Ingenio y se venderá exclusivamente al productor a lo sumo al precio de costo.

El comprobante contendrá la información siguiente:

- a) Nombre o razón social del Ingenio y su código de identificación.
- b) Serie y número del formulario.
- c) Nombre o razón social del productor y su código de identificación.

- d) Procedencia de la caña (cantón, municipio, departamento y nombre de la propiedad) y zonificación que el Ingenio le ha asignado a éste.
- e) Nombre y código del motorista.
- f) Nombre y código de transportista.
- g) Placa y/o código del vehículo.
- h) Número de la cargadora.
- i) Nombre del cargador.
- j) Nombre y código del lote de donde procede la caña.
- k) Ciclo de corte.
- l) Nombre y código de la variedad de la caña.
- m) Tipo de caña (larga, corta, picada, cruda o quemada dentro o fuera de programa).
- n) Datos de recolección, fecha y hora de: quema, corte y carga.
- o) Fecha de emisión del envío.
- p) Nombre y firma del emisor del envío.
- q) Firma del motorista.

Figura 11: Transporte de la caña de azúcar



Fuente: (elclavo.com, s.f.)

El original será proporcionado al motorista para que éste lo entregue al Ingenio, de tal manera que sirva de base para la elaboración del comprobante de peso. En base a lo anterior, cada vez que en el Ingenio se reciba un cargamento de caña, se emitirá:

- a) Un comprobante de peso con las copias que sean necesarias, de las cuales una será para el motorista y otra para el productor; y,

- b) Un comprobante de laboratorio con las copias que sean necesarias, de las cuales una será para el productor. Tanto el comprobante de peso como el comprobante de laboratorio contendrán la información descrita en el artículo 29 del Reglamento del Sistema de Pago de Caña de Azúcar. Con las regulaciones antes expuestas se espera velar por la transparencia y buen funcionamiento de los procesos de corte, alza y transporte de la caña de azúcar. (Zafra, 2015-2016).

8 CREACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Para la creación del caso de estudio abarcado en esta investigación, y para poder darle solución a la problemática planteada, se determinó la participación de 4 ingenios presentes en el valle geográfico del río Cauca y 96 suertes que serán distribuidas entre ellos, para la satisfacción de sus necesidades; en este caso de estudio, no se mencionará la identificación de los ingenios ni la propiedad de dichas suertes.

La ubicación de los ingenios y las suertes mencionadas anteriormente, se encuentran a continuación ver Tabla 1 Ubicación de los ingenios involucrados en el caso de estudio; las coordenadas geográficas se obtuvieron mediante el uso de la herramienta de Google Maps, el cual las suministra en valores de latitud y longitud; de allí se procedió a realizar la conversión a coordenadas cartesianas presentadas en unidades de metros.

Tabla 1 Ubicación de los ingenios involucrados en el caso de estudio

Ingenios	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Cartesianas		Coordenadas Cartesianas	
	Latitud	Longitud	x (m)	y (m)	x (km)	y (km)
A	4,0514972	76,2522572	360984,5221	447931,9063	360,984522	447,931906
B	4,069412151	76,31863117	353618,1811	449924,3802	353,618181	449,92438
C	4,319066742	76,08876586	379177,3768	477487,4018	379,177377	477,487402
D	4,906554362	75,8959150	400662,0469	542407,3615	400,662047	542,407362

Fuente: Elaboración propia

En el caso de las ubicaciones pertenecientes a las suertes, se procedió con la misma metodología mencionada anteriormente. Ver Tabla 2 Ubicación de las suertes estudiadas para ver la tabla completa ver **ANEXO 1**

La determinación de la capacidad de las suertes utilizadas en el caso de estudio, se basa en los datos obtenidos del informe anual de asocaña 2013-2014, donde mencionan el promedio de toneladas de caña por hectárea encontrado entre los años 2002 a 2013 es de 116,860, y de la misma manera en los aspectos generales del sector azucarero colombiano del año 2013-2014 el total de suertes sembradas en caña de acuerdo con el área es de 3.362 y a su vez obteniendo también el promedio de hectáreas pertenecientes a cada suerte, se calculó la media de esta, utilizando los valores de la siguiente tabla. (Ver Tabla 3 Número de

suertes sembradas en caña de acuerdo con el área), resultándonos un valor de 75,49108.

Tabla 2 Ubicación de las suertes estudiadas

suerte	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Cartesianas		Coordenadas Cartesianas	
	Latitud	Longitud	x (m)	y (m)	x (km)	y (km)
1	4,89	75,91	399515,07	540574,78	399,52	540,57
2	4,32	76,11	376585,13	477495,88	376,59	477,50
3	4,28	76,11	377062,57	473350,58	377,06	473,35
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
95	4,15	76,20	366970,17	458568,92	366,97	458,57
96	4,14	76,23	363309,23	457282,57	363,31	457,28

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3 Número de suertes sembradas en caña de acuerdo con el área

límite inferior	Límite superior	Frecuencia absoluta	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada
0	10	736	736	21,89%	21,89%
11	20	394	1130	11,72%	33,61%
21	40	630	1760	18,74%	52,35%
41	60	437	2197	13,00%	65,35%
61	100	465	2662	13,83%	79,18%
101	200	437	3099	13,00%	92,18%
201	400	193	3292	5,74%	97,92%
401	600	51	3343	1,52%	99,43%
601	1000	15	3358	0,45%	99,88%
1000	> 1000	4	3362	0,12%	100,00%
		3362			

Fuente: Elaboración propia

Con los datos obtenidos anteriormente se procede a calcular la capacidad de cada suerte multiplicando el valor de toneladas de caña por hectárea y el promedio de hectáreas pertenecientes a cada suerte. Resultando los valores de la Tabla 4.

Para el parámetro de productividad se trabaja bajo el supuesto de que todas las suertes poseen una productividad del 100%. Para ver la tabla completa ver **ANEXO 2**

Tabla 4 Disponibilidad y productividad de las suertes

suerte	Disponibilidad [tn/año]	Productividad [%]
1	8775	1
2	8775	1
3	8775	1
⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮
95	8775	1
96	8775	1

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de cada frente de alce se determinara bajo el supuesto que trata de cumplir que toda la caña sembrada en las suertes mencionadas, debe ser recogida en su totalidad; también se determina que cada ingenio posee seis frentes de alce, los cuales deben de cumplir con la tarea asignada. Para efectos de este supuesto, todos los frentes de alce tendrán la misma capacidad de recolección mostrada en la Tabla 5, despreciando así esta capacidad para determinar la asignación, y evaluándola mediante otros factores.

Tabla 5 Capacidad de corte del frente de alce de cada ingenio

Capacidad corte [tn/año]	Ingenios			
	A	B	C	D
1	35100	35100	35100	35100
2	35100	35100	35100	35100
3	35100	35100	35100	35100
4	35100	35100	35100	35100
5	35100	35100	35100	35100
6	35100	35100	35100	35100

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la demanda de cada ingenio, se tiene en cuenta el supuesto mencionado anteriormente, en el cual los ingenios deben de recibir la totalidad de toneladas de caña proveniente de las suertes sembradas, para esto se tomó el total de toneladas sembradas y se dividió entre el número de ingenios resultando lo que se muestra en la Tabla 6

Tabla 6 Demanda de cada ingenio

Ingenios	Demanda [tn/año]
A	210600
B	210600
C	210600
D	210600

Fuente: Elaboración propia

El cálculo de las distancias presentes en la Tabla 7, se realizó mediante la ecuación de distancia entre dos puntos tomando cada ubicación de los ingenios y la ubicación de cada suerte. Para ver la tabla completa ver **ANEXO 3**

Tabla 7 Distancia de las suertes a cada uno de los ingenios

Distancia [km]	Ingenio			
Suerte	A	B	C	D
1	100,3359639	101,6071844	66,2845331	2,1619202
2	33,4276503	35,8841004	2,5922582	69,2329239
3	30,0767744	33,1425096	4,6460455	72,9779072
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
95	12,2054885	15,9060845	22,5149957	90,3550079
96	9,6353128	12,1679655	25,6911120	92,9594670

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros que se mencionaran a continuación, no se mostraran en valores por motivos de confiabilidad, sin embargo se presenta la manera en la que operan en el modelo.

Para efectos del cálculo de la utilidad mencionado en el contexto de la investigación, se presenta una matriz de 2x4, ver Tabla 8 en la que están los ingresos de cada ingenio por tonelada de caña.

Tabla 8 Ingresos por tonelada cosechada

Ingenios	Rendimiento [\$/tn]
A	Rendimiento A
B	Rendimiento B
C	Rendimiento C
D	Rendimiento D

Fuente: Elaboración propia

De igual manera, se incluyen los costos pertenecientes al frente de alce mostrados en la Tabla 9 que debe ir relacionado con los de ingresos mencionados anteriormente.

Tabla 9 Costo de corte de cada frente de alce

Costo de frente de alce [\$/tn]	Ingenios			
	A	B	C	D
1	Costos 1A	Costos 1B	Costos 1C	Costos 1D
2	Costos 2A	Costos 2B	Costos 2C	Costos 2D
3	Costos 3 A	Costos 3B	Costos 3C	Costos 3D
4	Costos 4 A	Costos 4B	Costos 4C	Costos 4D
5	Costos 5 A	Costos 5B	Costos 5C	Costos 5D
6	Costos 6 A	Costos 6B	Costos 6C	Costos 6D

Fuente: Elaboración propia

El costo de transporte de la caña de azúcar alzada en todas las suertes a cada ingenio mencionado en la Tabla 10, es uno de los más importantes en esta cadena de valor, ya que sin esta actividad el ingenio en cuestión no tendría como satisfacer su demanda requerida.

Para el último costo relacionado en el caso de estudio, se tuvo en cuenta el costo de transportar cada frente de alce acarreado por cada ingenio involucrado. Estos costos se verán en la Tabla 11, los cuales se suman a los otros costos para así poder calcular el valor de utilidad buscado.

Tabla 10 Costos de transporte de la caña de azúcar

Ingenios	Costo de transporte [\$ /km*tn]
A	Costo TC1
B	CostoTC2
C	CostoTC3
D	CostoTC4

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Costo de transporte de cada frente de alce

Costo de T frente de alce [\$ /km]	Ingenios			
	A	B	C	D
1	Costo TF1A	Costo TF1B	Costo TF1C	Costo TF1D
2	Costo TF2A	Costo TF2B	Costo TF2C	Costo TF2D
3	Costo TF3A	Costo TF3B	Costo TF3C	Costo TF3D
4	Costo TF4A	Costo TF4B	Costo TF4C	Costo TF4D
5	Costo TF5A	Costo TF5B	Costo TF5C	Costo TF5D
6	Costo TF6A	Costo TF6B	Costo TF6C	Costo TF6D

Fuente: Elaboración propia

8.1 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACION

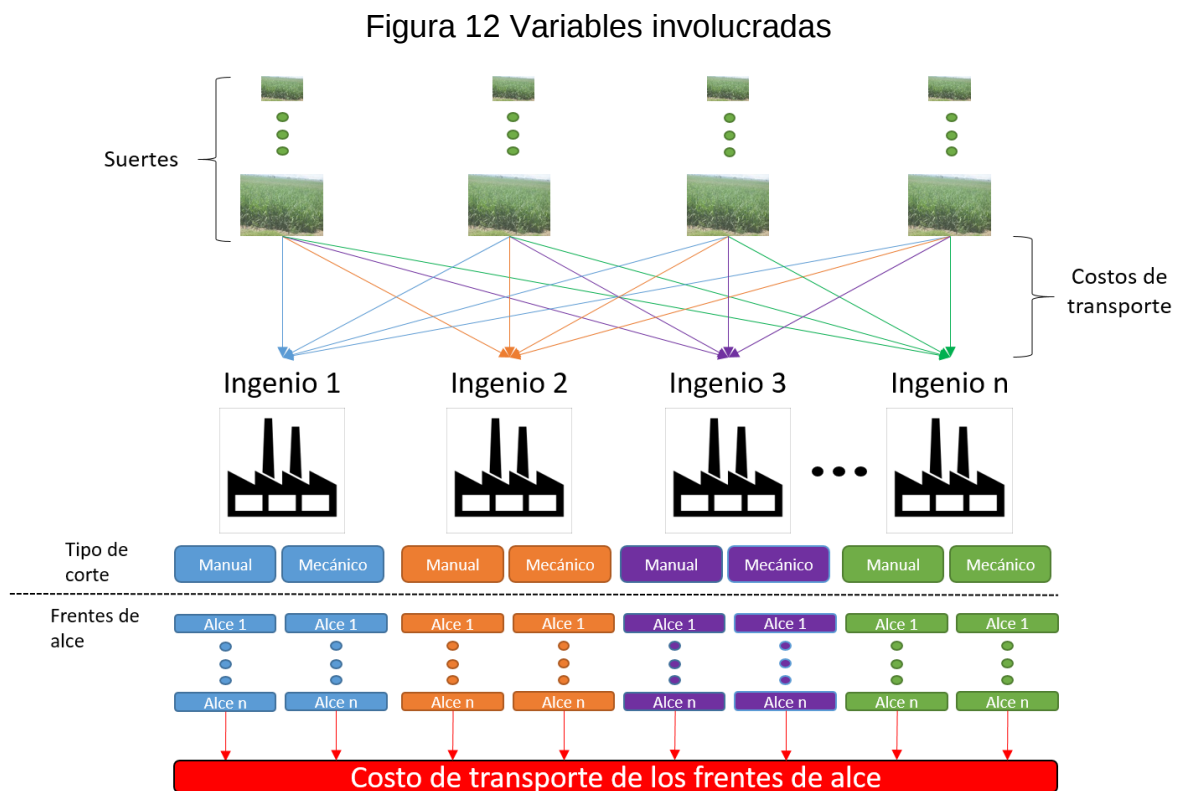
De acuerdo con las características descritas de los ingenios de la región, y una vez determinado la forma en la que se comportan las variables críticas y el impacto de las decisiones en las negociaciones de las suertes, en la asignación del tipo de corte y en la asignación del frente de alce en el área de cosecha identificado en la caracterización del sistema, desde el proceso de corte de la caña hasta el arribo de esta al patio de caña, se desarrolló un modelo base de programación lineal entera mixta, para determinar una utilización óptima de recursos mediante la minimización de costos de transporte para la maximización de los ingresos del sistema que se desee estudiar.

El modelo propuesto es una herramienta de decisión para dar solución a este problema, buscara mediante la función objetivo asignar cada una de las suertes a

un ingenio, determinar el tipo de corte (manual o mecánico) mediante el cual debe ser cosechada esta, asignar un frente de alce del ingenio, para que coseche esta en función del tipo de corte ya asignado y determinar a su vez la ruta optima de corte que debe seguir cada frente partiendo desde el ingenio y regresando a este una vez cosechadas las suertes asignadas; todo esto mediante la disminución de las distancias de las suertes a los ingenios para así obtener mínimos costos de transporte, los cuales están representados en:

- ❖ costo transporte de los trenes cañeros para llevar la caña cosechada al ingenio
- ❖ costo de transporte del movimiento de los frentes de alce.

La situación anterior se presenta en la Figura 12 Variables involucradas.



Fuente: elaboración propia

Para el caso de estudio se desarrolló una herramienta de optimización de asignación y ruteo con un horizonte de planeación de un año bajo los siguientes supuestos.

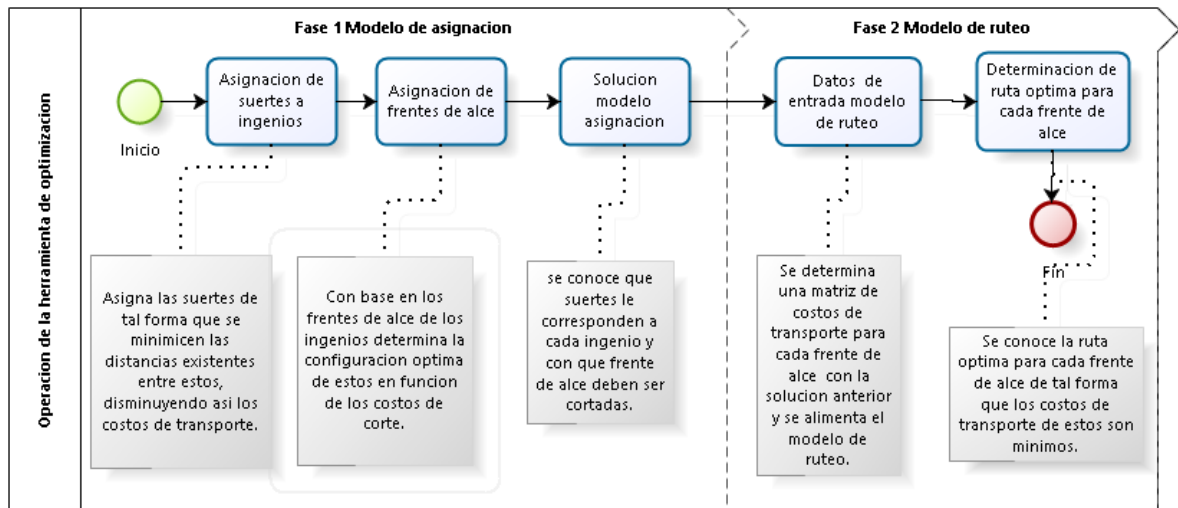
1. La cantidad a cosechar por cada ingenio, la capacidad de oferta de caña de cada suerte, las distancias de cada suerte a los ingenios serán proporcionadas por cada ingenio.
2. Todas las suertes estarán disponibles a ser asignadas y a ser cosechadas una vez al año.
3. Los costos de cada una de las actividades en la cosecha son suministrados al modelo por cada ingenio.
4. La demanda de las plantas involucradas debe ser igual a la oferta de las suertes.
5. Una suerte solo puede ser cosechada por un ingenio y solo puede ser cortada por un frente de alce.
6. Cada frente de alce parte de la planta y regresa a esta después de cosechar las suertes asignadas.
7. Las distancias de las suertes a los ingenios son simétricas.

8.2 FORMULACION DE LA HERRAMIENTA DE OPTIMIZACION

El modelo desarrollado involucra dos fases, asignación y el ruteo de la cosecha, la forma en la que opera el modelo se presenta en la Figura 13: Operación .

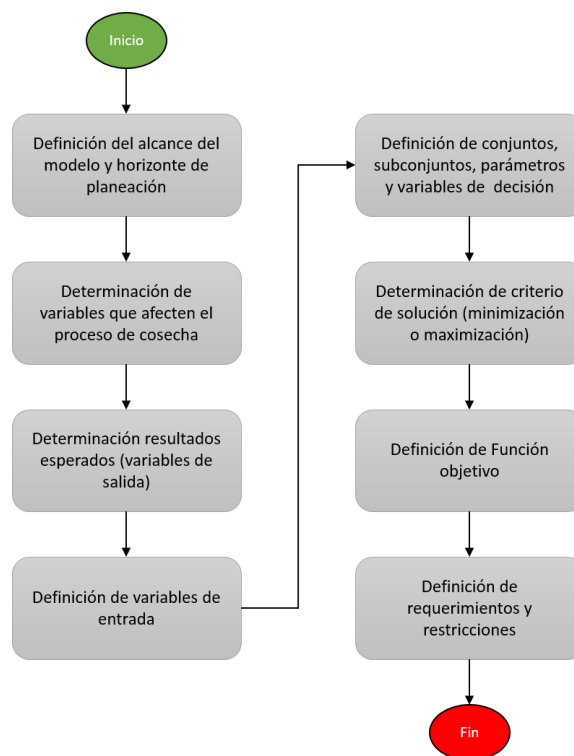
El modelo de asignación se detiene cuando encuentra una solución factible que satisfaga todas las restricciones, de tal manera que se obtengan ingresos máximos por cosecha, el modelo de ruteo a su vez se detiene cuando encuentra una ruta óptima para cada frente de alce, (Ver Figura 14: Diagrama de flujo de la construcción del modelo), donde se puede ver la forma en la que se determinan las variables a usar de acuerdo a las necesidades a resolver.

Figura 13: Operación de la herramienta de optimización



Fuente: elaboración propia

Figura 14: Diagrama de flujo de la construcción del modelo



Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta la notación y formulación matemática del problema de asignación y ruteo a través de un modelo de PLEM y un modelo de TSP+MTZ.

8.3 MODELO ASIGNACION (PLEM)

8.3.1 Conjuntos

Conjunto de suertes asociado al subíndice i

$$\begin{aligned} S &= \{i | i \text{ es una suerte}\} \\ S &= \{i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 \dots \dots \dots i_n\} \end{aligned}$$

Conjunto de ingenios asociados al subíndice j

$$\begin{aligned} I &= \{j | j \text{ es un ingenio}\} \\ I &= \{j_1, j_2, j_3, j_4, j_5 \dots \dots \dots j_n\} \end{aligned}$$

Conjunto de frentes de alce asociados al subíndice k

$$\begin{aligned} F &= \{k | k \text{ es un frente de alce}\} \\ F &= \{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 \dots \dots \dots k_n\} \end{aligned}$$

8.3.2 Parámetros

Disponibilidad de la suerte asociada al subíndice $i \left\{ \frac{tn}{año} \right\}$

$$DISPONIBILIDAD_i \{i \in S : i \text{ es} \geq 0\}$$

Capacidad de corte del frente de alce k del ingenio $j \left\{ \frac{tn}{año} \right\}$

$$CAPACIDADC_{kj} \{k \in F, j \in I : k \text{ y } j \text{ son} \geq 0\}$$

Demanda de caña a moler al año del ingenio $j \left\{ \frac{tn}{año} \right\}$

$$DEMANDA_j \{j \in I : j \geq 0\}$$

Productividad de la suerte i $\{\%$

$$PRODUCTIVIDAD_i \{ i \in S : j \geq 0 \}$$

Distancia de la suerte i al ingenio j $\{km\}$

$$DISTANCIA_{ij} \{ i \in S, j \in I : j \text{ y } i \text{ son } \geq 0 \}$$

Ingreso por tonelada productiva del ingenio j $\left\{ \frac{\$}{tn} \right\}$

$$RENDIMIENTO_j \{ j \in I : j \geq 0 \}$$

Costo de corte del frente de alce k del ingenio j $\left\{ \frac{\$}{tn} \right\}$

$$COSTOC_{kj} \{ k \in F, j \in I : k \text{ y } j \text{ son } \geq 0 \}$$

Costo del ingenio j por transportar una tonelada de caña $\left\{ \frac{\$}{km*tn} \right\}$

$$COSTOTC_j \{ j \in I : j \geq 0 \}$$

Costo de transporte del frente de alce k del ingenio j $\left\{ \frac{\$}{km} \right\}$

$$COSTOTF_{kj} \{ k \in T, j \in I : k \text{ y } j \text{ son } \geq 0 \}$$

8.3.3 Variables de Decisión

$$W_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{ si la suerte } i \text{ es cosechada por el ingenio } j \text{ usando} \\ \text{el frente de alce } k \\ 0, \text{ de lo contrario} \end{cases}$$

8.3.4 Función Objetivo

Ecuación (1): Maximizar Ingresos por cosecha de la suerte i

$$I_{max} = \sum_{i \in S} \sum_{j \in I} \sum_{k \in T} [((DISPONIBILIDAD_i * PRODUCTIVIDAD_i * RENDIMIENTO_j) - ((COSTOC_{kj} * DISPONIBILIDAD_i) + (COSTOTF_{kj} * DISTANCIA_{ij}) + (COSTOTC_j * DISPONIBILIDAD_i * DISTANCIA_{ij}))) * W_{ijk}] \quad (1)$$

La función objetivo es una función de utilidad donde se evalúan los ingresos menos los costos, está dividida en cuatro partes:

$$1. (DISPONIBILIDAD_i * PRODUCTIVIDAD_i * RENDIMIENTO_j)$$

$$\left(\frac{tn}{año} * \left(\frac{TSH}{TCH} \right) * \frac{\$}{tn} \right) = \left(\frac{\$}{año} \right)$$

En la primera parte se calculan los ingresos anuales por tonelada productiva que se obtienen al cosechar la suerte i por el ingenio j , las suertes pueden tener capacidades iguales o diferentes y también productividades diferentes, esto depende de las hectáreas y características del terreno, se involucra la productividad porque es una variable clave para hacer una buena negociación satisfaciendo así las necesidades de producción de las partes que se involucren.

$$2. (COSTOC_{kj} * DISPONIBILIDAD_i)$$

$$\left(\frac{\$}{tn} * \frac{tn}{año} \right) = \left(\frac{\$}{año} \right)$$

En la segunda parte de la ecuación se calcula el costo de cortar la suerte i por el ingenio j usando el tipo de corte k (en el costo de corte está incluido también el alce).

$$3. (COSTOTF_{kj} * DISTANCIA_{ij})$$

$$\left(\frac{\$}{km} * km \right) = (\$)$$

En esta parte calcula el costo de transportar los frentes de alce, es aquí donde asigna los frentes de alce de tal forma que los costos de transporte de estos sean mínimos.

$$4. (COSTOTC_j * DISPONIBILIDAD_i * DISTANCIA_{ij})$$

$$\left(\frac{\$}{km * tn} * \frac{tn}{año} * km \right) = \left(\frac{\$}{año} \right)$$

En la cuarta parte calcula el costo de transportar la caña que se ha cortado, es en esta parte de la ecuación donde esta busca disminuir las distancias entre las suertes y los ingenios minimizando así los costos de transporte.

El objetivo de la función es asignar suertes a ingenios, determinar mediante qué frente de alce se van a cosechar y disminuir distancias, buscando con la integración de estas cuatro partes obtener los costos mínimos y a su vez unos ingresos máximos por cosecha.

8.3.5 Restricciones

El modelo funciona bajo una serie de restricciones las cuales lo acotan en un rango definido de acuerdo a las características propias de capacidad que tiene en los diferentes parámetros que se mencionaron anteriormente.

Ecuación (2): Restricción de capacidad de los ingenios

$$\sum_{i \in S} \sum_{k \in F} (DISPONIBILIDAD_i * PRODUCTIVIDAD_i) * W_{ijk} = DEMANDA_j ; \forall j \in I \quad (2)$$

$$\left(\frac{tn}{año} * \% \right) = \left(\frac{tn}{año} \right)$$

Esta restricción busca que las toneladas de sacarosa que se cosechen en las suertes asignadas a cada ingenio sean iguales la capacidad de producción de estos, cosechando así exactamente lo que necesitan para su producción.

Ecuación (3): Restricción de Capacidad de corte

$$\sum_{i \in S} DISPONIBILIDAD_i * W_{ijk} \leq CAPACIDADC_{kj} ; \forall k \in T , j \in I \quad (3)$$

$$\left(\frac{tn}{año} \right) \leq \left(\frac{tn}{año} \right)$$

El número total de suertes cortadas por cada ingenio estará dado en función de la capacidad total que tengan los frentes de alce de estos; se restringe al modelo a que los frentes de alce solo corten lo que están en capacidad de cortar.

Ecuación (4): Restricción de un solo corte para cada suerte

$$\sum_{j \in I} \sum_{k \in T} W_{ijk} = 1 ; \forall i \in S \quad (4)$$

Esta restricción asegura que las suertes solo puedan ser cortadas una vez al año lo cual es factible debido al ciclo de maduración de la caña que oscila entre 10 y 12 meses.

8.4 MODELO DE RUTEO (TSP+MTZ)

8.4.1 Conjuntos

Conjunto de clúster asociados al subíndice l , se crea este conjunto debido a la solución del modelo de asignación que entrega un grupo de suertes a cada frente de alce, el modelo de ruteo debe generar una ruta para clúster.

$$\begin{aligned} CLU &= \{l | l \text{ es un cluster}\} \\ CLU &= \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5 \dots \dots \dots l_n\} \end{aligned}$$

Conjunto de nodos asociados al índice V

$$\begin{aligned} V &= \{V | V \subseteq CLU : V \geq 0\} \\ V_l &= \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5 \dots \dots \dots V_n\} \end{aligned}$$

Conjunto de arcos asociados al índice A

$$\begin{aligned} A &= \{A | A \subseteq CLU : i \in V ; j \in V ; i \neq j ; A \geq 0\} \\ A_l &= \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 \dots \dots \dots A_n\} \end{aligned}$$

8.4.2 Parámetros

Costo del arco que va desde el nodo i al nodo j en el cluster l $\left\{ \frac{\$}{km} \right\}$

$$C_{lij} \{l \in CLU, (i, j) \in A | A \subseteq CLU : (i, j) \geq 0\}$$

El parámetro C_{lij} es una matriz producto dentro de cada clúster l de orden $m \times n$ en función del número de nodos que se presenten, en la que el elemento situado en la fila i y en la columna j se obtiene multiplicando cada elemento en la posición i, j de la matriz D (distancia entre los nodos involucrados) por el valor k respectivo de la matriz $COSTOTF$ (costo de transporte de cada frente de alce) como se muestra a continuación.

$$D_l * COSTOTF_l = C_{lij}$$

$$\begin{array}{ccc} D_1 = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} & COSTOTF_1 = [k_1] & C_1 = \begin{bmatrix} k_1 d_{11} & \cdots & k_1 d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_1 d_{m1} & \cdots & k_1 d_{mn} \end{bmatrix} \\ D_2 = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} & COSTOTF_2 = [k_2] & C_1 = \begin{bmatrix} k_2 d_{11} & \cdots & k_2 d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_2 d_{m1} & \cdots & k_2 d_{mn} \end{bmatrix} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ D_l = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} & COSTOTF_l = [k_l] & C_l = \begin{bmatrix} k_l d_{11} & \cdots & k_l d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ k_l d_{m1} & \cdots & k_l d_{mn} \end{bmatrix} \end{array}$$

8.4.3 Variables de Decisión

$$X_{lij} = \begin{cases} 1, & \text{si en el cluster } l \text{ toma el arco del nodo } i \text{ al nodo } j \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

8.4.4 Función Objetivo

Ecuación (5): Minimizar costo de transporte de los frentes de alce

$$C_{min} = \sum_{(i,j) \in A | A \subseteq CLU} \sum_{l \in CLU} C_{lij} * X_{lij} \quad (5)$$

La función objetivo es una función de costos donde se evalúan los costos asociados a cada nodo, busca la ruta más corta de tal forma que los costos de transporte de los frentes de alce por visitar los arcos X_{lij} sean mínimos.

8.4.5 Restricciones

El modelo funciona bajo una serie de restricciones las cuales lo limitan en un rango definido de posibles soluciones de acuerdo a los resultados que se desean obtener.

Ecuación (6): Restricción de un ingreso por nodo

$$\sum_{(i,j) \in A | A \subseteq CLU} X_{lij} = 1 ; \forall j \in V | V \subseteq CLU, l \in CLU \quad (6)$$

Esta restricción garantiza que el frente de alce ingrese exactamente una vez a cada nodo.

Ecuación (7): Restricción de una salida por nodo

$$\sum_{(i,j) \in A | A \subseteq CLU} X_{lij} = 1 ; \forall i \in V | V \subseteq CLU, l \in CLU \quad (7)$$

Esta restricción busca que el frente de alce salga exactamente una vez de cada nodo.

Con las restricciones anteriores se genera un espacio de soluciones factibles en las que cada frente de alce cosecha las suertes asignadas una a la vez, siguiendo una secuencia en la que solo pasa una vez por cada suerte.

Ecuación (8): Restricción de rompimiento de sub-rutas

Ecuación (9): Restricción de rompimiento de sub-rutas

$$U_{li} - U_{lj} + (N - 1) * X_{lij} \leq (N - 2) ; \quad (8)$$

$$\forall (i,j) \in A | A \subseteq CLU : i \neq j, i \geq 2, j \geq 2, l \in CLU$$

$$1 + (N - 2) * X_{li1} \leq U_{li} \leq N - 1 - (N - 2) * X_{li1} ; \quad (9)$$

$$\forall i \in V | V \subseteq CLU : i \geq 2, l \in CLU$$

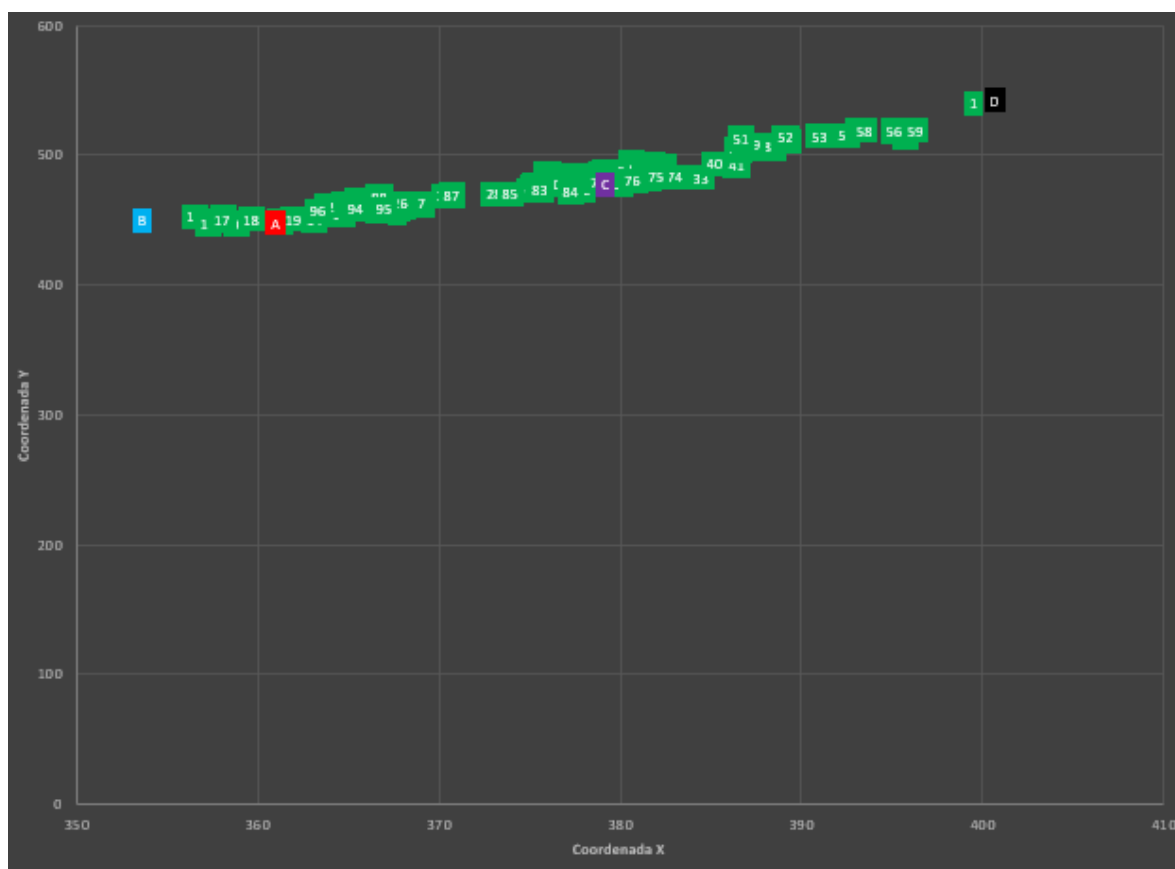
En la Ecuación (8) y Ecuación (9) se incluyen las restricciones de eliminación de subtours de (MILLER, TUCKER, & ZEMLIN, 1960), lo que obliga a que un solo camino cubra todas las suertes y no dos o más caminos disjuntos cubran conjuntamente todas las suertes.

9 ANALISIS DE RESULTADOS

9.1 SOLUCION MODELO DE ASIGNACIÓN (PLEM)

La problemática planteada en la presente investigación, fue abordada mediante la utilización de datos pertenecientes a un caso de estudio comprendido por 4 ingenios azucareros ubicados en el valle geográfico del río Cauca y 96 suertes de la misma región, los cuales se muestran a continuación.

Figura 15 Ubicación caso de estudio



Fuente: elaboración propia

9.1.1 Solución Ingenio A

Con la implementación del modelo de asignación, se llega a una solución factible para cada uno de los ingenios objetos de estudio, determinando así las suertes asignadas al ingenio A, B, C y D independientemente, a continuación se presenta la configuración determinada al ingenio A, ver Tabla 12

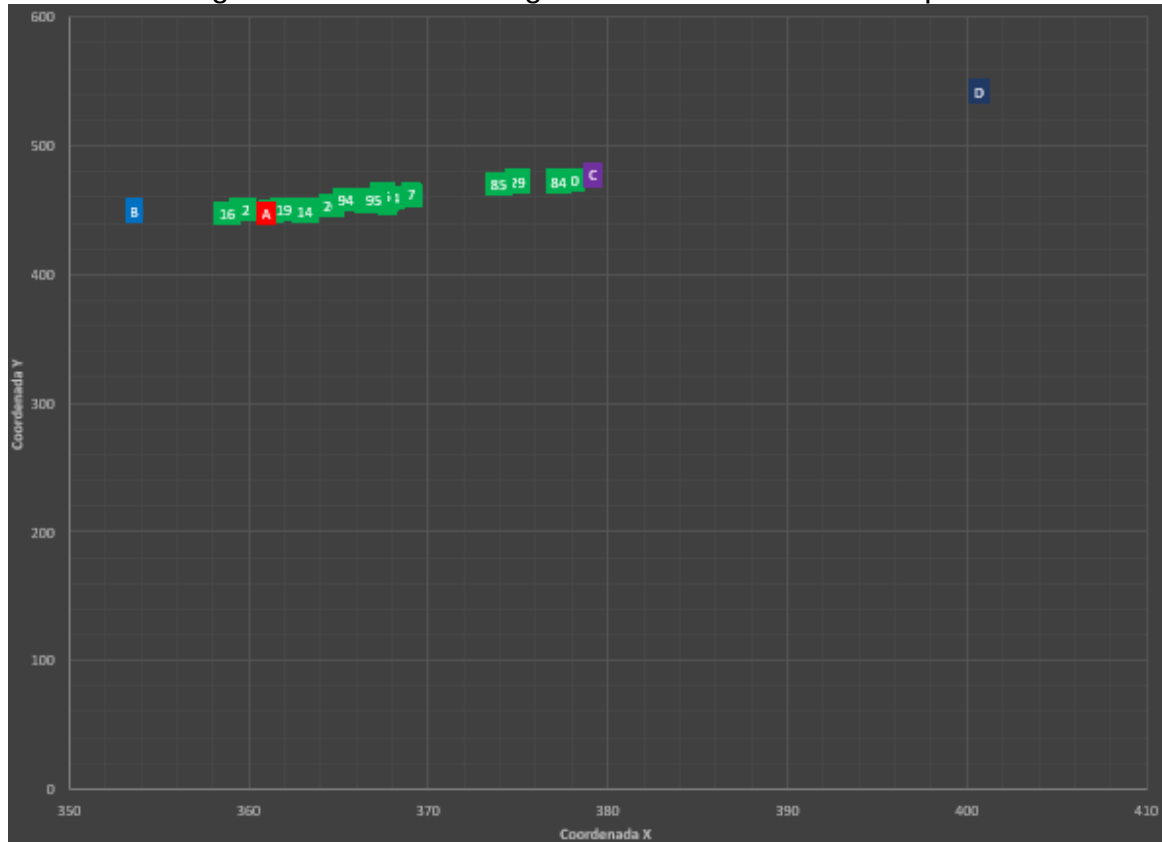
Tabla 12 Asignación de suertes al ingenio A

suerte	1	2	3	4	5	6
3	1					
4			1			
5		1				
6			1			
7	1					
8				1		
9				1		
12					1	
13					1	
14						1
16						1
19						1
20						1
21					1	
22					1	
23	1					
24		1				
25	1					
29				1		
30		1				
84				1		
85		1				
94			1			
95			1			

Fuente: elaboración propia

La distribución de las suertes asignadas a este ingenio son presentas en la Figura 16, donde se identifica que la asignación es realizada dependiendo de la distancia entre las fuentes y el destino.

Figura 16 Suertes del ingenio A distribuidas en el espacio.

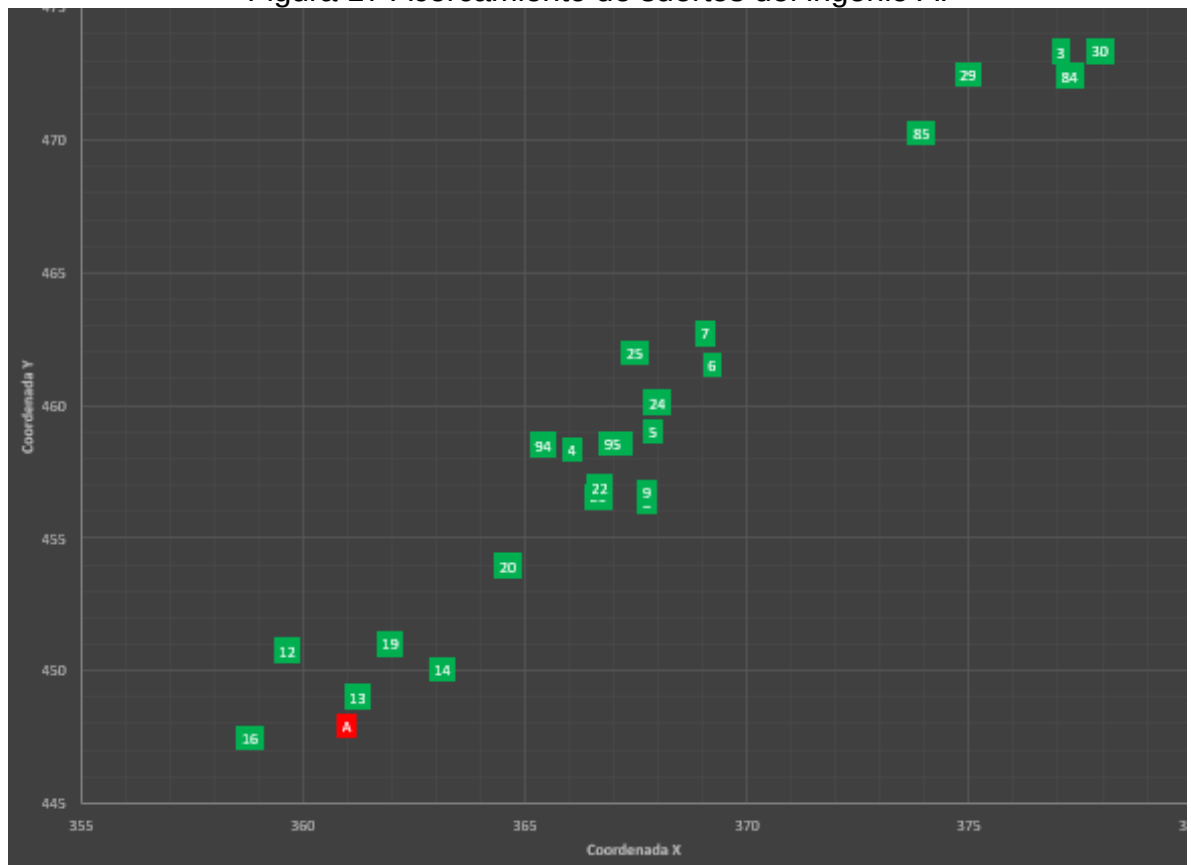


Fuente: elaboración propia

En la tabla anterior, se puede observar que las suertes asignadas al ingenio A, se distribuyen en seis diferentes grupos pertenecientes al tipo de frente de alce de cada ingenio, esta distribución es hecha dependiendo de la asignación más óptima del tipo de corte mediante el cual va a ser cosechada la suerte, la notación de los seis números presentados allí, es la siguiente: {1, 2, 3, 4} para un frente de alce mecánico y {5, 6} para un frente de alce manual.

Para una mejor observación de la distribución otorgada por la solución de la asignación, se presenta en la Figura 17 la ubicación de las suertes de este ingenio (A) de una manera más acercada y amplia.

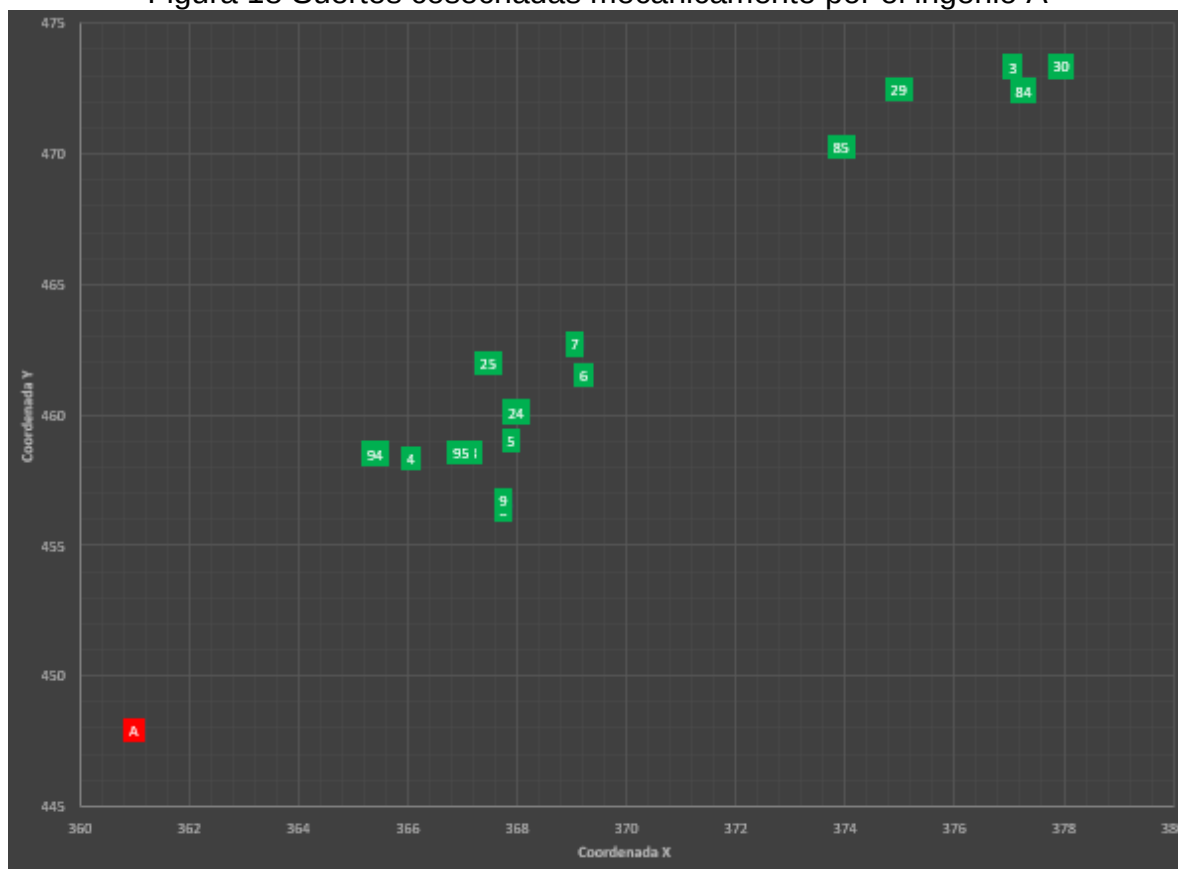
Figura 17 Acercamiento de suertes del ingenio A.



Fuente: elaboración propia

En la Tabla 12 se presenta la asignación de suertes al frente de alce mecánico, el cual se observa espacialmente en la Figura 18.

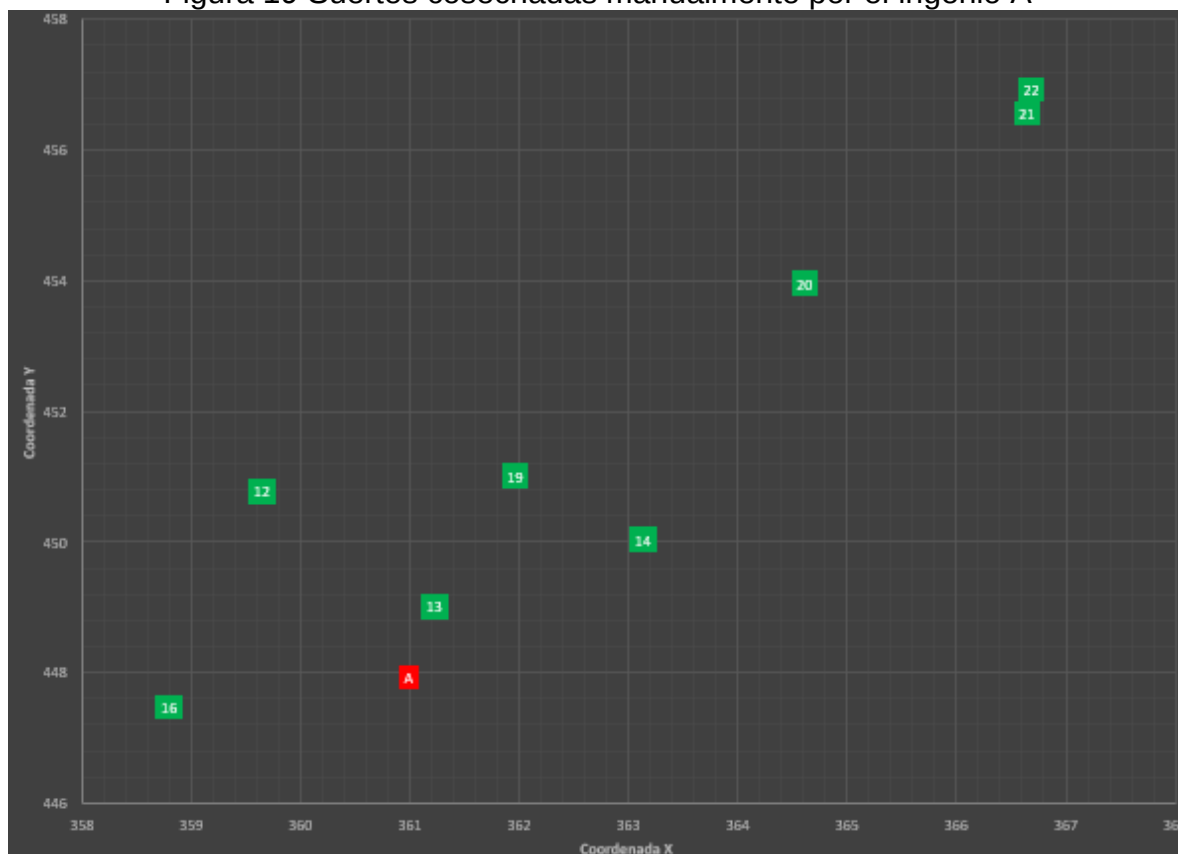
Figura 18 Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio A



Fuente: elaboración propia

De igual manera se presenta la gráfica de ubicación de suertes que deben de ser cortadas manualmente por el ingenio A. en la Figura 19

Figura 19 Suertes cosechadas manualmente por el ingenio A



Fuente: elaboración propia

Las soluciones correspondientes a los ingenios restantes se pueden observar en el **ANEXO 4**

9.2 SOLUCION MODELO RUTEO (TSP + MTZ)

De acuerdo a los resultados obtenidos de la solución factible del modelo de asignación se determinan los clúster con los que se alimenta el modelo de ruteo, cada clúster está formado con los frentes de alce de cada ingenio y las suertes asignadas a cada uno de ellos; se ejecuta el modelo para cada clúster obteniendo así n ruteos en función de los k frentes de alce de los j ingenios, siendo para este caso de estudio 6 frentes de alce por 4 ingenios, el modelo genero 24 rutas optimas de cosecha una para cada frente de alce (clúster) las cuales se presentan a continuación.

La variable X_{lij} como se mencionó anteriormente representa si se toma la ruta del nodo i al nodo j para cada clúster l .

9.2.1 Solución Ingenio A

A continuación se presenta la tabla x donde se encuentran las rutas a seguir por cada frente de alce del ingenio A, el modelo de asignación destino 24 suertes a cada ingenio de las cuales asigno 4 de estas para cada frente de alce de tal forma que se genera un grafo $G = (V, A)$ en el cual V representa el conjunto de nodos y A el conjunto de arcos, para cada clúster en el cual el modelo escoge cual es la ruta optima en la cual el costo de transporte de los frentes de alce para cosechar las suertes asignadas partiendo del ingenio y regresando a este después de cosechar la última suerte es mínimo.

Tabla 13 Ruteos para el ingenio A

x1		x2		x3		x4		x5		x6	
i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j
1	5	1	3	1	4	1	4	1	3	1	3
2	3	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
3	4	3	5	3	5	3	2	3	4	3	4
4	1	4	2	4	3	4	5	4	5	4	5
5	2	5	4	5	2	5	3	5	2	5	2

Fuente: elaboración propia

Una vez obtenida la ruta en función del nodo de inicio y el nodo destino se procede a determinar que nodo corresponde a que suerte en el clúster respectivo, posteriormente se grafican los resultados y se valida si la solución obtenida no viola ninguna restricción del modelo; a continuación se presentan las soluciones para cada frente de alce del ingenio en cuestión posteriormente de los demás ingenios.

Frente de alce 1:

Del modelo de asignación se sabe que al frente 1 del ingenio A le correspondieron las suertes 3, 7, 23 y 25 como se puede observar en la siguiente tabla donde se muestra además que nodo representa cada suerte.

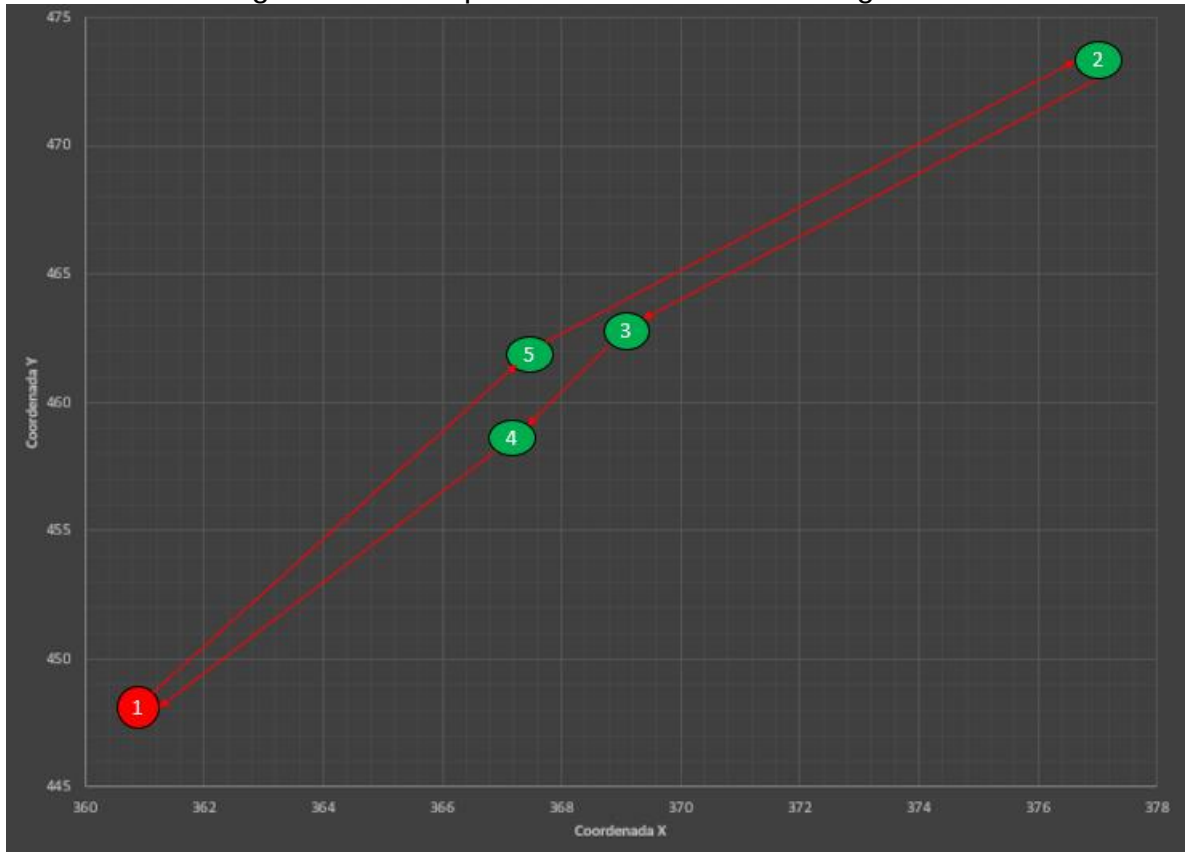
Tabla 14 Nodos frente de alce 1 ingenio A

NODO	SUERTE
1	A
2	3
3	7
4	23
5	25

Fuente: elaboración propia

Para graficar los resultados obtenidos se ubican las suertes y el ingenio en un plano (X, Y) de acuerdo a sus coordenadas cartesianas, se reemplazan las suertes por el nodo correspondiente y se procede a graficar los arcos obtenidos tal como se muestra a continuación.

Figura 20 Ruta optima frente de alce 1 del ingenio A



Fuente: elaboración propia

En el grafo anterior se observa la ruta a seguir por el frente de alce 1 del ingenio A consiguiendo con esta secuencia (1-5-2-3-4-1) costos mínimos de transporte.

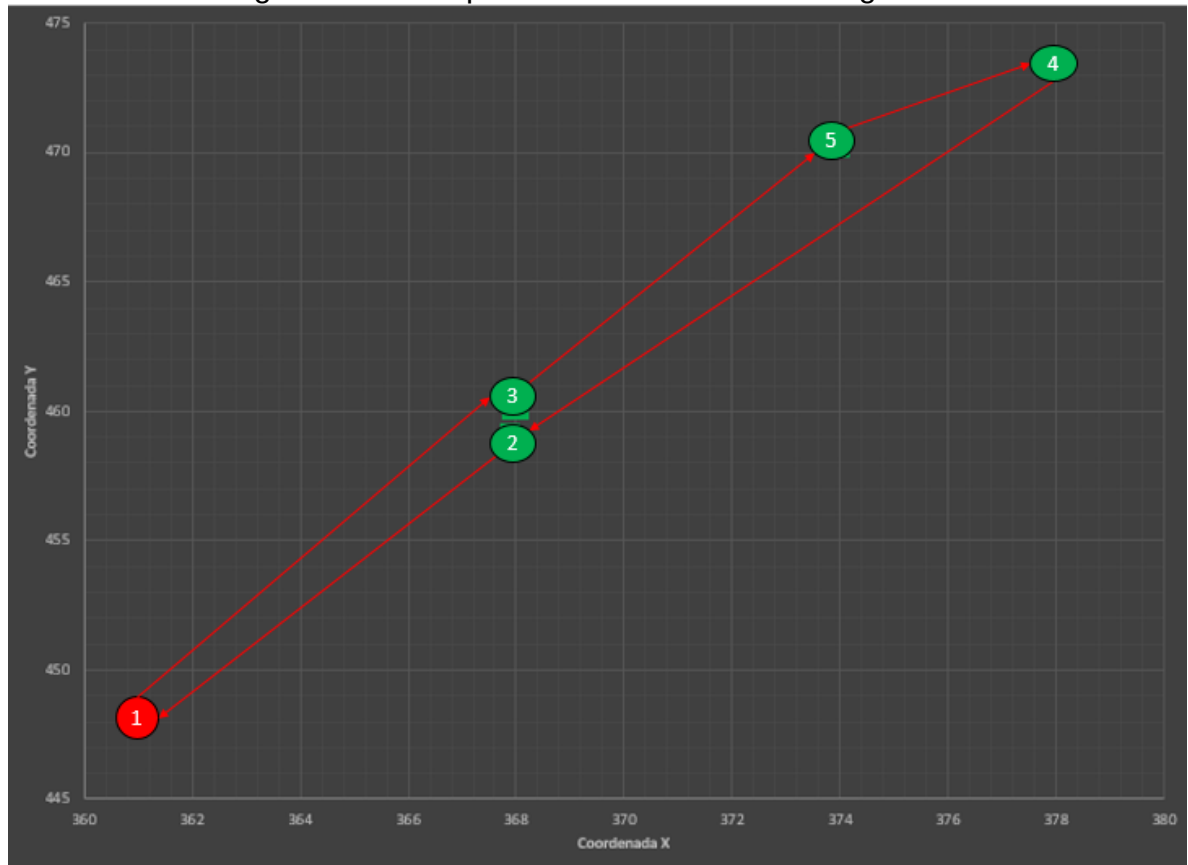
Frente de alce 2:

Tabla 15 Nodos frente de alce 2 ingenio A

NODO	SUORTE
1	A
2	5
3	24
4	30
5	85

Fuente: elaboración propia

Figura 21 Ruta optima frente de alce 2 del ingenio A



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 2 del ingenio A (1-3-5-4-2-1).

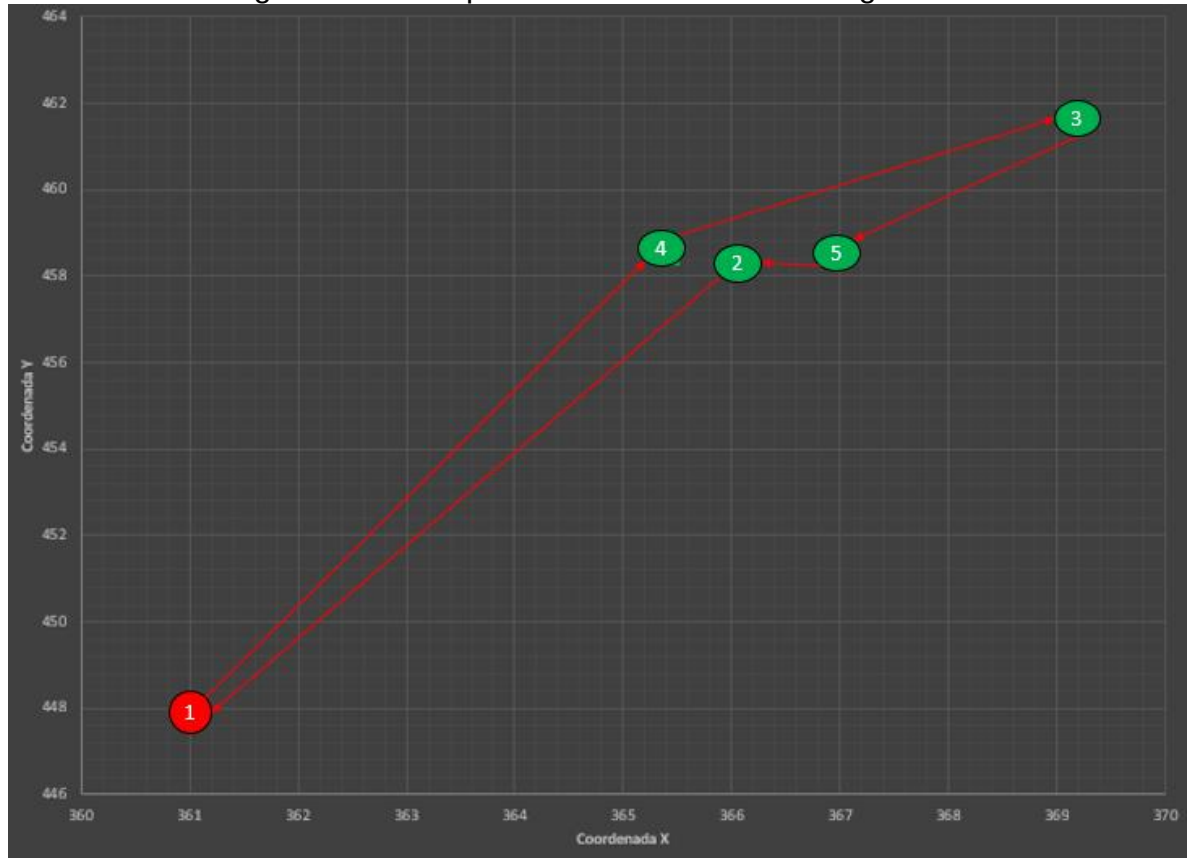
Frente de alce 3:

Tabla 16 Nodos frente de alce 3 ingenio A

NODO	SUERTE
1	A
2	4
3	6
4	94
5	95

Fuente elaboración propia

Figura 22 Ruta optima frente de alce 3 del ingenio A



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 3 del ingenio A (1-4-3-5-2-1).

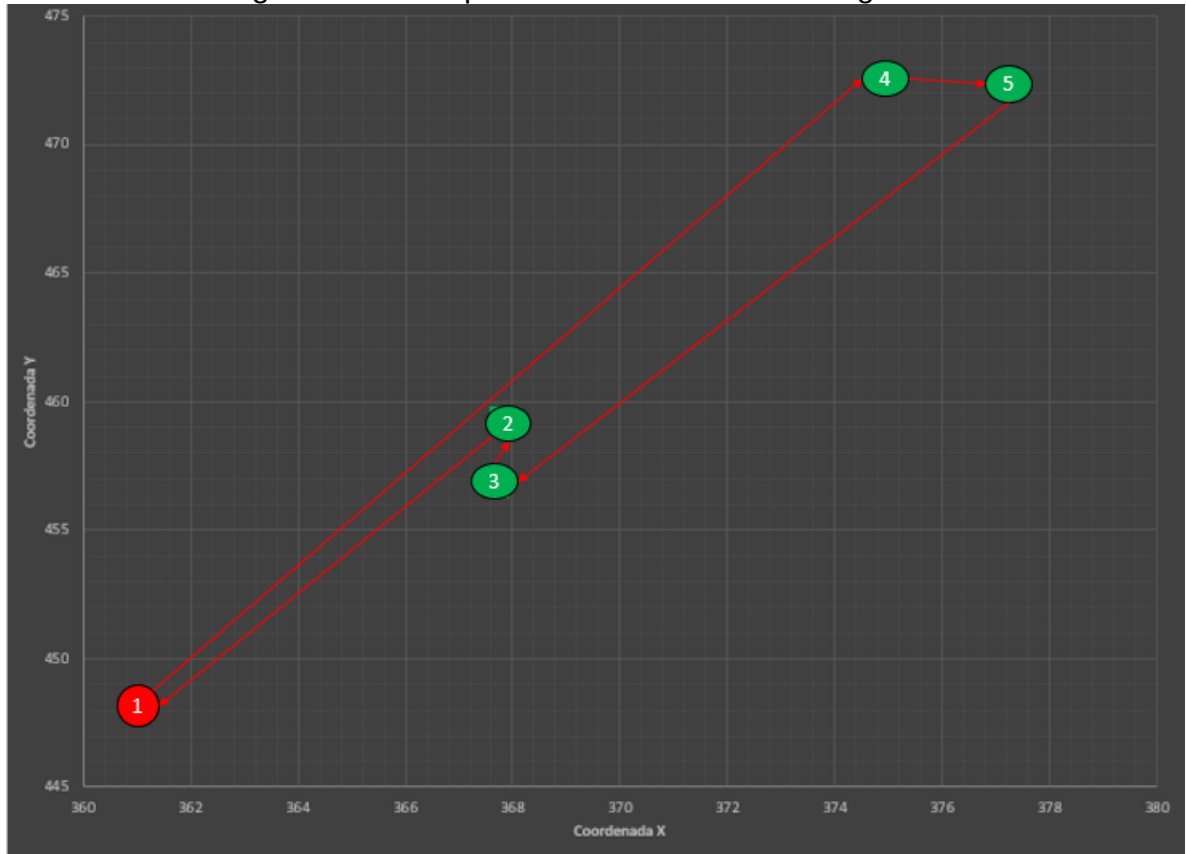
Frente de alce 4:

Tabla 17 Nodos frente de alce 4 ingenio A

NODO	SUERTE
1	A
2	8
3	9
4	29
5	84

Fuente: elaboración propia

Figura 23 Ruta optima frente de alce 4 del ingenio A



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 4 del ingenio A (1-4-5-3-2-1).

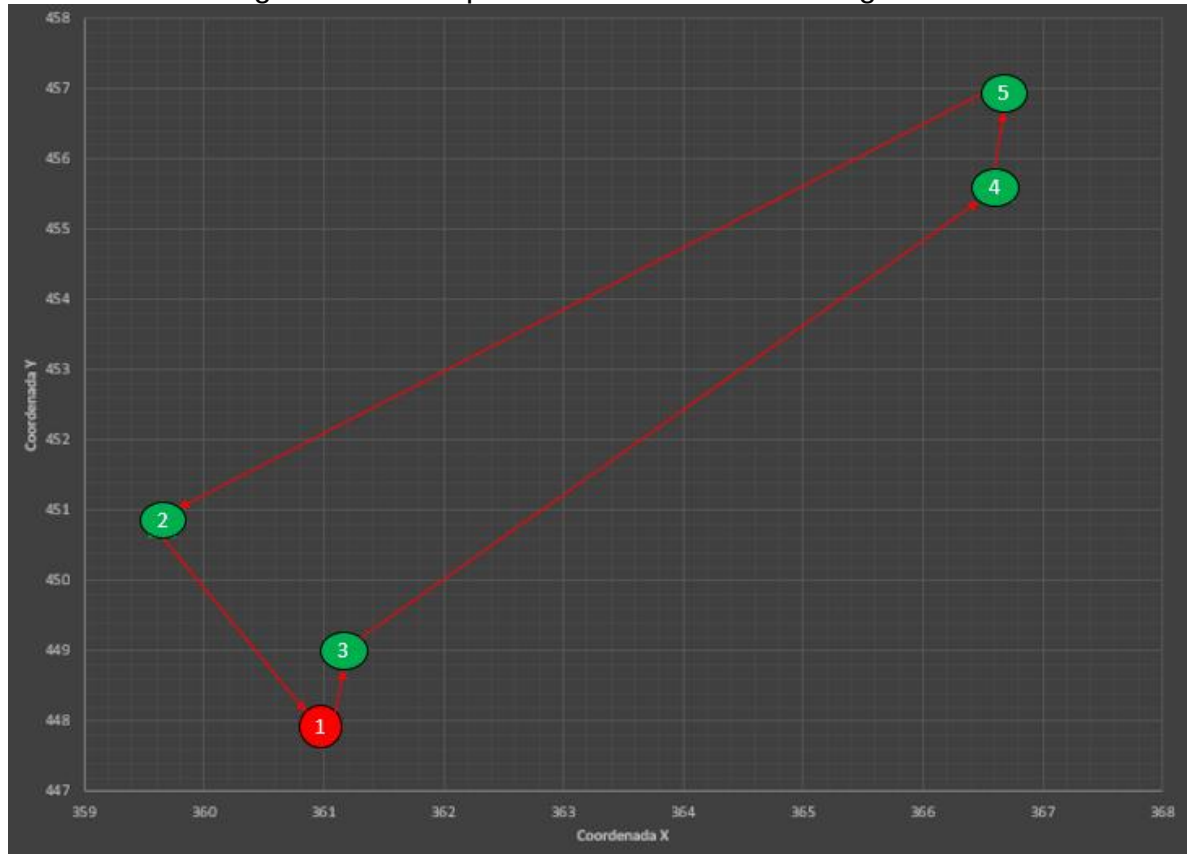
Frente de alce 5:

Tabla 18 Nodos frente de alce 5 ingenio A

NODO	SUERTE
1	A
2	12
3	13
4	21
5	22

Fuente: elaboración propia

Figura 24 Ruta optima frente de alce 5 del ingenio A



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 5 del ingenio A (1-3-4-5-2-1).

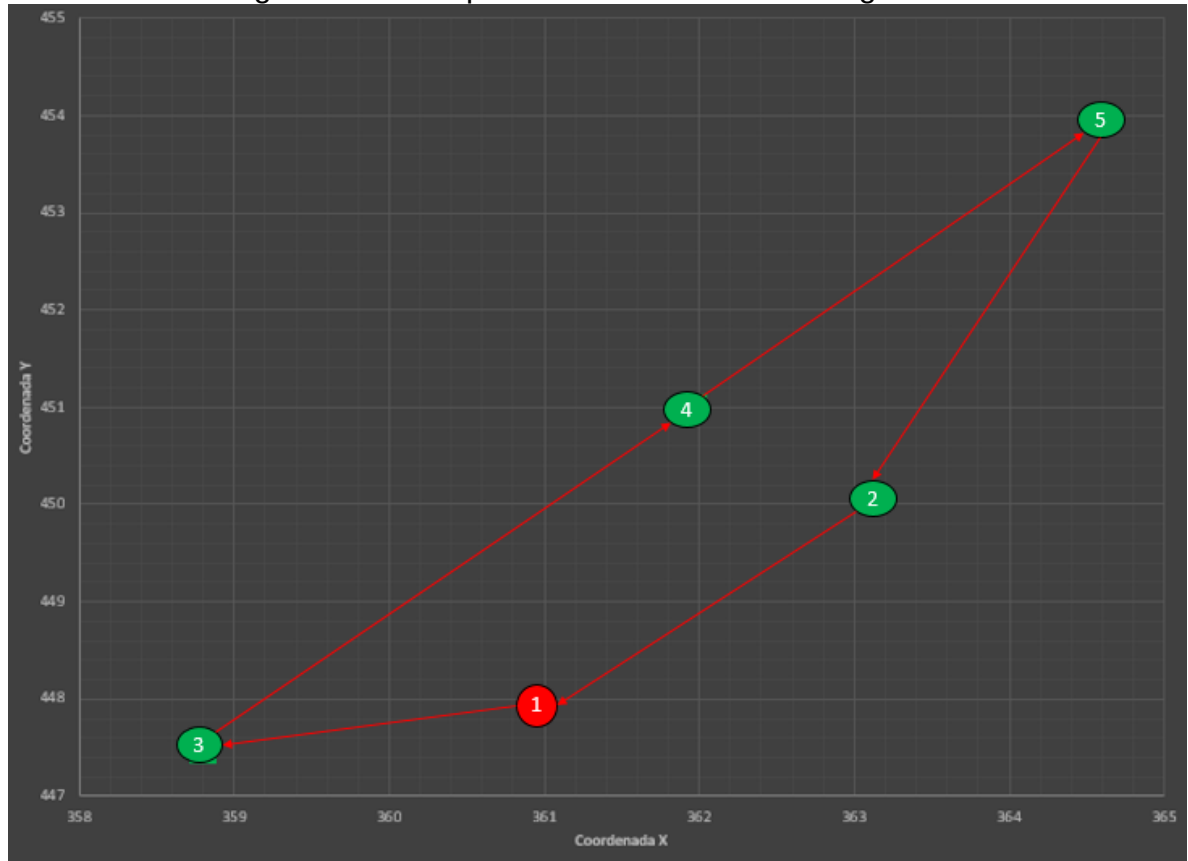
Frente de alce 6:

Tabla 19 Nodos frente de alce 6 ingenio A

NODO	SUERTE
1	A
2	14
3	16
4	19
5	20

Fuente: elaboración propia

Figura 25 Ruta optima frente de alce 6 del ingenio A



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 6 del ingenio A (1-3-4-5-2-1).

Las soluciones correspondientes a los ingenios restantes se muestran en el **ANEXO 5**

Una vez obtenidos y validados los resultados del modelo de ruteo se reemplazan los costos de transporte del frente de alce en el modelo de asignación por los costos de transporte ya optimizados en el modelo de ruteo, con esto se completa la herramienta de optimización propuesta y se da respuesta al caso de estudio planteado, teniendo como producto final las suertes asignadas a cada ingenio, el tipo de corte con el cual deben ser cortadas, el frente de alce que deben usar y que secuencia debe seguir el frente de alce para cosechar estas suertes, obteniendo así ingresos máximos por cosecha mediante la minimización de distancias.

10 CONCLUSIONES

Una vez realizada la investigación del sistema, se concluye lo siguiente:

En la caracterización del sistema de abastecimiento se analizó que las actividades logísticas de los ingenios ubicados en el valle geográfico del río Cauca, son unas de las más críticas en el sector azucarero debido a su alta complejidad, ya que en este participan muchas variables que afectan directamente la eficiencia del sector.

La implementación de la herramienta de optimización que involucra al modelo de asignación y al modelo de ruteo, le proporciona a la investigación una solución aproximada la configuración entre las fuentes de materia prima y las plantas de procesamiento, a su vez otorga una secuencia de recolección más eficiente de todas las fuentes asignadas cumpliendo necesidades de satisfacción y requerimientos otorgados por los usuarios del modelo en cuestión.

A sí mismo, esta herramienta permite analizar las suertes ya pertenecientes a un ingenio para determinar la secuencia de recolección minimizando el costo de ella; cada ingenio también puede tomar las características de distancia y capacidad de suertes ajenas a él, y determinar si estas fuentes pueden ser parte de su lista de “proveedores”, dependiendo de su necesidad y requerimientos.

La asignación de las suertes se realiza teniendo en cuenta la cercanía de ellas con cada uno de los destinos (ingenios), para así minimizar los costos relacionados con las distancias recorridas tanto por los frentes de alce, como por los transportadores de la caña recolectada y de igual manera restringe la cantidad de toneladas de caña alzadas por un frente por la capacidad del mismo.

La utilización de esta herramienta, permite ayudar económicamente a los ingenios que decidan competir con otros, para así entrar en la negociación de los suelos (suertes) necesarias para cumplir con sus requerimientos; de la misma forma poder crear un límite de distancia propio (de cada ingenio) al cual puede intervenir en las fuentes de abastecimiento.

11 BIBLIOGRAFIA

- (s.f.). Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de elclavo.com: <http://elclavo.com/en-linea/mercedes-benz-presenta-la-solucion-innovadora-para-cosecha-y-transporte-de-cana-de-azucar/>
- Lopez Milan , E., Miquel Fernandez , S., & Pla Aragones, L. M. (2005). Sugar cane transportation in Cuba, a case study. *European Journal of Operational Research*, 374–386.
- Adarme Jaimes, W., Fontanilla Díaz , C., & Arango Serna , M. D. (2011). Modelos logísticos para la optimización del transporte de racimos de fruto fresco de palma de aceite en colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 89-114.
- Aguirre Otalvaro, O. F., & Patiño Giraldo, O. I. (2012). *propuesta para reducir el costo logístico del transporte primario desde la cervecería del valle a los diferentes centros de distribución mediante un modelo matemático*. Cali.
- Alvear V., S., & Rodriguez C., P. (2006). Estimación del costo por kilómetro de una empresa de transporte de carga industria agrícola, región del Maule, chile. *Panorama socioeconomico N° 32*, 48-57.
- Amú, L. G. (2011). *Modelo de simulacion y optimizacion para la gestion logistica del sistema de abastecimiento de caña en un ingenio sucro-alcoholero colombiano*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Arbelaez Restrepo, L., & Marin Perez, F. (Octubre de 2001). Sistema de costeo ABC aplicado al transporte de carga. *Revista Universidad EAFIT*.
- ASOCAÑA. (2015). *asocaña.org*. Recuperado el 21 de 11 de 2015, de *asocaña.org*: <http://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>
- Azucar de caña*. (s.f.). Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de <http://www.perafan.com/azucar/ea02enti.html>
- Barbosa, M. G. (2009). Aproximacion a un canje de “suertes” de caña de azucar a traves de un modelo de programación lineal. 7-8.
- Caicedo, L. G. (2010). Logistica de cosecha: Evaluacion de Tiempos y Movimientos. Indicadores y Control. *Tecnicaña*, 25-30.
- Caña de azucar*. (s.f.). Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de <http://canadeazucaranhuaac.blogspot.com.co/2010/10/siembra-y-cultivo.html>

- Cenicaña. (21 de 11 de 2015). *Centro de investigacion para la caña de azucar de colombia*. Obtenido de http://www.cenicana.org/pictures/quienes_somos/map_region_azucarera.jpg
- CENICAÑA. (s.f.). *Proceso de obtencion de azucar*. Recuperado el 07 de Marzo de 2017, de CENICAÑA: http://www.cenicana.org/pop_up/fabrica/diagrama_obtencion.php
- Décima, A., Majorel Padilla, N., Willa, A., Rodríguez, S., & Diez, O. (2011). Optimización del transporte de caña de azúcar utilizando sistemas multiagentes y algoritmos genéticos grouping. *Mecánica Computacional*, 2473-2485.
- Domínguez, J. C. (14 de Mayo de 2014). *Portafolio.co*. Recuperado el 1 de Diciembre de 2015, de Portafolio.co: <http://www.portafolio.co/negocios/ingenios-azucareros-afectados-importaciones>
- Dominik Jena, S., & Poggi, M. (2013). Harvest planning in the Brazilian sugar cane industry via mixed integer. *European Journal of Operational Research*, 374–384.
- Giraldo, F. (2016). *Cosecha, Alce y Transporte*. Recuperado el 07 de Marzo de 2017
- Gonzalez Parra, Y. F., & Teran Cantillo, L. A. (2010). *Diseño de un modelo para la asignación y ruteo de las bombas estacionarias desde las plantas de concreto de holcim (colombia) s.a, zona bogotá*. BOGOTA D.C: Universidad Militar Nueva Granada.
- Investigacion de Operaciones*. (s.f.). Recuperado el 17 de Marzo de 2017, de <http://inves-op-ittol.blogspot.com.co/>
- Larrahondo A., J. E., & Villegas, F. (1995). Control y Caracteristicas de Maduracion . En *El cultivo de la caña en la zona azucarera de colombia* (págs. 297-313). Cali: CENICAÑA.
- Lopez, E., Miquel, S., & Pla Aragones, L. M. (2005). Sugar cane transportation in Cuba, a case study. *European Journal of Operational Research*, 374–386.
- Majorel, N., Décima, A., Will, A., Rodríguez, S., & Diez, O. (2011). Optimización del transporte de caña de azúcar en Tucumán utilizando sistemas multiagentes. *Revista Iberoamericana de Ingenieria Industrial*, 103-119.

- Mantilla, D. E. (2010). Los Sistemas de Corte Mecanizado de Caña de Azúcar. Equipos de Cosecha. *Revista Técnica* No. 26 , 23-24.
- Martin, U. N. (s.f.). *Universidad Nacional de San Martín*. Recuperado el 07 de Marzo de 2017, de <http://www.unsam.edu.ar/tss/cosechadora-sin-fronteras/>
- MILLER, C., TUCKER, A., & ZEMLIN, R. (1960). Integer programming formulations and traveling salesman problems. *JOURNAL ACM* 7, 326-329.
- Miranda, J. P. (2004). Transporte, Ruteo y Asignación de Vehículos. *Ingeniería de operaciones IN47B*.
- Ochoa, O. J. (2012). Modelo de ruteo con asignación de cargas multimodal. *Congreso Latino- Iberoamericano de Investigación Operativa*.
- piscanos-sas. (s.f.). *piscanos-sas*. Recuperado el 07 de Marzo de 2017, de <http://www.piscano-sas.com/images/procesos/proceso-cosecha-mecanizada.jpg>
- Rivera Arroyave, M., & Velasco Naranjo , V. (2014). Desarrollo de un modelo de distribución urbana de mercancías con plataformas logísticas aplicado a la ciudad. *Ing. USBMed* .
- Server Garcia, P. M., Dieguez Batista, R., & Fernandez Aedo, R. (2002). El transporte de la caña de azúcar utilizando la modelación.
- Toro Ocampo, E. M., Bolaños, R. I., & Granada Echeverri, M. (2014). Solución del problema de múltiples agentes viajeros resuelto mediante técnicas heurísticas. *Scientia et Technica Año XIX, Vol. 19*, 174-182.
- Zafra. (2015-2016). *Instructivo para el Corte, Alza y Transporte de Caña de Azúcar (C.A.T.)*.
- Zanjirani Farahani, R., Hekmatfar, M., Boloori Arabani, A., & Nikbakhsh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution. *Computers & Industrial Engineering*, 1096–1109.

ANEXOS

ANEXO 1: UBICACIÓN DE LAS SUERTES ESTUDIADAS

Tabla 2 Ubicación de las suertes estudiadas

suerte	Coordenadas Geográficas		Coordenadas Cartesianas		Coordenadas Cartesianas	
	Latitud	Longitud	x (m)	y (m)	x (km)	y (km)
1	4,89	75,91	399515,07	540574,78	399,52	540,57
2	4,32	76,11	376585,13	477495,88	376,59	477,50
3	4,28	76,11	377062,57	473350,58	377,06	473,35
4	4,15	76,21	366055,09	458338,43	366,06	458,34
5	4,15	76,19	367880,82	459021,85	367,88	459,02
6	4,17	76,18	369210,22	461544,50	369,21	461,54
7	4,19	76,18	369048,82	462730,14	369,05	462,73
8	4,13	76,19	367743,40	456348,26	367,74	456,35
9	4,13	76,19	367745,15	456717,39	367,75	456,72
10	4,10	76,29	356512,98	452972,42	356,51	452,97
11	4,09	76,28	358083,93	452099,06	358,08	452,10
12	4,08	76,26	359644,67	450776,12	359,64	450,78
13	4,06	76,25	361223,84	449013,02	361,22	449,01
14	4,07	76,23	363131,33	450041,85	363,13	450,04
15	4,04	76,29	357265,41	446747,35	357,27	446,75
16	4,05	76,27	358796,11	447469,11	358,80	447,47
17	4,07	76,28	358037,28	449723,22	358,04	449,72
18	4,08	76,26	359630,37	450771,41	359,63	450,77
19	4,08	76,24	361960,70	451013,90	361,96	451,01
20	4,11	76,22	364609,59	453967,78	364,61	453,97
21	4,13	76,20	366643,17	456560,47	366,64	456,56
22	4,13	76,20	366681,83	456927,21	366,68	456,93
23	4,15	76,20	367113,08	458559,24	367,11	458,56
24	4,16	76,19	367977,75	460119,59	367,98	460,12
25	4,18	76,19	367466,05	461984,86	367,47	461,98
26	4,19	76,19	367844,47	463342,40	367,84	463,34
27	4,24	76,17	370315,99	469054,81	370,32	469,05
28	4,25	76,14	373052,22	470366,13	373,05	470,37
29	4,27	76,13	374974,98	472478,30	374,97	472,48

30	4,28	76,10	377948,55	473368,23	377,95	473,37
31	4,32	76,08	380027,28	478115,44	380,03	478,12
32	4,34	76,07	380868,10	479912,04	380,87	479,91
33	4,37	76,04	384444,03	482693,52	384,44	482,69
34	4,38	76,06	382052,89	484168,13	382,05	484,17
35	4,39	76,09	379607,20	485732,77	379,61	485,73
36	4,40	76,12	375987,96	485927,32	375,99	485,93
37	4,44	76,06	382328,77	490610,74	382,33	490,61
38	4,47	76,08	380639,12	494520,40	380,64	494,52
39	4,46	76,02	386414,99	492534,94	386,41	492,53
40	4,46	76,03	385201,67	493250,89	385,20	493,25
41	4,46	76,02	386434,01	492516,00	386,43	492,52
42	4,42	76,07	381341,79	488119,22	381,34	488,12
43	4,45	76,06	382356,11	491419,59	382,36	491,42
44	4,56	76,02	386522,04	504345,25	386,52	504,35
45	4,57	76,02	387123,68	505555,14	387,12	505,56
46	4,57	76,01	388471,27	505666,75	388,47	505,67
47	4,57	76,02	386866,79	505711,58	386,87	505,71
48	4,59	76,01	387906,85	507199,87	387,91	507,20
49	4,60	76,02	387303,59	508193,88	387,30	508,19
50	4,62	76,00	389261,19	510465,85	389,26	510,47
51	4,64	76,02	386677,18	512942,84	386,68	512,94
52	4,65	76,00	389111,12	513776,38	389,11	513,78
53	4,66	75,98	391002,82	514993,78	391,00	514,99
54	4,66	75,97	392450,28	515162,02	392,45	515,16
55	4,65	75,94	395712,70	514448,28	395,71	514,45
56	4,69	75,95	395128,21	518780,54	395,13	518,78
57	4,70	75,96	393119,99	519246,67	393,12	519,25
58	4,70	75,96	393472,34	519312,39	393,47	519,31
59	4,70	75,94	396280,55	519034,32	396,28	519,03
60	4,47	76,08	380639,20	494577,16	380,64	494,58
61	4,46	76,07	381790,13	493553,76	381,79	493,55
62	4,45	76,07	381184,72	491482,77	381,18	491,48
63	4,43	76,06	382049,71	490280,02	382,05	490,28
64	4,42	76,07	380909,89	489141,63	380,91	489,14
65	4,42	76,07	381321,82	488313,20	381,32	488,31
66	4,41	76,08	379826,86	487780,81	379,83	487,78
67	4,40	76,09	379139,91	486982,34	379,14	486,98
68	4,39	76,09	378937,82	485563,44	378,94	485,56

69	4,38	76,09	379117,49	484669,07	379,12	484,67
70	4,38	76,10	377954,71	484183,50	377,95	484,18
71	4,38	76,11	377163,60	483844,05	377,16	483,84
72	4,36	76,10	378223,41	482286,04	378,22	482,29
73	4,36	76,07	381547,65	482200,83	381,55	482,20
74	4,37	76,05	383025,29	483064,49	383,03	483,06
75	4,37	76,06	381992,23	483368,71	381,99	483,37
76	4,35	76,08	380678,22	480361,74	380,68	480,36
77	4,34	76,09	378805,58	479763,59	378,81	479,76
78	4,34	76,11	377290,27	479278,49	377,29	479,28
79	4,34	76,11	376362,28	479809,74	376,36	479,81
80	4,33	76,11	376302,81	478234,36	376,30	478,23
81	4,31	76,12	375272,23	477034,16	375,27	477,03
82	4,30	76,12	375184,27	475525,01	375,18	475,53
83	4,28	76,12	375572,03	473598,78	375,57	473,60
84	4,27	76,11	377261,28	472422,94	377,26	472,42
85	4,25	76,14	373923,79	470270,21	373,92	470,27
86	4,25	76,17	370694,04	470204,05	370,69	470,20
87	4,24	76,17	370697,18	469125,21	370,70	469,13
88	4,23	76,20	366708,41	468080,84	366,71	468,08
89	4,21	76,21	365494,61	465631,59	365,49	465,63
90	4,19	76,22	364808,95	462774,48	364,81	462,77
91	4,17	76,21	365364,00	461268,78	365,36	461,27
92	4,17	76,23	363815,19	460954,12	363,82	460,95
93	4,16	76,21	365233,21	459863,49	365,23	459,86
94	4,15	76,21	365402,69	458533,45	365,40	458,53
95	4,15	76,20	366970,17	458568,92	366,97	458,57
96	4,14	76,23	363309,23	457282,57	363,31	457,28

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2: DISPONIBILIDAD Y PRODUCTIVIDAD DE LAS SUERTES

Tabla 20 Disponibilidad y productividad de las suertes

suerte	DISPONIBILIDAD	PRODUCTIVIDAD
1	8775	1
2	8775	1

3	8775	1
4	8775	1
5	8775	1
6	8775	1
7	8775	1
8	8775	1
9	8775	1
10	8775	1
11	8775	1
12	8775	1
13	8775	1
14	8775	1
15	8775	1
16	8775	1
17	8775	1
18	8775	1
19	8775	1
20	8775	1
21	8775	1
22	8775	1
23	8775	1
24	8775	1
25	8775	1
26	8775	1
27	8775	1
28	8775	1
29	8775	1
30	8775	1
31	8775	1
32	8775	1
33	8775	1
34	8775	1
35	8775	1
36	8775	1
37	8775	1
38	8775	1
39	8775	1
40	8775	1
41	8775	1
42	8775	1

43	8775	1
44	8775	1
45	8775	1
46	8775	1
47	8775	1
48	8775	1
49	8775	1
50	8775	1
51	8775	1
52	8775	1
53	8775	1
54	8775	1
55	8775	1
56	8775	1
57	8775	1
58	8775	1
59	8775	1
60	8775	1
61	8775	1
62	8775	1
63	8775	1
64	8775	1
65	8775	1
66	8775	1
67	8775	1
68	8775	1
69	8775	1
70	8775	1
71	8775	1
72	8775	1
73	8775	1
74	8775	1
75	8775	1
76	8775	1
77	8775	1
78	8775	1
79	8775	1
80	8775	1
81	8775	1
82	8775	1

83	8775	1
84	8775	1
85	8775	1
86	8775	1
87	8775	1
88	8775	1
89	8775	1
90	8775	1
91	8775	1
92	8775	1
93	8775	1
94	8775	1
95	8775	1
96	8775	1

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3: DISTANCIA DE LAS SUERTES A CADA UNO DE LOS INGENIOS

Tabla 21 Distancia de las suertes a cada uno de los ingenios

Suerte	Ingenio			
	A	B	C	D
1	100,3359639	101,6071844	66,2845331	2,1619202
2	33,4276503	35,8841004	2,5922582	69,2329239
3	30,0767744	33,1425096	4,6460455	72,9779072
4	11,5761093	15,0157532	23,2137395	90,9132961
5	13,0593179	16,9170564	21,6469117	89,5977245
6	15,9048679	19,4457910	18,8021361	86,7641605
7	16,8529162	20,0522386	17,8987225	85,7196296
8	10,7943232	15,5173452	24,0332935	92,1401458
9	11,0856110	15,6753378	23,7084227	91,7948462
10	6,7380567	4,2036156	33,3865153	99,7384061
11	5,0772627	4,9671011	33,0076015	99,8423076
12	3,1440013	6,0863854	33,0910714	100,3927745
13	1,1072878	7,6600655	33,6618442	101,3798534
14	3,0100920	9,5138713	31,7920394	99,6992566
15	3,9031983	4,8369189	37,7502961	105,0433494
16	2,2368102	5,7305615	36,2835214	103,7594743
17	3,4489216	4,4236709	34,8963284	102,0157902

18	3,1458736	6,0715600	33,1033197	100,4029195
19	3,2328910	8,4133590	31,5794320	99,2499866
20	7,0408041	11,7115420	27,6657349	95,5057004
21	10,3185464	14,6180744	24,3935000	92,3416106
22	10,6477578	14,8222297	24,0595161	91,9864773
23	12,2678206	16,0210210	22,4459929	90,3108015
24	14,0515079	17,6107801	20,6657329	88,5411806
25	15,4756454	18,3635117	19,4289499	87,0043309
26	16,8683814	19,5558319	18,1250052	85,6052627
27	23,0922825	25,3927213	12,2324457	79,3818583
28	25,4739823	28,2054424	9,3930858	77,1507701
29	28,2534656	31,0611033	6,5384436	74,4976454
30	30,5742506	33,7872895	4,2985570	72,6794650
31	35,6885423	38,6286942	1,0567674	67,5221831
32	37,6574730	40,5193461	2,9559072	65,5550611
33	41,9370751	44,9894375	7,4054915	61,8770319
34	41,9158692	44,5103037	7,2732878	61,1400747
35	42,1391696	44,2455653	8,2565666	60,4592062
36	40,8503966	42,3865417	9,0224549	61,6344484
37	47,7185474	49,7963627	13,4964184	54,9454182
38	50,5647169	52,1434156	17,0956008	51,9045187
39	51,3433446	53,7707182	16,6976456	51,8674970
40	51,3836635	53,6162627	16,8754190	51,5303956
41	51,3363190	53,7673186	16,6888412	51,8804901
42	45,0492849	47,1958023	10,8498917	57,6235645
43	48,4553798	50,4749588	14,2902176	54,1743456
44	61,9243946	63,5947757	27,8439993	40,6037414
45	63,2747401	64,9415116	29,1709058	39,2603301
46	63,9439893	65,7415382	29,6724158	38,7103008
47	63,3117883	64,9436815	29,2528852	39,2031820
48	65,0961047	66,7547307	30,9682790	37,4467986
49	65,7586378	67,3055791	31,7635483	36,7288834
50	68,6299091	70,2544947	34,4856709	33,9151814
51	69,9037494	71,1633597	36,2399653	32,6149430
52	71,6002821	73,0535885	37,6240517	30,8732399
53	73,4737576	75,0442400	39,3264477	29,0655317
54	74,2292545	75,9202325	39,9442970	28,4559611
55	75,0364850	77,0407809	40,4910275	28,3937729
56	78,6468029	80,4005754	44,2668265	24,2662374
57	78,2207403	79,7870487	44,0253697	24,3577528

58	78,4259624	80,0190585	44,2004015	24,1882132
59	79,3811249	81,2173727	44,9295566	23,7801702
60	50,6170507	52,1920115	17,1521609	51,8521245
61	50,1420692	51,9343982	16,2774210	52,3719712
62	48,0075641	49,8699747	14,1385952	54,5222867
63	47,2980458	49,3652684	13,1111199	55,3505057
64	45,7740281	47,7789707	11,7823033	56,8100851
65	45,2134312	47,3412394	11,0361437	57,4475675
66	44,0791222	46,0435046	10,3138804	58,4650740
67	43,0645353	44,9961194	9,4950087	59,4570078
68	41,6947655	43,7175812	8,0795938	60,8537023
69	40,9685648	43,0976535	7,1819146	61,6269327
70	40,0270573	42,0232538	6,8068110	62,4951292
71	39,3883792	41,2908053	6,6679984	63,1018132
72	38,4367763	40,6533430	4,8925447	64,1721566
73	39,9650062	42,6828402	5,2758551	63,1679198
74	41,4740102	44,3062583	6,7757131	61,9082551
75	41,1957656	43,8589797	6,5202167	61,9203039
76	37,9412209	40,7268830	3,2425891	65,1844447
77	36,4807635	39,0484745	2,3063545	66,3471727
78	35,3339213	37,7098375	2,6017631	67,3163715
79	35,3931023	37,5556760	3,6493826	67,1486484
80	33,9542184	36,2773710	2,9700303	68,6407017
81	32,4203635	34,6963719	3,9313582	70,1305772
82	31,0324351	33,4736949	4,4492586	71,5707097
83	29,5225975	32,2869736	5,3028208	73,2402207
84	29,4065239	32,6371175	5,4148126	73,7930559
85	25,8151958	28,7449196	8,9268178	76,9331098
86	24,2965673	26,5113194	11,1809737	78,1754401
87	23,3129098	25,6975480	11,9096613	79,1717579
88	20,9461844	22,3832830	15,6191675	81,7146278
89	18,2652607	19,6917780	18,1046471	84,4468314
90	15,3273652	17,0399003	20,5650667	87,3317877
91	14,0375216	16,3297177	21,3038274	88,4840188
92	13,3263144	15,0211194	22,5687034	89,3997876
93	12,6654686	15,2870805	22,4731392	89,8259029
94	11,4853317	14,5941969	23,4306317	90,9838228
95	12,2054885	15,9060845	22,5149957	90,3550079
96	9,6353128	12,1679655	25,6911120	92,9594670

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 4: SOLUCION MODELO ASIGNACION (PLEM)

Solución Ingenio B

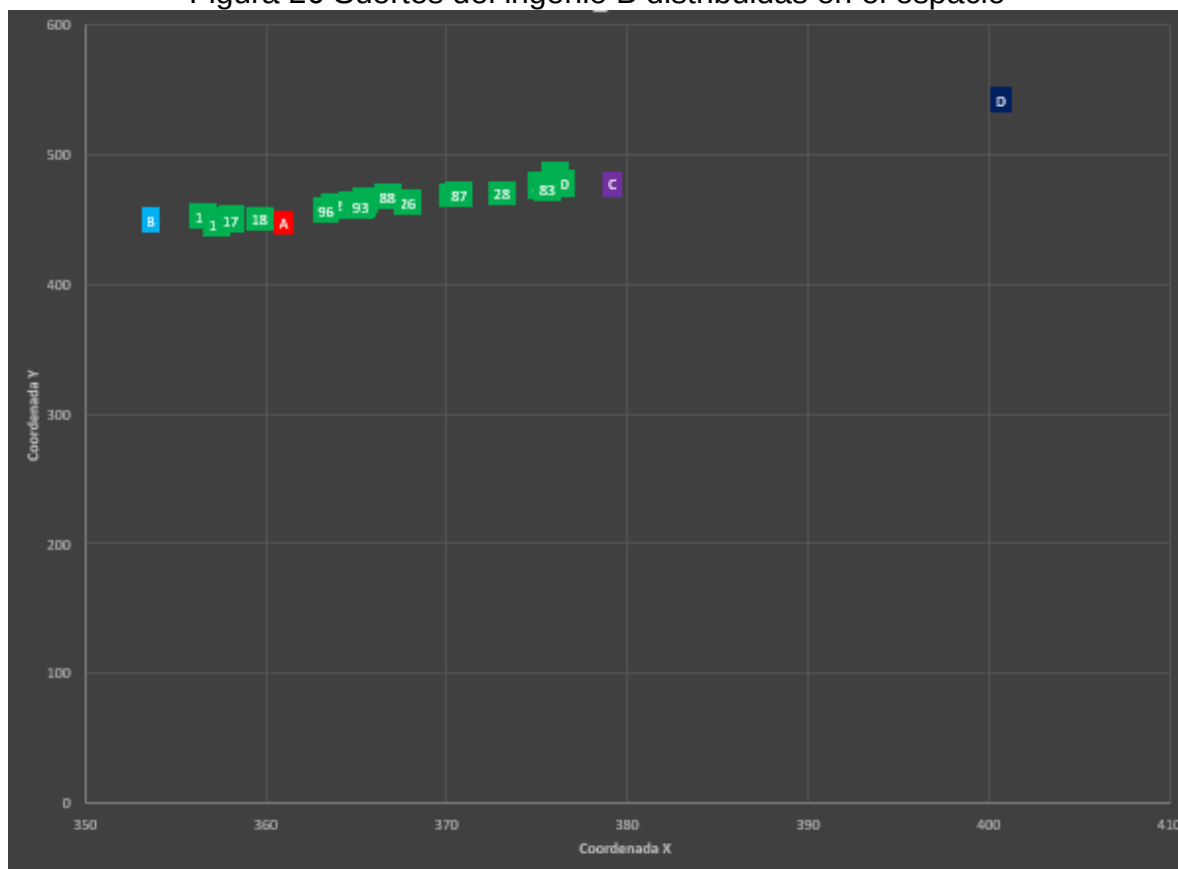
La asignación de suertes correspondiente al ingenio B y la configuración determinada de los frentes de alce, se muestra en la Tabla 22 de tal forma que la necesidad de cada ingenio es abastecida por las toneladas de caña resultantes de suertes.

Tabla 22 Asignación de suertes al ingenio B

suerte	1	2	3	4	5	6
2		1				
10					1	
11						1
15						1
17						1
18					1	
26		1				
27		1				
28			1			
36			1			
79	1					
80	1					
81				1		
82				1		
83				1		
86		1				
87				1		
88			1			
89			1			
90	1					
91	1					
92						1
93					1	
96					1	

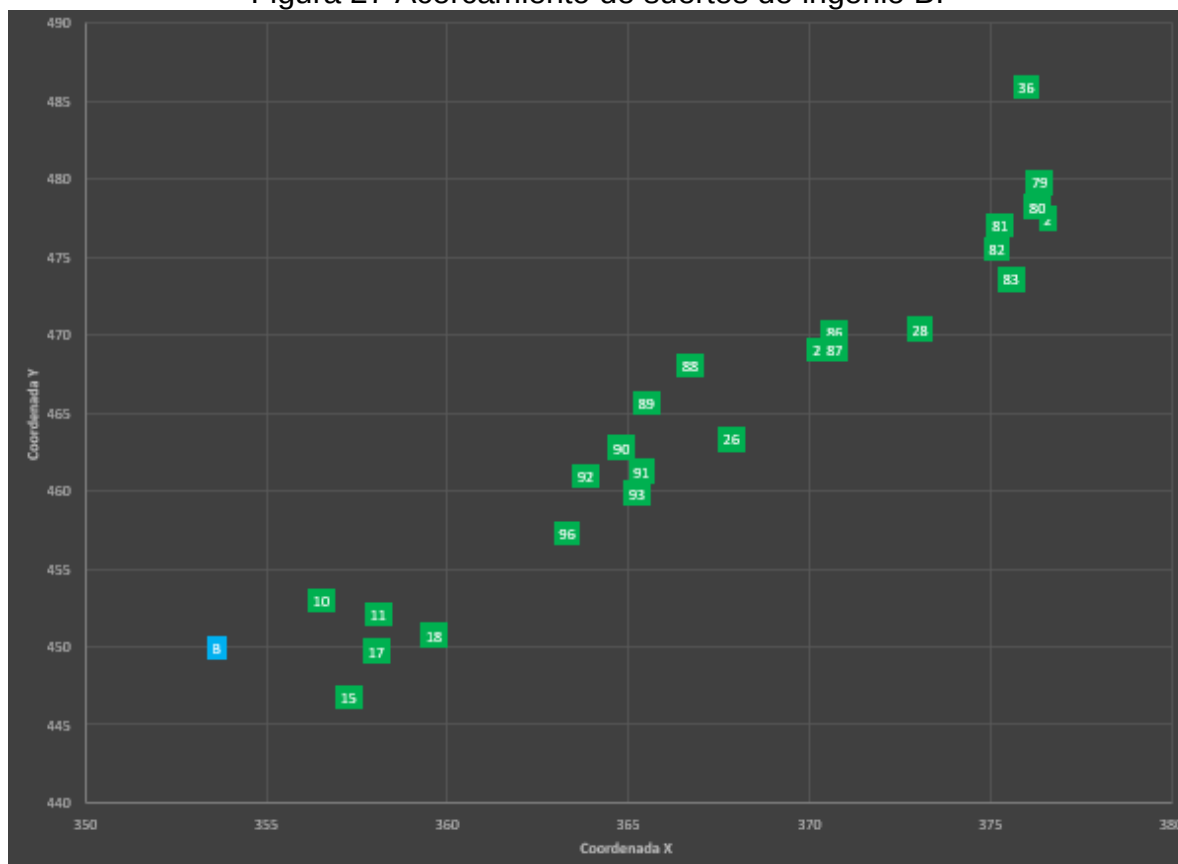
Fuente: elaboración propia

Figura 26 Suertes del ingenio B distribuidas en el espacio



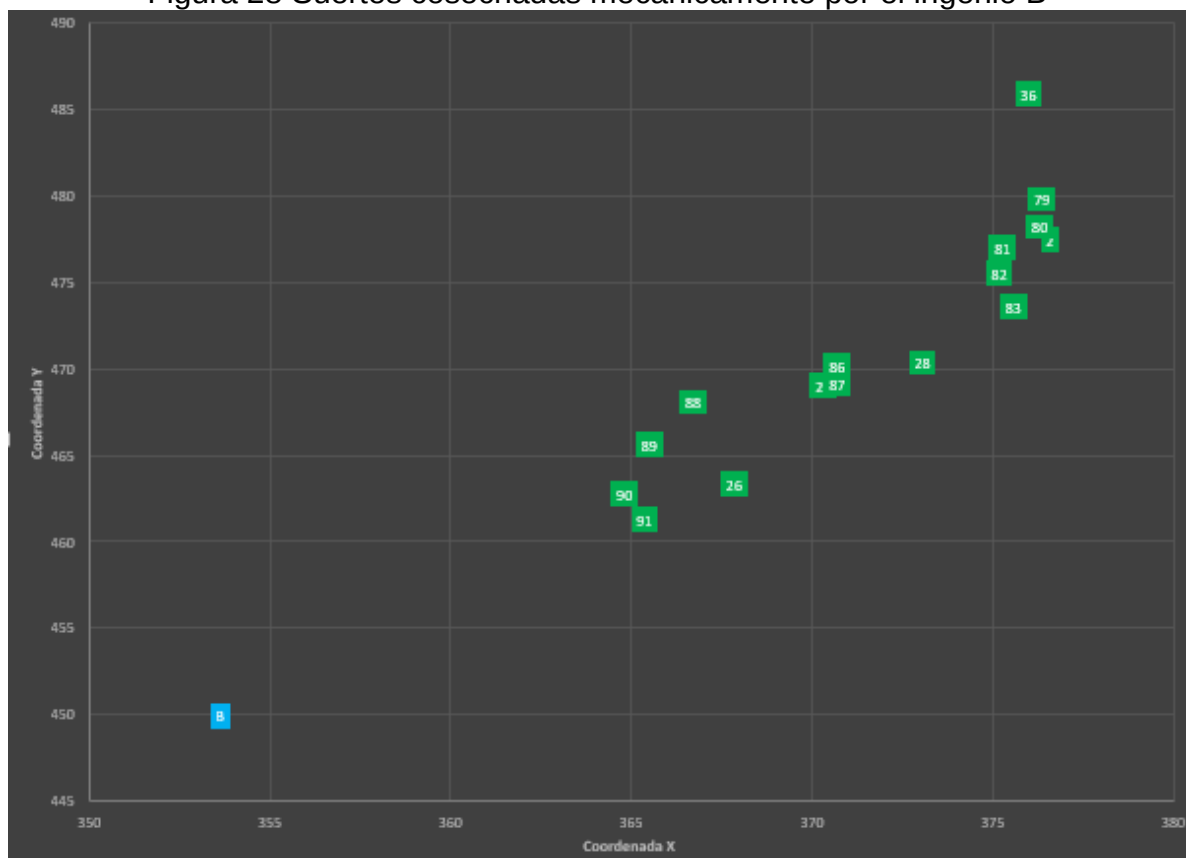
Fuente: elaboración propia

Figura 27 Acercamiento de suertes de ingenio B.



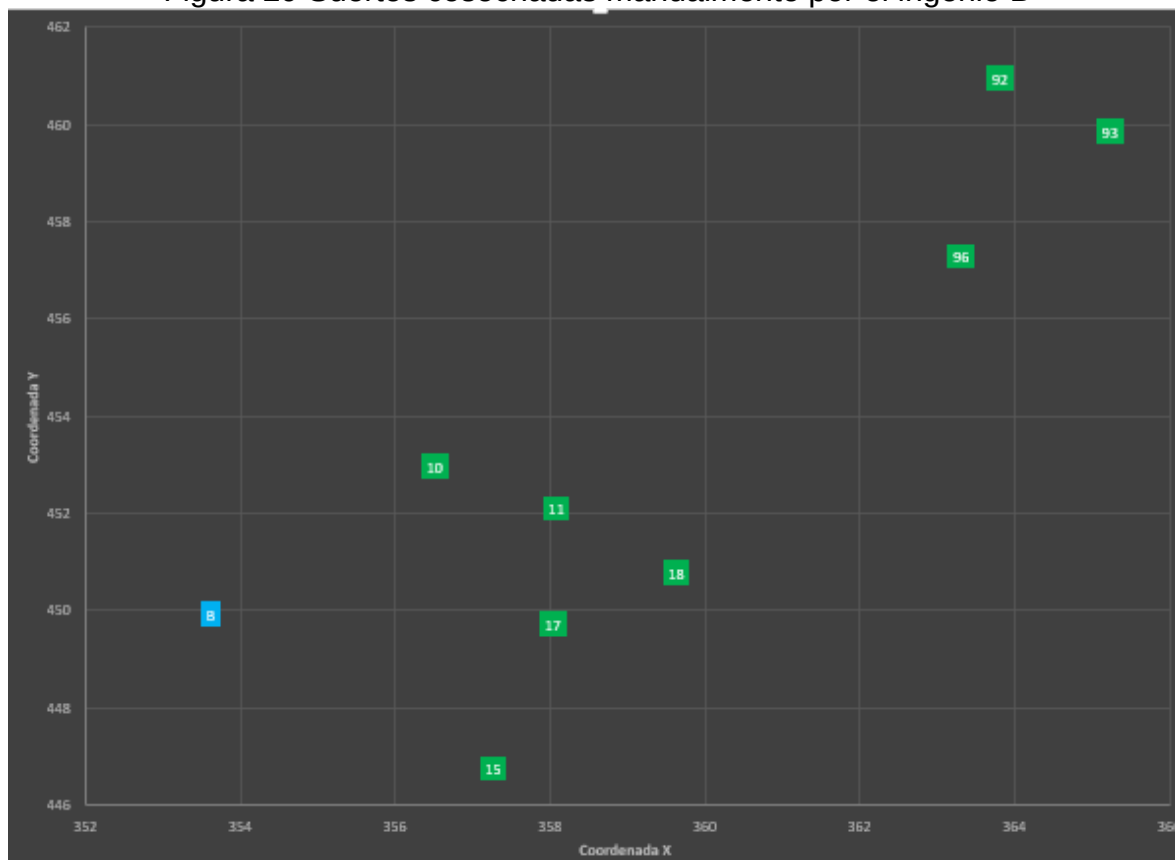
Fuente: elaboración propia

Figura 28 Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio B



Fuente: elaboración propia

Figura 29 Suertes cosechadas manualmente por el ingenio B



Fuente: elaboración propia

Solución Ingenio C

El modelo de asignación planteada en este trabajo, se encarga de optimizar la utilidad de cada ingenio en cuestión; para ello escoge las suertes más próximas al ingenio, el tipo de alce más conveniente referente a costos y muestra la asignación resultante para el ingenio C en la Tabla 23

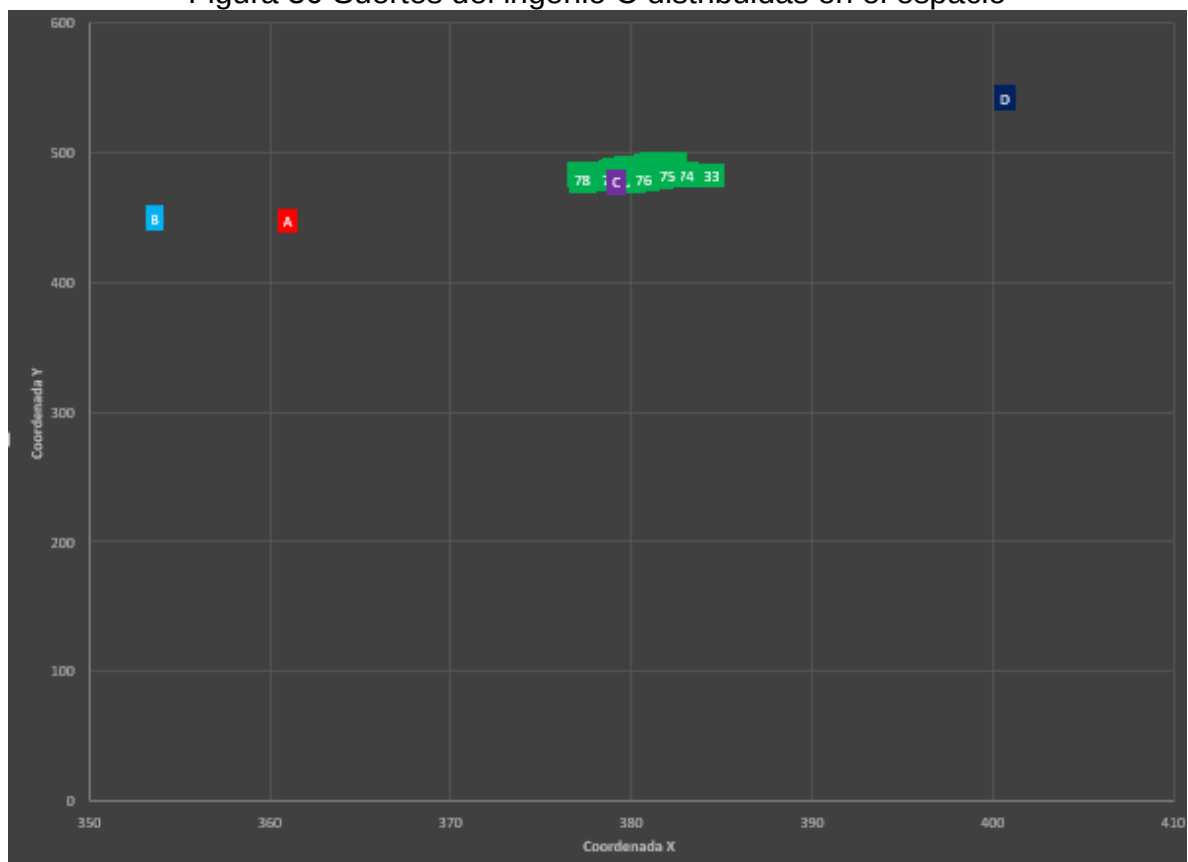
Tabla 23 Asignación de suertes al ingenio C.

suerte	1	2	3	4	5	6
31						1
32					1	
33			1			
34				1		
35				1		
37		1				

42				1		
62	1					
63	1					
64	1					
65			1			
66		1				
67	1					
68			1			
69		1				
70		1				
71				1		
72						1
73					1	
74			1			
75					1	
76						1
77						1
78					1	

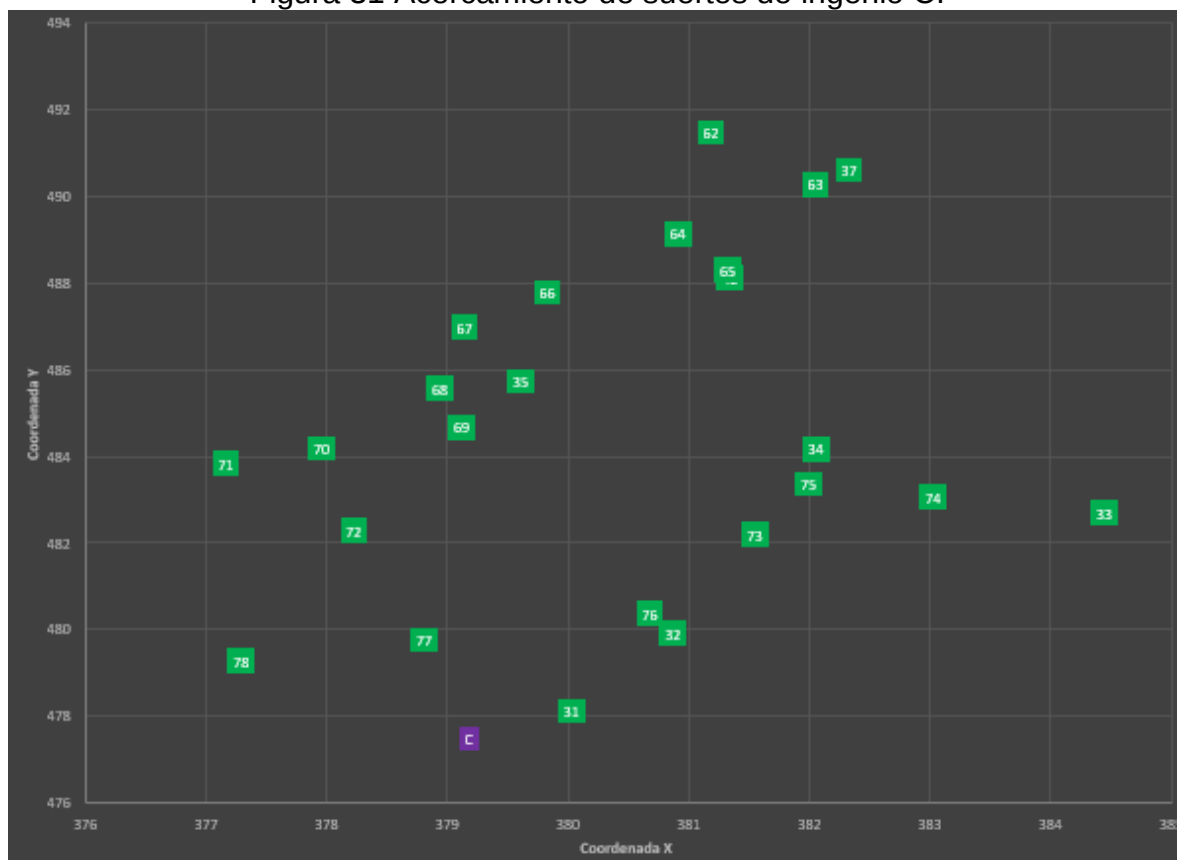
Fuente: elaboración propia

Figura 30 Suertes del ingenio C distribuidas en el espacio



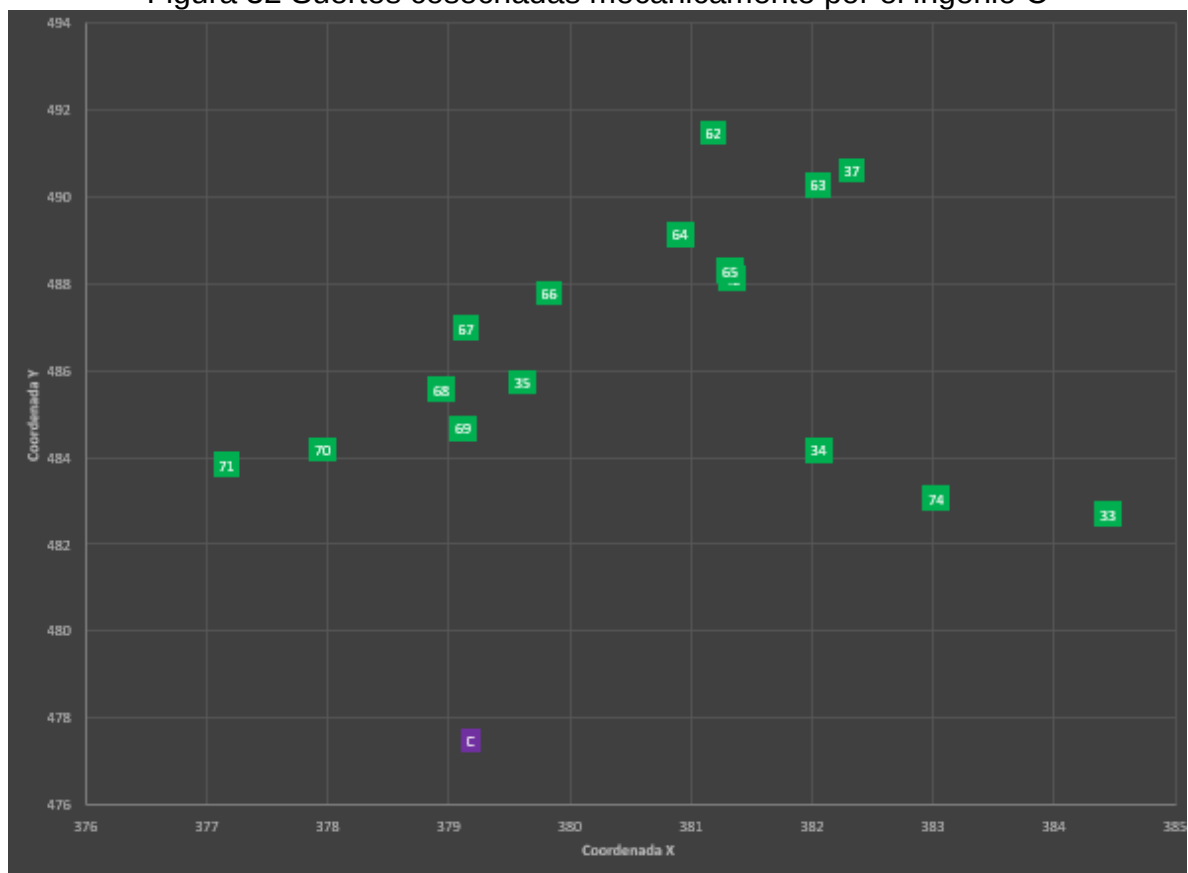
Fuente: elaboración propia

Figura 31 Acercamiento de suertes de ingenio C.



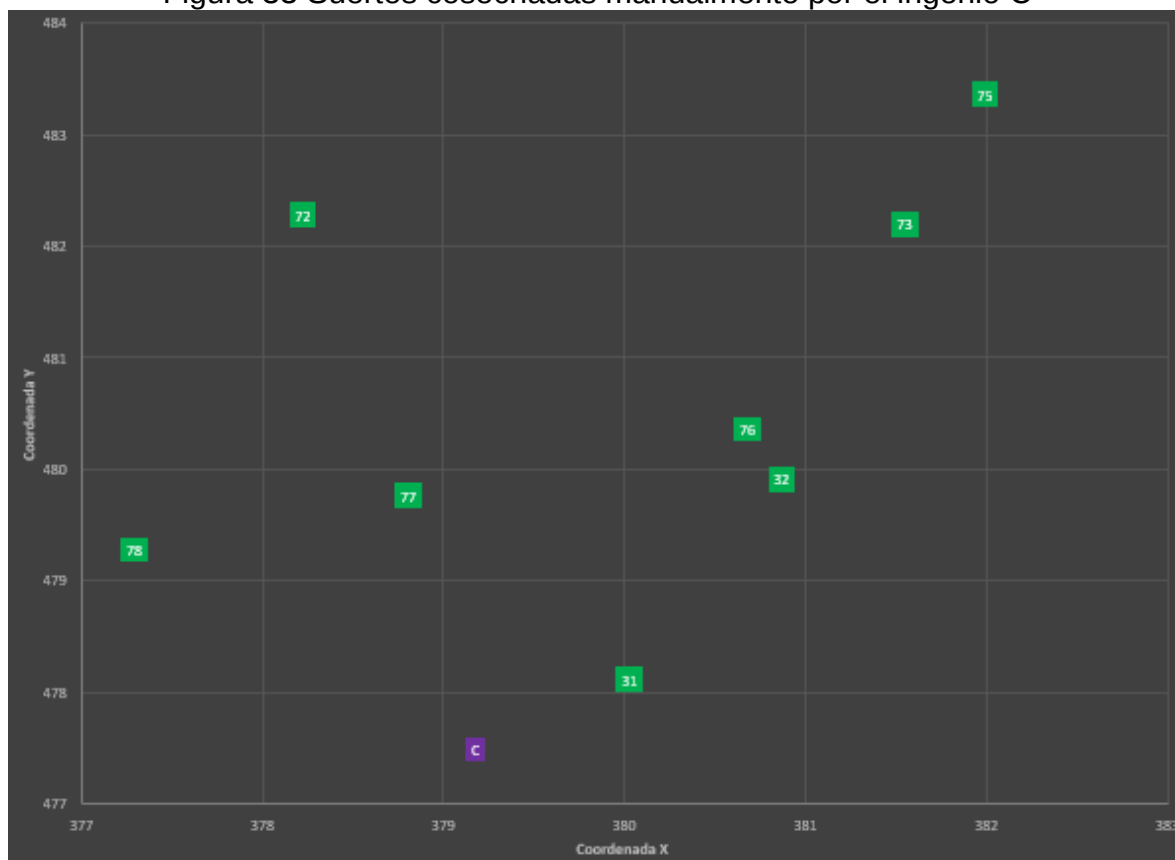
Fuente: elaboración propia

Figura 32 Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio C



Fuente: elaboración propia

Figura 33 Suertes cosechadas manualmente por el ingenio C



Fuente: elaboración propia

Solución Ingenio D

Para la última asignación de suertes, que serán del único ingenio faltante, el modelo trabaja sobre las mismas restricciones y parámetros incluidos en el; otorgando así la cantidad en toneladas de caña para el ingenio D y encaminado a la determinación del frente de alce con menor costo relacionado. Los resultados de esta asignación se presentan en la Tabla 24

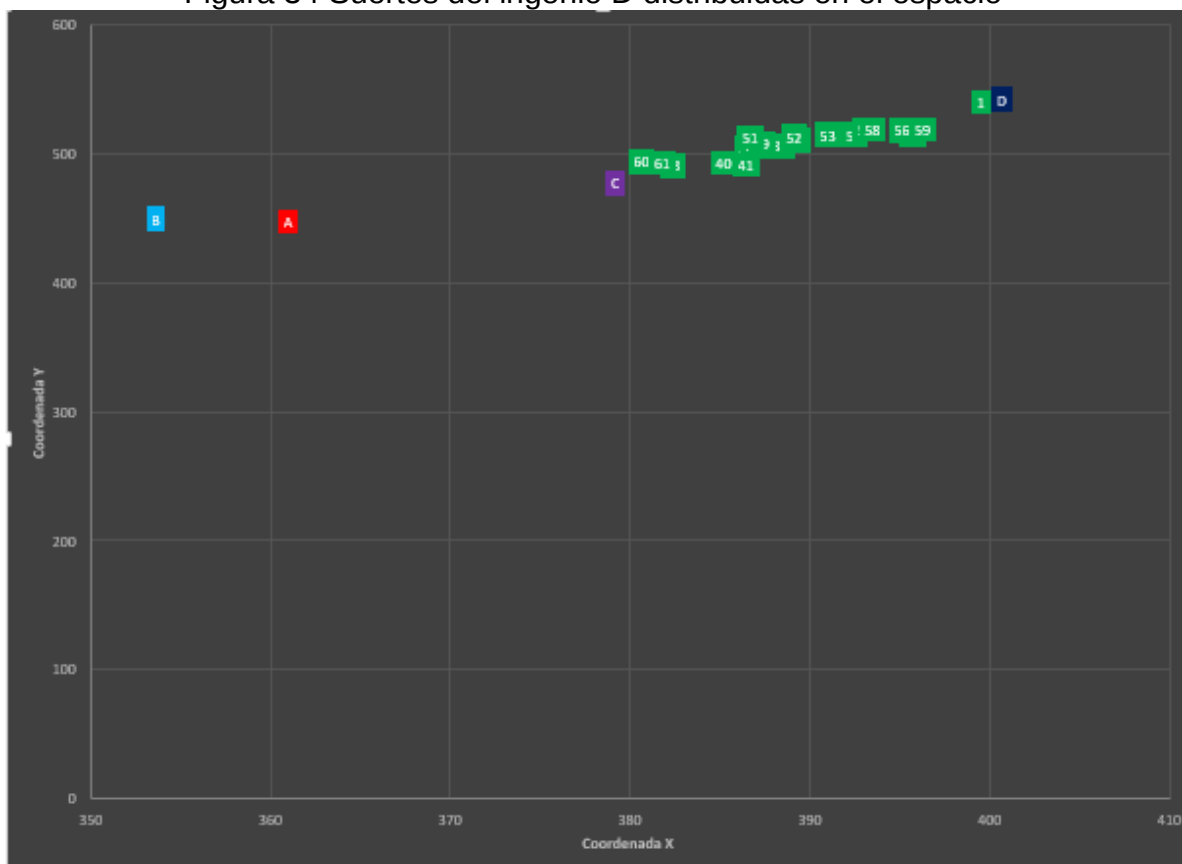
Tabla 24 Asignación de suertes al ingenio D.

suerte	1	2	3	4	5	6
1						1
38	1					
39				1		
40	1					
41			1			

43	1					
44		1				
45			1			
46		1				
47				1		
48			1			
49				1		
50			1			
51		1				
52		1				
53						1
54						1
55					1	
56						1
57					1	
58					1	
59					1	
60				1		
61	1					

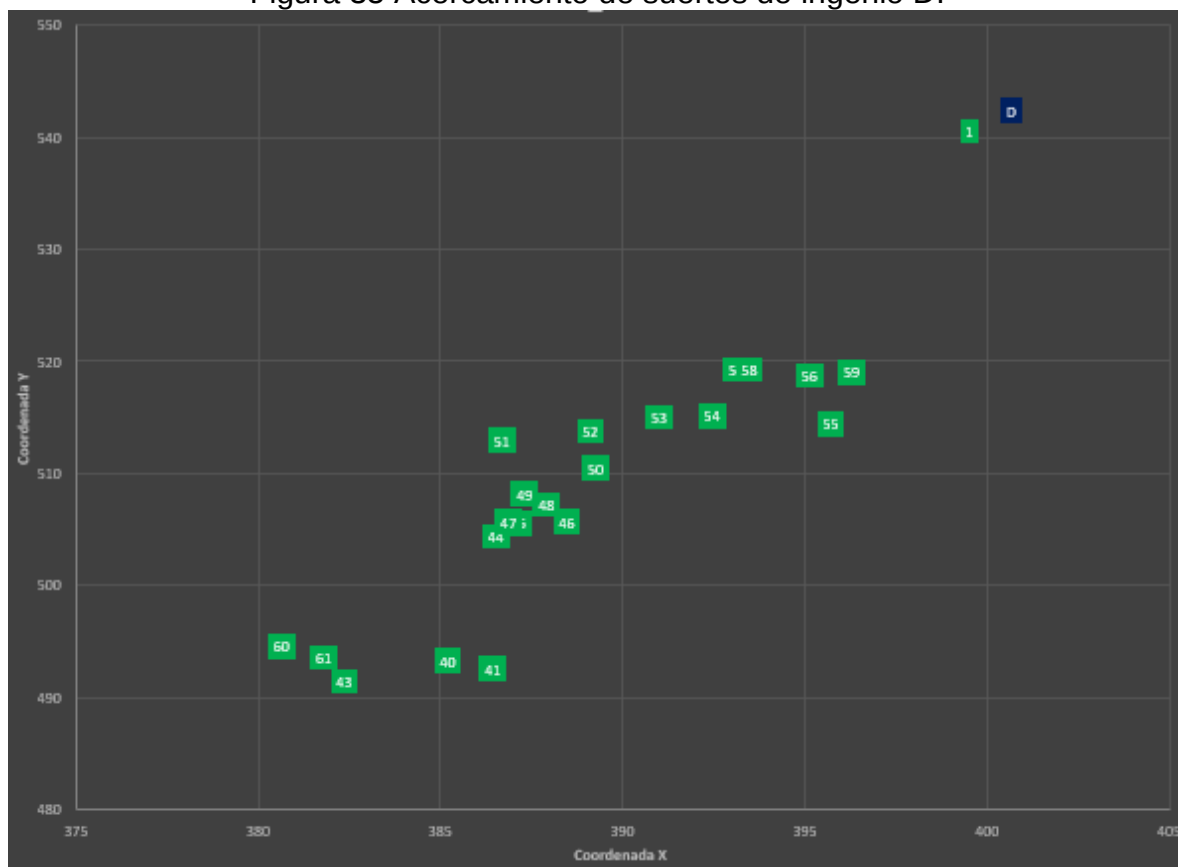
Fuente: elaboración propia

Figura 34 Suertes del ingenio D distribuidas en el espacio



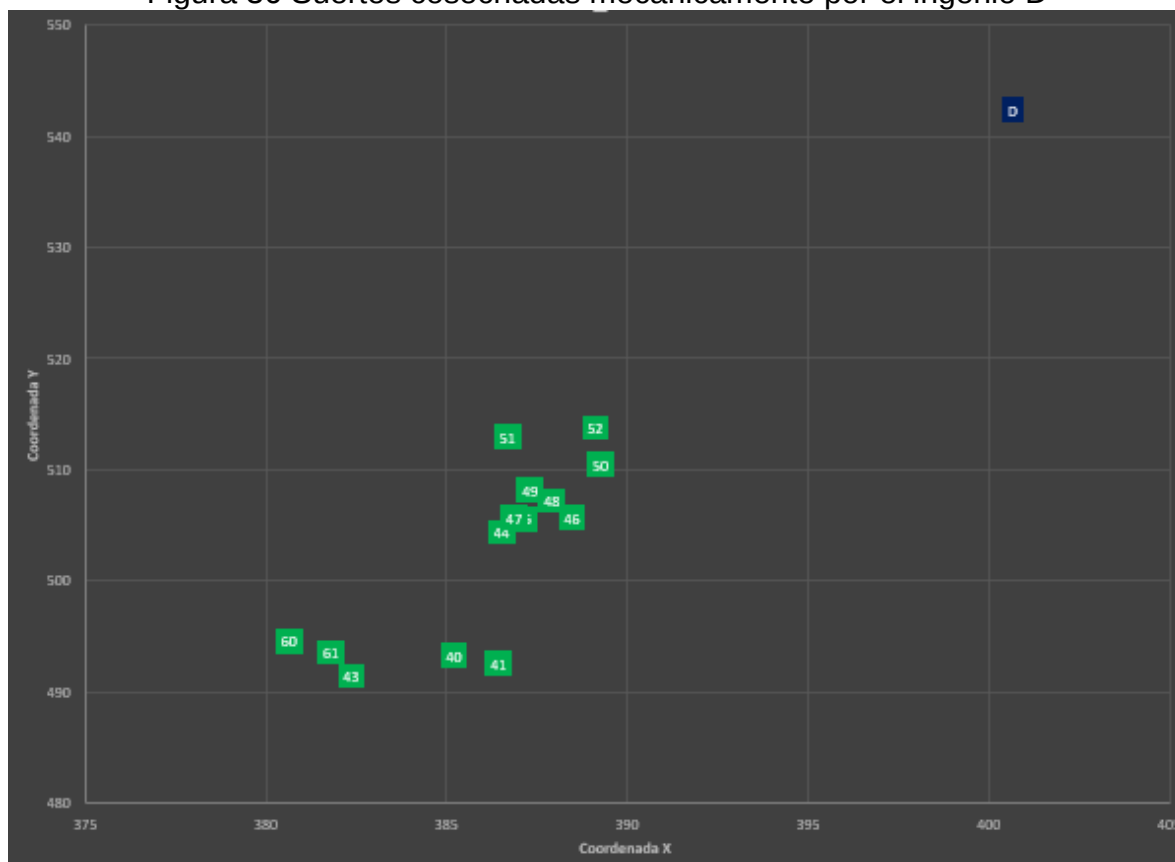
Elaboración propia

Figura 35 Acercamiento de suertes de ingenio D.



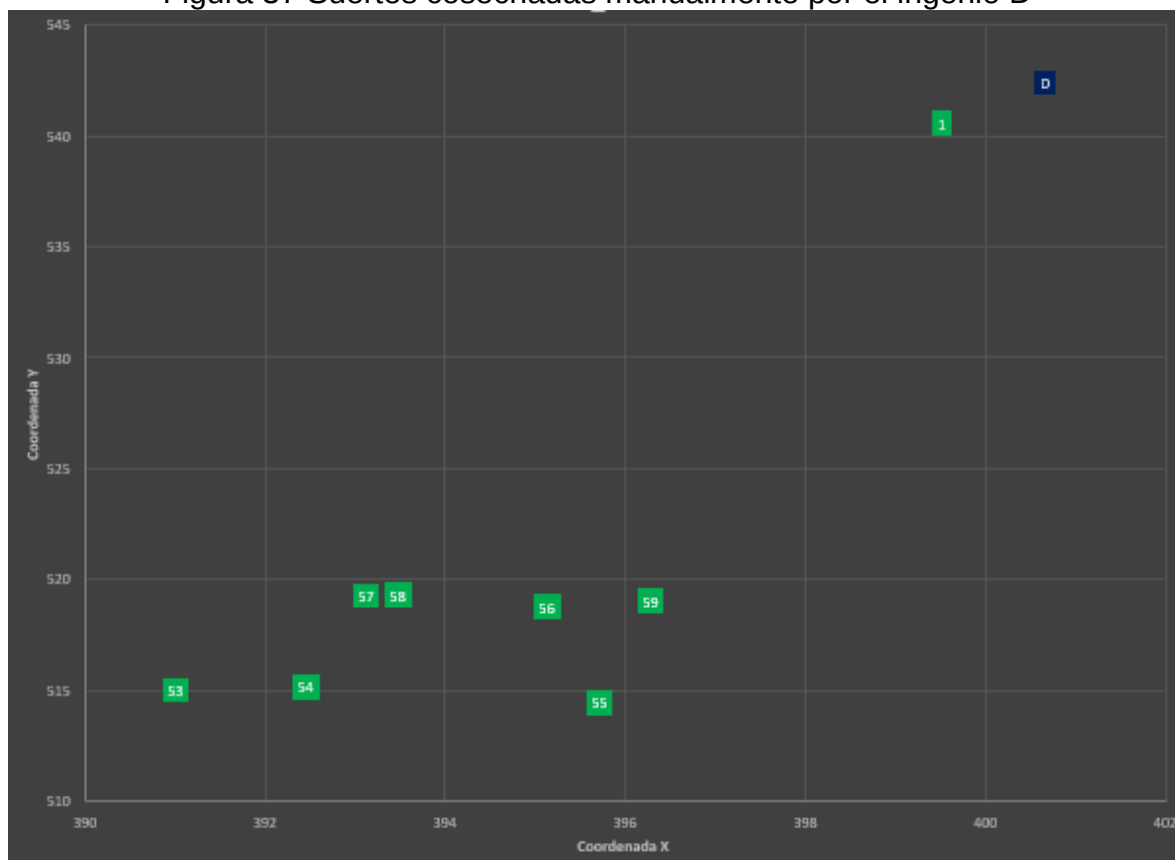
Fuente: elaboración propia

Figura 36 Suertes cosechadas mecánicamente por el ingenio D



Fuente: elaboración propia

Figura 37 Suertes cosechadas manualmente por el ingenio D



Fuente: elaboración propia

ANEXO 5: SOLUCION MODELO RUTEO (TSP + MTZ)

Solución Ingenio B

Tabla 25 ruteos para el ingenio B

X1		X2		X3		X4		X5		X6	
i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j
1	4	1	4	1	2	1	2	1	3	1	3
2	3	2	3	2	3	2	3	2	1	2	5
3	5	3	1	3	4	3	4	3	5	3	4
4	2	4	5	4	5	4	5	4	2	4	2
5	1	5	2	5	1	5	1	5	4	5	1

Fuente: elaboración propia

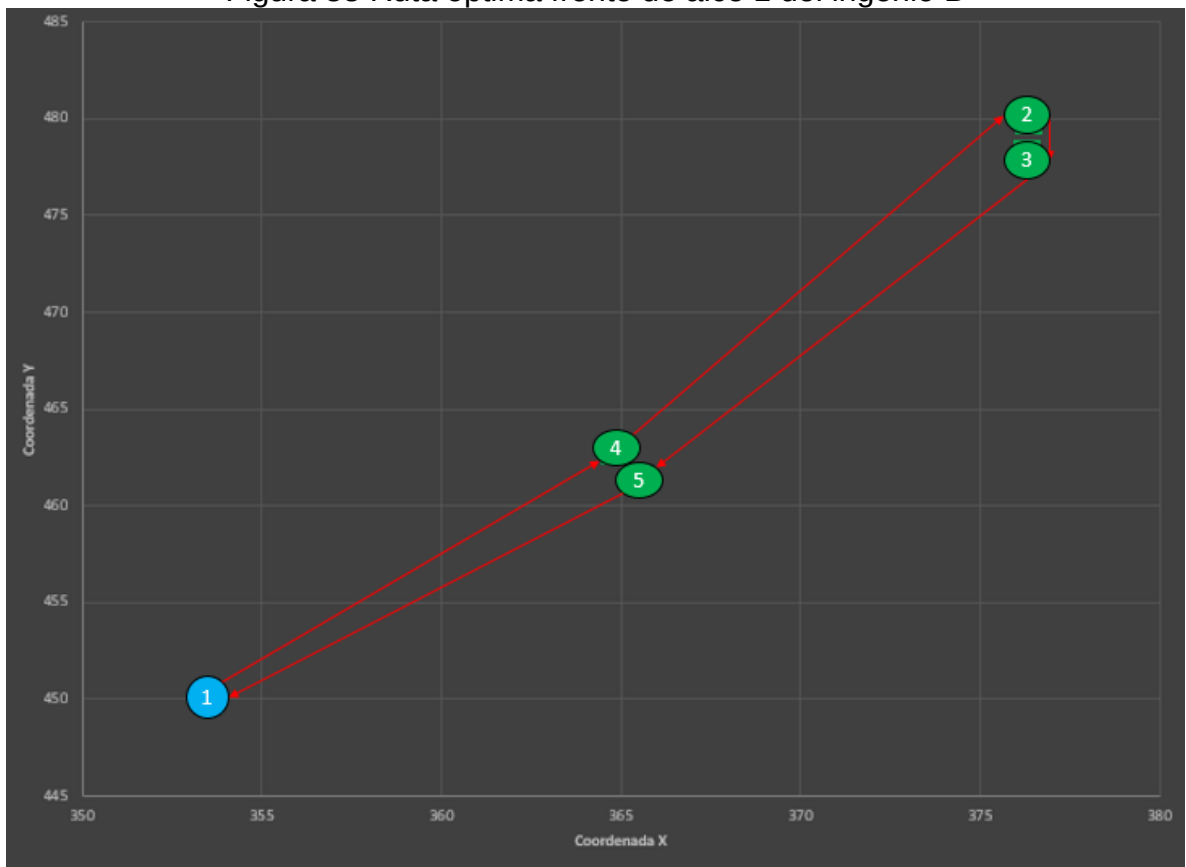
Frente de alce 1:

Tabla 26 Nodos frente de alce 1 ingenio B

NODO	SUERTE
1	B
2	79
3	80
4	90
5	91

Fuente: elaboración propia

Figura 38 Ruta optima frente de alce 1 del ingenio B



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 1 del ingenio B (1-4-2-3-5-1).

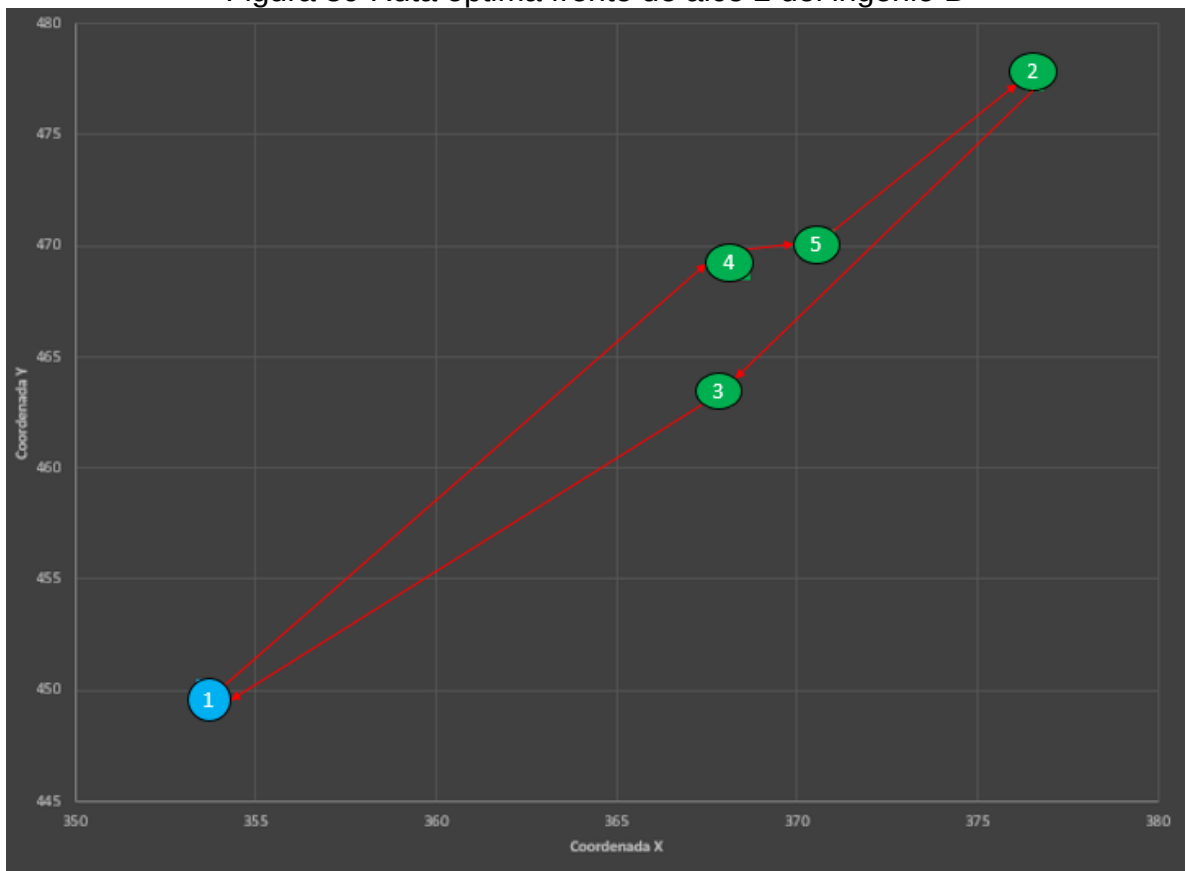
Frente de alce 2:

Tabla 27 Nodos frente de alce 2 ingenio B

NODO	SUERTE
1	B
2	2
3	26
4	27
5	86

Fuente: elaboración propia

Figura 39 Ruta optima frente de alce 2 del ingenio B



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 2 del ingenio B (1-4-5-2-3-1).

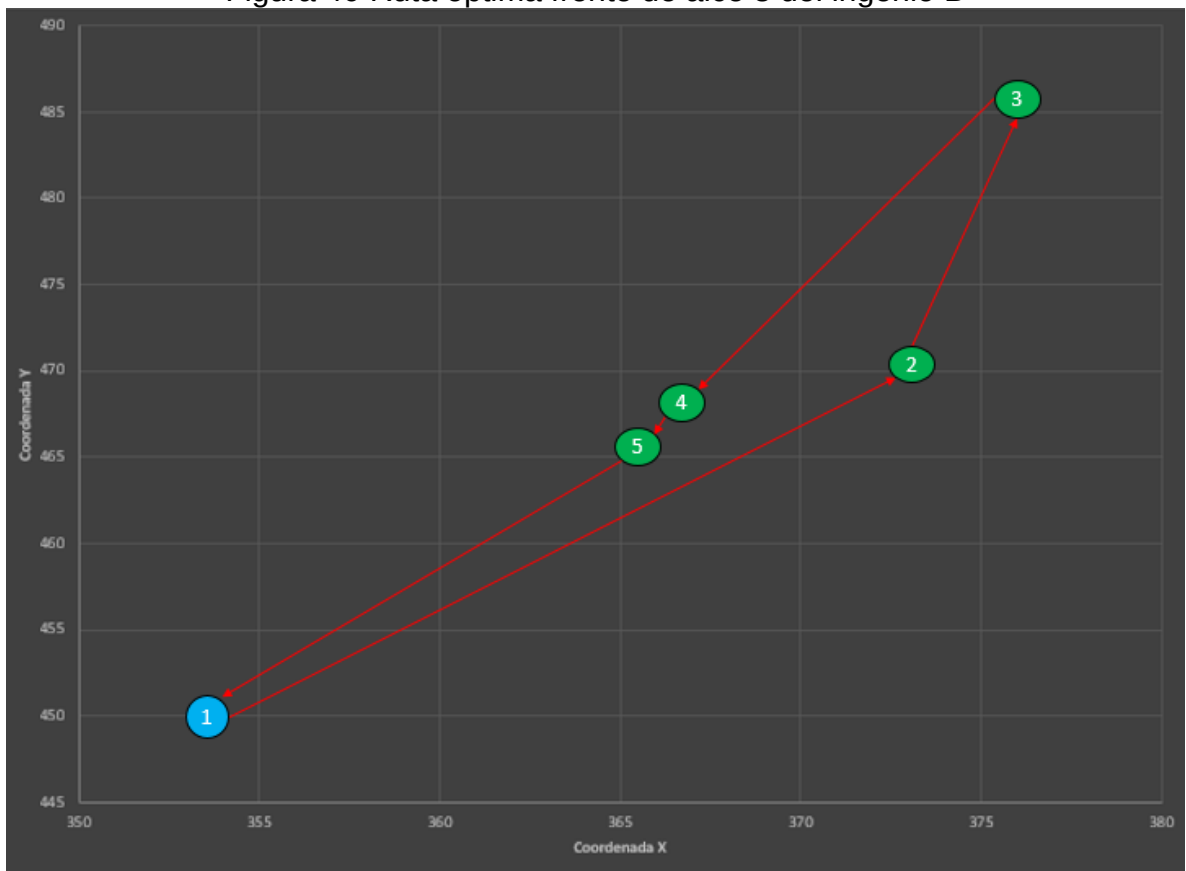
Frente de alce 3:

Tabla 28 Nodos frente de alce 3 ingenio B

NODO	SUERTE
1	B
2	28
3	36
4	88
5	89

Fuente: elaboración propia

Figura 40 Ruta optima frente de alce 3 del ingenio B



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 3 del ingenio B (1-2-3-4-5-1).

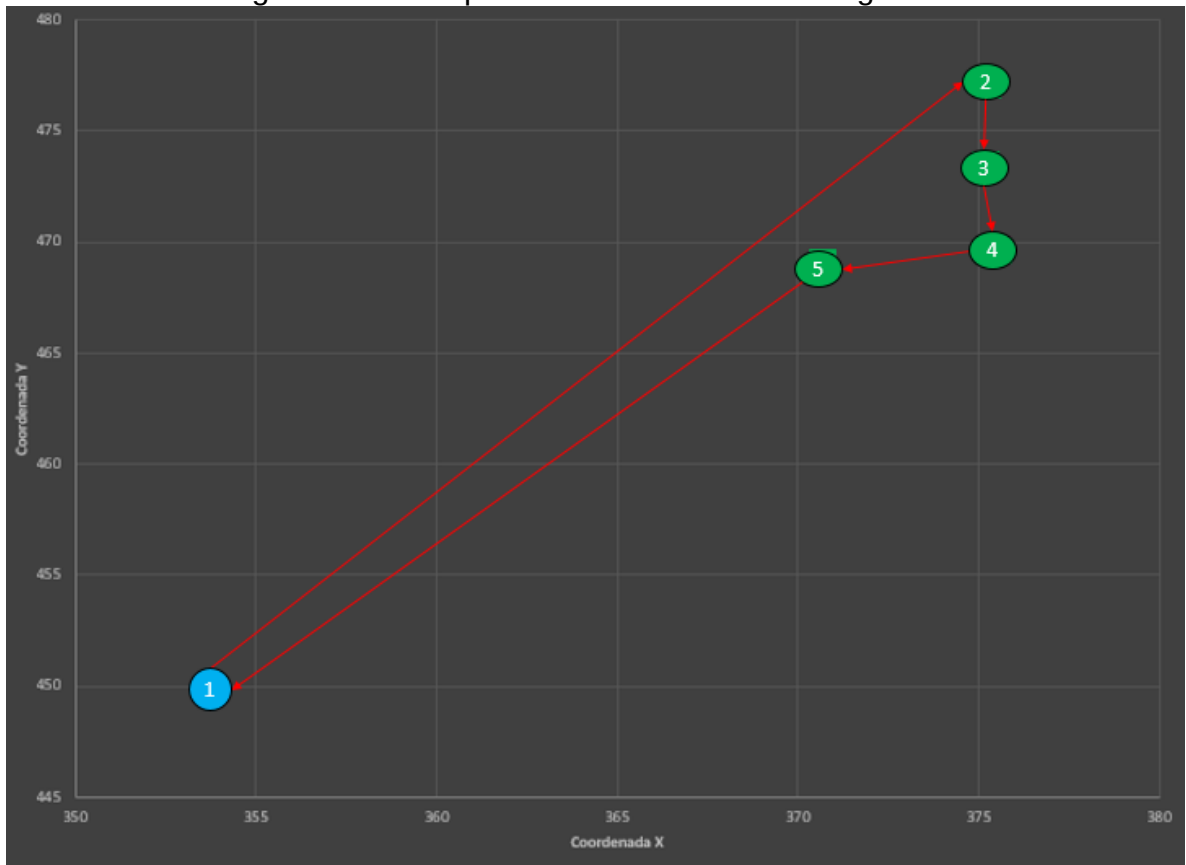
Frente de alce 4:

Tabla 29 Nodos frente de alce 4 ingenio B

NODO	SUERTE
1	B
2	81
3	82
4	83
5	87

Fuente elaboración propia

Figura 41 Ruta optima frente de alce 4 del ingenio B



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 4 del ingenio B (1-2-3-4-5-1).

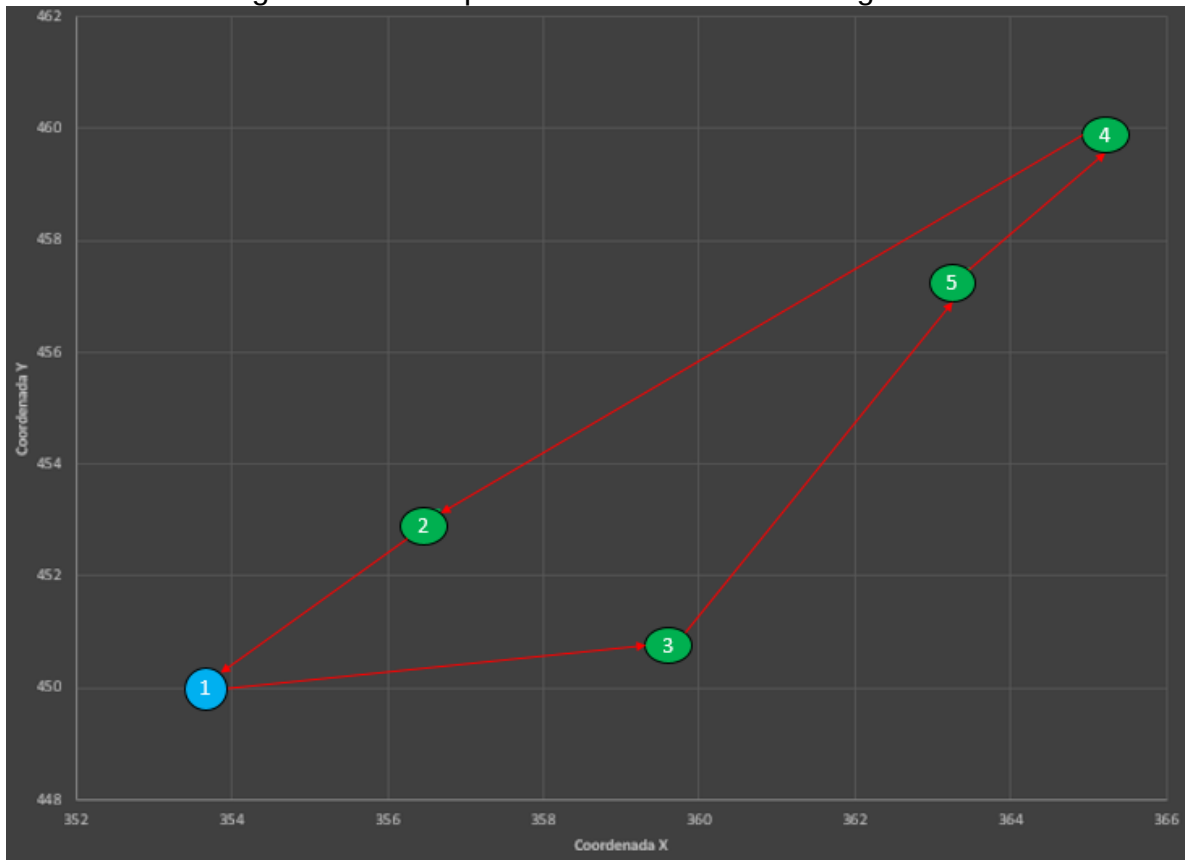
Frente de alce 5:

Tabla 30 Nodos frente de alce 5 ingenio B

NODO	SUERTE
1	B
2	10
3	18
4	93
5	96

Fuente: elaboración propia

Figura 42 Ruta optima frente de alce 5 del ingenio B



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 5 del ingenio B (1-3-5-4-2-1).

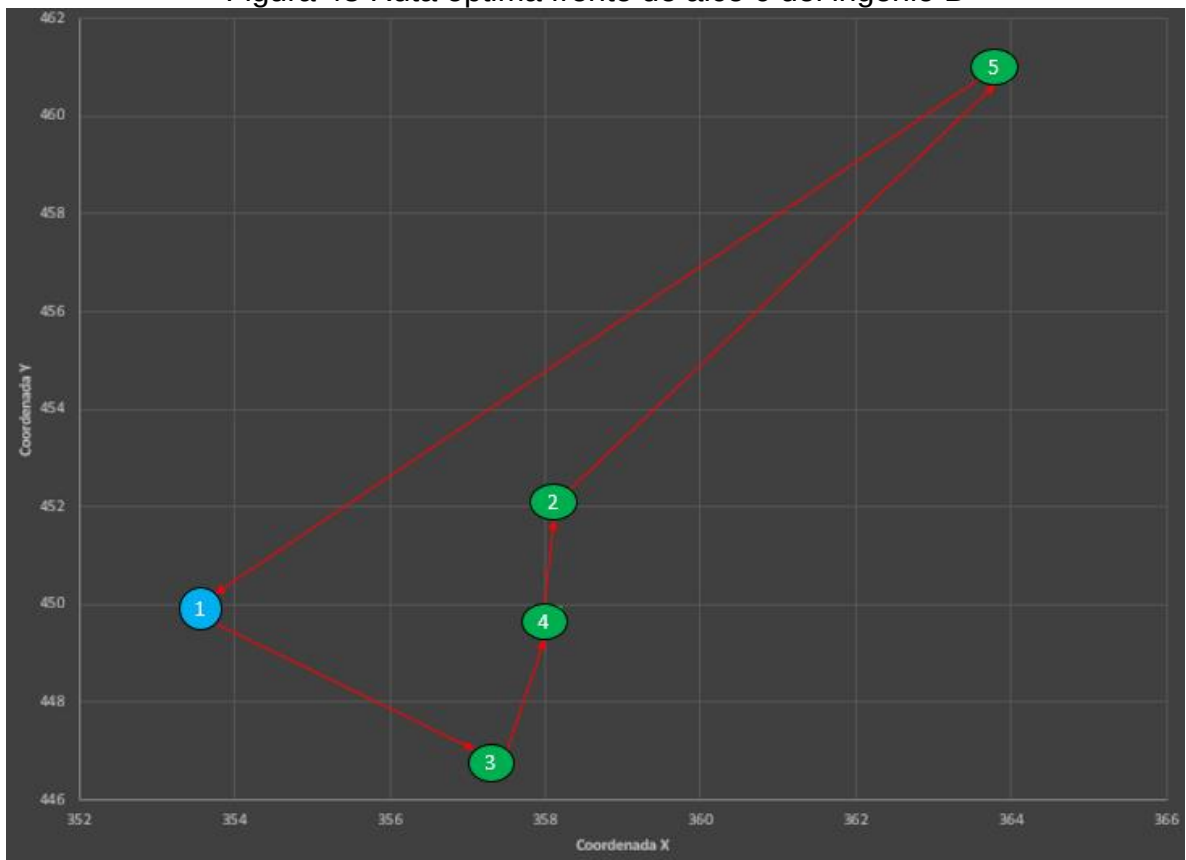
Frente de alce 6:

Tabla 31 Nodos frente de alce 6 ingenio B

NODO	SUERTE
1	B
2	11
3	15
4	17
5	92

Fuente: elaboración propia

Figura 43 Ruta optima frente de alce 6 del ingenio B



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 6 del ingenio B (1-3-4-2-5-1).

Solución Ingenio C

Tabla 32 ruteos para el ingenio C

X1		X2		X3		X4		X5		X6	
i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j
1	3	1	2	1	4	1	2	1	2	1	5
2	4	2	3	2	1	2	4	2	3	2	1
3	2	3	4	3	5	3	5	3	4	3	4
4	5	4	5	4	3	4	3	4	5	4	2
5	1	5	1	5	2	5	1	5	1	5	3

Fuente: elaboración propia

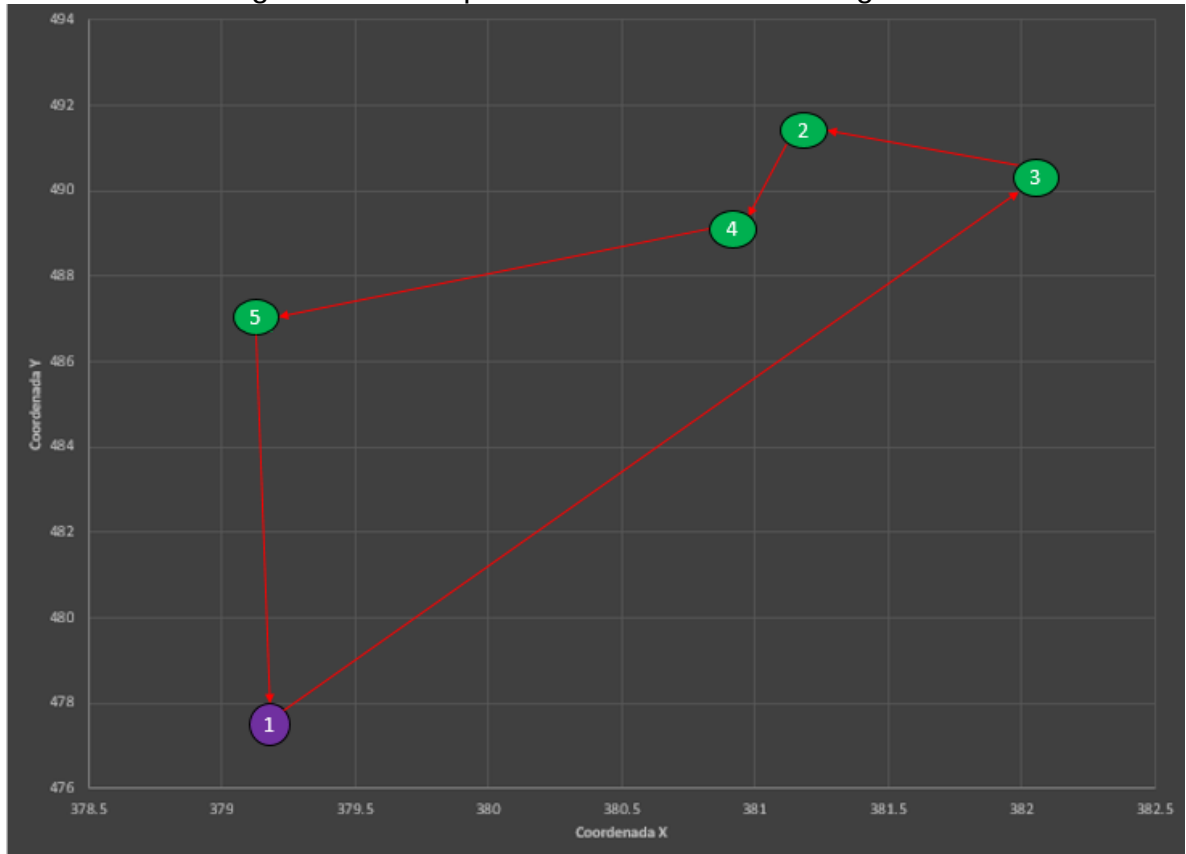
Frente de alce 1:

Tabla 33 Nodos frente de alce 1 ingenio C

NODO	SUERTE
1	C
2	62
3	63
4	64
5	67

Fuente: elaboración propia

Figura 44 Ruta optima frente de alce 1 del ingenio C



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 1 del ingenio C (1-3-2-4-5-1).

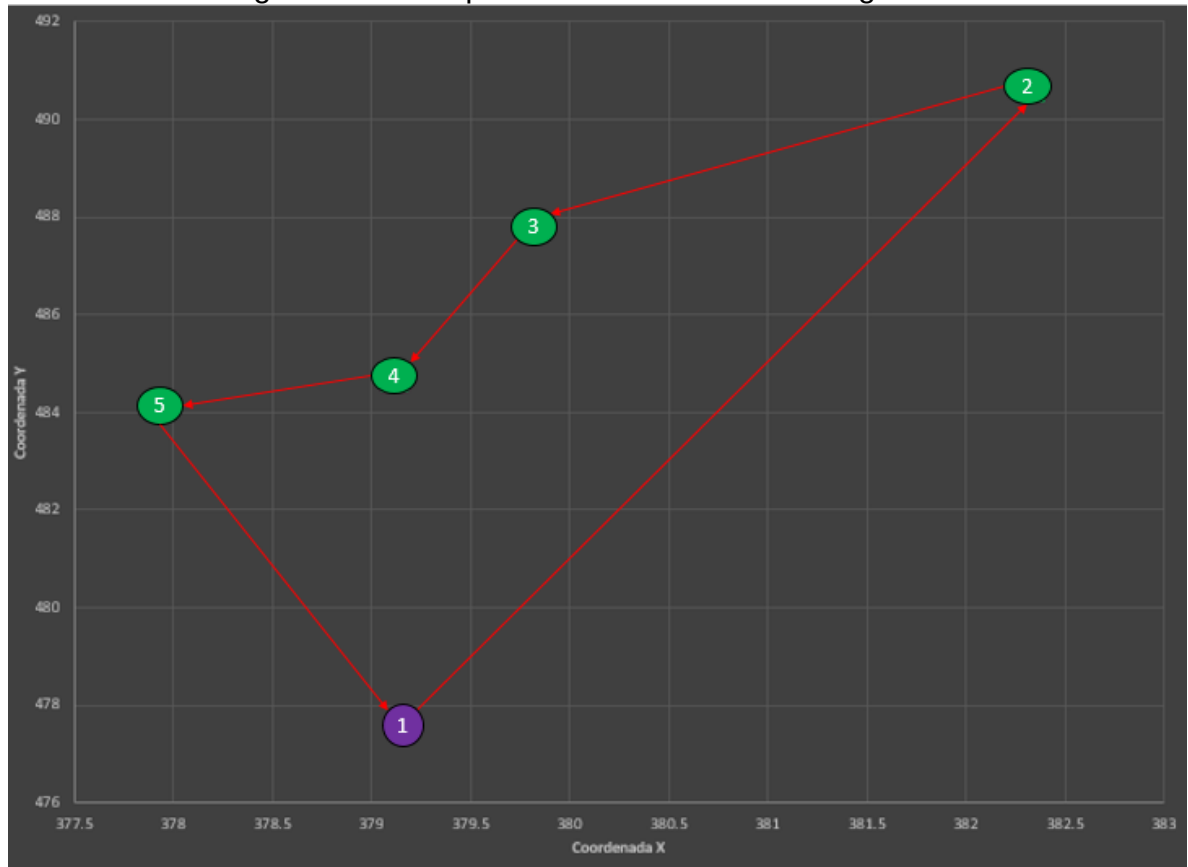
Frente de alce 2:

Tabla 34 Nodos frente de alce 2 ingenio C

NODO	SUERTE
1	C
2	37
3	66
4	69
5	70

Fuente: elaboración propia

Figura 45 Ruta optima frente de alce 2 del ingenio C



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 2 del ingenio C (1-2-3-4-5-1).

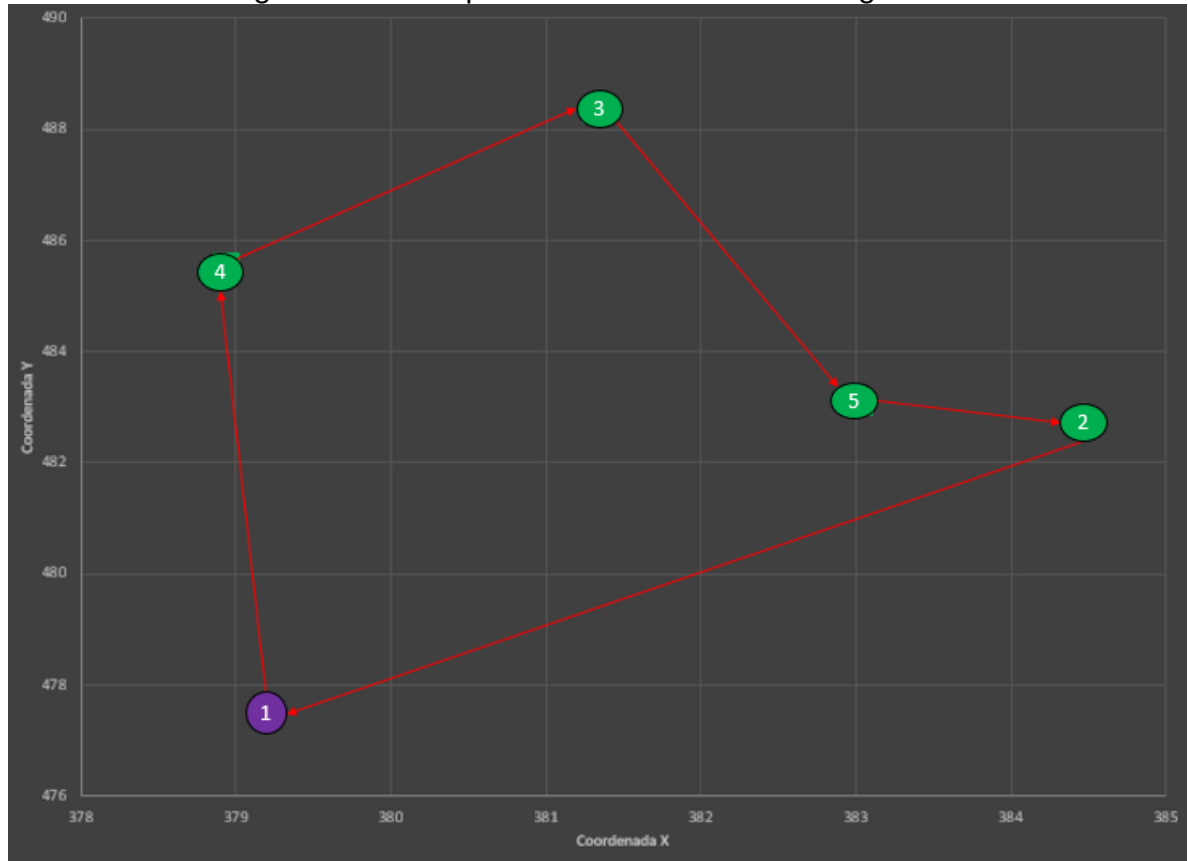
Frente de alce 3:

Tabla 35 Nodos frente de alce 3 ingenio C

NODO	SUERTE
1	C
2	33
3	65
4	68
5	74

Fuente: elaboración propia

Figura 46 Ruta optima frente de alce 3 del ingenio C



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 3 del ingenio C (1-4-3-5-2-1).

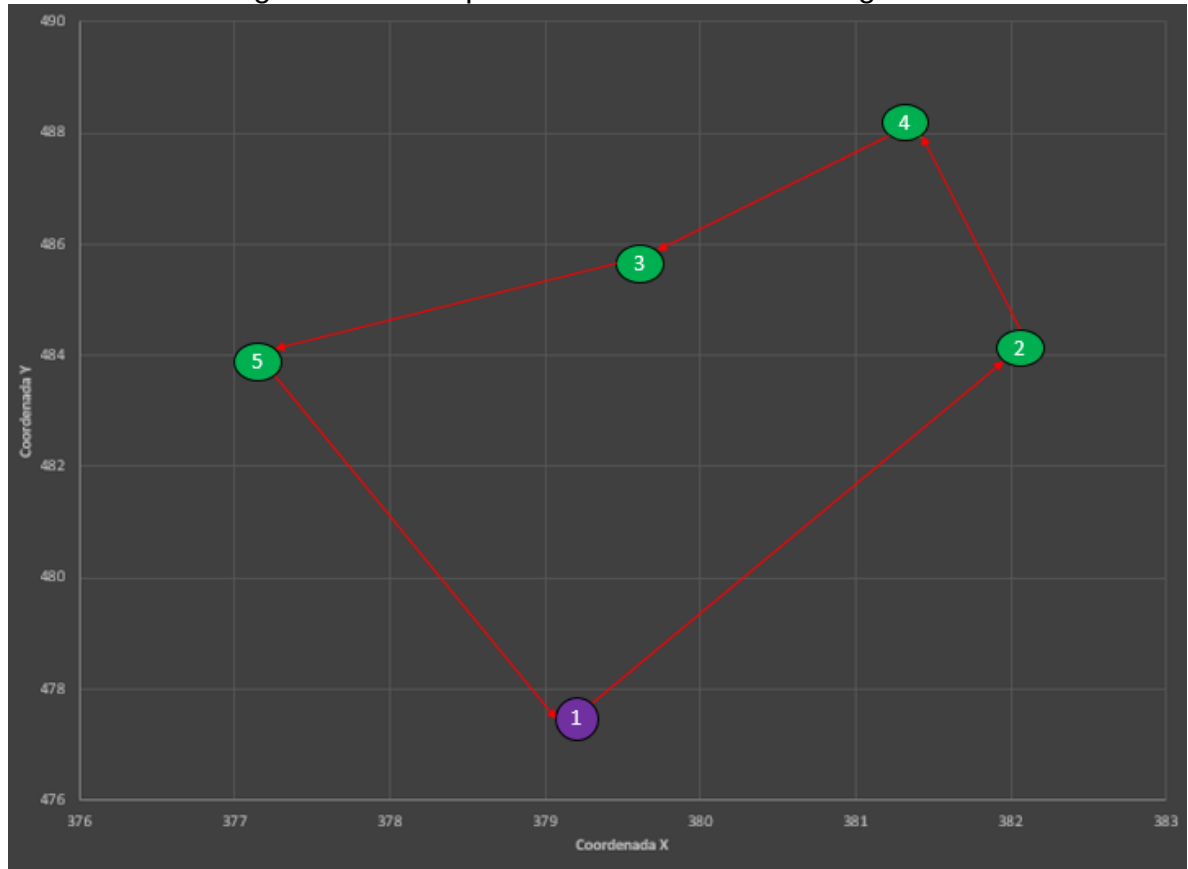
Frente de alce 4:

Tabla 36 Nodos frente de alce 4 ingenio C

NODO	SUERTE
1	C
2	34
3	35
4	42
5	71

Fuente: elaboración propia

Figura 47 Ruta optima frente de alce 4 del ingenio C



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 4 del ingenio C (1-2-4-3-5-1).

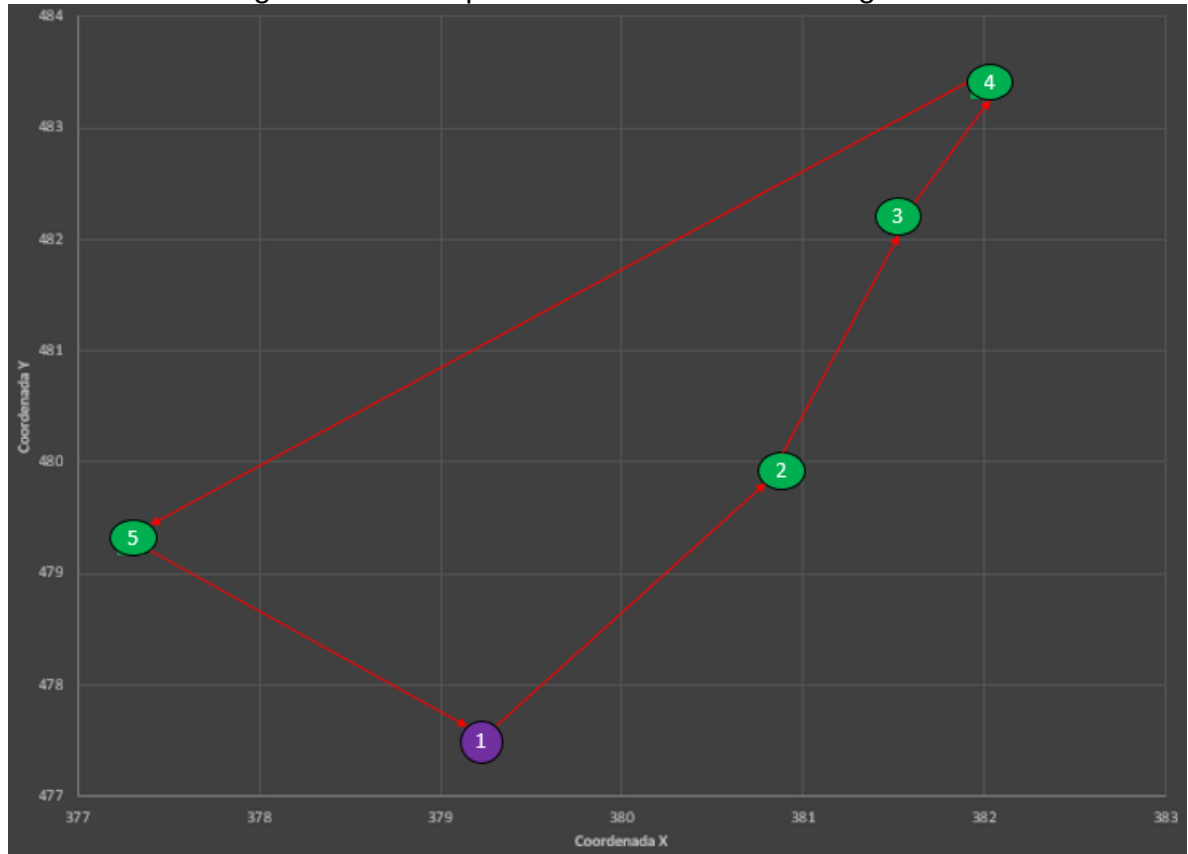
Frente de alce 5:

Tabla 37 Nodos frente de alce 5 ingenio C

NODO	SUERTE
1	C
2	32
3	73
4	75
5	78

Fuente: elaboración propia

Figura 48 Ruta optima frente de alce 5 del ingenio C



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 5 del ingenio C (1-2-3-4-5-1).

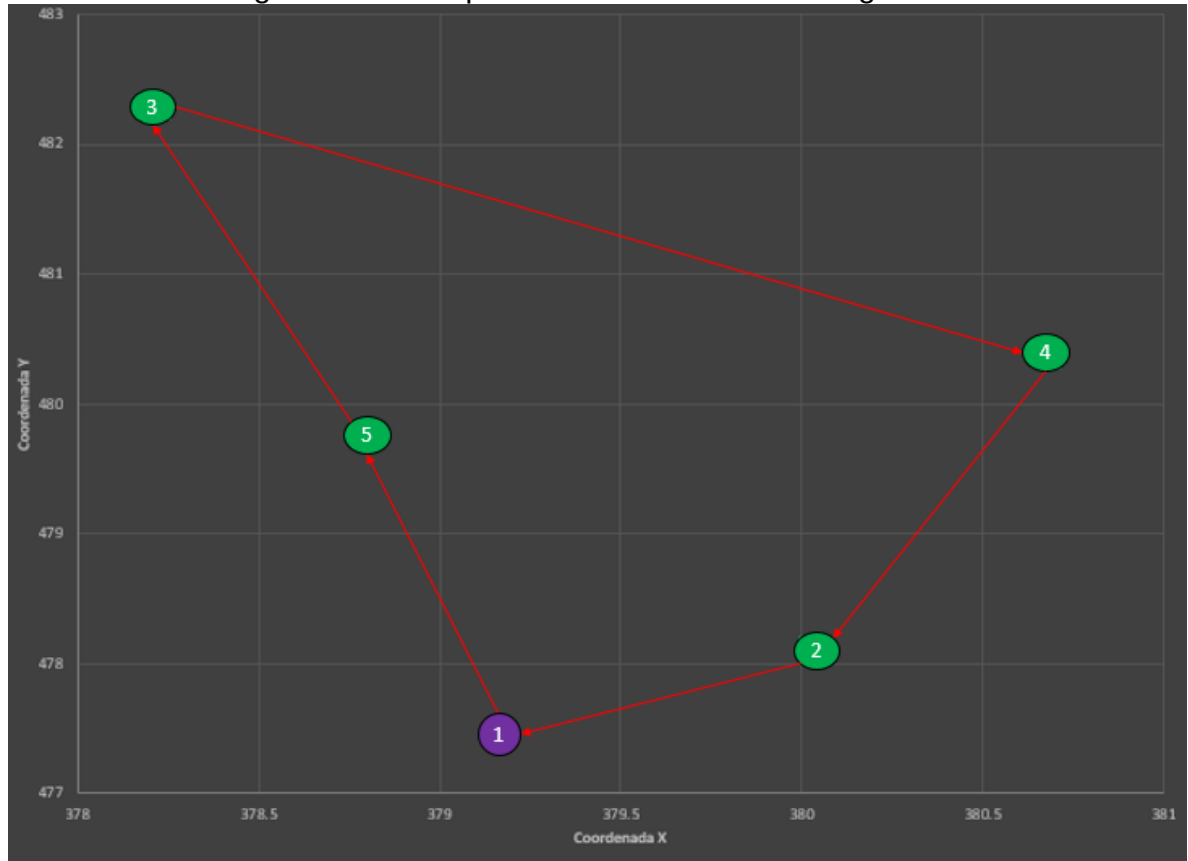
Frente de alce 6:

Tabla 38 Nodos frente de alce 6 ingenio C

NODO	SUERTE
1	C
2	31
3	72
4	76
5	77

Fuente: elaboración propia

Figura 49 Ruta optima frente de alce 6 del ingenio C



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 1 del ingenio C (1-5-3-4-2-1).

Solución Ingenio D

Tabla 39 Ruteos para el ingenio D

X1		X2		X3		X4		X5		X6	
i	j	i	j	i	j	i	j	i	j	i	j
1	2	1	5	1	2	1	2	1	4	1	5
2	5	2	4	2	3	2	5	2	5	2	1
3	1	3	2	3	4	3	4	3	2	3	2
4	3	4	1	4	5	4	1	4	3	4	3
5	4	5	3	5	1	5	3	5	1	5	4

Fuente: elaboración propia

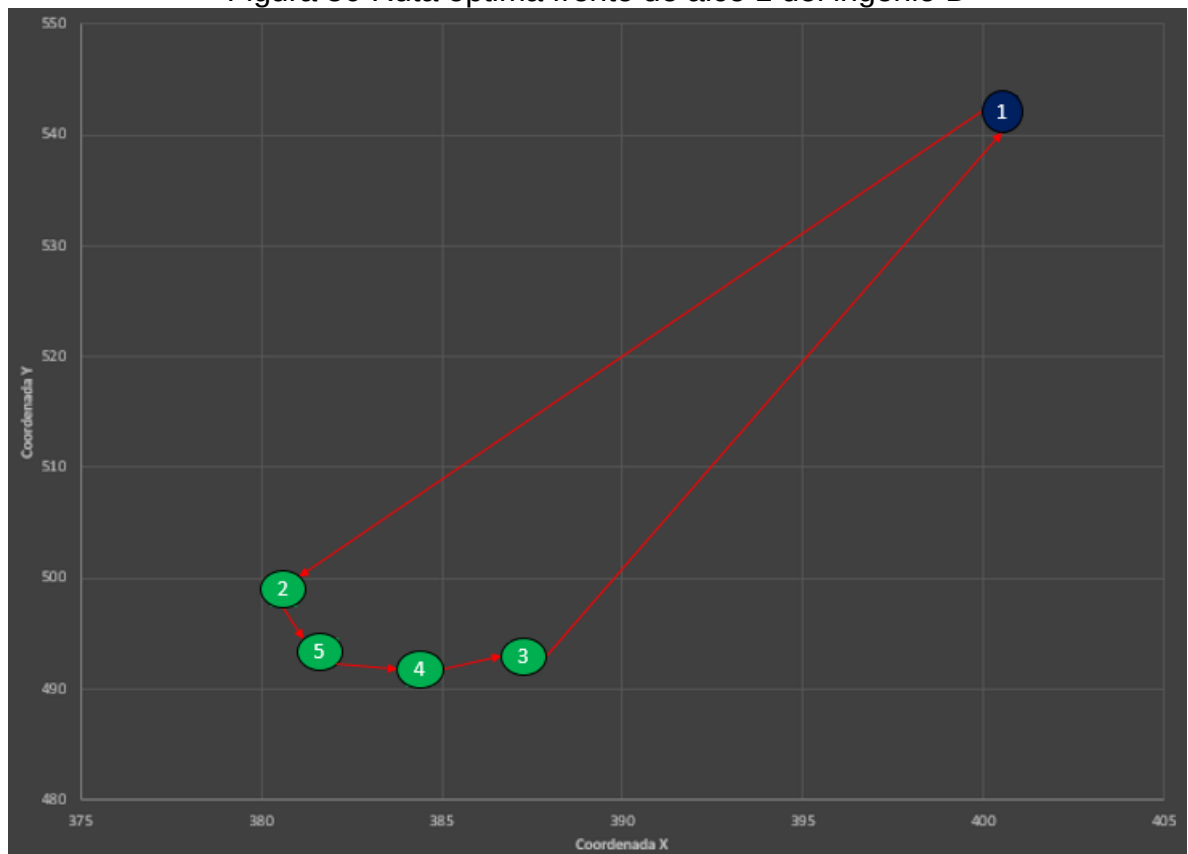
Frente de alce 1:

Tabla 40 Nodos frente de alce 1 ingenio D

NODO	SUERTE
1	D
2	38
3	40
4	43
5	61

Fuente: elaboración propia

Figura 50 Ruta optima frente de alce 1 del ingenio D



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 1 del ingenio D (1-2-5-4-3-1).

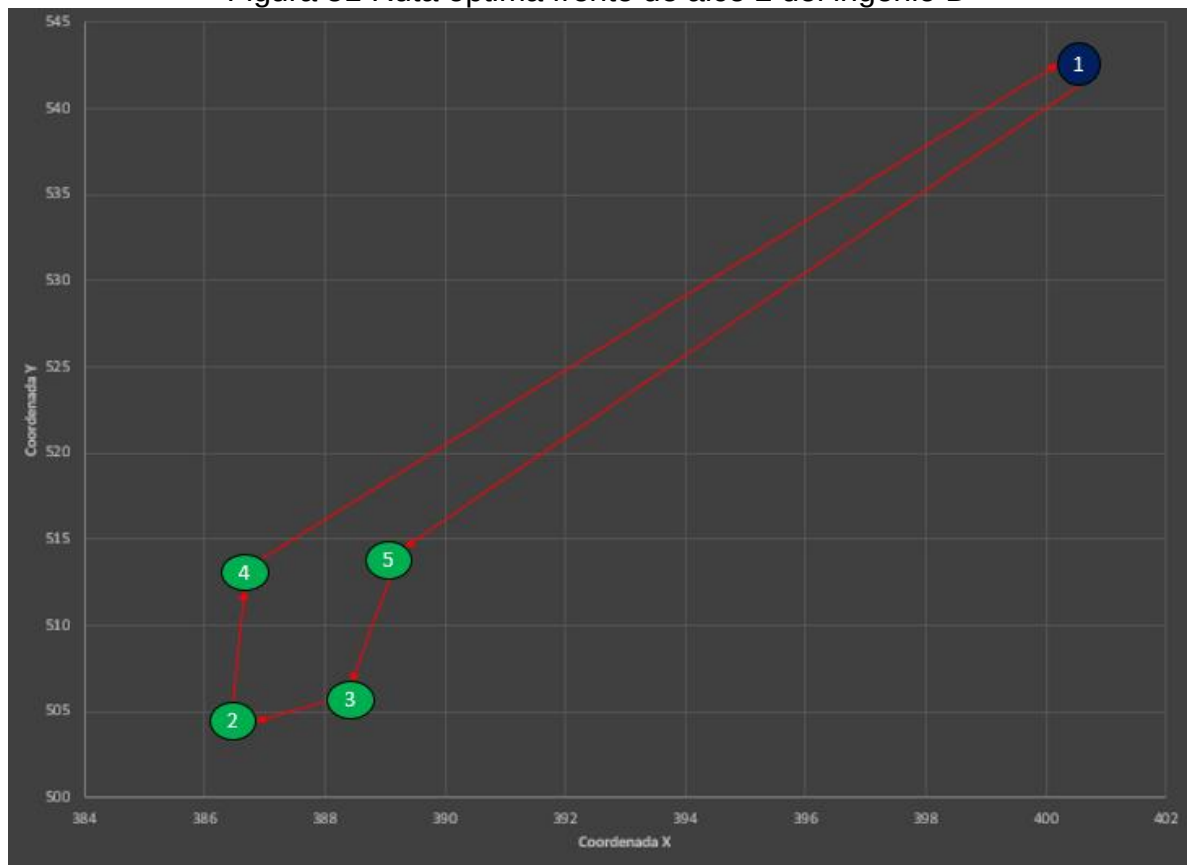
Frente de alce 2:

Tabla 41 Nodos frente de alce 2 ingenio D

NODO	SUERTE
1	D
2	44
3	46
4	51
5	52

Fuente: elaboración propia

Figura 51 Ruta optima frente de alce 2 del ingenio D



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 2 del ingenio D (1-5-3-2-4-1).

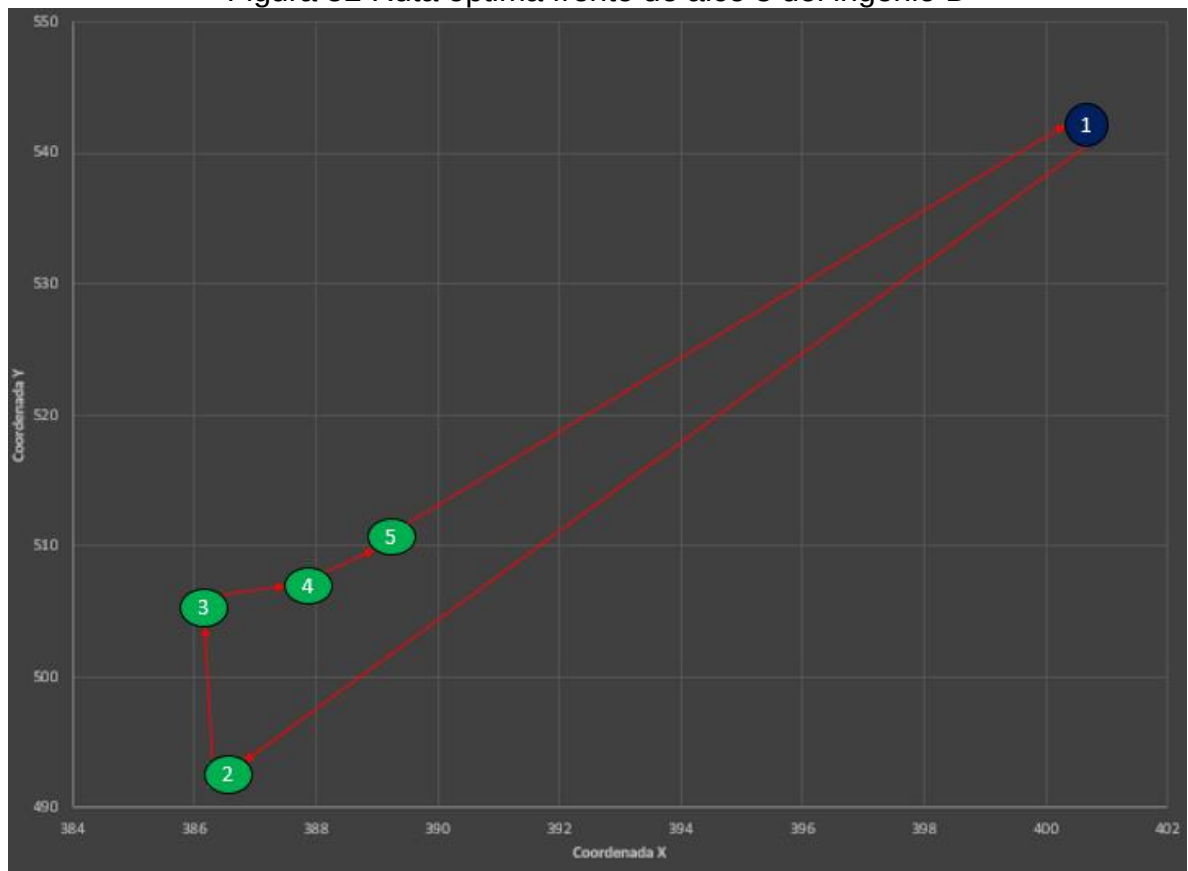
Frente de alce 3:

Tabla 42 Nodos frente de alce 3 ingenio D

NODO	SUERTE
1	D
2	41
3	45
4	48
5	50

Fuente: elaboración propia

Figura 52 Ruta optima frente de alce 3 del ingenio D



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 3 del ingenio D (1-2-3-4-5-1).

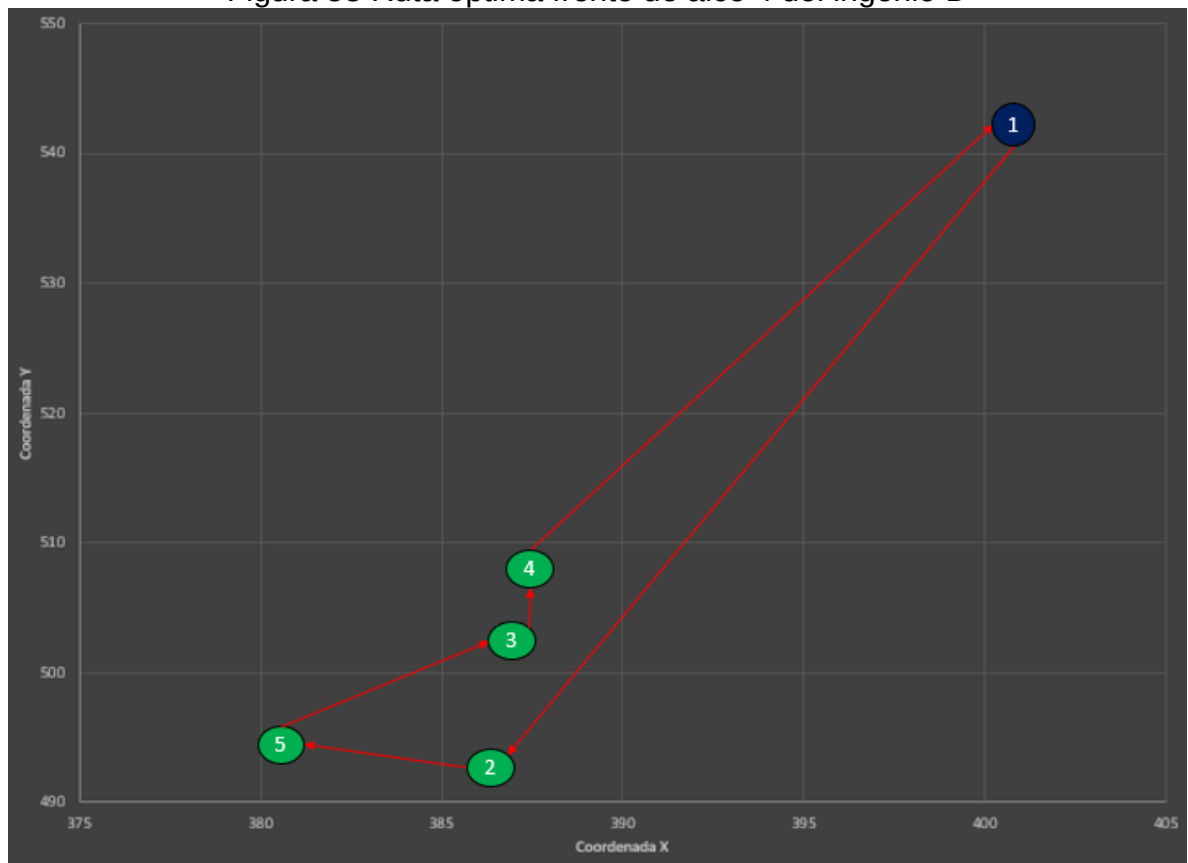
Frente de alce 4:

Tabla 43 Nodos frente de alce 4 ingenio D

NODO	SUERTE
1	D
2	39
3	47
4	49
5	60

Fuente: elaboración propia

Figura 53 Ruta optima frente de alce 4 del ingenio D



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 4 del ingenio D (1-2-5-3-4-1).

Frente de alce 5:

Tabla 44 Nodos frente de alce 5 ingenio D

NODO	SUERTE
1	D
2	55
3	57
4	58
5	59

Fuente: elaboración propia

Figura 54 Ruta optima frente de alce 5 del ingenio D



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 5 del ingenio D (1-4-3-2-5-1).

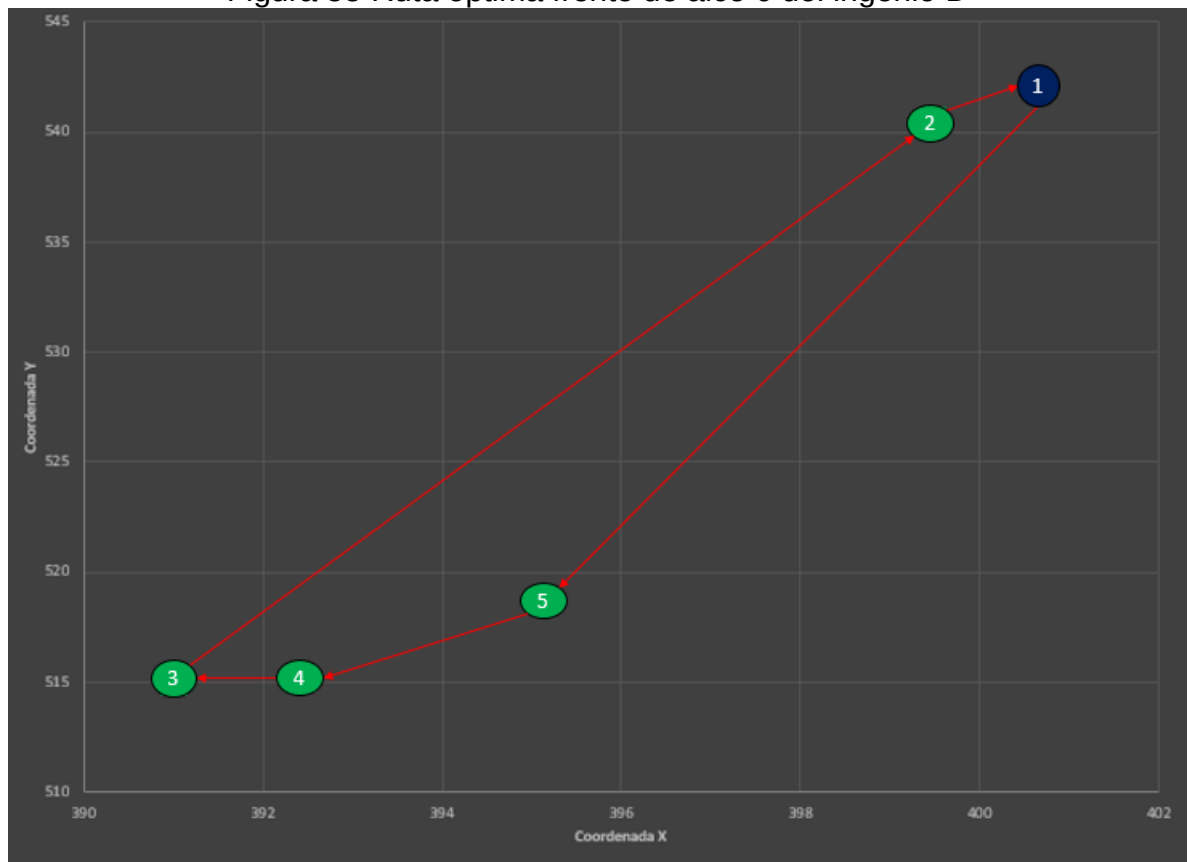
Frente de alce 6:

Tabla 45 Nodos frente de alce 6 ingenio D

NODO	SUERTE
1	D
2	1
3	53
4	54
5	56

Fuente: elaboración propia

Figura 55 Ruta optima frente de alce 6 del ingenio D



Fuente: elaboración propia

Secuencia optima a seguir por el frente de alce 6 del ingenio D (1-5-4-3-2-1).