

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Implementación de un modelo de asignación de flota maximizando la rentabilidad
en operaciones de transporte de bebidas

INGE-2939

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Industrial

Presentado por:

Luis Fernando Medina

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A las personas más importantes en mi vida, que me han empujado hacia adelante en distintas etapas de mi vida universitaria. Apoyándome incluso cuando he sido malagradecido. Este logro también pertenece a las mujeres que me han dado todo, María Dolores Medina Camacho y Ruth María Camacho Menoscal; a la única que he amado, Giulianna Natalia Torres Campodónico; y a una de las pocas amistades en las que confío plenamente, Karelys Abigail Farfán Vera.

Luis Fernando Medina

Agradecimientos

A Marlon Alejandro Pacheco Chica, Esaú Iván Idrovo Suárez, Gilson Omar Reyes Balón y Erick Ronald Zuñiga Pilatasig por ser verdaderos amigos.

A la ingeniera Bárbara Jacqueline Rugel Rugel por confiar en mi cuando apenas iniciaba la carrera.

Al club IISE ESPOL por ser un espacio de convivencia y comunidad.

A la ingeniera María Isabel Alcívar García por su apoyo como consejera del club y tutora de este proyecto.

A Luis Alfredo Peralvo Aguilera por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto.

Luis Fernando Medina

Declaración Expresa

Yo Luis Fernando Medina acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 26 de mayo del 2025.


Luis Fernando Medina

Evaluadores

Sofía Anabel Lopez Iglesias, MSc.

Profesor de Materia

María Isabel Alcívar García, MSc.

Tutor de proyecto

Resumen

Una cervecera industrial requiere, en promedio, 153 viajes cada mes para abastecer las diferentes en el país; la asignación del camión es una actividad manual que requiere 5 horas a la semana. Un modelo de optimización permite reducir ese tiempo y asegura una eficiencia operativa minimizando costos y la subutilización del espacio. Para desarrollar el proyecto se aplicó QFD para transformar los comentarios de los clientes (VOC) en especificaciones de diseño, bases de datos de la empresa para la recolección de datos claves, programación lineal mixta para la formulación del modelo y el lenguaje Python con la librería PuLP para la ejecución de este. Como resultados de las pruebas piloto comparando la asignación real contra la sugerencia del modelo se obtuvo un incremento de 13% de utilización del espacio para cada pedido equivalente a \$ 1 660 de ahorro mensual; a su vez, se redujo el tiempo diario de la actividad manual de 45 a 15 minutos.

Palabras Clave: MILP, problema de asignación, transporte pesado, subutilización de peso.

Abstract

An industrial brewery requires, on average, 153 trips per month to supply the different warehouses around the country; truck allocation is a manual activity that takes up to 5 hours every week. An optimization model would allow us to reduce this time and ensure operation efficiency by minimizing costs and underutilization of space. To develop the project, QFD was applied to transform customer feedback (VOC) into design specifications, company databases were used to collect key data, mixed linear programming was applied to formulate the model, and the Python language with the PuLP library was used to execute it. As a result of pilot tests comparing actual allocation against the model's suggestion, a 13% increase in space utilization was obtained for each order, equivalent to \$ 1 660 in monthly savings; in turn, the daily time spent on the manual activity was reduced from 45 to 15 minutes.

Keywords: *MILP, assignment problem, primary transportation, truck utilization by weight.*

Índice general

Resumen	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general	III
Simbología	IV
Índice de figuras	V
Índice de tablas	V
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	2
1.3 Justificación del Problema	3
1.4 Objetivos	4
<i>1.4.1 Objetivo general</i>	4
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i>	4
1.5 Marco teórico	4
Capítulo 2	7
2.1 Metodología	8
Capítulo 3	24
3.1 Resultados y análisis	25
Capítulo 4	29
4.1 Conclusiones y recomendaciones	30
<i>4.1.1 Conclusiones</i>	30
<i>4.1.2 Recomendaciones</i>	30
Referencias	32

Simbología

HL	Hectólitro
SKU	Stock Keeping Unit
TBL	Triple Bottom Line
TON	Tonelada
USD	Dólar americano

Índice de figuras

Figura 1 <i>Diagrama de distribución</i>	8
Figura 2 <i>Tablero de operaciones T1</i>	9
Figura 3 <i>Mapa de actores de transporte primario</i>	10
Figura 4 <i>Journey Map del transporte primario</i>	11
Figura 5 <i>Entrevista con actores principales</i>	11
Figura 6 <i>Análisis QFD</i>	13
Figura 7 <i>Capacidad de carga por pallet</i>	15
Figura 8 <i>Km recorridos vs tarifas</i>	16
Figura 9 <i>Comparación de viajes por canal de distribución</i>	17
Figura 10 <i>Esquema de modelo deseado</i>	18
Figura 11 <i>Matriz PUGH del software</i>	19
Figura 12 <i>Diagrama de Gantt del prototipo</i>	19
Figura 13 <i>Plantilla de ingreso de datos</i>	23
Figura 14 <i>Comparativo de utilización</i>	26
Figura 15 <i>Resultados de prueba de diferencia de medias</i>	26
Figura 16 <i>Ahorro estimado</i>	27
Figura 17 <i>Tiempo de actividad manual</i>	28

Índice de tablas

Tabla 1 <i>VOC de los actores entrevistados</i>	12
Tabla 2 <i>Especificaciones de diseño</i>	12
Tabla 3 <i>Declaración del problema</i>	14
Tabla 4 <i>Métricas TBL</i>	14
Tabla 5 <i>Plan de recolección de datos</i>	14
Tabla 6 <i>Placas de camiones</i>	16
Tabla 7 <i>Costos asociados</i>	20
Tabla 8 <i>Beneficios estimados</i>	20

Capítulo 1

1.1 Introducción

Este proyecto se realizó en una empresa de cervezas, nueva en el Ecuador. El mercado de cervezas industriales se encuentra dominado por la competencia, que lleva décadas en el país. Por ende, debe optimizar su operación y llevar un excelente control de calidad.

Su servicio de transporte terrestre de producto terminado está tercerizado, tanto la flota primaria, compuesta por camiones articulados, como secundaria, compuesta por camiones furgonados. Para su flota primaria atiende a dos canales de distribución, tradicional y moderno, este proyecto se enfoca en el canal tradicional equivalente al 90% de sus viajes de transporte primario en 2024 y un promedio mensual de 153 viajes.

La operación de transporte primario, para el canal tradicional, se subdivide en dos categorías:

- abastecimiento, a centros de distribución tercerizados
- distribución, venta a distribuidores y entrega al socio comercial

Donde la cadena de valor se puede generalizar de la siguiente manera:

1. Generación del requerimiento por parte del área comercial o equipo de planeación
2. Facturación del pedido
3. Asignación de flota
4. Generación de mapa de carga y/o guía de remisión
5. Transporte, y monitoreo, de carga

1.2 Descripción del Problema

La asignación de flota es un proceso manual que requiere entre dos y cinco horas del tiempo del asistente, coordinador y jefe de distribución sin lograr asegurar de forma medible que se está realizando de la mejor manera asegurando un uso eficiente de los recursos de la empresa.

El problema es importante porque se enfoca en la actividad operativa que materializa los requerimientos de producto en órdenes de transporte, destinando recursos que no pueden ser

utilizados hasta el día siguiente; considerando que la totalidad de la flota es tercerizada es imprescindible asegurar que el proceso pueda realizarse reduciendo actividades que no agreguen valor, asegurando de forma objetiva una utilización correcta de la flota disponible y sin requerir mayor tiempo del personal para tareas operativas.

Ante lo mencionado, el modelo debe cumplir los requerimientos del equipo de transporte.

Requerimientos obligatorios

- Cada pedido debe asignarse a un único camión.
- Cada camión debe asignarse a un único pedido.
- Cada camión asignado debe tener la capacidad de carga suficiente para transportar el pedido.
- Cada pedido asignado debe medir su eficiencia en dólar por hectólitro transportado y utilización del camión en pallets de producto.

Requerimientos flexibles

1. Reducir el costo total de transporte considerando tarifa de flete.
2. Reducir la subutilización de cada pedido, aprovechando al máximo la capacidad de carga.

1.3 Justificación del Problema

Al momento, la asignación de flota se realiza sin la oportunidad de realizar un análisis previo considerando la capacidad del camión, distancia de ruta, costos asociados, entre otros. Adicional, la empresa mide como indicador clave la utilización del espacio de cada viaje, en toneladas y hectólitros, cerrando el año 2024 con un promedio de 89.26% lo que representa otra oportunidad en la asignación de camiones maximizando el uso de la flota considerando tanto su capacidad de la estructura como la composición del pedido logrando ser eficiente con su presupuesto asignado.

1.4 Objetivos

1.4.1 *Objetivo general*

Diseñar un modelo de optimización, entre mayo y septiembre de 2025, para el mejoramiento de asignación de flota de transporte primario maximizando la capacidad de carga y reduciendo los costos de transporte.

1.4.2 *Objetivos específicos*

1. Resumir los requerimientos del cliente para la identificación de las especificaciones de diseño.
2. Construir un modelo matemático para la asignación de flota considerando las especificaciones de diseño.
3. Demostrar un prototipo de la herramienta con la capacidad de ejecución de pruebas piloto.
4. Relatar el estándar del procedimiento para la ejecución de la herramienta.

1.5 Marco teórico

La logística de una empresa suele incorporar el almacenamiento y transporte de materia prima, producto semielaborado y producto terminado. Para este proyecto se enfocará en el transporte, específicamente, el primario que se identifica como aquel compuesto por viajes de alto volumen entre plantas de producción y bodegas. El modelado matemático aplicado en este proyecto es programación lineal entera mixta, MILP por sus siglas en inglés, que permite optimizar variables continuas con restricciones lineales. Inicialmente la programación lineal solo modelaba decisiones discretas, sí/no, pero, hoy en día se ha extendido para permitir que variables tomen valores numéricos enteros o continuos (Scavuzzo et al., 2024).

Cada modelo de MILP se compone por los siguientes componentes:

- Conjunto de objetos iterables

- Parámetros fijos
- Variables que pueden tener valores binarios, números enteros o números continuos
- Función objetivo por maximizar o minimizar
- Restricciones que debe cumplir el modelo

Como se describirá más adelante, los modelos de asignación enfrentan a un problema donde se deben emparejar objetos de dos distintos tipos, sea trabajos a máquinas, personal de ventas a clientes o pedidos a camiones. Asignar una cantidad X de objeto 1 a Y objetos 2 para maximizar o minimizar un nivel de competencia según se defina en la función objetivo.

Para la ejecución del modelo se utiliza el lenguaje de programación Python, un lenguaje de código abierto que permite desarrollar herramientas complejas adaptadas a la necesidad de cada usuario; otro puente fuerte es su gramática simple que ofrece un alto nivel de legibilidad y facilidad del mantenimiento del código (Tinoco, C & Rocca, D, 2020).

Por último, para poder correr modelos de programación lineal y entera mixta se requiere la librería PuLP donde se puede redactar el modelo matemático con una sintaxis similar a su expresión matemática con la oportunidad de ejecutar solvers de optimización de código abierto, como CBC o GLPK, o comerciales, como CPLEX (Mitchell et al., 2011).

Hakim I., Abbas F. (2019) diseñaron un modelo que minimiza los costos de almacenamiento, manipulación y transporte de productos en una red de crossdocking; su modelo consideraba distintos tipos de camiones y manejaba una capacidad de volumen para cada tipo de camión. Este modelo otorga una base a lo que puede lograr el propuesto en este proyecto, pero su realidad operativa es muy diferente para poder usarse.

Battarra I et al. (2022) diseñaron un modelo que minimizaba los costos de almacenamiento, transporte y subutilización de la capacidad de cada camión; tenían definidas las posibles rutas dentro de una red de nodos donde el producto se trasladaba en forma de flujos

continuos. Lo relevante al proyecto es como aplicar esa penalidad por la subutilización de la capacidad operativa.

Yang X & Hajem A. (2020) aplicaron un modelo de asignación de camiones que minimizaba los costos de transporte y contratación de flota adicional; aplicado a un puerto marítimo donde se asignan contenedores a camiones y por la naturaleza de la operación no es posible variar o agrupar pedidos. Este modelo se escogió como base para el proyecto por su similitud a la operación a replicar.

Capítulo 2

2.1 Metodología

El proyecto se realizó en cuatro etapas:

1. Identificación de necesidades del cliente y declaración de oportunidad
2. Recolección de datos y análisis de opciones de diseño
3. Soluciones de diseño y plan de prototipado
4. Implementación o simulación de la solución y resultados obtenidos

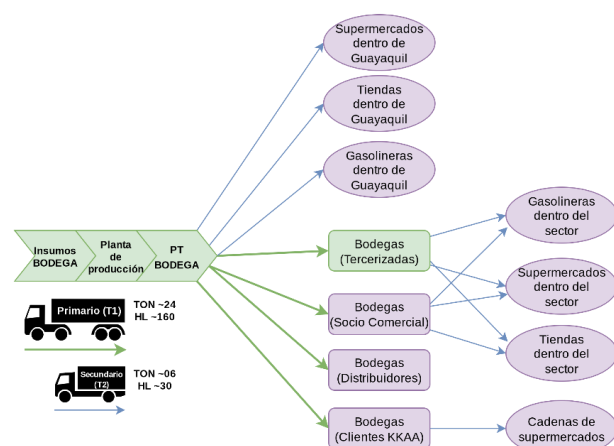
Las tres primeras etapas son descritas en este capítulo, sin embargo, la última corresponde al capítulo 3 al referirse a los resultados obtenidos.

Identificación de necesidades del cliente y declaración de oportunidad

El proyecto se realiza dentro de la operación logística de la empresa, por ende, es necesario entender como se maneja su cadena de abastecimiento para la distribución de producto terminado desde su planta de producción de Guayaquil. Actualmente, se encuentra dividida en transporte primario, movimiento de volúmenes grandes con el fin de abastecer bodegas, y, transporte secundario, entrega directa al cliente con camiones más pequeños. Revisar Figura 1 que muestra cómo se divide entre primaria y secundaria.

Figura 1

Diagrama de distribución



Dentro de transporte primario se pueden clasificar las cuatro distintas bodegas receptoras:

- bodegas tercerizadas
- bodegas del socio comercial
- bodegas de distribuidores
- bodegas de clientes KKAA

Al considerar cantidad de viajes para el primer semestre de 2025 se mantiene un promedio mensual de 230 viajes de transporte primario; donde entre el 60% y 70% lo compone las primeras 3 bodegas receptoras: terceras, socio comercial y distribuidores. Revisar la captura del tablero de operaciones de la operación en Figura 2.

Figura 2

Tablero de operaciones T1



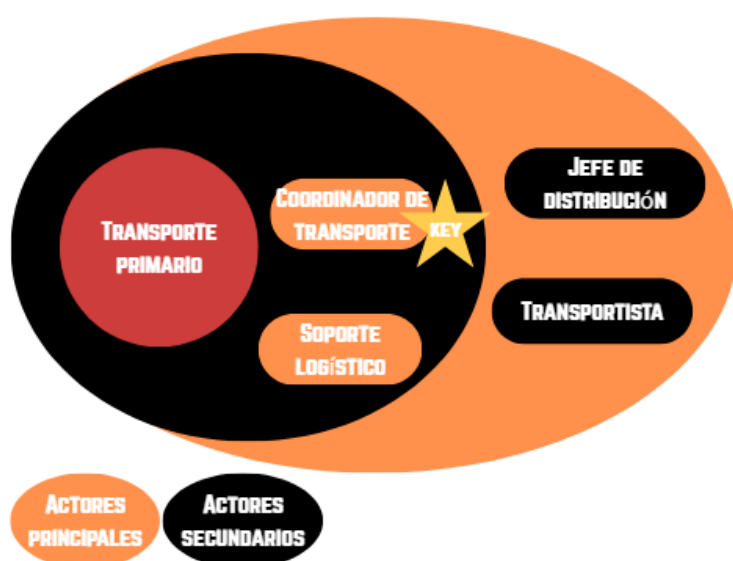
Por ende, el proyecto se focaliza en aquellas entregas; cabe notar que toda la flota de transporte primario es tercerizada y compuesta por dos empresas que serán identificadas como principal y spot según la condición de sus contratos. Con respecto a las estructuras de camiones que componen la flota se tienen jumbo, cama baja y bi-train; pero, la estructura bi-train no entra en el alcance de este proyecto, por solicitud de la empresa, y las estructuras de

cama baja se diferencian entre ambos transportistas ya que no comparten las mismas dimensiones.

Se procedió a realizar un mapa de actores para identificar todos los que participan en el transporte primario y clasificar en principal o secundario (Ver Figura 3).

Figura 3

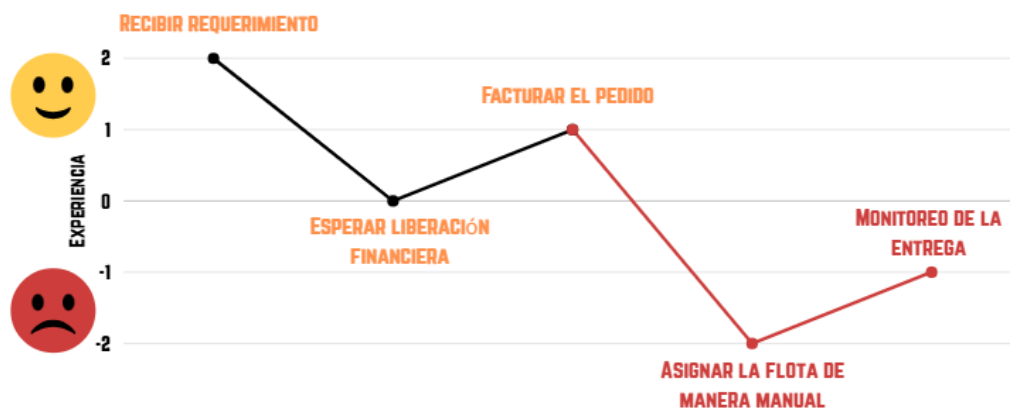
Mapa de actores de transporte primario



Según el mapa de actores levantado se identifica al coordinador de transporte como cliente clave del proyecto. En cambio, para el soporte logístico se realizó un journey map ya que es el rol operativo que realiza tareas de facturación, asignación y monitoreo; esta herramienta nos permite desglosar las actividades de un proceso e identificar los puntos de dolor para ser tratados. Ver Figura 4.

Figura 4

Journey Map del transporte primario



Para recolectar las necesidades del coordinador de transporte y jefe de distribución se realizaron entrevistas, como se observan la Figura 5 a y b.

Figura 5

Entrevista con actores principales



(a)



(b)

Los comentarios obtenidos se detallan en la Tabla 1 con su respectiva asignación de prioridad de acuerdo con lo conversado con cada actor.

Tabla 1*VOC de los actores entrevistados*

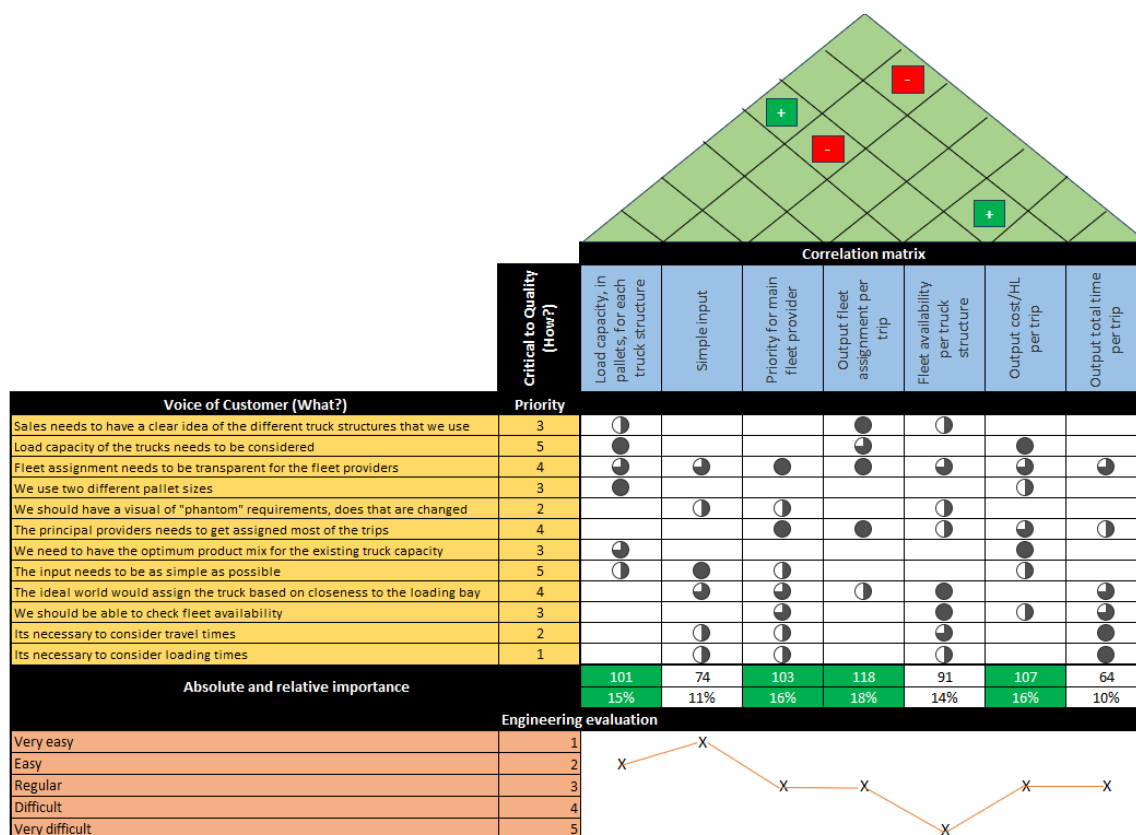
	Comentario	Prioridad	Nivel de prioridad
VOC - Jefe de Distribución	La capacidad de carga es distinta para cada estructura de camión	5	Importancia extrema
	Las tarifas para cada estructura de camión y destino	4	Importancia moderada
	Tenemos un proveedor principal	4	Importancia moderada
	Ventas tiene una idea clara de las diferentes estructuras de camiones	3	Neutral
	Necesitamos transparencia en la asignación de flota	3	Neutral
	Tenemos pallets de distintos tamaños	2	Importancia baja
	Sería bueno tener una visual de requerimientos "fantasmas" que no se logran atender	2	Importancia baja
VOC - Coordinador de Transporte	Los clientes de KKAA se manejan de otra manera pero son un volumen pequeño	1	No es importante
	Ingreso de datos debe ser lo más simple	5	Importancia extrema
	El mundo ideal asignaría a los camiones según la cercanía al patio	3	Neutral
	Existe un mix óptimo de productos para cada estructura de camión	3	Neutral
	Deberíamos poder revisar disponibilidad de flota	3	Neutral
	Es necesario considerar tiempos de viaje	2	Importancia baja
	Es necesario considerar tiempos de carga	1	No es importante

Cada comentario con prioridad mayor a 3 fue transformado en una especificación de diseño. Revisar Tabla 2 donde también se indica su relación con los objetivos triple bottom line (TBL), ecológico, económico y social, definidos más adelante.

Tabla 2*Especificaciones de diseño*

Especificaciones de diseño	TBL
Capacidad de carga, en pallet, para cada estructura de camión	Ecológico
Tener un ingreso simple de datos	Social
Prioridad al transportista principal	Económico
Considerar disponibilidad de flota para cada camión	Social
Eficiencia de cada pedido, medido en dólar por hectólitro	Económico
Asignación de flota para cada pedido	Social
Tiempo total de viaje para cada pedido	Económico

Se procede con un análisis QFD, como se muestra en la Figura 6, para realizar una evaluación cruzada de cada requerimiento del cliente con las especificaciones de diseño planteadas. Con el fin de identificar aquellos requerimientos críticos que se deben cumplir en la propuesta del proyecto; a su vez, se considera el nivel de dificultad para cumplirlo y si las especificaciones tienen un impacto positivo o negativo entre sí.

Figura 6*Análisis QFD*

Del análisis resulta que solo 4 especificaciones de diseño, con dificultad razonable, son críticas al proyecto:

1. Capacidad de carga, en pallets, para cada estructura de camión
2. Prioridad al transportista principal.
3. Asignación de flota para cada pedido.
4. Eficiencia de cada pedido, medido en dólar por hectólitro.

Con la información levantada anteriormente se define en la Tabla 3 la declaración de oportunidad de la siguiente manera, aplicando el modo punto de vista del usuario, o POV por sus siglas en inglés.

Tabla 3*Declaración del problema*

POV	Usuario	Necesidad	Insight
	El coordinador de transporte	Optimizar la asignación de flota para transporte primario, considerando capacidad de carga y costos asociados	La flota se compone de 3 estructuras de camiones y el mayor punto de dolor es la asignación manual de viajes

Los objetivos TBL quedan definidos según se puede revisar en Tabla 4.

Tabla 4*Métricas TBL*

Métricas TBL	Económico	Reducción en dólar/HL para transporte primario
	Ecológico	Incremento en la utilización del camión por peso
	Social	Reducción en cantidad de horas dedicadas a tareas manuales

Recolección de datos y análisis de opciones de diseño

Se generó un plan de recolección de datos donde cada variable proviene de una especificación crítica. Se emplearon distintos métodos de validación tal como se menciona en la Tabla 5.

Tabla 5*Plan de recolección de datos*

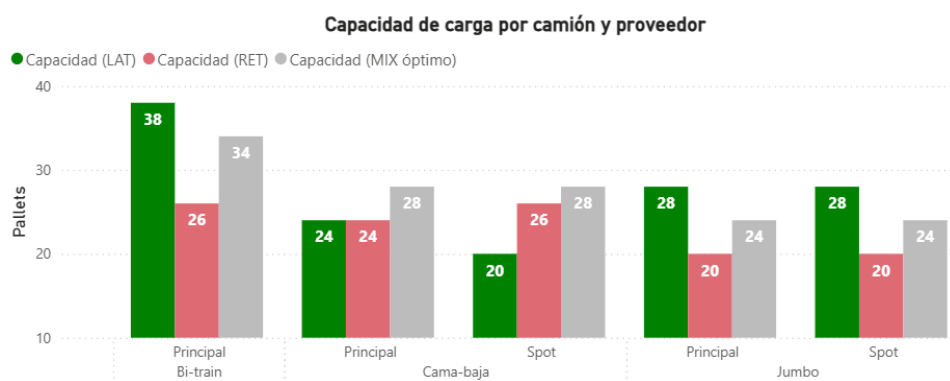
Requerimiento crítico	DATOS				OPERACIÓN				/Recolectado?	/Validado?
	¿Qué va a ser medido?	Factores de estratificación	¿Por qué será medido?	¿Cómo será medido?	Muestra	¿Dónde será registrado?	¿Cómo será validado?			
Capacidad de carga, en pallets, para cada estructura	Capacidad de carga en pallets	"Estructura" "Transportista"	Para maximizar dentro del modelo	Consultar a cada transportista	Todos las estructuras de camiones	Archivo de excel "T1 Camiones"	GEMBA: Conteo físico de la cantidad de pallets cargados en un camión completo	OK	OK	
Prioridad al transportista principal	Placas de cada cabezal y estructura	"Estructura" "Transportista"	Para identificar al transportista principal	Solicitar el listado de placas a cada transportista	Flota activa en un mes	Archivo de excel "Flota LSP T1"	Validación cruzada: Registro de seguridad de todas las placas que han ingresado a la planta	OK	OK	
Asignación de flota para cada pedido	Tarifa por viaje	"Ubicación" "Estructura"	Para calcular dólar/HL	Recolectar las tarifas de viaje de las bases de datos actuales	Ambos transportistas	Archivo de excel "Tarifario T1"	Validación cruzada: Revisar las tarifas pactadas en el contrato de transporte	OK	OK	
Eficiencia de cada pedido, medido en dólar por hectólitro	HL por SKU	"Presentación"	Para calcular el HL por viaje	Conteo de unidades por caja y cálculo con ml por unidad	Un SKU para cada presentación	Archivo de excel "Info SKU"	Validación cruzada: Revisando los valores con el equipo de inventarios	OK	OK	
Eficiencia de cada pedido, medido en dólar por hectólitro	Cubicaje, en pallets, de cada pedido	"Fecha" "Estructura" "Cliente"	Para calcular el HL por viaje	Registro dentro de cada pedido	Todos los viajes de transporte primario, que no van a una bodega de	Archivo de excel "T1 Base - cubicaje"	Validación cruzada: Registro de viajes dentro del sistema de facturación	OK	OK	
Eficiencia de cada pedido, medido en dólar por hectólitro	HL por viaje	"Presentación"	Para calcular el HL por viaje	Calcular de las variables mencionadas anteriormente	en un mes	Archivo de excel "T1 Base - envíos"	Fórmulas de cálculo	NA	NA	
Eficiencia de cada pedido, medido en dólares por hectólitro	Dólar/HL por viaje	"Fecha" "Estructura" "Cliente"	Para minimizar dentro del modelo	Calcular con la tarifa y hectólitro de cada viaje	en un mes	Archivo de excel "T1 Base - costos"	Fórmulas de cálculo	NA	NA	

Para la capacidad de carga, considerando pallets o espacios disponibles, en la Figura 7 se levantó la información agrupada por transportista, estructura de camión y tipo de producto

transportado; la distinción en tipo de producto es porque no se trabaja con un tamaño único de pallets.

Figura 7

Capacidad de carga por pallet



Como se ha mencionado anteriormente, ambos transportistas tienen dimensiones diferentes en sus estructuras de cama baja. Esto se traduce a capacidades de carga distintas, el proveedor principal puede llevar una capacidad de 24-24-28 según su mix de producto, mientras que el proveedor spot tiene capacidad de 20-26-28.

Con respecto a las placas de toda la flota para poder distinguir entre ambos transportistas se contempla la Tabla 6. Cabe mencionar que durante el diseño del modelo se identificó que no fue necesario realizar la distinción; por ende, este listado de placas no es parte de los inputs del modelo.

Tabla 6

Placas de camiones

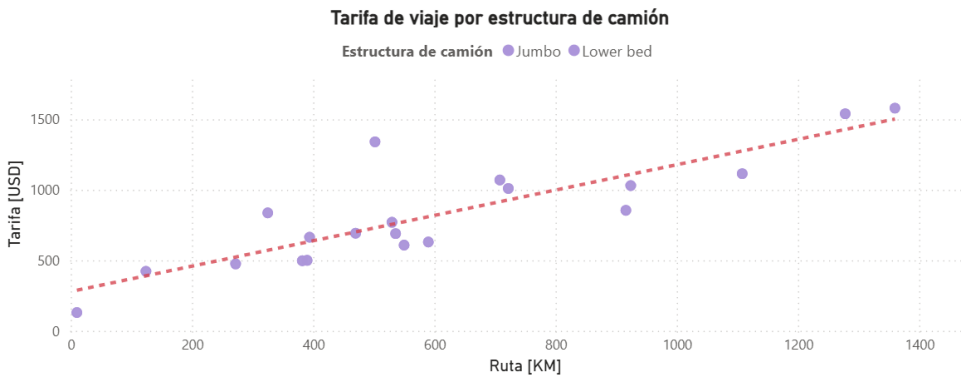
VEHÍCULO							CHOFER		
LSP	PLACA	FABRICANTE	MODELO	AÑO	COMBUSTIBLE	TIPO DE CAMIÓN	NOMBRE COMPLETO	CEDULA DE IDENTIDAD	FECHA CADUCIDAD DE LICENCIA
MAIN	GBP-8008	SINOTRUK	SITRAK C7H ZZ4256V324HC1B AC 12.4 2P 6X4 TM DIESEL	2024	DIESEL	Bi-train			22/06/2027
MAIN	GBP-8010	SINOTRUK	SITRAK C7H ZZ4256V324HC1B AC 12.4 2P 6X4 TM DIESEL	2024	DIESEL	Jumbo			05/09/2028
MAIN	GBQ-2657	JAC	HFC4181KR1T AC 7.8 2P 4X2 TM DIESEL	2025	DIESEL	Jumbo			25/05/2027
MAIN	GBQ-2656	JAC	HFC4181KR1T AC 7.8 2P 4X2 TM DIESEL	2025	DIESEL	Jumbo			01/02/2026
MAIN	GBQ-2655	JAC	HFC4181KR1T AC 7.8 2P 4X2 TM DIESEL	2025	DIESEL	Jumbo			09/05/2028
MAIN	PAE-3538	JAC	HFC4181KR1T AC 7.8 2P 4X2 TM DIESEL	2024	DIESEL	Camia baja			22/02/2026
MAIN	PAE-3539	JAC	HFC4181KR1T AC 7.8 2P 4X2 TM DIESEL	2024	DIESEL	Jumbo			10/05/2028
MAIN	PAE-1269	HYUNDAI	XCIENT GT TRACTO CAMION AC 12.7 2P 6X4 TM DIESEL	2024	DIESEL	Jumbo			02/06/2026
MAIN	PAE-1329	FAW	CA4259P25K2T1ES480 AC 12.5 2P 6X4 TM DIESEL	2023	DIESEL	Jumbo			14/07/2027
SPOT	POO-0780	INTERNATIONAL	CHASIS CABINADO 9200I 6X4 EXT. CAB	2006	DIESEL	Jumbo			25/07/2028
SPOT	PAC-9368	DAF	CF85 FTT AC 12.9 2P 6X4 TM DIESEL	2018	DIESEL	Camia baja			06/05/2029
SPOT	PAE-1770	JAC	HFC4260K3R1 AC 12.5 2P 6X4 TM DIESEL	2024	DIESEL	Jumbo			14/03/2027
SPOT	PCB-8083	KENWORTH	T800 SPORT PLUS	2013	DIESEL	Camia baja			16/01/2028
SPOT	PAC-7475	KENWORTH	T800 SPORT PLUS AC 14.9 2P 6X4 TM DIESEL	2014	DIESEL	Jumbo			15/04/2028
SPOT	PAE-2408	INTERNATIONAL	HX AC 14.9 2P 6X4 TM DIESEL	2024	DIESEL	Jumbo			03/12/2025
SPOT	PPB-4960	INTERNATIONAL	9200 TS TM 14.94 2P 6X4	2013	DIESEL	Camia baja			15/04/2028
SPOT	CAH-0165	KENWORTH	T 800 6X4	2009	DIESEL	Jumbo			06/10/2025

Para el costo por viaje se recopiló los valores tarifados por ambos transportistas.

Como método de validación se revisó la cotización del servicio de transporte original para el transportista con contrato spot. Se puede identificar que, a excepción de dos ubicaciones, siguen una relación lineal entre distancia y la tarifa pactada.

Figura 8

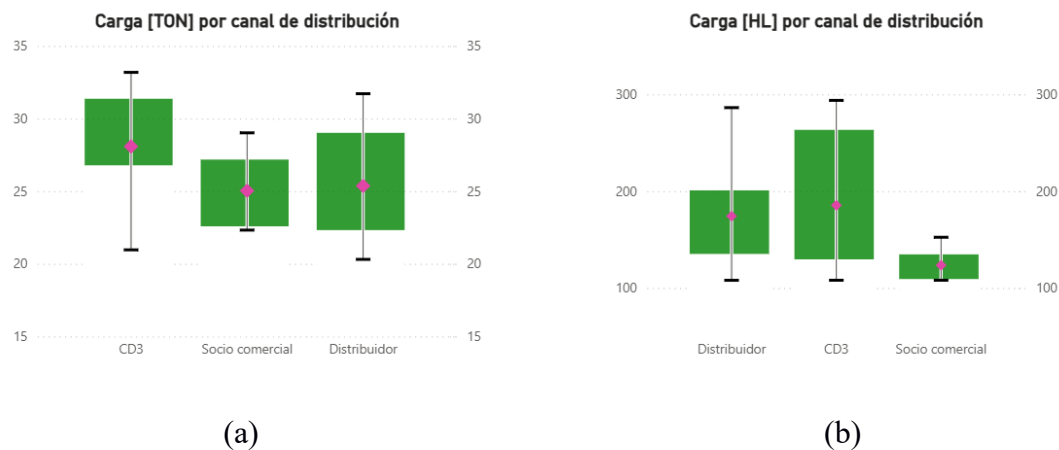
Km recorridos vs tarifas



Para cada SKU se recopiló el volumen, en hectólitros, y peso para poder evaluar tanto peso como eficiencia por viajes. Estos datos se han agregado por canal de distribución para facilitar su lectura. Ver Figura 9 a y b.

Figura 9

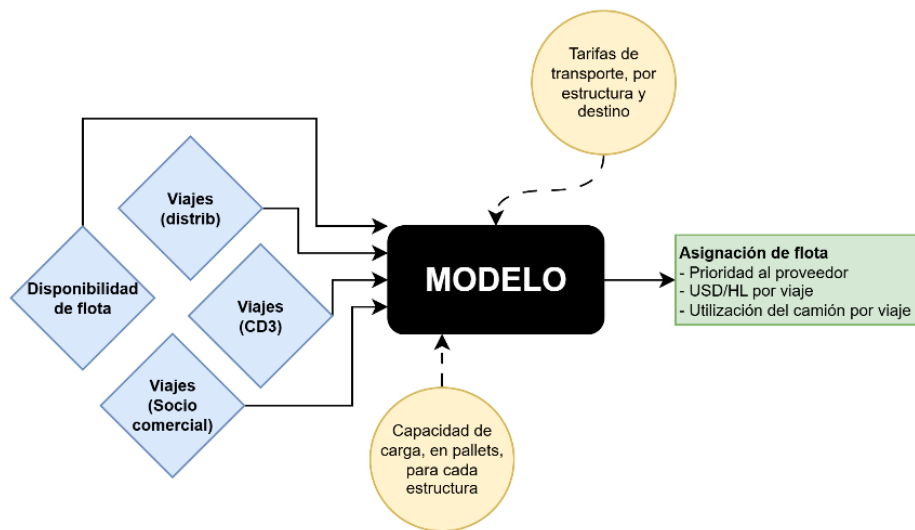
Comparación de viajes por canal de distribución



Opciones de diseño

En la Figura 10 se puede apreciar un diagrama describiendo el comportamiento del modelo deseado:

1. Debe poder recibir como ingreso de datos los viajes por asignar en conjunto con la disponibilidad de flota por estructura de camión.
2. Debe considerar las tarifas de transporte definidas y las capacidades de carga de cada estructura.
3. Debe realizar la asignación de flota minimizando la subutilización del camión dando como resultado una eficiencia mayor al transportar más producto, en hectólitros en la misma cantidad de viajes, representado por la tarifa.

Figura 10*Esquema de modelo deseado*

En la Figura 11 se puede apreciar la matriz Pugh realizada para poder comparar y decidir entre las opciones de software para formular y ejecutar el modelo. Se consideraron cinco criterios para evaluar en una escala del 1 al 5:

- Facilidad de uso
- Costos de licencia
- Tiempo necesario para formulación, dentro del lenguaje de programación
- Tiempo necesario para entrenar al soporte logístico
- Tiempo necesario para ejecutar una prueba piloto

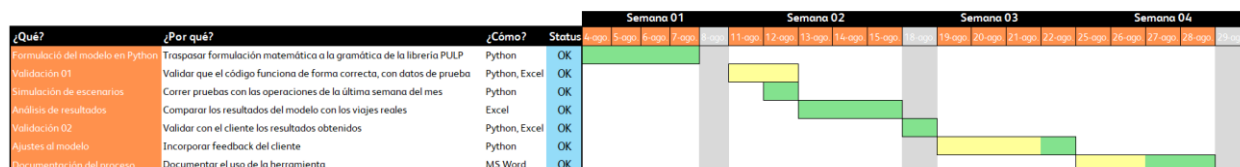
Figura 11*Matriz PUGH del software*




CRITERIO	PESO	EXCEL (SOLVER)	PYTHON (PuLP)	GAMS
FACILIDAD DE USO	25%	4	4	3
COSTOS DE LICENCIA	25%	4	5	2
TIEMPO PARA FORMULACIÓN	20%	3	4	5
TIEMPO PARA ENTRENAMIENTO	15%	4	3	3
TIEMPO PARA PRUEBAS PILOTO	15%	2	4	4
PUNTAJE PONDERADO TOTAL		3.5	4.1	3.3

Plan de prototipo

Se definió un plan para la finalización del prototipo durante el último mes del proyecto. No se detalla responsables ya que el equipo del proyecto solo está compuesto por una persona. El plan se logró ejecutar dentro del tiempo considerado.

Figura 12*Diagrama de Gantt del prototipo***Análisis financiero de la solución**

Al decidir utilizar el lenguaje de programación Python con la librería PuLP, ambas herramientas de libre acceso y uso, no se incorporan costos materiales al proyecto; sin

embargo, es posible realizar el análisis de costos considerando las horas dedicadas al proyecto que luego serán transformadas a dólares con una tasa de 4.76 [USD/hora] basado en el sueldo del soporte logístico. Revisar Tabla 7.

Tabla 7

Costos asociados

	Detalle	Horas	Costo total [USD]
Costos	Formulación del modelo dentro de Python	3	14,28
	Entrenamiento del equipo con la herramienta	4	19,04
	Pruebas y ajustes del modelo	10	47,6
	Total		80,92

Con respecto al beneficio obtenido se considera el tiempo ahorrado a diario durante la asignación de los camiones, se espera por lo menos reducir 20 minutos por día. Revisar Tabla 8.

Tabla 8

Beneficios estimados

	Detalle	Horas	Costo total [USD]
Beneficios	Ahorro de 20 minutos al día, en un año (21 días x 12 meses)	84	399,84

Considerando el costo total de \$ 128.52 y el beneficio anual de \$ 399.84 se obtuvo una tasa de beneficio/costo de 3.11 indicando que el proyecto es económicamente viable.

Modelo de asignación

La formulación fue hecha a partir de un modelo base de asignación donde se incorporaron lo mencionado en el marco teórico. Este modelo busca optimizar la operación al minimizar los costos, compuestos por la tarifa de transporte y la penalidad por subutilización. Se detallan todos sus componentes a continuación.

Conjuntos

P : conjunto de órdenes de transporte $\{1, 2, \dots, p\}$

C : conjunto de estructuras de camiones $\{\text{Jumbo, Cama-baja-principal, Cama-baja-spot}\}$

Pa : conjunto de tipos de pallets $\{\text{Biela, Lata}\}$

M : conjunto de posibles mix de productos en un pedido $\{\text{OW, RET, MIX}\}$

Parámetros

H_p : volumen de carga para pedido p [HL]

T_p : peso de carga para pedido p [TON]

M_p : mix de carga para pedido p

D_p : cliente para pedido p

V_{ppa} : cantidad de pallet de tipo pa para pedido p [UN]

V_c : capacidad de peso de carga para estructura de camión c [TON]

F_c : disponibilidad de flota para estructura de camión c [UN]

CT_{pc} : tarifa de transporte para pedido p con estructura de camión c [USD]

Ca_{cmpa} : capacidad de estructura de camión c , según mix m , para tipo de pallet pa [UN]

M : parámetro utilizado para asegurar que la restricción de subutilización solo considere emparejamientos asignados de pedido y estructura de camión $\{M=1\}$

α, β : penalizaciones por subutilización de camiones en peso y espacio para pallets respectivamente [USD]

Variables de decisión

X_{pc} : bin $\{1$ pedido p es asignada a estructura de camión c , 0 no es asignado $\}$

S_p^{peso} : cont $\{\text{subutilización, sobre peso permitido, del pedido } p\}$

S_p^{pallet} : cont $\{\text{subutilización, sobre espacios para pallets, del pedido } p\}$

Función objetivo

$$\sum_{p=1}^P \left(\sum_{c=Jumbo}^C CT_{pc} \cdot X_{pc} + \alpha S_p^{peso} + \beta S_p^{pallet} \right) \quad (2.1)$$

Restricciones

$$T_p \cdot X_{pc} \leq V_c \quad \forall p \in P, \forall c \in C \quad (2.2)$$

$$X_{pc} \cdot V_{ppa} \leq Ca_{cm_{pi}} \quad \forall p \in P, \forall c \in C, \forall i \in Pa \quad (2.3)$$

$$S_p^{peso} \geq 1 - \frac{T_p}{V_c} - (1 - X_{pc}) \cdot M \quad \forall p \in P, \forall c \in C \quad (2.4)$$

$$S_p^{pallet} \geq 1 - \sum_{i=Biela}^{Pa} \frac{V_{pi}}{Ca_{cm_{pi}}} - (1 - X_{pc}) \cdot M \quad \forall p \in P, \forall c \in C \quad (2.5)$$

$$\sum_{c=Jumbo}^C X_{pc} = 1 \quad \forall p \in P \quad (2.6)$$

$$\sum_{c=Jumbo}^C X_{pc} \leq F_c \quad \forall c \in C \quad (2.7)$$

$$X_{pc} \in \{0,1\}, \quad S_p^{peso} \geq 0, \quad S_p^{pallet} \geq 0 \quad (2.8)$$

- Las ecuaciones 2.2 y 2.3 aseguran que ninguna asignación sobrepase las capacidades de peso y espacio para pallets de cada estructura de camión.
- Las ecuaciones 2.4 y 2.5 calculan la subutilización para cada pedido.
- Las ecuaciones 2.6 aseguran que cada pedido sea asignado a una estructura de camión.
- Las ecuaciones 2.7 aseguran que no se sobrepase la disponibilidad de flota para cada estructura de camión.

Ingreso de datos al modelo

Para el ingreso de datos el soporte logístico debe especificar la disponibilidad de flota, tippear la cantidad de pallets de cada producto que componen el pedido y detallar el destino, con esa información la plantilla automáticamente calcula el peso y volumen que es alimentado al modelo. Ver Figura 13 a, b y c.

Figura 13

Plantilla de ingreso de datos

Camión	Disponible	
Jumbo	6	
Cama-baja	3	
Cama-baja-spot	2	

Pedido	Presentación	Pallets	Tipo	HL	TON
1	BRAHMA 600ml x12	26	Biela	1.87	29.016
2	HNK 600ml x12	10	Biela	0.72	11.160
2	DORADA 355ml x24	10	Lata	0.85	13.219
2	SOL 330ml 4x6	1	Biela	0.08	0.846
2	AMSTEL 330ml x24	3	Biela	0.24	2.538
3	DORADA 600ml x12	6	Biela	0.43	6.696
3	HNK 600ml x12	10	Biela	0.72	11.160
3	AMSTEL 600ml x12	3	Biela	0.22	3.348
3	BIELA R. 600ml x12	7	Biela	0.50	7.812
4	HNK 600ml x12	5	Biela	0.36	5.580
4	AMSTEL 600ml x12	5	Biela	0.36	5.580
4	BIELA R. 600ml x12	10	Biela	0.72	11.160
5	HNK 600ml x12	3	Biela	0.22	3.348
5	AMSTEL 600ml x12	3	Biela	0.22	3.348
5	BIELA R. 600ml x12	4	Biela	0.29	4.464
5	AMSTEL 269ml x24	3	Lata	0.19	3.950
5	BIELA L. 355ml 4x6	7	Lata	0.60	7.928
5	SOL 330ml x24	4	Biela	0.32	3.384
6	BIELA R. 355ml 4x6	12	Lata	1.02	15.855
6	HNK 600ml x12	18	Biela	1.15	17.856
7	HNK 269ml x24	21	Lata	1.36	27.648
7	HNK 207ml x24	3	Biela	0.30	3.840
7	HNK 330ml 4x6	3	Biela	0.24	2.538

(a)

(b)

Pedido	Biela	Lata	Mix	HL	TON	Destino
1	26	0	Ret	1,872	29,016	Patricio Ordoñez
2	14	10	Mix	1,8888	27,7565	Darwin Quilumba
3	26	0	Ret	1,872	29,016	Jorge Rodriguez
4	20	0	Ret	1,44	22,32	Jorge Rodriguez
5	14	10	Mix	1,82688	26,42125	Megalicores
6	16	12	Mix	2,1744	33,711	CBC UIO Norte
7	6	21	Mix	1,89144	34,02625	Darwin Quilumba

(c)

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

Una vez formulado el problema se realizaron corridas de prueba para comprobar su correcto funcionamiento; de estas primeras corridas se identificaron posibles inconvenientes a partir de la formulación original del problema. Por ende, se incorporaron los siguientes cambios:

1. Se agrega el parámetro M para ambas restricciones que calculan la subutilización con el fin de que solo considere las parejas X_{pc} elegidas por el modelo. Caso contrario estaba calculando un promedio con varios ceros.
2. Se elimina la variable de eficiencia del modelo y se calcula afuera del modelo. Con ambas variables de subutilización en la función objetivo el modelo ya estaba cumpliendo sus requisitos.
3. Se simplifica la formulación para considerar cantidad de camiones por estructura en vez de tener un conjunto con todas las placas individuales; tras lo conversado con el cliente clave no era imprescindible que se le otorgue una ventaja al transportista principal ya que se observó que el modelo sí le daba más viajes por su peculiar capacidad en cama baja. Este cambio también simplifica el ingreso de datos por parte del soporte logístico y evita posibles errores.

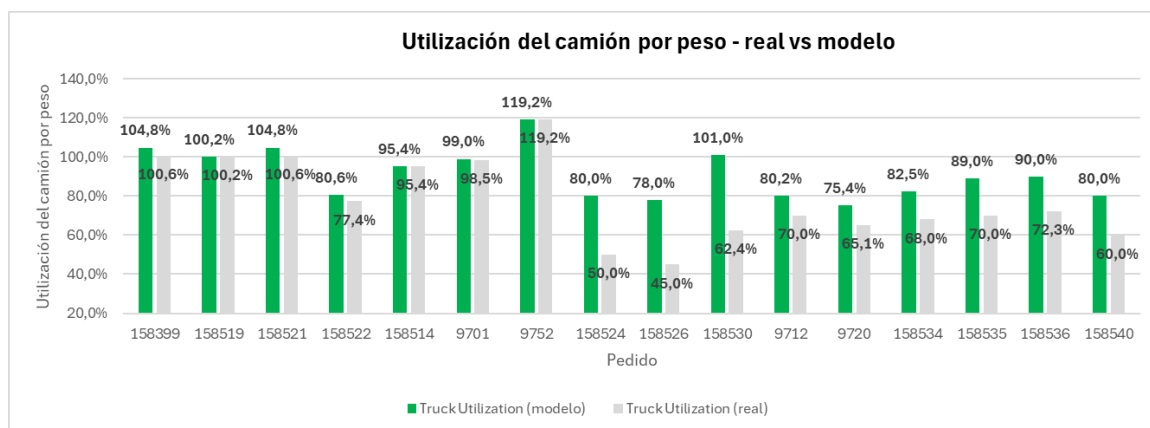
Corrida realizada

Con las modificaciones mencionadas se obtiene la formulación, descrita en el capítulo anterior, que fue incorporada a la gramática de PuLP en el Apéndice A. Como muestra para las corridas se eligió todos los viajes de los días 30 y 31 del mes de julio ya que los cierres suelen ser tiempos picos porque el equipo comercial busca alcanzar sus metas de venta. Esta muestra está compuesta por 16 viajes que en promedio fueron con un 78.4% de ocupación por peso permitido.

En la Figura 14 se puede observar un comparativo del viaje real con lo propuesto por el modelo. Importante notar que los viajes del 30 de julio, desde 158399 hasta 9752, fueron con una utilización similar a lo sugerido por el modelo; pero, el resto de los viajes que fueron realizados el 31 de julio no tuvieron una asignación óptima por la carga laboral adicional durante el día.

Figura 14

Comparativo de utilización



En promedio la asignación propuesta del modelo fue de 91.2% una diferencia de 12.8% con respecto a la asignación real de los viajes. Para validar esta diferencia se realizó una prueba T de diferencia de medias con un 95% de confianza y la hipótesis nula de que la diferencia entre ambas medias es 0. En la Figura 15 se comparten los resultados de la prueba.

Figura 15

Resultados de prueba de diferencia de medias

```
Welch Two Sample t-test

data: modelo and real
t = 2.0735, df = 24.414, p-value = 0.04883
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.07117974 25.60382026
sample estimates:
mean of x mean of y
 91.25625  78.41875
```

Con un valor p de 0.04883 la prueba nos asegura que la hipótesis nula no es verdadera, en otras palabras, si hay una diferencia estadísticamente significativa entre la asignación real y la sugerencia del modelo.

Para poder calcular un ahorro estimado con el incremento de la subutilización del camión se necesita traducir ese % en valores monetarios, una forma de lograrlo es con el valor tarifado para cada viaje. En este caso no se puede detallar el valor por cada viaje por solicitud de la empresa; pero, si indicar que tienen un valor promedio de \$ 593.30 que al multiplicar por la mejora de 12.8% de subutilización nos brinda un ahorro estimado de \$ 76.12 en esta corrida, si se promedia para los 17 viajes se tiene un ahorro de \$ 4.48 por viaje. Para conseguir una proyección mensual se consideró el promedio de 153 viajes y se multiplicó por el ahorro promedio por viaje de \$ 4.48 se obtiene \$ 685.08 al mes. Este valor se lo puede multiplicar por los 12 meses del año para conseguir un ahorro estimado anual de \$ 8 220.96 tal como lo muestra la Figura 16.

Figura 16

Ahorro estimado



Por último, la corrida la realizó por completo el soporte logístico con lo que se registró un tiempo total de 15 minutos desde que se empezó a ingresar los datos hasta poder

correr el modelo y obtener la asignación sugerida. Esto es una diferencia de 30 minutos al promedio de 45 minutos por día que requiere actualmente la actividad. Ver Figura 17.

Figura 17

Tiempo de actividad manual



Impactos TBL

Con respecto a los objetivos TBL se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Ecológico** – Incremento en promedio de 12.8% utilización del espacio del camión, esto resulta en una reducción de la cantidad total de viajes a realizarse ya que se logra ser más eficiente con cada viaje.
- **Económico** – El ahorro estimado de \$ 4.48 por viaje que en un año resulta en \$ 8 220 considerando solo las tarifas de viaje. A este valor se le agregó el beneficio estimado de \$ 399 por la liberación de espacio operativo al soporte logístico se consigue un ahorro total de \$ 8 619.
- **Social** – La reducción de 45 a 15 minutos para la actividad diaria le permite al soporte logístico tener 3.5 horas a la semana para tareas de mayor valor. Asimismo, la inclusión del modelo le libera tiempo al coordinador de transporte y jefe de logística ya que no es necesario la intervención de los tres roles para realizar la asignación.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Para el proyecto se identificaron 4 requerimientos críticos del cliente, pero, por decisión de este solo fue necesario cumplir con 3 dentro del modelo: considerar la capacidad de carga por pallets, mostrar la eficiencia de cada pedido en dólar por hectólitro y realizar la asignación de flota.
- El modelo matemático producido logra cumplir con los requerimientos mencionados anteriormente, minimiza los costos de la operación que se componen por la tarifa de viaje y las penalizaciones por subutilización.
- Como prototipo se generó una plantilla de excel, y con la librería PuLP una herramienta con la capacidad de leer aquella plantilla para ejecutar el modelo y entregar los resultados en un archivo de excel. Los resultados mostraron un incremento significativo de 13% en la utilización del camión por peso.
- Para la ejecución de la herramienta se redactó el procedimiento de uso en el estándar de la empresa.
- Con respecto a los objetivos TBL se logró en lo ecológico un incremento del 13% de utilización del camión, en lo económico un ahorro proyectado de \$1 660 por mes y en lo social una reducción de 30 minutos en el tiempo diario necesario para realizar la asignación.

4.1.2 Recomendaciones

- Se recomienda abordar los viajes de clientes del canal de distribución KKAA que principalmente son cadenas de supermercados ya que agregarían una complejidad al modelo por sus limitaciones de ventanas de tiempos.

- Se recomienda abordar un proyecto similar pero que aplique teoría de colas para minimizar el tiempo muerto dentro del patio de carga.
- Se recomienda continuar con un análisis de optimización del proceso para seguir reduciendo el tiempo dedicado a la asignación de viajes.
- Se recomienda modificar la plantilla de ingreso de datos para que pueda leer los requerimientos directo del sistema SAP, considerando la transformación digital planeada por el área de logística en los meses de agosto y septiembre.

Referencias

- Battarra, I., Accorsi, R., Lupi, G., Manzini, R., & Sirri, G. (2022). Location-allocation problem in a multi-terminal cross-dock distribution network for palletized perishables delivery. *Transportation Research Procedia*, 67, 172-181.
- Condor Tinoco, E. E., & De la Cruz Rocca, M. A. (2020). Algoritmos resueltos con Python. Editorial EIDEC.
- Hakim, I. M., & Abbas, F. M. H. (2019, September). Optimization model of truck utilization to minimize outbound logistics cost. *In Proceedings of the 5th International Conference on Industrial and Business Engineering (pp. 62-66)*.
- Mitchell, S., O'Sullivan, M., & Dunning, I. (2011). PuLP: A Linear Programming Toolkit for Python. Optimization Online.
- Scavuzzo, L., Aardal, K., Lodi, A., & Yorke-Smith, N. (2024). Machine Learning Augmented Branch and Bound for Mixed Integer Linear Programming. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.05501>.
- Yang, X., & Hajem, A. (2020). A column generation-based decomposition and aggregation approach for combining orders in inland transportation of containers. *OR Spectrum*, 42(1), 261-296.

Apéndice A

Código Python

```

import pulp as pl
import pandas as pd

file_path = "Input.xlsx"
# Importar solo las hojas requeridas
resumen_df = pd.read_excel(file_path, sheet_name="Resumen")
clientes_df = pd.read_excel(file_path, sheet_name="Clientes")
flota_df = pd.read_excel(file_path, sheet_name="Flota")
# Load weight for transport order p [ton]
T_p = dict(zip(resumen_df["Pedido"], resumen_df["TON"]))
clientes_df = clientes_df.fillna(0)
resumen_df = resumen_df.fillna("")

# --- Sets ---
# Transport order
Pedidos = resumen_df["Pedido"].tolist()
# Truck types
Camiones = ["Jumbo", "Cama-baja", "Cama-baja-spot"]
# Pallet type
Pallet = ["Biela", "Lata"]
# Load mix
Mix = ["OW", "Ret", "Mix"]

# --- Parameters ---
# Load weight capacity for truck type c [ton]
V_c = {"Jumbo": 30, "Cama-baja": 30, "Cama-baja-spot": 30}
# Fleet available for truck type c [un]
F_c = dict(zip(pd.read_excel(file_path, sheet_name="Flota") ["Camion"],
pd.read_excel(file_path, sheet_name="Flota") ["Disponibile"]))
# Load weight for transport order p [ton]
T_p = dict(zip(resumen_df["Pedido"], resumen_df["TON"]))
# Load volume for transport order p [hl]
H_p = dict(zip(resumen_df["Pedido"], resumen_df["HL"]))
# Client for transport order p
D_p = dict(zip(resumen_df["Pedido"], resumen_df["Destino"]))
# Load mix type for transport order p
M_p = dict(zip(resumen_df["Pedido"], resumen_df["Mix"]))

```

```

# Load mix for transport order p and pallet type pa [un]
V_ppa = {
    row["Pedido"]: [row["Biela"], row["Lata"]]
    for _, row in resumen_df.iterrows()
}

# Capacity of truck type c regarding mix m for pallet type pa [un]
Ca_cmpa = {
    "Jumbo": {"OW": [0, 28], "Ret": [20, 0], "Mix": [10, 14]},
    "Cama-baja": {"OW": [0, 24], "Ret": [24, 0], "Mix": [12, 16]},
    "Cama-baja-spot": {"OW": [0, 20], "Ret": [26, 0], "Mix": [16, 12]}
}

# Transport cost for each client and truck type c
CT_dc = {
    row["Cliente"]: {
        "Jumbo": row["Tarifa-Jumbo"],
        "Cama-baja": row["Tarifa-CB"],
        "Cama-baja-spot": row["Tarifa-CB"] # mismo valor que CB
    }
    for _, row in clientes_df.iterrows()
}

# Transport cost pof each transport order
CT_pc = {
    p: CT_dc[D_p[p]]
    for p in Pedidos
}

# --- Variables ---
X = pl.LpVariable.dicts("X", (Pedidos, Camiones), cat=pl.LpBinary)
S_peso_p = pl.LpVariable.dicts("S_peso_p", Pedidos, lowBound=0, upBound=1, cat=pl.LpContinuous)
S_pallet_p = pl.LpVariable.dicts("S_pallet_p", Pedidos, lowBound=0, upBound=1, cat=pl.LpContinuous)

# --- Problem ---
model = pl.LpProblem("Asignacion_Productos", pl.LpMinimize)

# --- Objective function---
# Minimize total costs
#model += pl.lpSum(CT_pc[p][c] * X[p][c] for p in Pedidos for c in Camiones)
alpha = 100 # peso
beta = 30 # pallets

model += pl.lpSum(CT_pc[p][c] * X[p][c] for p in Pedidos for c in Camiones) \

```

```

+ alpha * pl.lpSum(S_peso_p[p] for p in Pedidos) \
+ beta * pl.lpSum(S_pallet_p[p] for p in Pedidos)
# --- Restrictions ---
# Weight capacity restriction for each truck type
for c in Camiones:
    for p in Pedidos:
        model += T_p[p] * X[p][c] <= V_c[c] + 2
# (2)(3) Capacity restriction for pallet types
for p in Pedidos:
    for c in Camiones:
        for i, pa in enumerate (Pallet):
            model += (
                X[p][c] * V_ppa[p][i] <= Ca_cmpa.get(c, {}).get(M_p[p], [0, 0])[i]
            )
# Subutilización por Big-M
M = 1
for p in Pedidos:
    for c in Camiones:
        # Peso
        model += S_peso_p[p] >= 1 - (T_p[p] / V_c[c]) - (1 - X[p][c]) * M
        # Subutilización de pallets
        pallet_util = 0
        for i, pa in enumerate (Pallet):
            cap = Ca_cmpa[c][M_p[p]][i]
            if cap > 0:
                pallet_util += V_ppa[p][i] / cap
        model += S_pallet_p[p] >= 1 - pallet_util - (1 - X[p][c]) * M
# (4) Assignment, each order gets assigned to a unique truck type
for p in Pedidos:
    model += pl.lpSum(X[p][c] for c in Camiones) == 1
# (5) Assignment capacity, it can only assign as many trucks as available
for c in Camiones:
    model += pl.lpSum(X[p][c] for p in Pedidos) <= F_c[c]

# --- Resolve ---
model.solve(pl.PULP_CBC_CMD(msg=True))

# --- Results ---
print("Status:", pl.LpStatus[model.status])
for p in Pedidos:

```

```

for c in Camiones:
    if X[p][c].varValue > 0:
        print(f'X[{p}, {c}] = {X[p][c].varValue}')

print("\nUtilización por pedido:")
for p in Pedidos:
    # Encontrar el camión asignado
    cam_asignado = [c for c in Camiones if X[p][c].varValue > 0.5]
    if not cam_asignado:
        print(f'Pedido {p}: no asignado')
        continue
    c = cam_asignado[0]
    # Subutilización por peso
    subtil_peso = 1 - T_p[p] / V_c[c]
    # Subutilización por pallets
    subtil_pallet = 0
    for i, pa in enumerate(Pallet):
        capacidad = Ca_cmpa[c][M_p[p]][i]
        if capacidad > 0:
            subtil_pallet += 1 - V_ppa[p][i] / capacidad
        else:
            subtil_pallet += 0
    subtil_pallet /= len(Pallet)
    print(f'Pedido {p} asignado a {c}: {100-subtil_peso*100:.1f}% peso, {100-subtil_pallet*100:.1f}% pallets')
    print(f'Pedido {p} tiene una tarifa para llegar a {D_p[p]}: {CT_pc[p][c]:.1f} dólares")

# --- Others ---
print("\nEficiencia por pedido:")
for p in Pedidos:
    costo = sum(CT_pc[p][c] * X[p][c].varValue for c in Camiones)
    eficiencia = costo / H_p[p]
    print(f'Pedido {p}: {eficiencia:.2f} [USD/HL]')

```