



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Modelo para la planificación eficiente del transporte forestal:

Un análisis del transporte bimodal de trozas en
Uruguay.

Montevideo, Uruguay
Agosto 2021

Autores:

- Lara Caraballo - 4.793.161-8
- Facundo Correa - 4.840.377-1
- Alejandro Cordatti - 4.573.614-5

Tutor: Pedro Piñeyro (INCO)
Co-Tutor: Víctor Viana (INCO-CUT)

Resumen

El presente trabajo aborda el uso de modelos de programación lineal para la gestión y planificación de problemas de ruteo y asignación de viajes.

La planificación del transporte es una característica fundamental para el correcto funcionamiento de las operaciones forestales. Actualmente Uruguay se encuentra en un constante crecimiento y desarrollo en el sector forestal, impulsado por la instalación de múltiples plantas de celulosa en los últimos años. Esto ha puesto al límite la infraestructura vial actual, viéndose necesario un análisis de mejora de las mismas o el impulso de nuevas estrategias de trabajo.

Con el fin de obtener una representación fehaciente del rubro, es que se caracterizan los distintos tipos de transporte de trozas, contextualizándolo con la situación actual de Uruguay en cuanto a costos e infraestructura, integrando el uso de carreteras y vías férreas en una red bimodal. Además, se estudian las zonas forestadas representativas, así como los principales consumidores.

Mediante un modelo matemático se logra representar de forma simplificada el abastecimiento de los puntos de demanda desde las zonas forestadas utilizando la infraestructura previamente mencionada, obteniendo así la asignación óptima de camiones y trenes a cada trayecto para un cierto período de tiempo, minimizando los costos operativos.

Se consideraron múltiples escenarios con el fin de analizar el comportamiento del sistema compuestos por los diferentes tipos de nodos y de medios de transporte, variando diferentes aspectos de la operación como el agregado de nuevas rutas, ampliación de la demanda manteniendo la infraestructura, casos puntuales de extrema demanda, disminución de diferentes costos, entre otros.

Los resultados que se obtuvieron confirman la falta de competitividad que hoy en día tiene el sistema ferroviario, ya sea por los costos de transporte, los costos de carga y descarga, estados de las vías y su poca densidad. Queda abierta la posibilidad del desarrollo de nuevas investigaciones que complementen el trabajo como por ejemplo la integración del transporte fluvial al modelo bimodal, o también realización de un análisis de ubicación estratégica de nuevos centros de acopios.

Palabras claves: Planificación, Transporte Forestal, Programación Matemática, Optimización.

Keywords: Planning, Forest Transportation, Mathematical Programming, Optimization.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a nuestros tutores Pedro Piñeyro y Victor Viana, quienes dedicaron su tiempo y conocimientos trabajando con nosotros, apoyándonos y guiándonos en el proceso de este proyecto.

Además, a la Asociación de Transportistas Forestales por acceder a realizar la encuesta, la cual tuvo un gran valor para nuestro trabajo. A todas las empresas e interesados que de alguna forma colaboraron con información relevante para poder llevar adelante los análisis.

Por último, agradecemos a nuestras familias y amigos, quienes nos acompañaron y apoyaron durante la realización del proyecto y a lo largo de toda la carrera.

Índice

1. Introducción.....	13
2. Estado del arte	15
2.1. Contexto.....	15
2.1.1. Problemas a nivel mundial	16
2.2. Situación actual en Uruguay.....	20
2.2.1. Posicionamiento de la Industria Forestal en Uruguay.....	21
2.2.2. Impacto del transporte forestal en la industria consumidora de madera	22
2.2.3. Infraestructura.....	24
2.2.4. Distribución geográfica de plantaciones	36
2.2.5. Principales consumidores	37
2.3. Principales limitantes en Uruguay	40
2.4. Actores involucrados y su rol en la industria forestal	41
2.4.1. Productores.....	41
2.4.2. Consumidores.....	41
2.4.3. Transportista	42
2.5. El problema del transporte forestal.....	43
2.5.1. Motivación	43
2.5.2. Modelado	43
2.5.3. Sistemas de soporte de decisiones (DSS)	53
3. Marco teórico	57
3.1. Planificación del transporte	57
3.2. Transporte multimodal.....	58
3.3. Transporte de trozas	60
4. Definición del Problema.....	65
4.1. Objetivo del proyecto.....	65
4.2. Descripción del caso.	65
4.3. Modelado	71
5. Modelo Matemático	73
5.1. Objetivo.....	73
5.2. Formulación	73
5.3. Validación del modelo	77
5.3.2. Casos de estrés	81
6. Relevamiento y generación de datos.....	83
6.1. Fuentes de información.....	83

6.2.	Selección de nodos.....	83
7.	Experimentación numérica	89
7.1.	Análisis de escenarios.....	89
8.	Conclusiones.....	107
9.	Referencias.....	109
10.	Anexos	118
10.1.	Anexo I- Validación del modelo.	118
10.2.	Anexo II - Matrices de datos	128

Índice Tablas

•	Tabla 2.1 - Costos de transporte desde cosecha a industria por País....	16
•	Tabla 2.2 - Impacto Climático por Región.....	17
•	Tabla 2.3 Fragmento de ranking de redes viales.....	18
•	Tabla 2.4 - Distancia media de traslado por Región.....	20
•	Tabla 2.5 – ICC y razón de sinuosidad para localidades seleccionadas del Uruguay.....	26
•	Tabla 2.6 Comparativa de eficiencia.....	32
•	Tabla 2.7 – Velocidades máximas y carga por eje.	34
•	Tabla 2.8- Empresas relacionadas al rubro forestal.	37
•	Tabla 2.9- Destino de principales exportaciones.	39
•	Tabla 2.10 - Principales consumidores de productos forestales.....	42
•	Tabla 2.11- Artículos con contenido relacionado a problemas de ruteo y sus respectivas estrategias de resolución.....	54
•	Tabla 4.1 - Clasificación y dimensión de la red vial uruguaya.....	67
•	Tabla 4.2 - Dimensión de red ferroviaria según tramo y capacidad de carga.....	68
•	Tabla 4.3 - Resultados de encuesta realizada a transportista sobre impacto en actividades.....	70
•	Tabla 5.1 - Resumen resultado Caso de prueba 1.....	78
•	Tabla 5.2 - Resumen resultado Caso de prueba 2.....	79
•	Tabla 5.3 - Resumen resultado Caso de prueba 5.....	80
•	Tabla 5.4 - Valores relevantes en casos de pruebas.....	81
•	Tabla 5.5 - Resumen resultado Caso de prueba estrés 2.....	81
•	Tabla 5.6 - Valores relevantes en casos de pruebas de estrés.....	82
•	Tabla 6.1 - Consumo de madera anual en aserraderos por localidad.....	84
•	Tabla 6.2 - Destinos seleccionados con su consumo estimado de madera (m ³) y diario (camiones).....	85
•	Tabla 6.3 - Selección de centros de acopios.....	86
•	Tabla 7.1- Resumen de resultados del problema caso de estudio 1 con el conjunto de orígenes 1.....	91
•	Tabla 7.2 Resumen de resultados del problema caso de estudio 2 con el conjunto de orígenes 1.....	92

•	Tabla 7.3 Resumen de resultados del problema caso de estudio 3 A....	94
•	Tabla 7.4 Resumen de resultados del problema caso de estudio 3 B....	95
•	Tabla 7.5 - Resumen de resultados para el caso de estudio 4.....	97
•	Tabla 7.6 - Resumen de variación de costos para el caso de estudio 4..	98
•	Tabla 7.7 - Resumen de resultados para el caso de estudio 5 - escenario 30%.....	99
•	Tabla 7.8 - Resumen de resultados para el caso de estudio 5 - escenario 60%.....	100
•	Tabla 7.9 - Resumen de resultados para el caso de estudio 6.1.3-A con T=10.....	101
•	Tabla 7.10 - Resumen de resultados para el caso de estudio 6 con demanda extrema en D4.....	102
•	Tabla 7.11 - Resumen de resultados para el caso de estudio sin trenes.	103
•	Tabla 7.12 - Resumen de resultados para la variación costos USD/ton.km en la operación transporte en tren.....	103
•	Tabla 7.13 -Resumen de resultados para la variación costos USD/ton.km y ampliación capacidad del tren.....	104
•	Tabla 7.14 -Resumen de resultados para la variación costos USD/ton cargada.....	104

Índice de Figuras

•	Figura 2.1 Indicador del desempeño logístico: regiones del mundo.....	18
•	Figura 2.2 Densidad de red vial total - Fuente: Inversiones en infraestructura en América Latina.....	19
•	Figura 2.3 - Componente del PBI asociado a fabricación de papel y productos de papel y cartón.....	21
•	Figura 2.4- Precio (en pesos) de referencia por km transportado.....	23
•	Figura 2.5 - Comparativa ITPC con otras variables de interés.....	23
•	Figura 2.6 - Indicadores de Accesibilidad y Densidad de la Red.....	25
•	Figura 2.7 -Transito promedio por ruta.....	28
•	Figura 2.8- Evolución de la carga transportada por la Red Vial Nacional.	29
•	Figura 2.9 Ejemplo incremento de tiempo.....	30
•	Figura 2.10 – Ejemplo implementacion ASICAM	31
•	Figura 2.11 - Ilustración del transporte principal de madera desde el monte hasta instalaciones de almacenamiento o molinos utilizando camiones, trenes y embarcaciones.....	32
•	Figura 2.12 -Mapa Ferroviario del Uruguay.....	33
•	Figura 2.13 – Zonas de prioridad forestal.....	36
•	Figura 2.14 -Fuente: Geoportal Forestal del Uruguay.....	38
•	Figura 2.15 - A la derecha dos flujos directos - A la izquierda backhaulage tour.....	46
•	Figura 2.16 – Diagrama procedimiento FlowOpt.....	46
•	Figura 2.17 – Clasificación de métodos heurísticos.....	50
•	Figura 2.18 – Diagrama de heurística de los ahorros.....	50
•	Figura 3.1 - Porcentaje del PBI asociado al comercio internacional.....	59
•	Figura 3.2 - Operación del comercio internacional utilizando múltiples medios de transporte.....	59
•	Figura 3.3 - Sistema simple de gravedad.....	61
•	Figura 3.4 - Movimiento de trozas mediante cables propulsados.....	61

•	Figura 3.5 - Carga ferroviaria en Uruguay.....	62
•	Figura 3.6 - Camión Tritren.....	62
•	Figura 3.7 - Transporte de madera por flotación.....	63
•	Figura 4.1 - Evolución de superficie plantada.....	66
•	Figura 4.2 - Extracción de madera por destino final.....	66
•	Figura 4.3 - Red vial territorio uruguayo.....	67
•	Figura 4.4 - Red ferroviaria de Uruguay.....	68
•	Figura 5.1 - Representación gráfica del problema.....	75
•	Figura 5.2 - Diagrama de flujo caso de prueba 1.....	79
•	Figura 5.3 - Diagrama de flujo caso de prueba 2.....	80
•	Figura 6.1 - Localización de aserraderos y plantas de celulosa.....	84
•	Figura 6.2 - Geolocalización de los orígenes, destinos y centros de acopio.....	86
•	Figura 7.1 - Ubicación de centros de acopio y destinos.....	90
•	Figura 7.2 - Ubicación de centros de acopio añadidos sobre la base ferroviaria uruguaya.....	92
•	Figura 7.3 - Ubicación de centros de acopio y destinos para el caso 6.3	94
•	Figura 7.4 - Puntos representativos por zona.....	96
•	Figura 7.5 - Porcentaje promedio de ahorro por el uso de tritrenes o “Longer and Heavier Vehicle”.....	99
•	Figura 7.6 Fila de camiones a la espera de cargar el buque Mineral Gent.....	101

Glosario

- **Acopio:** Zonas de acopio de producto a pequeña escala, usualmente ubicadas dentro de los montes para su posterior extracción.
- **ADT:** Toneladas secadas al aire (10% humedad).
- **AFE:** Administración de Ferrocarriles del Estado.
- **ANIU:** Academia Nacional de Ingeniería Uruguay.
- **ANP:** Administración Nacional de Puertos.
- **BCU:** Banco Central de Uruguay.
- **Bin-picking:** es una meta disciplina que combina varias disciplinas, como análisis de escena, reconocimiento de objetos, localización de objetos, planificación GRASP y planificación de ruta [1].
- **Bioma:** Región geográfica delimitada por la existencia de determinada flora, fauna y condiciones climáticas.
- **BPS:** Banco de Previsión Social.
- **Centro de acopio:** Zonas de acopio de producto a gran escala, usualmente ubicadas en puntos neurálgicos de flujo de producto.
- **CINOI:** Centro de Innovación en Organización Industrial.
- **Cluster:** Grupo.
- **DSS:** Sistema de Soporte a las Decisiones.
- **ENCE:** Empresas Nacionales de Celulosa de España.
- **FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- **GLPK:** GNU Linear Programming Kit.
- **GRASP:** Greedy Randomized Adaptive Search Procedures.
- **Heurística:** Algoritmo hecho a la medida del problema que se quiere tratar.
- **Hub:** Centro de actividad.
- **ICC:** Índice de calidad de la comunicación.

- **INALOG:** Instituto Nacional de Logística.
- **IPC:** Índice de Precios al Consumo.
- **Metaheurística:** “Heurísticas de nivel más alto de abstracción” [2] guían el proceso de búsqueda de soluciones, explorando el espacio de soluciones evitando caer en óptimos locales.
- **MTOP:** Ministerio de Transporte y Obras Públicas.
- **Metros estéreos:** Unidad de medida que contempla el volumen ocupado por una pila de madera teniendo en cuenta el aire contenido en la misma.
- **Monte:** Zona forestada.
- **ODT:** Toneladas secadas en horno (0% humedad).
- **Optimización combinatoria:** Problemas de optimización en donde las variables de decisión son enteras.
- **PBI:** Producto Bruto Interno.
- **SELF:** Servicio Logístico Ferroviario.
- **SPF:** Sociedad de Productores Forestales.
- **TPDA:** Tránsito promedio diario anual.
- **Troza:** Tronco aserrado.
- **VRP:** Problema de rute de vehículos.

1. Introducción

En el presente informe se presenta el trabajo realizado en busca de comprender la situación del transporte forestal en el territorio uruguayo, con el objetivo de generar una planificación para el traslado de trozas mediante la combinación de múltiples medios de transporte.

El término transporte forestal es muy amplio, involucrando aspectos del movimiento de productos en cualquier etapa de la cadena productiva forestal. En el informe se presenta lo que refiere a la carga y transporte de trozas acopiadas dentro de los montes hasta los principales puntos de consumo nacional, entre los que se destacan las plantas productoras de celulosa, los aserraderos y los puertos como puntos de exportación directa.

Dentro de los múltiples medios aptos para el traslado de este tipo de producto se encuentran el transporte por carretera, el transporte por tren, el transporte marítimo y fluvial.

Es por esta diversidad de medios de transporte sumado a las múltiples características geográficas, climáticas y de infraestructura que presentan las regiones en donde se realiza esta actividad a gran escala, que existen una amplia variedad de trabajos académicos que buscan analizar oportunidades de mejora dentro del rubro.

En este trabajo se profundiza sobre la correcta planificación y distribución del abastecimiento de las trozas, obteniendo así una solución que se adapta a las características del territorio uruguayo tanto en la situación actual como en un futuro próximo.

La principal motivación para la realización de este estudio es debido al alto impacto que tiene hoy en día el constante incremento de la cadena forestal en el país, donde la infraestructura actual se ve saturada, a la par de estar siendo mejorada y ampliada. En un trabajo reciente realizado por ANIU se expresa que “El país pasó de transportar 5.000.000 toneladas del agro en 2002 a más de 20.000.000 de toneladas por año en la actualidad sobre la infraestructura de caminos nacionales y departamentales” [3]. Este aumento se debió a la incorporación de la producción forestal al sistema.

Como objetivos para este trabajo, en primer lugar, se propuso realizar una revisión de la literatura sobre la planificación de transporte de productos forestales, sobre todo en países con un desarrollo fuerte en esa industria, confeccionando un documento de estado del arte, prestando especial atención a las variantes investigadas, los modelos matemáticos propuestos, así como los procedimientos de resolución y los resultados obtenidos.

Hasta donde se logró relevar, no se encontraron estudios relacionados a la temática para nuestro país donde se analice el uso de múltiples medios de transporte para generar una óptima planificación. Es por ello que el siguiente análisis espera ser un disparador de futuras investigaciones, que permitan apoyar a los involucrados dentro de este rubro en las decisiones de mejora y permita generar una industria más eficiente.

En una segunda etapa se tuvo como objetivo proponer un modelo matemático que sirva de base para el estudio de transporte de carga forestal, que pueda ser utilizado como herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la optimización de recorridos y frecuencias para el transporte de la madera, desde los diferentes lugares de origen hacia los posibles destinos. Este modelo debe considerar también cumplir con la demanda existente, minimizar los costos de los fletes, evitar la congestión de las rutas y ampliar alternativas al sistema tradicional de transporte.

Por lo anterior se creó un modelo matemático que sirvió como herramienta de análisis de diversos escenarios de estudio planteados. Con base en programación lineal, se resolvió utilizando GLPK, resultando la salida del mismo en la asignación de viajes entre los distintos nodos de nuestra red. Se entiende como nodo a la representación de un punto geográfico dentro de una red que puede consumir, almacenar o ser generador de oferta de producto.

Además, mediante diferentes análisis de escenarios se proponen distintas líneas de acción para mejoras a la situación actual, y que esperamos sirvan de apoyo a la toma de decisión sobre posibles inversiones en infraestructura como también la ubicación de nuevos puntos estratégicos dentro de la red.

Los resultados que se obtienen son consistentes con lo que se visualiza en la actualidad en lo que refiere a competitividad de los diferentes medios de transporte. También se encuentran puntos de interés en los cuales se ve viable el análisis de inversiones.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: Sección 2- Estado del Arte, donde de introduce en problemas de transporte y estrategias para su resolución, Sección 3 - Marco Teórico, el cual brinda un contexto actualizado del sector, Sección 4 - Definición del problema, en donde se define el problema y su alcance, Sección 5 - Modelo Matemático, donde describe el modelo matemático generado. Los datos utilizados y cómo se obtuvieron están descritos en la Sección 6, luego en la Sección 7 se realiza el análisis de los resultados obtenidos juntos con los análisis de sensibilidad. Luego una Sección 8 con las principales conclusiones, y para finalizar la bibliografía y el anexo en las Secciones 9 y 10 respectivamente.

2. Estado del arte

Esta Sección resume el relevamiento de información referente a múltiples aspectos del transporte y del rubro forestal.

Por un lado se obtuvo información sobre los diferentes problemas a los que se enfrentan quienes trabajan en el rubro. También se observó la importancia que tiene la infraestructura vial en lo que es el nivel de desarrollo de las industrias y posicionamos a nuestro país en comparación con otros países.

Por otro lado también se releva quiénes son hoy en día los principales productores de madera y sus principales consumidores, como también a que rubro productivo se destina esta madera. Luego se analizan las diferentes tecnologías e investigaciones realizadas para mejorar la red logística y obtener mejores resultados en lo que refiere a la planificación del transporte.

2.1. Contexto

El transporte se lo podría representar como el conjunto de procesos por los cuales la materia prima es trasladada a las diversas estaciones del proceso industrial, en las cuales se realiza algún tipo de transformación, agregando valor, preparando esta materia prima para el siguiente proceso o incluso ya dándole la forma de producto final. El transporte también está involucrado en la distribución del producto final hacia su consumidor. Por lo general estos dos tipos de transporte, tienen modalidades y lógicas diferentes, ya sea por volúmenes transportados como por estado físico del producto que requiera una modalidad de transporte con un acondicionamiento especial, entre otras.

El siguiente estudio tiene como foco el transporte forestal. Una rama del transporte que tiene como materia prima la madera extraída de las plantaciones forestales.

Se puede decir que el transporte forestal comienza con la silvicultura, en lo que respecta al traslado de los plantines desde viveros a los montes. Luego de la cosecha, la madera es transportada. Dependiendo del producto final deseado, se identifican cuatro ramas de producción, celulósica-papelera (celulosa, papel, cartón), madera sólida (aserraderos, chips), energía (leña, biomasa) y química (resinas, aceites) [4].

La infraestructura requerida para poder llevar a cabo el transporte es amplia y variada. Por un lado, es necesario contar con carreteras, vías férreas y puertos adecuados para poder manipular y trasladar esta materia prima. El no contar con esta infraestructura hace que se generen ciertas restricciones a la hora de optimizar el uso de estas. Por otra parte, se cuenta con infinitas configuraciones de cargas y descargas dependiendo de la rama de producción y las necesidades y estrategias de cada industria. Por lo mencionado anteriormente nos encontramos frente a un problema de asignación y gestión de medios de transporte, puntos de carga y descarga y selección de caminos óptimos importante.

En este rubro, el transporte corresponde a uno de los sectores con mayores costos asociados a la producción[5].

En la Tabla 2.1 observamos en términos generales, el costo en porcentaje en el que incide el transporte desde la cosecha a la industria en algunas regiones de referencia.

Tabla 2.1 - Costos de transporte desde cosecha a industria por País (En base a costos operativos)

País	% de costo Operativo
Australia	18-25
Sur de los Estados Unidos	25-35
Suecia	30-40
Canadá	36
Nueva Zelanda	40
Chile	≥45

Fuente: Planning methods and decisions support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review [5].

2.1.1. Problemas a nivel mundial

A continuación, se presentan diversos problemas a los cuales se ha enfrentado el sector forestal en el mundo.

2.1.1.1. Climas adversos, con períodos de inactividad.

Países con climas extremos como son Canadá, Finlandia, Suecia o Chile, año a año se ven interrumpidos por ejemplo por inviernos extensos y muy fríos, típicos de su ubicación geográfica.

Analizando los diferentes aspectos climáticos con los que se puede enfrentar un país o región, tenemos por un lado las zonas que son lluviosas todo el año o por algún cierto período de tiempo. En estos casos lo que sucede es que el conductor deberá realizar sus trayectos de forma más cuidada y lenta. Esto debido a que el asfalto mojado es más peligroso, aumentando las probabilidades de accidentes. También la visibilidad se ve limitada. Como se mencionaba, las consecuencias de este tipo de situaciones es el necesitar un mayor tiempo de traslado por cada trayecto/camión

El segundo aspecto a tener en cuenta es las épocas de nevada, las misma se pueden extender en algunos días o en varias semanas dependiendo la región. Claramente esto trae diversos problemas como:

- Rutas que antes eran transitables, por un cierto período del año se encuentran clausuradas por la nieve.
- Cambios en los recorridos de forma no programada por rutas momentáneamente inhabilitadas.

Esto implica que los modelos, programas o formas de gestionar la programación del transporte forestal, se vean impactados por estas restricciones que aparecen en un período particular del año.

En la Tabla 2.2 podemos ver cómo afecta el clima según las regiones [5].

Tabla 2.2 - Impacto Climático por Región

País	Impacto Climático
Chile	Temporada de lluvias que requieren carreteras de mejor calidad para mantener el transporte.
Estados Unidos	Temporada de lluvias con episodios de lluvias regionales suspenden temporalmente el transporte
Canadá	El invierno que requiere remoción de nieve y el período de descongelación suspenden el transporte por 6-8 semanas
Suecia	El invierno que requiere remoción de nieve y el período de descongelación suspenden el transporte de 1 a 4 semanas
Austria	Los períodos lluviosos o las fuertes nevadas suspenden temporalmente el transporte

Fuente: Planning methods and decisions support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review [5]

2.1.1.2. Infraestructura de rutas

Como se comenta al inicio del apartado dos, la infraestructura de rutas juega un papel muy importante. Esto es así dado que de esta depende a qué lugares vamos a tener acceso, qué tan sencillos y rápidos serán nuestros traslados, cuál es el riesgo al que nos enfrentamos cuando se conduce en rutas poco mantenidas, entre otras.

Por lo tanto ¿Qué analizamos cuando queremos determinar la adecuación de las rutas?

Principalmente se debe analizar qué porcentaje de las rutas se encuentran asfaltadas y además que permita el transporte de camiones de carga de alto kilaje. Además del porcentaje se debe tener en cuenta la condición de las mismas, la señalización e iluminación.

Cada gobierno debe determinar un porcentaje de su PBI para el mantenimiento de las rutas que son utilizadas por todo tipo de vehículos, no solo de carga. También existe la posibilidad de contar con colaboraciones público-privadas de forma de que el gasto público disminuya en lo referente a las mejoras en infraestructura, dado que estas inversiones son grandes.

En 2018 El Foro Económico Mundial [6] realizó un estudio mundial en donde determinó un ranking de los países con las mejores redes viales. En la Tabla 2.3 se deja un fragmento con posiciones y países relevantes para el trabajo.

Tabla 2.3 Fragmento de ranking de redes viales

POSICIÓN	PUESTO	PUNTUACIÓN
1	Singapur	6,5
2	Países Bajos	6,4
3	Suiza	6,3
4	Hong Kong	6,1
5	Japón	6,1
15	Estados Unidos	5,5
19	Alemania	5,3
20	Finlandia	5,3
27	Chile	5,2
31	Canadá	5
44	China	4,6
55	Italia	4,4
90	Uruguay	3,7
91	Argentina	3,6
114	Brasil	3
141	Chad	1,9

Fuente: The Global Competitiveness Report [6]

Uruguay ocupa un lugar intermedio en la Tabla de ranking mundial, pero obtiene una posición privilegiada si se compara con la región.

Desde la perspectiva de la logística la infraestructura es solo uno de los factores del desempeño del sector transporte (de carga), se observa que, para América Latina, este elemento es aún uno de los principales responsables de los cuellos de botella en la cadena logística [7].

Indicador del desempeño logístico: las regiones del mundo

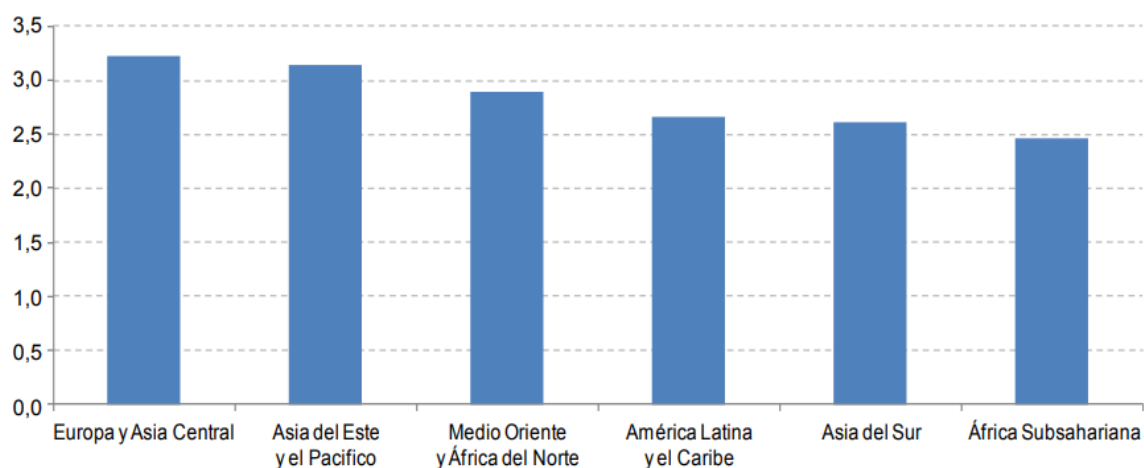


Figura 2.1 Indicador del desempeño logístico: regiones del mundo

Fuente: Inversiones en infraestructura en América Latina [7]

Si se analiza ahora el porcentaje antes mencionado de rutas y vías de ferroviarias aptas para transporte de carga, encontramos la Figura 2.2 que muestra la densidad de rutas en un territorio dado y donde se ve claramente la pobreza en infraestructura vial en América Latina y nos hace dar cuenta de todo lo que hace falta para mejorar la logística vial.

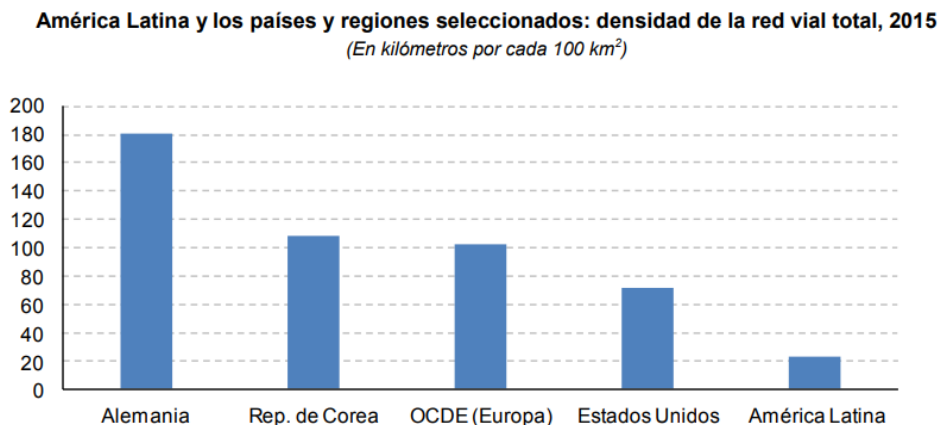


Figura 2.2 Densidad de red vial total - Fuente: Inversiones en infraestructura en América Latina [7]

Otro aspecto importante son los puentes. Con estos sucede algo similar en lo referente al peso, si los puentes no son aptos para el paso de camiones, estos deben realizar recorridos más extensos para llegar al mismo punto.

En el caso del transporte marítimo, contar con un puerto eficiente es esencial para mejorar la competitividad de un país. Para mantener una posición competitiva de los mercados, las naciones necesitan conocer los factores que condicionan la eficiencia de sus puertos y establecer comparaciones continuas del grado de eficiencia entre los puertos que integran el sector nacional y también con los puertos de otras regiones [8].

Al 2018, los 50 mayores puertos del mundo han aumentado su movimiento de contenedores un 4,6% anual, llegando a transportar 500 millones de TEU's (unidad de medida de un contenedor estándar). Los puertos asiáticos incluyendo India y Medio Oriente abarcan el 78% de la carga mundial, frente a un 12,4% y un 6,6% entre los puertos de Europa y América del Norte [9].

Un puerto con una infraestructura adecuada debe contar con calados lo suficientemente profundos según el tipo de barcos que recibe, a mayor calado barcos con mayor capacidad podrán ingresar, además debe contar con equipos especializados que apoyen la navegación de los barcos que se encuentran entrando y saliendo, además de la maquinaria adecuada para su manipulación. Como complemento un puerto puede contar con carreteras especiales de ingreso así como líneas ferroviarias y ríos de navegación interna.

Aparte de los que es el transporte por vía marítima mediante barcos de carga, también se puede encontrar el transporte mediante el uso de la corriente de ríos, es decir en aquellos ríos que tiene un caudal suficiente y una cierta corriente, mediante flotación, se realiza el transporte dirigido por los llamados gancheros en la antigüedad y en la actualidad por botes.

2.1.1.3. Distancias entre proveedor y cliente

Lo primero que se debe analizar en este punto es el poder determinar cuáles son los costos del transporte por carretera y cómo la distancia afecta los mismos.

Estos costos son visiblemente mayores cuando el traslado se realiza en camión, comparándolo con el transporte en tren o barco.

Con la intención de ser más gráficos, existe una fórmula comunmente conocida en el rubro que permite realizar una estimación bastante básica de los costos de transporte o de cómo estimar un presupuesto. Esta fórmula es recomendada como una estimación inicial ya

que existen otras variables como el estado del camión que puede hacer que los valores cambien.

La fórmula es $T = CF + CV(D)$, donde CF son los costos fijos, CV los variables y D la distancia a recorrer del viaje que cotiza. CF , suma el costo total relacionado con los sueldos y salarios de la dirección y gerenciamiento, seguros, impuestos, derechos e incluye el gasto de los servicios domésticos que utilizan, entre otros. CV , suma todos aquellos gastos que incurren durante la prestación del servicio de transporte, por ejemplo, combustible, mantenimiento, llantas, gastos de camino, operador, entre otros [10].

Analizando esta fórmula es sencillo visualizar cómo influyen de forma importante los kilómetros a realizar. Como conclusión, será siempre una mejor alternativa contar con proveedores cercanos.

La creación de depósitos intermedios es una buena estrategia para reducir estas distancias de forma que varios proveedores y clientes centren en estos la materia prima.

En la Tabla 2.4 se muestra un promedio de las distancias que recorren los transportistas en países de referencia en el rubro.

Tabla 2.4 - Distancia media de traslado por Región

	Chile	Estados Unidos	Canadá	Suecia	Austria	Nueva Zelanda
Distancia media de traslado	60-120 Km	130 Km	145 Km	90 km	50-90 Km	50-60 Km

Fuente: Planning methods and decisions support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review [5]

2.1.1.4. Tráfico de camiones de madera en carretera

Desde el punto de vista de la mayoría de la población, los camiones de madera son la cara visible de la industria forestal. Puede llamar la atención también el número de accidentes o demoras en el tránsito que los involucran. Pocas personas negarían estar de acuerdo con la reducción o mejor distribución de los mismos, por ejemplo, al tomar decisiones sobre el aumento de los volúmenes de madera a mover [11].

Se encontró que algunas características de la carretera, particularmente los niveles generales de tráfico explican el patrón de los resultados de accidentes en los segmentos de autopista [12].

2.2. Situación actual en Uruguay

En esta Sección se presenta un análisis de la situación uruguaya en el rubro forestal, comenzando con una presentación de aspecto histórico, nombrando las políticas de estado que fomentaron la inversión extranjera. Seguidamente, se analizan los aspectos económicos, los costos y el aporte del rubro al PBI nacional. Finalizando esta Sección, se presenta la infraestructura asociada al transporte, posicionándose frente a la de la región y el mundo.

2.2.1. Posicionamiento de la Industria Forestal en Uruguay

Uruguay, ubicado en el sureste de América del sur, es el segundo país más pequeño en extensión territorial en ese continente. Con una estructura económica muy enfocada a los commodities, presentó al 2019 un PBI de 56,05 mil millones de dólares donde un 3,14% de este valor corresponde al sector de transporte y almacenamiento [13].

En este ámbito, uno de los rubros que ha experimentado mayor crecimiento, es el de fabricación de papel, productos de papel y cartón, llegando a aportar al PBI unos 27,7 mil millones en 2018, lo que en términos comparativos representa un 1,5 % del total. Esto por sí sola, sin tener en cuenta la cadena de abastecimiento, procesos de silvicultura, extracción de madera y demás actividades que brindan apoyo o resultan de este rubro.

Este crecimiento se ha dado mayormente por la presencia de inversiones extranjeras, comenzando en 2003 con el anuncio de la instalación de dos plantas de fabricación de celulosa sobre el Río Uruguay por parte de las empresas Botnia (Oy Metsä-Botnia Ab), de origen finlandesa, y ENCE (Empresa Nacional de Celulosa de España). Este anuncio no fue bien recibido por la opinión pública argentina, movilizándose en protesta, alegando problemas de contaminación del río.

En 2007, Botnia inaugura su planta en Fray Bentos, pero por otra parte ENCE encuentra como solución al conflicto la relocalización de su planta sobre el Río de la Plata, en la desembocadura del Río Uruguay. El proyecto pasa a manos de Montes del Plata, con capitales sueco-finlandesa (Stora Enso) y chilenos (Arauco), inaugurándose en 2014.

En la Figura 2.3, se puede ver el impacto de las inversiones en el componente PBI asociado a la fabricación de papel, productos de papel y cartón.

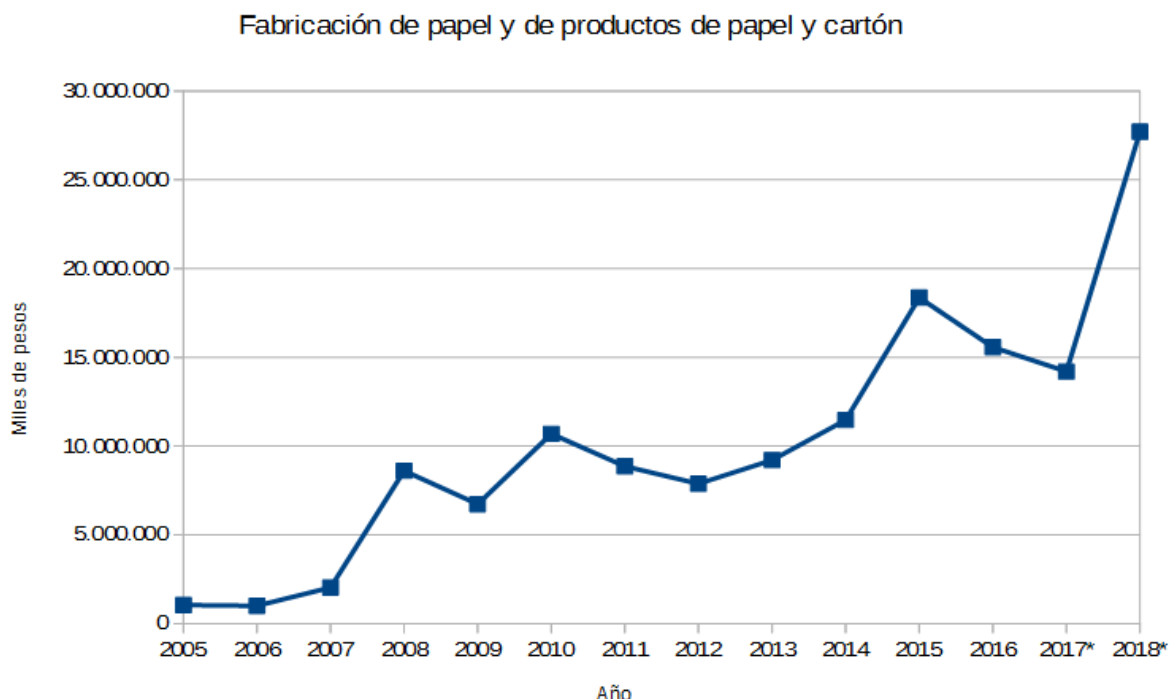


Figura 2.3 - Componente del PBI asociado a fabricación de papel y productos de papel y cartón [14]

Estas inversiones tuvieron lugar gracias a políticas del gobierno nacional que promovieron la inversión extranjera. Nos retrotraemos a 1968, cuando la ley N° 13723, llamada primera Ley forestal, fue aprobada, quedando operativa a partir del año 1975. En este marco se implementaron exoneraciones impositivas a plantaciones forestales, lo que alentó a productores agropecuarios a integrar la forestación a sus actividades. Esta política de inversión estuvo vigente durante cuatro años, hasta 1979, durante los cuales se realizaron plantaciones que años después se convertirían en las primeras exportaciones forestales realizadas por el país en forma de rolos palpables.

A partir de 1979, el sector forestal no dispuso de un marco legal que promoviera el incentivo a la actividad, hasta 1988 cuando entra en vigencia la segunda Ley forestal N°15939, cuyos objetivos fueron:

- Asegurar conservación de montes naturales en base a manejo sustentable.
- Ampliación de la forestación, a través de plantación en zonas de menor competitividad relativa con otros rubros de producción agropecuaria.

Hoy en día, Uruguay cuenta con una superficie de montes de aproximadamente dos millones de hectáreas, de las cuales un 60% corresponden a montes plantados, siendo los restantes montes naturales [15].

A causa del aumento de la producción forestal y las inversiones extranjeras, ha existido también un desarrollo y crecimiento de actividades complementarias, dentro de las cuales encontramos el transporte.

2.2.2. Impacto del transporte forestal en la industria consumidora de madera

Los costos asociados al transporte carretero han tenido gran variación ya que dependen directamente del salario de los jornales, precio de combustibles, importaciones de repuestos, neumáticos, entre otros. A causa de la gran cantidad de variables que inciden en los costos, el CINOI [16] hace un Índice de Costo de Transporte (ICT).

Por otra parte, el MTOP [17] emite precios de referencias en pesos/kilómetro para diferentes escenarios de transporte carretero (dependiente del tipo de material, como también el rango de kilómetros a ser transportado). Esta evolución de precio se representa en el Figura 2.4, además se puede ver en la Figura 2.5 cómo se comporta el crecimiento partiendo de la misma base con respecto al precio del combustible, IPC y el costo de construcción.

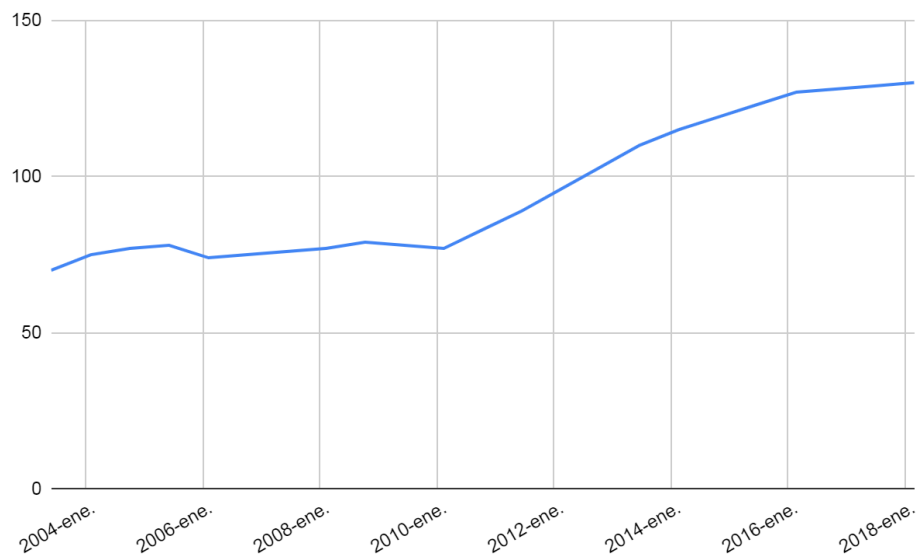


Figura 2.4- Precio (en pesos) de referencia por km transportado [17]

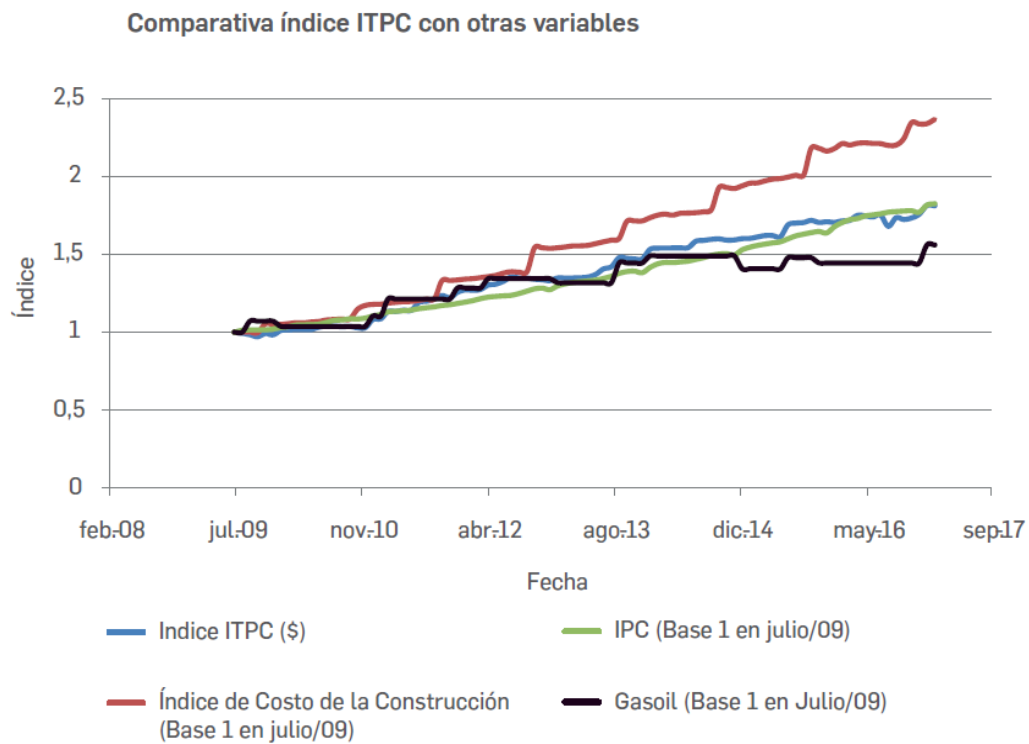


Figura 2.5 - Comparativa ITPC con otras variables de interés [18]

2.2.3. Infraestructura

Aquí se desarrollan los aspectos referentes a la infraestructura en rutas del Uruguay.

2.2.3.1. Transporte de carretera

Uruguay cuenta con una de las mejores redes viales de América Latina, ubicándose en el tercer lugar según el ranking de infraestructura de World Economic Forum [6] de la edición 2015-2016.

La red vial nacional cuenta con 8781 km [18] que a su vez están distribuidos en cuatro categorías:

- Corredor internacional - 2477 km
- Red primaria - 1532 km
- Red secundaria - 3756 km
- Red terciaria - 1016 km

Indicadores de Accesibilidad y Densidad de la Red

Se puede mediante indicadores simples analizar la accesibilidad al territorio o conectividad, útiles para comparar resultados globales para un país o región.

- **Índice de densidad media**, la cual relaciona la longitud de red vial y la superficie en km² del área de estudio. Según datos internacionales [18], considerando las redes de uso público como la caminaria de menor porte, el índice toma un valor de 44km/100km². Ubicando a Uruguay en el puesto 101 a nivel mundial y 50 entre todos los países con una superficie mayor a 10.000km². El mismo indicador pero en superficie pavimentada nos ubica en el lugar 84 con un valor de 4,4km/100km² en países con una superficie mayor a 10.000km². A nivel regional la red nacional es de las más densas, comparable con la de países de menor extensión territorial como Cuba y el Salvador y largamente más densa que la de los países vecinos (Argentina, Brasil, Paraguay).
- **Indicador de Engels**, es una medida de la eficacia vial ingresando la ponderación de la cantidad de habitantes del área de estudio y su superficie.

$$I_E = (100 \times L) / \sqrt{(S \times P)}$$

Donde:

- I_E es el indicador de Engels
- L es la longitud de la red vial, en kilómetros
- S es el área de la región en estudio (km²)
- P es la población de dicha región

En este caso, Uruguay resulta con más kilómetros de caminos y calles por habitante y unidad de área que los restantes países de Latinoamérica (excluyendo a Jamaica y naciones con superficies menor a 10.000km²) [18].

En general, internacionalmente a nivel de densidad por km² de superficie, Uruguay se compara a países de Europa Oriental o Nueva Zelanda, siguiendo un orden de magnitud por debajo de las redes viales más densas del mundo. No obstante, por la condición demográfica

de país poco poblado, en cuanto al indicador de Engels, Uruguay es comparable a grandes potencias mundiales. En las Figuras con referencia 2.6 se presentan las distintas ubicaciones relativas del país en cuanto a los indicadores comentados.

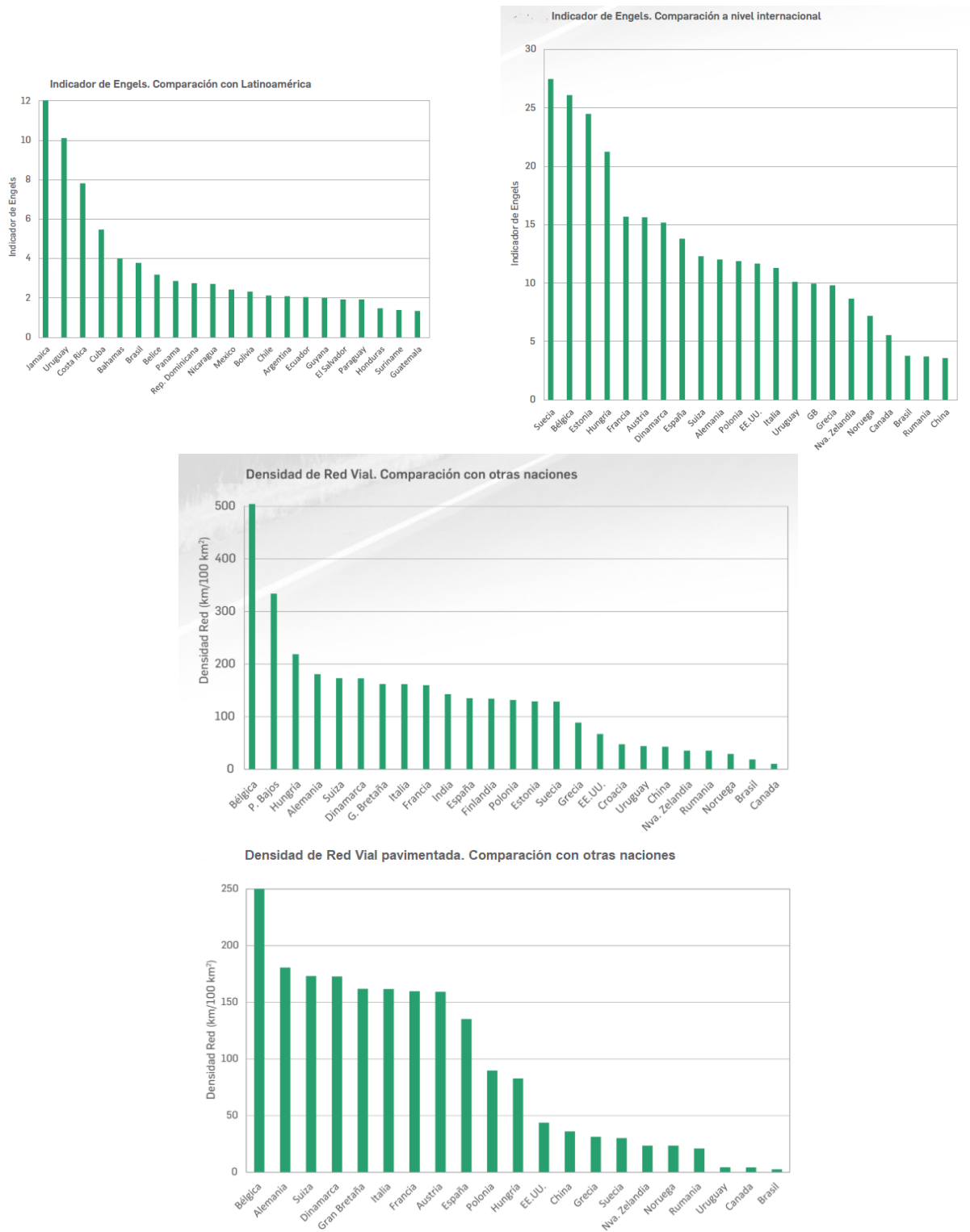


Figura 2.6 - Indicadores de Accesibilidad y Densidad de la Red [18]

Indicador de calidad de comunicación

Mediante el **Índice de la Calidad de la Comunicación (ICC)** o razón de sinuosidad, podemos conocer la eficiencia general de la red o la accesibilidad a una región o centro poblado.

El cálculo se realiza para un nodo particular y consiste en comparar la accesibilidad ideal (A_i) definida por geodésica (mínima distancia entre dos puntos de una superficie) con la accesibilidad real a ese nodo (AR_i).

$$ICC_i = A_i / AR_i$$

El inverso del ICC_i es el índice de sinuosidad del nodo i . Los valores A_i y AR_i se calculan sumando las distancias entre el nodo y los k nodos restantes de la red, con las distancias geográficas en la ideal y por el trayecto más corto dentro de la red vial en la real.

Para Uruguay se realizó el estudio considerando los 29 centros más poblados del país, utilizando la red de rutas nacionales y caminos departamentales de uso público y circulación permanente. Como se ve en la Tabla 2.5, los datos de ICC varían de 0,81 a 0,88 por lo que a nivel de las principales localidades las diferencias son menores al 10% del valor del indicador [17]. Se debe considerar además que los usuarios no necesariamente escogen el trayecto de menor recorrido, utilizando vías de mayor confort, seguridad o fluidez, lo cual muchas veces disminuye el costo de operación vehicular y el tiempo de recorrido.

Tabla 2.5 – ICC y razón de sinuosidad para localidades seleccionadas del Uruguay

Localidad	AI	AR	Razón de sinuosida	ICC
Artigas	10.545	13.043	1,24	0,81
Las Piedras	5.762	6.545	1,14	0,88
Montevideo	6.017	6.956	1,16	0,86
Nueva Palmira	6.475	7.558	1,17	0,86
Salto	8.751	10.328	1,18	0,85
Rocha	7.876	9.723	1,23	0,81
Rivera	9.590	11.220	1,17	0,85
Maldonado	7.388	8.561	1,16	0,86
Tacuarembó	7.464	8.754	1,17	0,85
Melo	8.545	10.185	1,19	0,84
Durazno	4.967	5.848	1,18	0,85
Mercedes	5.855	6.933	1,18	0,84
Pando	5.877	6.742	1,15	0,87
Localidad	AI	AR	Razón de sinuosida	ICC
Colonia del Sacramento	6.213	7.227	1,16	0,86
Paysandú	7.014	8.156	1,16	0,86
Minas	6.267	7.542	1,20	0,83
San José de Mayo	5.218	5.968	1,14	0,87
Treinta y Tres	7.431	8.997	1,21	0,83
Fray Bentos	6.352	7.489	1,18	0,85
Trinidad	4.895	5.726	1,17	0,85
Rosario	5.491	6.402	1,17	0,86
Cardona	5.136	5.947	1,16	0,86
Rio Branco	9.864	11.580	1,17	0,85
Young	5.936	7.175	1,21	0,83
Canelones	5.450	6.206	1,14	0,88
Solymar	6.064	7.077	1,17	0,86
Carmelo	6.338	7.372	1,16	0,86
Dolores	6.056	7.195	1,19	0,84
Paso de los Toros	5.452	6.738	1,24	0,81

Fuente: Situación de la vialidad Uruguaya [18]

Tránsito circulante por la red

El volumen de tránsito que circula por la red vial nacional es heterogéneo, percibiendo claramente la concentración de carga hacia los principales puertos (Montevideo y Nueva Palmira), en los corredores internacionales hacia Brasil, los puentes binacionales con Argentina, en las Rutas 1 e Interbalnearia, con la particularidad que esta última tiene un empleo casi exclusivo vinculado al turismo.

En la Figura 2.7 se muestran los distintos tramos de la Red Vial Nacional, distinguidos por tránsito promedio diario anual (TPDA).

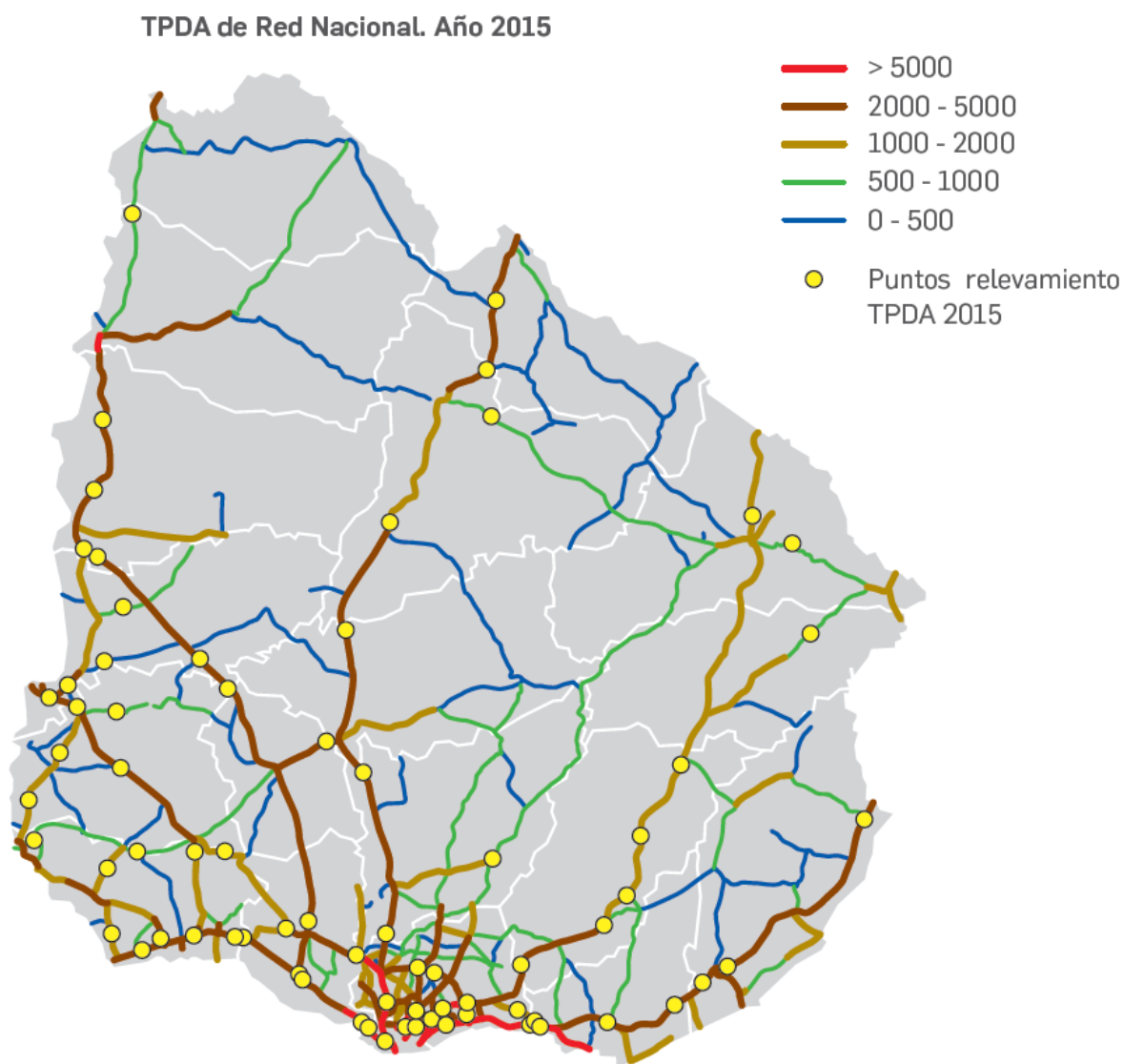


Figura 2.7 -Tránsito promedio por ruta
Fuente: MTOP [18]

Movimiento de Cargas

Si se analiza la evolución del transporte de cargas sobre la Red Vial Nacional en el período 2002-2015, el cual podemos ver en la Figura 2.8, se observa un crecimiento muy importante del orden del 10% acumulativo anual y 245% en todo el período de estudio [18].

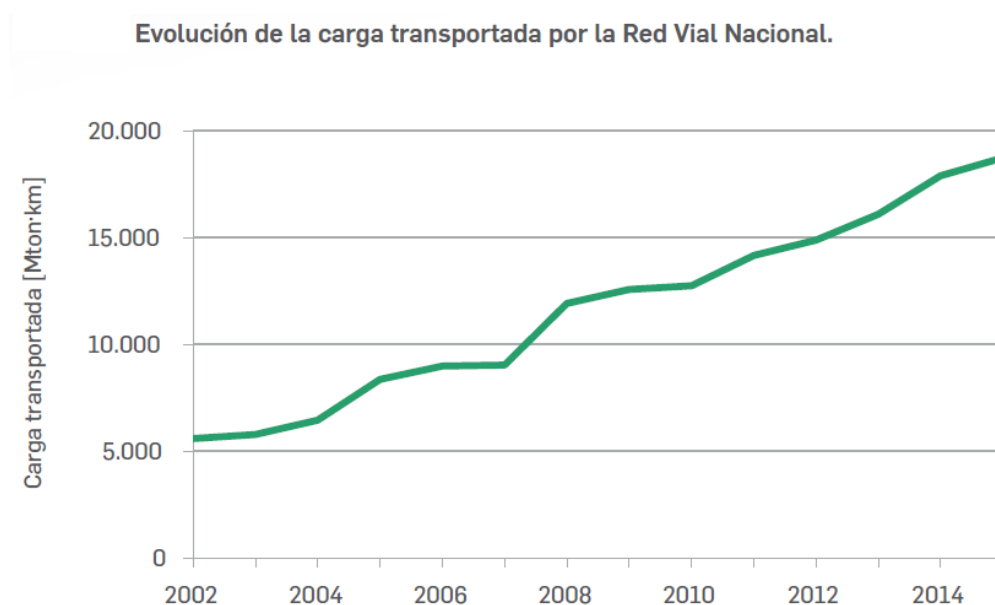


Figura 2.8- Evolución de la carga transportada por la Red Vial Nacional.
Fuente: MTOP-DINAPLO [19]

2.2.3.2. Experiencia de toma de decisiones asistidas en Uruguay y la Región

ASICAM es un sistema computacional basado en simulación utilizado con éxito por empresas forestales en Chile y otros países entre ellos Uruguay [20]. Tradicionalmente los horarios eran generados manualmente, para simplificar el problema, cada camión siempre viajaba entre un origen y un destino, sin consideraciones de tiempo.

Las consecuencias de la planificación manual fueron horarios deficientes. No se pudo satisfacer la demanda de algunos registros, hubo problemas entre los conductores que compitieron para hacer más viajes, donde hubo poca coordinación con las operaciones posteriores y, principalmente, los costos de transporte aumentaron especialmente debido a que los camiones tenían que esperar por mucho tiempo debido a la congestión tanto en el origen como en el destino.

En 1989, las empresas, que habían organizado un centro de innovación conjuntamente a través de un consorcio, buscaron desarrollar un sistema para mejorar la programación de los viajes [20]. La base del sistema era organizativa, una oficina central planificó todos los viajes (origen, destino, hora de salida y, dado que se conocía el tiempo de viaje, hora de llegada al destino), y el uso de un sistema para programar los viajes. El modelo funciona por incrementos de tiempo como vemos en la Figura 2.9.

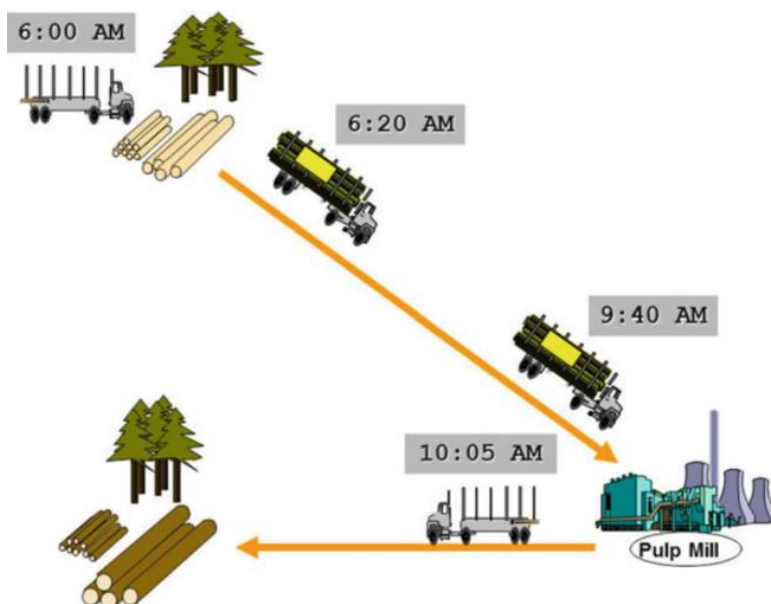


Figura 2.9 – Ejemplo incremento de tiempo.
Fuente: Transportation and Routing [20]

Este caso de ejemplo comienza a las 6.00 am cuando se cargan los primeros camiones en los orígenes, a las 6:20 am los camiones parten hacia sus destinos, a los que llegarán a las 6:20 más el tiempo de viaje (TT) requerido. A las 6:20 sumado el TT más 20 min los camiones están vacíos listos para viajar a un nuevo origen. A las 6:20 un segundo lote de camiones comienza a cargarse en los orígenes, y sale cargado a las 6:40 am. De esta forma, el modelo avanza a lo largo del día, viajando entre orígenes y destinos. Tenemos que tener en cuenta que si un camión llega a un origen o destino con camiones delante de él, debe esperar. El horizonte de planificación finaliza a las 6 pm, cuando se detiene el sistema de transporte, o más tiempo si hay horas extras. Se definieron períodos de 20 minutos cada uno, correspondientes al tiempo de carga y descarga. Los tiempos de viaje se aproximaron a estos períodos de 20 minutos.

La simulación debe tener en cuenta: la demanda y el suministro de cada tipo de registro en cada nodo, la disponibilidad de camiones y grúas para la carga, los tiempos de descarga y los costos de todas las actividades.

Existen varias restricciones donde las principales son: la demanda de cada tipo de registro en cada nodo, la llegada de registros a los destinos debe ser constante para facilitar la operación aguas abajo, se deben incluir una serie de problemas organizativos, como descansos para el almuerzo, arranque de los conductores y terminando su día cerca de sus hogares, tienen ingresos similares para todos los camiones en cada semana, etc.

El desafío principal fue encontrar reglas heurísticas para asignar camiones una vez que se vacían. Las reglas deben tener en cuenta las restricciones y el minimizar los costos. El modelo consideró un horizonte de 1 h, para poder programar múltiples viajes en conjunto, pero solo implementó el primer período de 20 min. Se calculó un índice de deseabilidad para cada viaje como el costo real del viaje (incluidas las colas) más un costo de congestión, derivado de las colas causadas a otros camiones.

Se definieron las prioridades de los viajes, la principal para satisfacer la demanda de cada tipo de registro en cada nodo. Las operaciones forestales típicas llevan a cabo entre 100 y 700 viajes por día y necesitan entre 40 y 250 camiones. El sistema se ejecuta en unos minutos en una computadora normal. Por lo general, se ejecuta temprano en la tarde y las instrucciones se envían a los conductores por correo electrónico.

Hay eventos inesperados durante el día, como pueden ser roturas de grúas, que son manejadas manualmente por los operadores. El sistema fue implementado por todas las principales empresas forestales en Chile, con mucho éxito. Los costos se redujeron entre 15 y 25% y la cantidad de camiones aún más. La espera promedio se redujo de 4,5 a 0,5 h [20]. En el Figura 2.10 se ve cómo la llegada de camiones a los destinos se hizo de forma más uniforme.

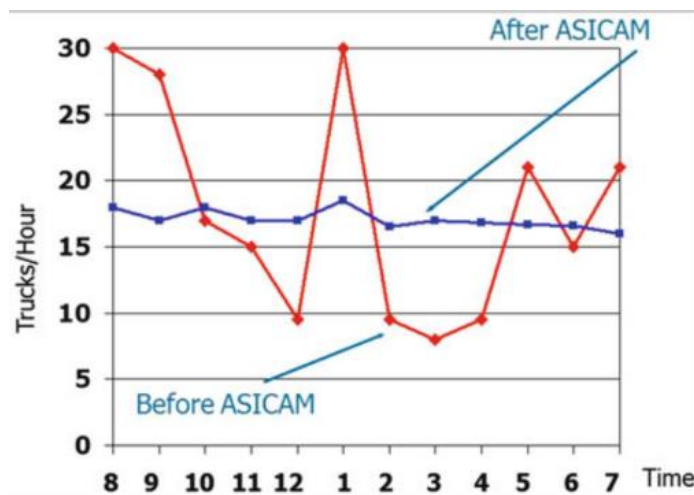


Figura 2.10 – Ejemplo implementación ASICAM
Fuente: Transportation and Routing [20]

El sistema también fue utilizado por empresas forestales en Sudáfrica (MONDI ganó el premio de Logística de Sudáfrica 1996 utilizando ASICAM), Brasil, Uruguay, Venezuela, Argentina.

ASICAM, con actualizaciones, se sigue utilizando ampliamente. Su implementación requirió que las empresas forestales realizaran cambios organizativos para centralizar la toma de decisiones y el control de las operaciones, introduciendo los sistemas computarizados. El compromiso de las empresas forestales a todos los niveles en el proceso hizo que la implementación del sistema fuera exitosa [21].

2.2.3.3. Alternativas a transporte de carretera

En Uruguay, más del 90% de la madera producida es transportada vía camión desde las plantaciones hasta los centros de acopio, fábricas o puertos[22]. Pero existen otras vías de transporte que son altamente eficientes cuando hablamos de grandes distancias y volúmenes, como por ejemplo el transporte ferroviario, fluvial o sistemas multimodales.

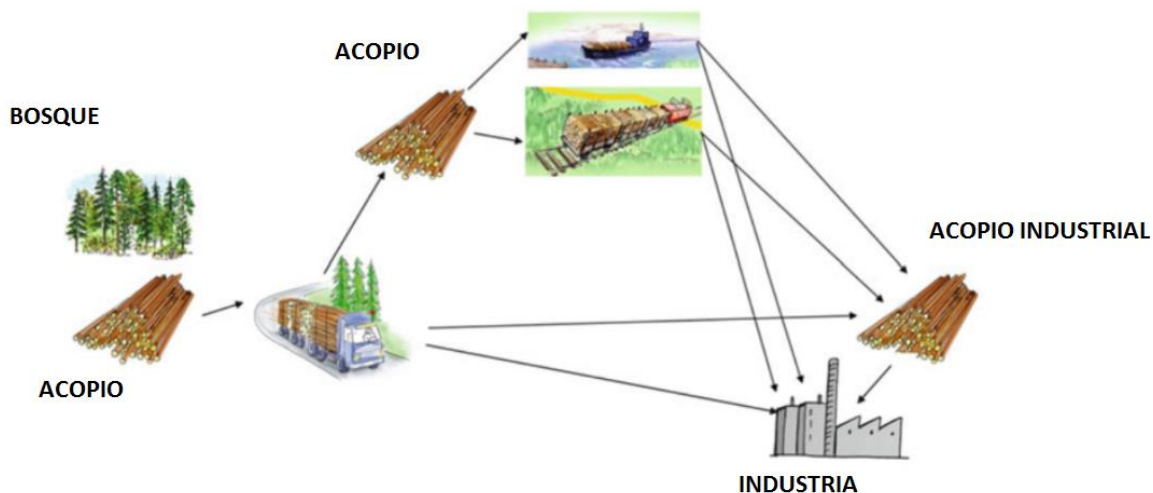


Figura 2.11 - Ilustración del transporte principal de madera desde el monte hasta instalaciones de almacenamiento o molinos utilizando camiones, trenes y embarcaciones Fuente : The Management of Industrial Forest Plantations. [20].

En la Tabla 2.6 podemos ver la comparativa de eficiencia entre las diferentes modalidades de transporte.

Tabla 2.6 Comparativa de eficiencia

	Capacidad de carga	Consumo de energía	Potencia
	Para transportar 1600 ton.	Con un litro de Gas Oil se transporta una ton.	Con un HP se puede transportar
Fluvial	1 barcaza	251 km	22,2 ton
Ferroviaria	40 vagones	101 km	7,4 ton
Carretera	80 camiones	29 km	1 ton

Fuente: Mapa logístico del Uruguay [23]

Transporte Ferroviario

Uruguay cuenta con una extensión de red ferroviaria potencialmente explotable de 1448 Km, la cual se ve representada en la Figura 2.12. Su administración se encuentra bajo dos empresas: la Administración de Ferrocarriles del Estado (AFE), encargada de la infraestructura y el transporte de pasajeros, y la sociedad anónima Servicios Logísticos Ferroviarios (SELF), encargada del movimiento de cargas [24].

Esta red se conecta con las redes de Argentina, sobre la represa de Salto Grande, que vincula las ciudades de Salto y Concordia con igual trocha en ambos países, por otra parte se conecta con Brasil en el Paso de Frontera Rivera-Livramento, donde existe una diferencia de trocha.



Figura 2.12 -Mapa Ferroviario del Uruguay [25]

En la Tabla 2.7 se ven representadas las velocidades límites y los niveles de carga máxima por eje para cada tramo de la red ferroviaria.

Tabla 2.7 – Velocidades máximas y carga por eje.

VELOCIDADES MÁXIMAS Y CARGA POR EJE ADMITIDA VIGENTES A SETIEMBRE 2018						
	TRAMO	VELOCIDAD MÁXIMA		CARGA MÁXIMA	LONGITUD	
		Km/h		Ton/eje	Km	
		CARGA	PASAJEROS			
ZONA METROPOLITANA	De Km. 0.5 (Terminal) a Km. 1.2 - LINEA RIVERA	40	40	18	0,7	46.2
	De Km. 1.2 a Km. 11 - LINEA RIVERA	50	60	18	9.8	
	De Sayago (8,3) a Toledo (25)-LINEA MINAS	40	50	18	16.7	
	De Toledo (25) a Sudriers (44)-LINEA MINAS	40	50	18	19	
LÍNEA RIVERA	De Km 11 a 25 de Agosto (Km 64)	60	80	18	53	575.3
	De 25 de Agosto (64) a Florida (109)	40	50	18	45	
	De Florida (109) a Pintado (145)	50	60	18	36	
	De Pintado (145) a Km 159 (Sarandi)	40	50	18	14	
	De Sarandi (Km 159) a Paso de los Toros (273)	30	40	18	114	
	De P. de los Toros (273) a Achar (335)	40	50	18	62	
	De Achar (335) a Tacuarembó (445)	40	50	18	129	
	De Tacuarembó (445) a km. 563 (Rivera)	50	75	18	118	
	Rivera - Livramento	0	0	18	4,3	
LÍNEA MINAS	De Km Sudriers (44) a Km Tapia (64)	50	60	18	20	81
	De Tapia (64) a Minas (Km.125)	40	50	18	61	
LÍNEA RÍO BRANCO	De Toledo (25) a km 160	30	40	18	135	432
	De km 160 a Nico Perez (230)	40	50	18	70	
	De Nico Pérez (230) a Varela (304)	30	40	18	74	
	De Varela (304) a Treinta y Tres (334)	25	30	18	30	
	De T. y Tres (334) a Río Branco (457)	30	40	18	123	
LÍNEAS DEL LITORAL	De Chamberlain (289) a Tres Arboles (334)	40	50	14	45	45
	De Tres Arboles (334) a Guichón (Km 385)	25	25	14	51	75
	De Guichón (Km. 385) a Algorta (Km. 409)	40	50	14	24	
	De Algorta (409) a Paysandú (480)	25	30	18	71	182
	De Paysandú (480) a Queguay (510)	25	30	20	30	
	De Queguay (510) a Salto (591)	25	30	14	81	
	De Salto (591) a Salto Grande (603)	50	60	20	12	12
	De Tres Arboles (334) a Piedra Sola (392)	0	0	0	0	0

Fuente: MTOP [26]

Proyecto Ferrocarril Central

El Proyecto “Ferrocarril Central”, constituye un paso trascendente en el marco del programa de infraestructura de transporte que el país está desarrollando para potenciar su plataforma logística, por su complementariedad con el camión y con el sistema portuario y, su influencia en el territorio como factor de viabilidad de emprendimientos productivos, por su mayor competitividad y sustentabilidad [27].

El proyecto involucra el tramo comprendido entre el puerto de Montevideo y la ciudad de Paso de los Toros en el departamento de Durazno, unos 273 km, los cuales serán mejorados para poder transportar mayores pesos y aumentar la velocidad de traslado. Se pasará de un máximo de 50 Km/h en algunos tramos a un máximo de 80 Km/h y de un máximo de 18 Ton/eje a 22,5 Ton/eje.

Por otro lado, este tipo de proyecto impacta de forma importante en las ciudades por las que funciona, tanto positiva como negativamente. El proyecto provee la implementación de varios By Pass como forma de evitar zonas pobladas y así reducir el tráfico mientras que en Durazno y Florida el tren continuará pasando por estas zonas lo cual ha llevado a varias discusiones entre las entidades del gobierno y quienes allí viven.

En lo que refiere a su capacidad, UPM usaría aproximadamente la mitad de la capacidad de la vía, quedando la otra mitad para ser explotada. Hay aquí una rama de estudio interesante para poder analizar cuáles podrían ser los rubro que mejor aprovecharían esta capacidad [28]. Es posible analizar también puntos estratégicos de esta ruta en donde ubicar

hubs logísticos para que diferentes industrias centralicen su producción y así darle acceso al tren.

Transporte Marítimo

Uruguay es el segundo país con mejor infraestructura portuaria de Latinoamérica [29], ocupando el lugar 39 en el ranking mundial. Cuenta con ocho puertos de movimiento de carga [30], los cuales son:

- Montevideo
- Juan Lacaze
- Nueva Palmira
- Fray Bentos
- Paysandú
- Zona Franca Punta Pereira
- UPM
- M'Bopicuá

Cabe destacar que Zona Franca Punta Pereira, UPM y M'Bopicuá están bajo administraciones privadas, mientras que el resto están bajo la Administración Nacional De Puertos (ANP).

El resurgimiento del transporte fluvial nacional vino de la mano de la forestación gracias a los emprendimientos de Botnia/UPM y Montes del Plata, que empujaron el sueño de resucitar la marina mercante en Uruguay. Ambos transportan ya sea celulosa (UPM desde Fray Bentos a Nueva Palmira) o madera (Montes del Plata desde Río Negro a Punta Pereira), utilizando un sistema de barcazas a través del río Uruguay. El gerente logístico de Montes del Plata, Ricardo Brunner, declara que el transporte fluvial fue parte crucial de su estrategia logística. El sistema fue implementado para poder movilizar como mínimo un 50% de la demanda de madera que consume la planta industrial. Para esto se construyeron cuatro barcazas de 500 toneladas cada una (tres de ellas en el astillero de la Armada) y dos empujadores fluviales [28].

Uruguay está rodeado de agua y la vía fluvial tiene una enorme ventaja competitiva, no solo como vía de transporte alternativo a las carreteras, sino como una oportunidad de negocio para prestar servicios navieros a las empresas que utilizan este medio. Si bien la infraestructura vial ha ido mejorando y las rutas van a ser cada vez más modernas, el río nos abre opciones. El uso de este medio va a significar revisar también la infraestructura portuaria [28].

El Río Uruguay se puede dividir en tres sectores, basándose en las características de navegabilidad [31]. Estos tres sectores son:

Bajo Uruguay - Se extiende desde Nueva Palmira (Km. 0 del Río Uruguay y de la Hidrovía Paraguay - Paraná) hasta Concepción del Uruguay (Km. 183).

Uruguay Medio - Desde Concepción del Uruguay hasta la represa de Salto Grande.

Uruguay Alto - Desde la represa Salto Grande hasta sus nacientes.

El tramo con mejor navegabilidad es el Bajo Uruguay, aunque es necesario realizar dragados y ensanches en algunos pasajes para una mejora de calidad de navegación.

Estas condiciones plantean un escenario de falta de aprovechamiento de infraestructura marítima debido a la baja capacidad de carga actual y la inaccesibilidad de distintos tipos de barcos a puertos aguas arriba.

Un caso particular es el puerto de Fray Bentos, en el cual, buques graneleros de 20000 a 40000 toneladas de capacidad pueden cargar no más de 8000 toneladas, lo que constituye una operación que no es rentable en comparación a otras alternativas logísticas [32].

2.2.4. Distribución geográfica de plantaciones

En esta Sección se desarrolla la composición del territorio uruguayo en lo referente a zonas forestadas.

2.2.4.1. Zonas de prioridad forestal

Como se menciona en la Sección 3.1, uno de los objetivos de la Ley forestal es la ampliación de la forestación, a través de plantación en zonas de menor competitividad relativa con otros rubros de producción agropecuaria. En consecuencia, de esto se definen zonas de prioridad forestal.

Para la delimitación de dichos terrenos se utilizó principalmente un mapa de Grupos de Suelos CONEAT. Estos grupos definen unidades de terreno definidas por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana en pie. Esta capacidad se expresa por un índice relativo a la capacidad productiva media del país, al que le corresponde el índice 100.

Actualmente hay aproximadamente 4,3 millones de hectáreas de prioridad forestal, distribuidas en 9 zonas, las cuales se presentan en la Figura 2.13.

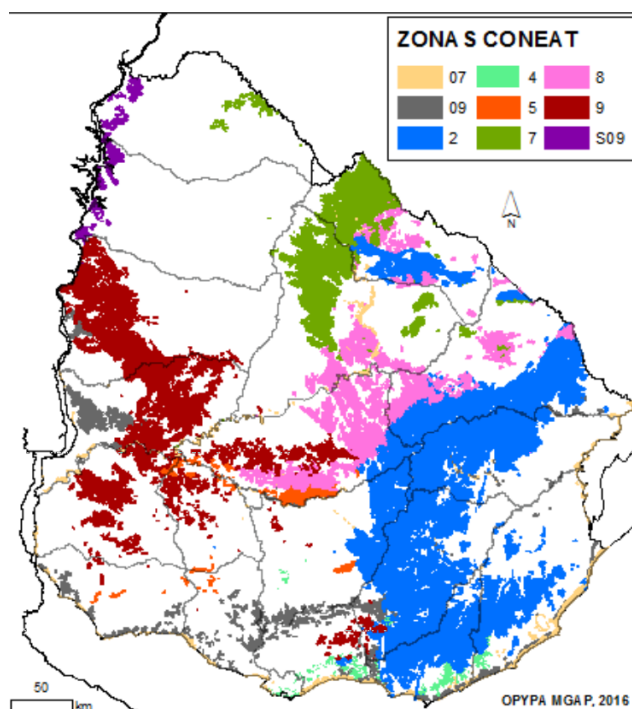


Figura 2.13 – Zonas de prioridad forestal
Fuente: Oficina de Programación y Políticas Agropecuarias [33]

2.2.4.2. Área forestada

Se definen tres regiones basadas en su ubicación geográfica y el tipo de plantación [34], estas son:

-**Litoral oeste y centro**, en el cual se encuentran efectivamente plantado un 23% de los suelos de prioridad forestal. En esta zona se encuentran principalmente Eucaliptus

Grandis y Duniis con destino a las plantas de celulosa en mayor medida, y aserraderos en una porción menor.

-**Norte**, donde la especie predominante es el Pino, con aproximadamente 60% de la superficie plantada. Los principales destinos de esta zona son aserraderos y exportación en bruto. Se estima que esta zona tiene una superficie plantada del 30% de las tierras de prioridad forestal.

-**Noreste / Sureste**, zona con menor superficie plantada del total de las tierras denominadas de prioridad forestal, con una tasa de tan solo 17% aproximadamente. La mayoría de las plantaciones tienen como destino plantas de producción de celulosa. Esta zona tiene la característica de que en el norte predomina la especie de eucaliptus Grandis, mientras que en el Sur, Duniis.

2.2.5. Principales consumidores

2.2.5.1. Locales

En Uruguay al 2021 hay un total de 1703 empresas asociadas al sector forestal que utilizan como insumo la madera. En la Tabla 2.8 se muestran discriminadas por tamaño (Micro y pequeñas - hasta 19 empleados, Medianas - 20 a 99 empleados, Grandes - más de 100 empleados)[34].

Tabla 2.8- Empresas relacionadas al rubro forestal.

	Micro y pequeñas	Medianas	Grandes	Total
Forestación	782	74	7	863
Producción de productos de madera	739	23	4	766
Fabricación de papel y productos de papel (incluye celulosa)	55	14	5	74
Total	1.576	111	16	1703

Fuente: Agencia Uruguay XXI – BPS [34]

En la Figura 2.14 se presenta un mapa con la ubicación de los principales consumidores nacionales de la producción forestal.

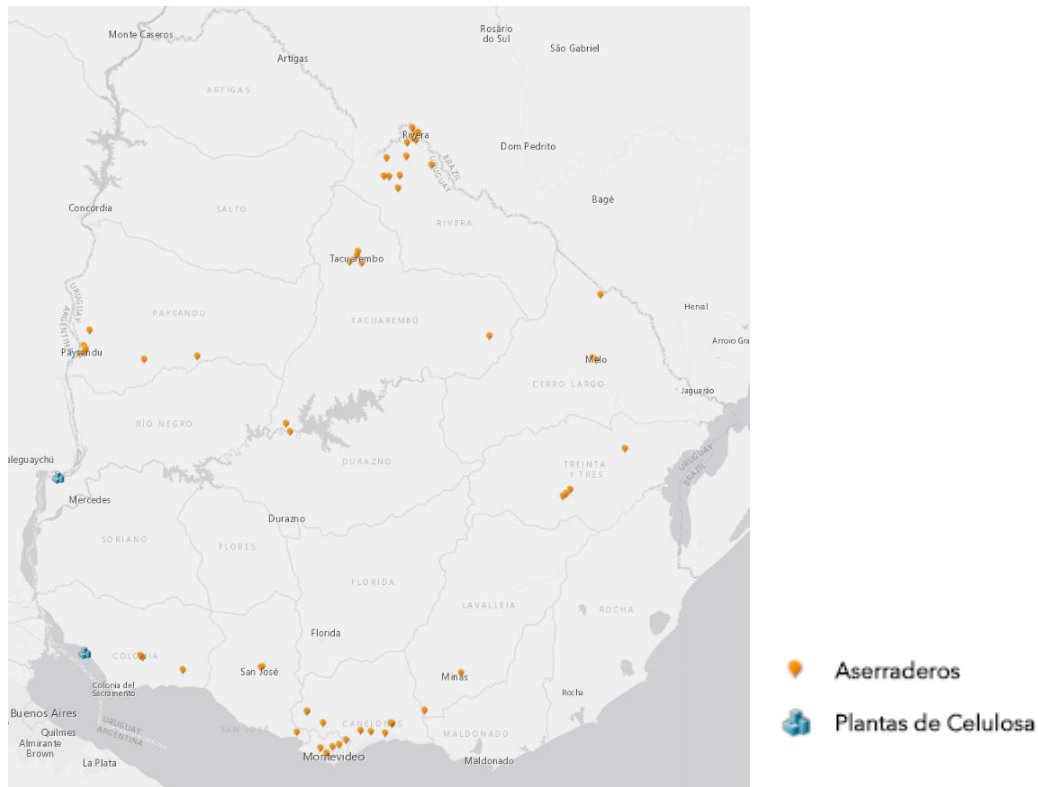


Figura 2.14 -Fuente: Geoportal Forestal del Uruguay - MGAP [35]

Se pueden definir tres focos de consumidores (que coinciden con las regiones mencionadas previamente en la Sección de Área Forestada). Por una parte el litoral Oeste, donde se encuentran actualmente las plantas de celulosa, y por otro la Zona Norte y la Sur, marcadas por la presencia de aserraderos.

2.2.5.2. Internacionales

Con datos del 2015 brindados por la Dirección Nacional de Aduanas, la Agencia Uruguay XXI generó un informe en el cual se puede encontrar el destino de las principales exportaciones del rubro forestal [36].

En la Tabla 2.9 se muestra un fragmento del informe previamente mencionado, asociando el valor en millones de dólares (U\$S) al destino de exportación según el producto.

Tabla 2.9- Destino de principales exportaciones.

Producto	Destino	U\$S Millones
Celulosa	China	459
	Países Bajos	305
	Italia	212
	Subtotal	976
	Total	1266
Papel y Cartón	Argentina	58
	Paraguay	12
	Brasil	9
	Subtotal	79
	Total	91
Madera en bruto (Sin ZZFF)	Portugal	57
	Vietnam	13
	China	7
	Subtotal	77
	Total	82
Tableros	México	25
	EEUU	21
	Reino Unido	8
	Subtotal	54
	Total	63
Madera aserrada, maciza encolada, chapas y molduras	EEUU	13
	China	12
	Corea del sur	10
	Subtotal	34
	Total	76

Fuente - Uruguay XXI. Sector Forestal. [36]

Se puede ver claramente que el principal flujo monetario corresponde a la producción de Celulosa, donde el destino de exportación por excelencia es China.

La existencia de una diferencia entre el Subtotal y el Total corresponde a exportaciones menores con distintos destinos.

2.3. Principales limitantes en Uruguay

Aunque es común pensar que Uruguay es un país pequeño y que eso facilita el transporte terrestre, lo cierto es que siempre ha presentado diversos desafíos. La falta de inversión por años en infraestructura vial, el hecho de que muchas vías no estuvieran proyectadas para soportar grandes configuraciones de transporte pesado y, además, que un gran número de ellas pasará por centros poblados fueron algunas de las condiciones adversas que tuvo que sortear la forestación [28].

Uno de los grandes méritos de la forestación es su descentralización: la amplia mayoría de los montes y sus respectivas industrias de transformación se instalan en el interior del país. Sin embargo, en Uruguay esto también se convierte en un desafío. La principal dificultad es la de poder hacer llegar la producción hasta el puerto. Falta la interfaz entre monte/industria y su arribo a la exportación. Las carreteras son sobreutilizadas, algunas están en muy mal estado y la caminería departamental también tiene severos problemas [37].

A futuro, además de contar con un óptimo mantenimiento de rutas, se debería apuntar a mejorar la calidad de las mismas o el trazado de aquellas que sean identificadas como prioritarias para el uso de nuevas configuraciones de transporte (como bi-trenes y tri-trenes). Según Ricardo Brunner, gerente logístico de Montes del Plata, existe un gran desafío en materia de infraestructura vial, la que se debe ir adaptando a las nuevas tecnologías y tipos de transporte que ya se están usando en otras partes del mundo. La clave sería, además, la vinculación con otros rubros agropecuarios para que la inversión sea provechosa para más de un sector. La forestación debería trabajar de forma conjunta con la agricultura y conocer sus flujos, para tener una visión más amplia de las cargas y rutas a promover. Lo importante es impulsar rutas que puedan ser utilizadas con otro tipo de cargas que mueven grandes volúmenes, no solo madera [28].

Además de la infraestructura, el costo interno del país es otro de los aspectos que más preocupa al sector productivo uruguayo. Uruguay tiene el combustible más caro de toda la región. Esta afirmación es confirmada por la web GlobalPetrolPrices.com [38], sitio especializado en seguir los precios del combustible en el mundo utilizando datos oficiales e históricos como puntos de referencia. Al 26 de marzo de 2018, Uruguay ocupaba la casilla número 35 en un ranking que incluía a más de ciento cincuenta países con un costo de 1,42 dólares (US\$) por litro de gasoil [37].

Los sobrecostos se dan, principalmente, porque la caída en el precio internacional del petróleo del último par de años no ha sido trasladada a los precios locales, por el costo de refinación y por los impuestos que tiene el combustible en el país. Dentro de la carga tributaria está el “fideicomiso del gasoil”, impuesto que se destina a subsidiar el transporte público urbano de pasajeros [37].

2.4. Actores involucrados y su rol en la industria forestal

2.4.1. Productores

La producción de madera es una actividad que se realiza en todo el mundo, siendo para algunos países una de sus principales actividades y que generan mayores ingresos. La misma es utilizada tanto internamente como para exportación.

Se debe tener en cuenta que en un territorio pueden existir restricciones legales en cuanto a qué porcentaje de territorio debe ser destinado a producción y qué porcentaje de territorio debe permanecer como monte nativo y no es posible su tala. Esto lleva a que exista un cierto comercio ilegal por la tala en zonas no permitidas.

2.4.2. Consumidores

Si se analizan los principales consumidores de madera, podemos dividirlo según la forma en que la materia prima es consumida, es decir, puede ser en forma de rolo, pellet, pulpa, aserrín, etc.

Los porcentajes que se muestran a continuación hacen referencia al consumo total que unifica el consumo de producto nacional y el producto importado.

- **Madera en rolo industrial**

EU	China	Rusia	Brasil	Canadá
18%	12%	10%	8%	7%

- **Pellets de madera**

Reino Unido	Corea	Dinamarca	Italia	Alemania
20%	11%	9%	7%	6%

- **Madera aserrada:**

China	EU	Alemania	Canadá	Japón
26%	21%	4%	4%	3%

- **Tableros de madera:**

China	EU	Rusia	Alemania	Polonia
47%	12%	3%	3%	3%

- **Pulpa para papel:**

EU	China	Japón	Suecia	Finlandia
24%	20%	5%	5%	4%

- **Papel recuperado:**

China	EU	Alemania	Japón	India
29%	13%	8%	7%	4%

- **Papel y cartón:**

China	EU	Japón	Alemania	India
26%	17%	6%	5%	5%

Tabla 2.10 Principales consumidores de productos forestales

Fuente - FAO [39]

2.4.3. Transportista

Al momento de tomar decisiones respecto a cómo administrar esta área nos encontramos con dos modalidades las cuales tienen impactos muy diferentes en el negocio.

Por un lado existe la posibilidad de tercerizar las flotas de camiones y su gestión. En estos casos la empresa se preocupa únicamente de obtener en tiempo su pedido. No se involucra en pago de empleados, seguros y reparaciones de camiones ni de la organización de los mismos respecto a trayectos a realizar. En estos casos la empresa de transporte será un proveedor y la empresa consumidora entrega datos de demanda según sea requerido. Tiene como aspectos negativos el costo, el compartir información de la demanda a terceros y la pérdida de poder en la toma de decisiones.

Por otro lado, la empresa puede optar por administrar su propia flota de camiones. De esta forma, toda la información queda dentro de la empresa y reduce los costos que implica pagar un proveedor todos los meses. Como aspecto negativo se destaca la falta de conocimiento del negocio de transporte que puede llegar a tener la empresa y que su curva de aprendizaje le sea muy costosa por lo que deja de ser redituable elegir esta opción. También tiene como aspecto negativo la necesidad de tener un equipo especializado para gestionar esta flota y todos sus gastos. Dependiendo del tamaño de la empresa y de la flota estos costos serán o no mejor distribuidos.

2.5. El problema del transporte forestal

A lo largo de este capítulo se introducen las distintas herramientas disponibles al enfrentarnos a un problema de transporte, en especial el del transporte forestal. Desde sus bases, abordando el ruteo de vehículos con sus distintas variantes. Se identifican las características propias, así como las distintas opciones en base a la información y recursos disponibles. Presentaremos estrategias para su resolución y como el problema puede ser integrado para que sea de ayuda en la toma de decisiones de la industria.

2.5.1. Motivación

Las operaciones de transporte representan una parte importante del costo de adquisición de la madera [40].

Por lo tanto, la reducción en los costos de transporte a través de mejoras en la eficiencia de estas operaciones ha motivado una cantidad considerable de esfuerzo de investigación en muchos países.

Gran parte de esta investigación se ha dedicado al **ruteo de vehículos** (La planificación del conjunto de rutas que debe tomar una flota de camiones para entregar madera desde las áreas de cosecha a las industrias)

Algunos autores trascendentes en el tema tienen estas premisas:

- Una pequeña reducción de costos puede generar ahorros sustanciales [40].
- Hay considerable interés en todo el mundo por encontrar formas de ahorrar costos en transporte [11] que incluye hacer que las operaciones de transporte sean más eficientes con una mejor planificación.
- El costo del combustible representa una proporción significativa de los costos de transporte, aproximadamente un tercio en Canadá [5], además del desafío de un mercado del crudo cambiante y las crecientes preocupaciones medioambientales.
- Los conductores necesitan más apoyo mientras trabajan en áreas más grandes y menos conocidas, las flotas de camiones se vuelven más heterogéneas y las industrias requieren más surtidos de maderas frescas y personalizadas (definidos, por ejemplo, en especie, dimensión y calidad).

2.5.2. Modelado

La disponibilidad de información en el momento de la planificación es una dimensión importante presente en la determinación del problema de recolección y entrega[41].

En problemas estáticos, se supone que toda la información se conoce a priori, mientras que en problemas dinámicos, la información se revela gradualmente y / o está sujeta a cambios con el tiempo.

Por lo cual, en problemas dinámicos requiere de ir ajustando la solución como nueva para obtener información actualizada. La mayoría de los artículos en la literatura abarcan problemas de ruteo de vehículos estáticos, aunque Ryan D, Rönnqvist M. [42] y Rönnqvist M, Sahlin H, Carlsson D. [43] son excepciones proponiendo un método de solución dinámico.

En estos documentos, la información sobre la situación real se publica continuamente. Sin embargo, es crítico poder anticipar el futuro y que se realice un plan de día completo que se pueda cambiar más adelante. El ruteo se revisa tan pronto como un nuevo evento ocurra, con eventos nos referimos a la entrega en un depósito, la recolección en el área de cosecha, los niveles revisados de oferta o demanda, etc. Estos desencadenan una re-optimización.

Un componente clave para dicho sistema es poder volver a optimizar con una solución actual parcial dada. Además, la información devuelta a los camiones es solo información

sobre el próximo viaje en ruta, ya que la ruta (excepto confirmada o viaje en curso) puede cambiar en cualquier momento.

Otra clasificación se da según la incertidumbre de la información disponible al momento de planificar. Por un lado los problemas deterministas suponen que todos los datos se conocen con certeza, mientras que en los estocásticos, algunos datos (por ejemplo, el tiempo de viaje del vehículo o los niveles de oferta / demanda) son variables aleatorias, las cuales podemos llegar a conocer su distribución [41]

2.5.2.1. Enfoque VRP

Una forma de modelar el problema de asignación de rutas y que requiere relativamente pocos conjuntos de restricciones en comparación con sus extensiones, es el llamado **Vehicle Routing Problem (VRP)**. Este problema intenta definir el ruteo para una flota de camiones con el objetivo de satisfacer la demanda de los puntos de entrega.

Este problema usualmente está orientado a las decisiones operativas de la empresa, es decir a corto plazo.

En cuanto a este tipo de problemas, desde su introducción por Dantzig G y Ramser J.[45], el VRP es uno de los más importantes y más estudiados de los problemas de optimización combinatoria [46].

Se han propuesto varios métodos de planificación basados en soluciones computacionales, además de desarrollar métodos de planificación para que los encargados puedan tomar decisiones sobre el transporte de madera como mencionamos en la Sección anterior.

A su vez esta estrategia puede contar con tres variantes, estas son:

- *Many-to-many*. En donde todas las entidades sirven tanto de origen como de destino.
- *One-to-many-to-one*. Donde los productos están en un depósito y son entregados a los consumidores y también a depósitos.
- *One-to-one*. En este caso el producto tiene origen y destino determinado.

Este modelo aplicado al transporte forestal puede quedar delimitado por los puntos de cosecha, depósitos, clientes, número de vehículo, vías de transporte, entre otros.

Dentro del VRP se pueden encontrar diversas variantes o extensiones, una de ellas es VRP-Time Window.

Este caso es una situación ampliada o puede llegar a ser más realista de un VRP. Al problema de VRP clásico se le agrega una nueva condición llamada ventana de tiempo. Cuando se usan ventanas de tiempo, el problema se llama VRP con ventanas de tiempo (VRPTW), a menudo, se utilizan cuando se consideran limitaciones de tiempo más generales en la ruta del vehículo, o disponibilidad de los proveedores o clientes de retirar o recibir cargas.

Para este caso también se pueden encontrar múltiples variaciones, entre las cuales podemos encontrar:

- *Opening hours*. Se especifica únicamente la hora de apertura del proveedor o cliente. Los vehículos deben estar programados para llegar luego de la apertura.
- *On-site loader operation hours*. Se definen los horarios disponibles para que cada vehículo sea cargado o descargado.

Como vimos el problema VRP puede formularse de varias formas, una de ellas es:

$$\begin{aligned}
 \min z &= \sum_j c_j x_j \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in J_t} x_j = 1, \quad \forall t \text{ (Cada camión tiene un viaje)} \\
 & \sum_j a_{ij} x_j \leq s_i, \quad \forall i \text{ (Carga en puntos de suministro)} \\
 & \sum_i d_{kj} x_j = d_k, \quad \forall k \text{ (Descarga en puntos de demanda)} \\
 & x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j
 \end{aligned}$$

Definimos c_j como el costo asociado al viaje j . Por otra parte, generamos la variable x la cual valdrá 1 si se realiza el viaje j y 0 en caso contrario. Los coeficientes a_i y d_k tienen los valores correspondientes a los volúmenes reales cargados o entregados en cada punto respectivamente. s_i representa el volumen máximo de stock en el punto de suministro i . Luego el conjunto J_t refiere a las rutas vinculadas al camión t . Por último, d_k corresponde a la demanda total en cada punto de descarga k .

El modelo como vemos, no tiene en cuenta las ventanas de tiempo ni la posibilidad de cola en industria, las cuales se pueden ir agregando. Estos problemas típicamente trabajan con 20–150 camiones, 100–500 puntos de suministro y 20–100 puntos de demanda. El número de restricciones se aproxima a las 140–750. Con un número de variables de miles de millones [44].

A modo informativo se detallan otras extensiones:

- Al VRP clásico se lo varían en la homogeneidad de la flota, es decir el conjunto de vehículos estará compuesto por vehículos con características diferentes.
- VRP - OVRP define un problema en el cual los vehículos no vuelven al depósito.
- VRP - MDVRP define un problema en el cual existen múltiples depósitos de los cuales abastecer a los clientes.
- VRP - SDVREP define que los clientes tienen la capacidad de devolver productos al depósito [47]

2.5.2.2.Backhauling

La propuesta de esta solución surge por la necesidad de optimizar el uso de los camiones en el sentido que los mismos son utilizados al 50% de su capacidad. Es decir, realizan un viaje cargado y un viaje vacío.

Lo que se propone es la utilización de diversos puntos de carga como forma de acortar trayectos entre un proveedor y los clientes. Según estudios hechos por Carlsson y Rönnqvist [43] y Forsberg [48] los ahorros generados por el uso de esta modalidad de gestión son de entre 2% y 20%.

Las posibilidades de utilizar Backhauling dependen del tipo de transporte y la distribución geográfica de los clientes, depósitos y las áreas de cosecha. Debe existir flujos de manera que van en direcciones opuestas. Esto puede deberse a que existen restricciones especiales entre pares de puntos de oferta y demanda, lo que resulta en que cada punto de demanda no esté conectado con la oferta más cercana [49].

Un aspecto a destacar en este problema, es que el intentar generar un modelo con estas características incrementa exponencialmente la cantidad de variable (alrededor de 10-15 millones), lo que lo hace muy complejo de trabajar. Es por ello que Carlsson Rönnqvist [43] propone una solución con las llamadas Generación de Columnas en donde las variables son dinámicas, por lo que se irán generando a medida que se procesa.

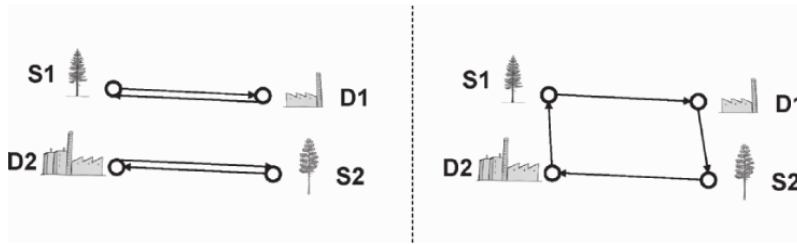


Figura 2.15 - A la derecha dos flujos directos - A la izquierda backhaulage tour
Fuente: Handbook of Operational Research in Natural Resources [49].

Para ejemplificar un caso de aplicación mencionamos FlowOpt, la cual es una herramienta de soporte de decisión que tiene como base la utilización de este modelo de gestión. En el artículo FlowOpt – “A Decision Support Tool for Strategic and Tactical Transportation Planning in Forestry” de Forsberg y Frisk [48] se analizan dos casos de estudio para la industria forestal de Suecia. En este estudio se menciona que, dado que hoy en día las fábricas de celulosa y aserradero pueden requerir diferentes tipos de madera, es viable que exista flujo de madera en direcciones no unidireccionales ya que los proveedores son diversos y no siempre son los más cercanos.

Al momento de diseñar el modelo y definir las variables, se crearon variables de penalización. El objetivo de las mismas es la de poder favorecer aquellas rutas que priorizan el backhauling. Es decir, las rutas que toman camino Backhauling tiene un costo que es la suma de los costos de todas las rutas menos un bonus.

En la Figura 2.16 se muestra el procedimiento de solución general que realiza la aplicación FlowOpt-

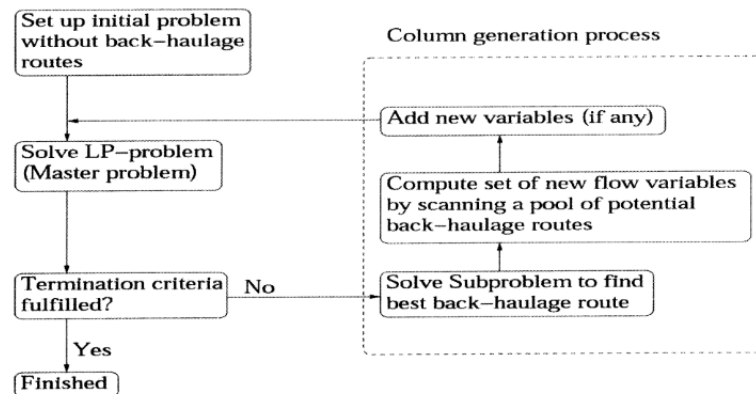


Figura 2.16 – Diagrama procedimiento FlowOpt
Fuente - FlowOpt – A Decision Support Tool for Strategic and Tactical Transportation Planning in Forestry. [48]

Si se analizan los casos de estudio presentados en el artículo de referencia, uno de ellos analiza la integración de camiones con trenes. Los resultados dieron que los beneficios de utilizar rutas con backhauling era de un 4% de ahorros mientras que cambiando algunas de estas rutas por traslados con trenes era de 7%. De todas formas, existe un beneficio por el uso de esta estrategia y al aplicarse en regiones en donde la infraestructura de trenes no es buena, siempre será mejor que la no aplicación.

El segundo caso de estudio era el análisis de un potencial intercambio o trueque de madera entre compañías. En este caso la utilización de rutas con backhauling no fue exitosa ya que no existían demasiados proveedores e industrias involucradas.

2.5.2.3. Sistema de Múltiples Agentes

El problema se divide en partes (agentes) capaces de interactuar y buscar soluciones individuales que brinden la mejor solución al problema. Se trata de un sistema que propone soluciones dinámicas en tiempo real por lo que mejora las soluciones obtenidas por los problemas tradicionales y elimina algunas de las limitaciones que estos tienen [50].

Para el caso de estudio, se identifican los llamados agentes y los elementos asociados al ambiente, estos últimos son:

- Proveedores, los cuales son identificados como polígono de área forestal.
- Rutas
- Patio de Madera

Los proveedores están conectados entre ellos y entre los patios de Madera (Clientes) a través de las rutas, las cuales pueden pasar a estado inactivo en ocurrencia de algún factor externo.

Los agentes involucrados serán:

- Camiones: Estos estarán caracterizados por sus diferentes cualidades, como ser capacidad, velocidad y costo operativo. Al inicializarse el sistema, el Agente de Transporte se comunica con el Agente de Rutas para determinar cuál es la ruta óptima entre proveedor y cliente. Al llegar al proveedor el Agente de Transporte se comunica con el Agente de Carga para realizar la solicitud de madera. Al ser una herramienta dinámica, el agente de transporte volverá a solicitar al agente de ruta la ruta óptima. Al llegar al cliente se comunica con el agente de descarga para informar la carga a retirar.
- Máquinas de carga: Esta maquinaria puede ser trasladada entre proveedores una vez hayan culminado con sus tareas en cada punto. Son responsables de gestionar el stock en cada polígono y tienen habilidades operativas propias.
- Máquinas de descarga: Al igual que las de descarga, tiene habilidades operativas propias, en cambio no tienen permiso de transporte entre clientes.
- Persona o sector encargado del ruteo. Este agente mide las mejores distancias y envía la información a los planificadores. Los camiones envían mensajes solicitando las rutas. Esta información es enviada por el agente de ruteo y también es reenviada y modificada en caso que surja algún imprevisto.
- Persona o sector responsable de planificar la operación. Este agente está encargado de determinar la cantidad de camiones a utilizar minimizando los costos, en un cierto período de tiempo. Lo hace utilizando la información de los elementos ambientales, el agente de transporte y del agente de ruteo. Es sobre el agente de planificación que se crea un problema lineal entero. En los momentos en que los imprevistos ocurren, este agente también es el encargado de evaluar económicamente los escenarios alternativos.

En el trabajo realizado por Araujo [51], lleva a cabo una simulación utilizando el sistema de múltiples agentes. Se prueba el sistema bajo diversas situaciones como:

- Dada una cierta flota de camiones y una solución con un subconjunto de estos, se realiza una prueba inhabilitando uno de los camiones seleccionados. Bajo este cambio y teniendo en cuenta la demanda en el ejemplo, los costos de este nuevo subconjunto aumentaron 2,8%.
- Re-planificación de rutas debido a un corte permanente de alguna de las rutas utilizadas en la solución inicial. En este caso y para los valores del problema, el aumento de costos fue de 12,6%.

2.5.2.4. Modelo para un problema multimodal

Como se mencionó en la Sección 3.3.3, el uso de más de un medio de transporte como forma de trasladar el producto es conocido como transporte multimodal.

Para estar en esta categoría dos o más medios de transporte diferentes deben estar involucrados en el traslado desde productores a consumidores. Estos medios de transporte incluyen camiones, trenes, barcos, aviones, entre otros.

Este trayecto puede ser dividido en 3 etapas, pre-recorrido, recorrido largo y recorrido final. Por lo general el pre recorrido y el recorrido final es llevado a cabo por camiones, mientras que el recorrido largo puede involucrar los otros métodos ya mencionados [52].

En el trabajo desarrollado por Guiwu Xiong y Yong Wang [53]. Se propuso un algoritmo para este tipo de problemas. El modelo presentado a continuación es uno de los que se desarrolla en el trabajo y es el más básico en cuanto a ser menos realista y complejo que al que se desarrolla en el trabajo mencionado. Se eligió con el fin de entender la lógica del problema y las características del mismo.

El problema cuenta con tres conjuntos de datos, $G(V, E, M)$, los cuales representan nodos, links y tipos de transporte respectivamente.

Existen dos tipos de ventanas de tiempo, las referidas a los nodos (i th) y las referidas a las necesidades de los clientes las cuales abarcan la totalidad del tiempo de transporte, (l i) tiempo mínimo aceptado y (u i) tiempo máximo aceptado.

Las variables y parámetros definidos para el problema son los siguientes:

x_{ijm} : producto transportado en el link (i, j) por la modalidad m

c_{ijm} : precio por unidad en la modalidad m en el link (i, j) .

d_{ijm} : distancia de transporte de la modalidad m en el link (i, j)

v_m : velocidad de link en la modalidad m

tt_{ikl} : unidad de tiempo de transferencia en un nodo i de modalidad de transporte k a l

tc_{ikl} : unidad de costo de transferencia en un nodo i de la modalidad de transporte k a l

w_{ikl} : indicador de cambio de transporte en el nodo i de la modalidad k a l

D_i : programación de horario de salida del nodo i . Vale 0 en caso de que no haya programaciones.

A_i : tiempo de arribo al nodo i

q_{ijm} : volumen del producto en el link (i, j) con modalidad m .

Q : volumen total desde el nodo original al nodo de destino.

Este problema NP difícil incluye minimizar tanto los costes de transporte como los tiempos de viaje.

La función objetivo queda definida como:

$$\begin{aligned} Z_1 &= \min \left\{ \sum_{ij} \sum_m c_{ijm} q_{ijm} d_{ijm} x_{ijm} + \sum_{ij} \sum_i \sum_{kl} q_{ijm} \omega_i^{kl} tc_{ikl} \right\} \\ Z_2 &= \min \left\{ \sum_{ij} \sum_m d_{ijm} / v_m + \sum_{ij} \sum_i \sum_{kl} \max(D_i, q_{ijm} tt_{ikl}) \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_j q_{ijm} - \sum_i q_{jim} = \begin{cases} Q & \text{if } i = O \\ -Q & \text{if } i = D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall i \in V, m \in M \quad (2)$$

$$\max(D_i, q_{ijm} t_{ikl}) + d_{ijm}/v_m - A_j = 0 \quad \forall i, j \in V, (i, j) \in E, m \in M \quad (3)$$

$$l_i \leq A_i \leq u_i, \forall i \in V \quad (4)$$

$$\sum_m x_{ijm} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in E, m \in M, \quad (5)$$

$$\omega_i^{kl} = \begin{cases} 1 & k \neq l \\ 0 & k = l \end{cases}, \quad (6)$$

$$x_{ijm} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in E, m \in M. \quad (7)$$

Si se analizan las ecuaciones presentadas, la primera función objetivo minimiza el costo total de transporte mientras que la segunda minimiza el tiempo. La ecuación (2) representa la conservación del flujo. La ecuación (3) asegura la compatibilidad con los tiempos requeridos. La desigualdad (4) representa que el nodo debe cumplir con la restricción de las ventanas de tiempo programadas. La desigualdad (5) denota que hay como máximo un transporte en el enlace (i, j) . Los conjuntos de restricciones (6–7) representan las condiciones de integralidad en las variables de decisión [53].

2.5.2.5. Estrategias de resolución

Generación de columnas

Actualmente pueden resolverse problemas de optimización en una computadora convencional, pero existen problemas prácticos cuando la cantidad de variables comienza a aumentar. Estos problemas pueden ser resueltos mediante técnicas de descomposición que transforman la solución de un gran problema en una serie de problemas de menor complejidad [54].

Esta estrategia llevará a cabo la resolución del problema, existiendo la posibilidad de que no todas las columnas o variables van a ser conocidas, bien debido a que estas no se conocen o debido a que no es de utilidad conocerlas.

Se recomienda “*Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs - Operation Research*”-[55] para un mayor entendimiento de la estrategia y “*A column generation algorithm for tactical timber transportation planning*”[56] para ver la aplicación del método, y sus resultados, en un problema de planeamiento forestal.

Heurísticas

Las heurísticas son procedimientos que proporcionan soluciones de aceptable calidad mediante una exploración limitada del espacio de búsqueda, en tiempos de cálculo generalmente moderados [57]. Estas soluciones pueden ser mejoradas utilizando métodos de búsqueda más sofisticados, pero incurriendo en elevados tiempos de ejecución [58].

Podemos clasificar los métodos heurísticos en métodos constructivos, métodos de dos fases y heurísticas de mejora, como se observa en la Figura 2.17.

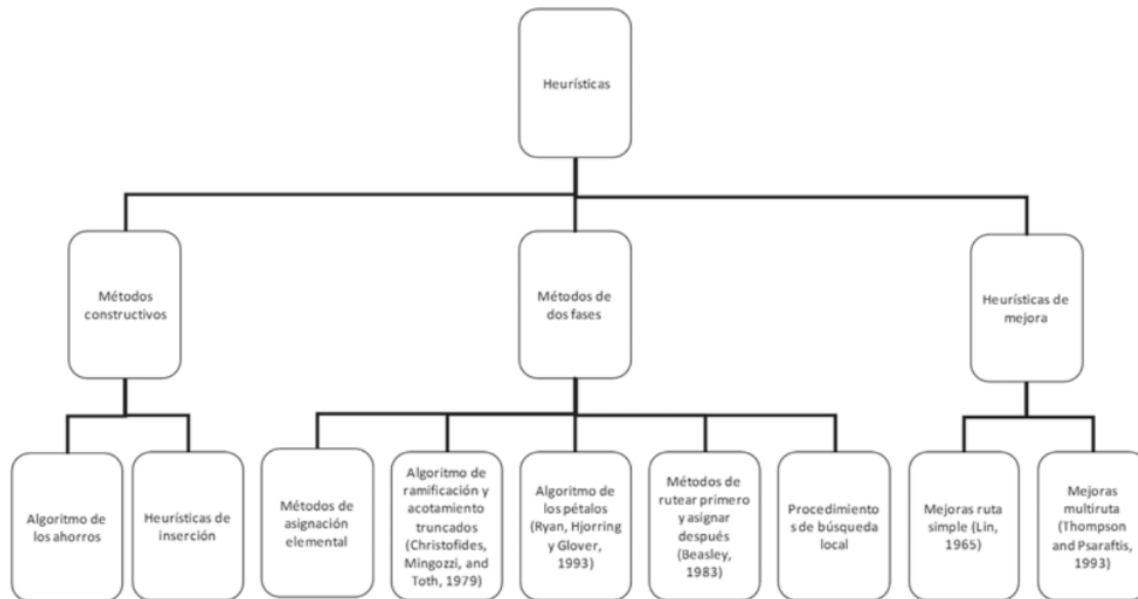


Figura 2.17 – Clasificación de métodos heurísticos

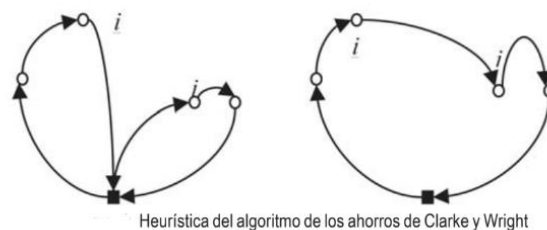
Fuente - Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos [57]

Métodos Constructivos

En los métodos constructivos se encuentran los algoritmos de los ahorros (Savings Algorithms) y las heurísticas de inserción, los cuales son ampliamente conocidos dentro del campo de la investigación de operaciones.

El algoritmo de ahorros de Clarke y Wright [59], uno de los más conocidos para VRP, se aplica generalmente a problemas para los cuales el número de vehículos es una variable de decisión.

Si en una solución se encuentran dos rutas diferentes y estas dos rutas pueden ser combinadas, buscando obtener una nueva ruta en la cual se encuentre un mayor ahorro [58]. En la Figura 2.18 se puede ver una representación en forma de grafo para dicha heurística.



Heurística del algoritmo de los ahorros de Clarke y Wright

Figura 2.18 – Diagrama de heurística de los ahorros
Fuente - Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos[58].

El algoritmo original de Clarke y Wright produce buenas rutas al inicio pero no hacia el final, al incluir algunas rutas circulares. Para ello, Toth y Vigo [60] mejoran el algoritmo

mediante un parámetro llamado Shape Parameter o Parámetro de Forma el cual penaliza la unión de rutas con clientes lejanos [57].

Por otro lado, los algoritmos de ahorros basados en coincidencia (Matching-Based Savings Algorithms) son una modificación del algoritmo de ahorros estándar y plantean realizar la unión de dos rutas teniendo en cuenta las posibles uniones subsiguientes. Esto se logra mediante un grafo que tiene todas las rutas en nodos y un arco entre ellos, el ahorro se obtiene al combinar las rutas correspondientes siempre que sea factible [57].

Por su parte en las heurísticas de inserción, se encuentran dos algoritmos de dos fases cada uno, los mismos aplican a problemas con un número de vehículos no especificado [57]. Estas heurísticas crean soluciones mediante sucesivas inserciones de clientes en las rutas, es decir, en cada iteración se tiene una solución parcial cuyas rutas solo visitan a un subconjunto de los clientes y luego se selecciona un cliente no visitado para insertarlo en la última ruta creada, aunque en consecuencia trae que los últimos viajes sean muy costosos [58].

La heurística de inserción secuencial de Mole & Jameson [61] utiliza parámetros para expandir una ruta en construcción. Al momento de insertar un cliente se utilizan dos medidas, una es el costo de insertar el cliente no visitado, determinando la mejor posición de cada uno, y una segunda para no pasar por alto las ubicaciones más lejanas, considerando también que tan factible es cada inserción [58].

Por último, la llamada inserción en paralelo de Christofides, Mingozzi & Toth [62] opera también en dos fases. En la primera fase se determina la cantidad de rutas a utilizar utilizando el algoritmo anterior de Mole & Jameson [61] para obtener rutas compactas y conservar los clientes iniciales de cada ruta junto con la cantidad de rutas de la solución final. En la segunda fase se crean las rutas y se inserta el resto de los clientes en ellas, en base a la diferencia de costo de insertarlos en su mejor o segunda mejor ruta [58].

Métodos de dos fases

Los métodos asignar primero y rutear después (*cluster first - route second*) proceden en dos fases. Primero se busca generar grupos de clientes, también llamados clusters, que estarán en una misma ruta en la solución final. Luego, para cada cluster se crea una ruta que visite a todos sus clientes. Las restricciones de capacidad son consideradas en la primera etapa, asegurando que la demanda total de cada cluster no supere la capacidad del vehículo[58].

El algoritmo de Barrido (*sweep algorithm*) consiste en formar inicialmente agrupamientos girando una semirrecta con origen en el depósito e incorporando los clientes hasta violar la restricción de capacidad. Una ruta de vehículos es obtenida para el cluster resolviendo el problema del viajero. En algunos casos de implementación es necesaria una fase de post-optimización en la cual los vértices se intercambian entre clusters adyacentes y las rutas son re-optimizadas[57].

Otro es el algoritmo basado en asignación generalizada (*generalized-assignment-based algorithm*) que en lugar de utilizar un método geométrico para formar clusters utiliza un Problema de Asignación Generalizada (GAP). La primera fase de este algoritmo consiste en escoger los vértices, llamados semillas para construir los agrupamientos. En la fase siguiente se asignan los vértices a cada agrupamiento sin sobrepasar la capacidad del vehículo resolviendo un GAP [57].

Truncated Branch and Bound. En este algoritmo tenemos tantos niveles ramificados como rutas de vehículos, donde cada uno contiene un conjunto de rutas. Sus autores

proponen una implementación en la cual determinan una rama en cada nivel y se va descartando la misma al paso de selección de la ruta. Con ello logramos construir un árbol limitado manteniendo pocas rutas en cada nivel[57].

Métodos de Ruteo Primero y Asignación Después (*Route-First, Cluster-Second Methods*). Este método consta de dos fases. En la primera se calcula una gran ruta que visita a todos los clientes resolviendo un TSP sin tener en cuenta las restricciones del problema. Luego en la segunda fase, esta ruta gigante se descompone en varias rutas factibles, es decir, teniendo en cuenta la solución de la primera fase se determina la mejor partición teniendo en cuenta la capacidad del vehículo [57].

Procedimientos de Búsqueda Local (*Local Search Procedures*). Estos procedimientos de búsqueda local se aplican para mejorar una solución ya obtenida. Se define un conjunto de soluciones vecinas y partiendo de una solución primaria para luego ser reemplazada por una solución vecina con un costo menor. El procedimiento se repite hasta que no se pueda mejorar la solución [57].

Extensiones de heurísticas clásicas

Dichas heurísticas surgen como forma de extender las anteriores y contemplar algunas restricciones adicionales como ventanas de tiempo y flota heterogénea [58].

Dentro de los algoritmos de ahorro, Solomon[63] propuso una mejora para contemplar los problemas de ventanas de tiempo, así como para las heurísticas de inserción secuencial.

Otra propuesta es la de Potvin y Rousseau [64] que trabaja en paralelo con la propuesta anterior de Solomon.

Así como Golden, Assad, Levy y Gheysens [65] presenta una extensión directa del Ruteo primero - Asignar después, donde se propone además de la distancia, el costo del menor vehículo capaz de recorrer la ruta.

Metaheurística

Las metaheurísticas son heurísticas de nivel más alto de abstracción[2], cuyas características se enfocan en estrategias que guían el proceso de búsqueda de una solución “de buena calidad”. El objetivo es explorar el espacio de búsqueda sin converger a una solución local continuamente.

En las siguientes Secciones se explicitan brevemente alguno de los algoritmos utilizados de la Metaheurística.

Algoritmos evolutivos

Es un procedimiento de resolución que está inspirado en la teoría de la evolución de Darwin, el cual parte de una población inicial de soluciones (factibles pero subóptimas) que evolucionan [58].

La evolución se da usualmente mediante la aplicación de los siguientes operadores:

- Selección
- Cruzamiento
- Mutación

En el caso particular del VRP, usualmente se utilizan cuatro operadores de mutación, los cuales son:

- Intercambio de la posición de dos nodos en una ruta
- Inversión del orden de la ruta

- Reinserción de un nodo en una ruta diferente a la original
- Selección de una subruta para insertarla en otro lugar de la solución.

Algoritmo de Colonia de Hormigas

Los sistemas de Algoritmos de Colonia de Hormigas están inspirados en el comportamiento social de las colonias de hormigas para buscar alimento. Cuando una hormiga encuentra un camino hacia una fuente de alimento, deposita en el trayecto una sustancia llamada feromona. La cantidad de feromona depositada depende de la longitud del camino y de la calidad del alimento encontrado.

Si una hormiga no detecta la presencia de feromona se mueve aleatoriamente, pero si percibe dicha sustancia, decidirá con alta probabilidad moverse por los trayectos con más cantidad, lo que a su vez provocará un aumento de la feromona depositada en esa zona. De este proceso desencadena un sistema auto catalítico ya que cuantas más hormigas sigan cierto trayecto, más atractivo este se vuelve para ellas [58].

Tabu Search

La Metaheurística de Tabu Search [2] tiene como principio realizar una búsqueda local aceptando soluciones que empeoran la solución actual. En cada iteración el algoritmo mueve la solución a la mejor dentro del subconjunto de soluciones vecinas. Cabe destacar que la solución actual puede ser peor que la anterior. A causa de esto se definen movimientos prohibidos (tabú), los cuales contemplan no volver a soluciones anteriores, evitando así caer en ciclos.

Simulated annealing

Propuesta inicialmente por Kirckpatrick [66] como método para la búsqueda de resultados en problemas de optimización, tiene como principio el re-cocido físico de los materiales sólidos. Se entiende como re-cocido, el proceso por el cual un material pasa a sólido en su estado fundamental, con sus átomos dispuestos en patrones regulares. Para alcanzar el estado fundamental, es importante que el enfriamiento no ocurra demasiado rápido. Este estado se alcanza cuando el material se encuentra con una configuración atómica de energía mínima, lo que corresponde a un valor mínimo de la función objetivo de un problema de optimización.

2.5.3. Sistemas de soporte de decisiones (DSS)

Cómo se realiza la planificación del transporte, por quién y con qué nivel de detalle varía significativamente entre empresas [44].

Algunas compañías realizan planificación de transporte interna mientras otros lo subcontratan a proveedores de servicios de transporte (por ejemplo, transportistas independientes o asociados) o a proveedores de servicios logísticos (LSP), los cuales coordinan en su nombre varios proveedores de servicios de transporte [67].

Las decisiones pueden variar en dos extremos, donde una posibilidad es ser descentralizadas, donde cada conductor toma su propia decisión o centralizada donde una entidad de gestión es la que toma la decisión de toda la flota.

Independientemente de las estructuras de propiedad de la flota, existe una tendencia a que la planificación del transporte se vuelva más centralizada, buscando que los camiones aumenten su área de trabajo [68].

Dado que aumenta la relevancia de los métodos de planificación basados en computadora, en problemas de transporte más grandes y complejos involucrados en la

planificación centralizada, decidir utilizar DSS es más rentables que la planificación manual por parte de un tomador de decisiones (DM).

Se busca permitir que el tomador de decisiones se beneficie por el uso de métodos de computadora, por lo que se han desarrollado métodos de planificación de integración de sistemas de soporte de decisiones (DSS) y desplegado en este tipo de industria.

La primera mención de DSS en el transporte de madera es por Robinson [69], quien informa el desarrollo de una "ayuda de envío mecánico de camiones" en la década de 1960 por una compañía neozelandesa.

En sentido amplio, una primera definición incluye todas las herramientas informáticas que admiten procesos de toma de decisiones en el transporte, la cual incluiría todos los sistemas de gestión de información, análisis de datos, los métodos y hojas de cálculo aplicados para resolver los problemas de decisión de transporte.

Otra segunda definición le da un significado más limitado al DSS de transporte: donde el mismo es "(...) un sistema interactivo basado en computadora que admite el DM en la resolución de un complejo problema de decisión de transporte.

Se reportan ahorros de costos de 0.8 a 35% en los estudios de caso e implementaciones con ese tipo de método de planificación y revisando el soporte de decisiones.

A pesar de tales resultados, la adopción de métodos de planificación basados en computadora y DSS por las empresas forestales en todo el mundo han estado limitadas hasta ahora, con una notable excepción en Latinoamérica con Chile utilizando ASICAM y ForesTruck.

En la Tabla 2.11 se presentan algunos artículos de referencia relacionados a problemas de ruteo y se explicita a grandes rasgos cuáles fueron las estrategias de resolución y cómo estas fueron evolucionando con los años.

Tabla 2.11- Artículos con contenido relacionado a problemas de ruteo y sus respectivas estrategias de resolución.

ARTÍCULO	AUTOR/ES	CONTENIDO
The truck dispatching problem	G. B. Dantzig y J. H. Ramser [45]	Documento enfocado en la búsqueda de ruta óptima de una flota de camiones de reparto de gasolina entre la terminal a granel y las estaciones de servicio.
Scheduling of Vehicle Routing Problem from a Central Depot to a Number of Delivery Points	Clarke, G. and Wright, J.R [59]	Enrutamiento óptimo de una flota de camiones de diferentes capacidades desde un depósito central hasta varios puntos de entrega. Surge el término "algoritmo de ahorros"
A tabu search heuristic for the vehicle routing problem	M Gendreau, A Hertz, G Laporte. [70]	Se describe una nueva heurística de búsqueda de tabú llamada "Taburoute" para el problema de generación de rutas de vehículos con restricciones de capacidad y longitud de ruta.
The Granular Tabu Search and Its Application to the Vehicle-Routing Problem	Paolo Toth, Daniele Vigo [60]	Se introduce el concepto de algoritmo "Granular Tabu Search" que, en pocas palabras, consiste en dejar de lado arcos que unen nodos muy distantes entre sí, ya que

		tienen una baja probabilidad de pertenecer a una buena solución.
A new matheuristic approach for the multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes.	J-F Cordeau M. Gendreau G. Laporte J-Y Potvin F. Semet [71]	Artículo en el cual se estudia el problema de generación de ruteo de vehículos. Se tiene en cuenta la posibilidad de existencia de varios depósitos con rutas entre ellos, donde los vehículos pueden realizar recargas durante la jornada laboral.
Using operational research for supply chain planning in the forest products industry	Sophie D'amours, Mikael Rönnqvist, Andres Weintraub [72]	Revisión general de problemas de planificación estratégica y operativa de procesos de cadena de suministro de productos de industria forestal.
Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation	J. Audy., S. D'Amours, M. Rönnqvist [4]	Documento que analiza métodos de planificación y sistemas de apoyo de toma de decisiones en referencia a problemas de ruteo de vehículos para transporte de madera. Se generó un resumen de posibles problemas, basados en los principales atributos encontrados en cada método de resolución propuesto.

3. Marco teórico

En la siguiente Sección se presentan los aspectos generales del transporte y su gestión. Luego se profundiza en la utilización de múltiples medios de transporte y cómo esto puede influir en los costos totales. Por último, se presentan casos de utilización de dichas modalidades aplicadas al transporte de troza y cómo ejecutar la planificación.

3.1. Planificación del transporte

El transporte de productos es el conjunto de procesos por los cuales la materia prima es trasladada a las diversas estaciones del proceso industrial, pero también es la distribución del producto final hacia su consumidor. El transporte se lo puede definir como el conjunto de operaciones que tienen como fin el movimiento. Dependiendo de la fase del ciclo productivo en el que nos encontremos, puede tener diferentes modalidades y tiempos asociados, ya sea por volúmenes transportados como por estado físico del producto.

La planificación del transporte en las operaciones forestales implica muchas decisiones comunmente administradas de acuerdo con cuatro horizontes de perspectiva de tiempo:

- Estratégico (hasta cinco años)
- Táctico (seis meses a cinco años),
- Operacional (de uno a 180 días)
- En tiempo real (<un día) [73].

Las decisiones a **nivel estratégico** se refieren a la construcción / mantenimiento del transporte, infraestructuras (por ejemplo, carretera, terminal) y la selección de modos de transporte (por ejemplo, despliegue de trenes, sistema multimodal para buques o camiones pesados).

Algunos de los motivos por los que puede ser necesario un análisis de localizaciones óptimas y de un aumento de la infraestructura es por el aumento previsto en la demanda de los productos actuales, por la diversificación de los productos transportados o también puede ser por la urbanización generada próximo a los puntos de interés.

Un problema no menor es el impacto de la congestión que se genera en las carreteras de aquellas ciudades por las cuales existe un mayor flujo de tráfico de carga, ya sea por ser una ciudad portuaria o por pertenecer a un paso fronterizo [74].

Las decisiones **tácticas** abordan principalmente la mejora de infraestructuras de transporte (por ejemplo, aumento de la capacidad de almacenamiento de la clase de carretera o terminal) y el ajuste de la capacidad y la utilización del equipo de transporte (por ejemplo, número de vagones en la ruta del tren y frecuencia de la ruta del tren).

Las decisiones **operativas** se refieren a la asignación de volumen desde los puntos de oferta a los de demanda. Diseño de recorridos de transporte de camiones y programación del transporte equipo / tripulación.

Las decisiones en **tiempo real** se refieren principalmente al despacho de camiones con la asignación de la siguiente carga (o más) a medida que ocurren las operaciones de transporte.

Con las tecnologías actuales es común que las empresas dedicadas al transporte de carga utilicen softwares de ruteo, los cuales permiten asignar las rutas óptimas que se deben realizar de acuerdo a las múltiples paradas que pueden llegar a requerir el viaje. Este tipo de tecnología ayuda a establecer ventanas de tiempo de arribo y genera ahorro en los costos asociados al transporte, ya que se optimiza el tiempo y el uso de los recursos que el medio consume, como puede ser el combustible y la mano de obra. La gran mayoría de estos softwares tienen base en la solución de problemas VRP y sus derivados, los cuales se explican en la Sección 2.5.2.1.

Uruguay no es ajeno a la utilización de las tecnologías antes mencionadas. Mediante la realización de una encuesta a transportistas del rubro, es que podemos afirmar que se utilizan paquetes de softwares de ruteo para la asignación de viajes además de ser sometidos controles de contabilización de tiempos muertos y el consumo de combustible por viaje utilizando estas tecnologías. Los datos obtenidos en la encuesta se encuentran ampliados en la Sección 4.1.2.

En consecuencia, la gestión o planificación del transporte de carga es una herramienta que logra que la industria pueda mantener un cronograma de entregas según se requiera, permitiendo un correcto flujo de las entradas y salidas de los productos. Como resultado esto impacta en diversos aspectos de la cadena de abastecimiento. Dicha planificación determina, por ejemplo, el nivel de servicio que se le brinda a los clientes, y a su vez permite la planificación de los valores de stock tanto de materia prima como de productos terminado, ya que se realiza en base a los tiempos de entrega los cuales dependen de cierta forma del medio de transporte por que cual se realiza.

3.2. Transporte multimodal

El comercio internacional representaba en 2019 un 58,2% del PBI a nivel mundial, gran parte de este asociado al movimiento de mercadería [6]. Como se puede observar en la Figura 3.1, este indicador aumentó un 31.7% desde 1970 al 2019.

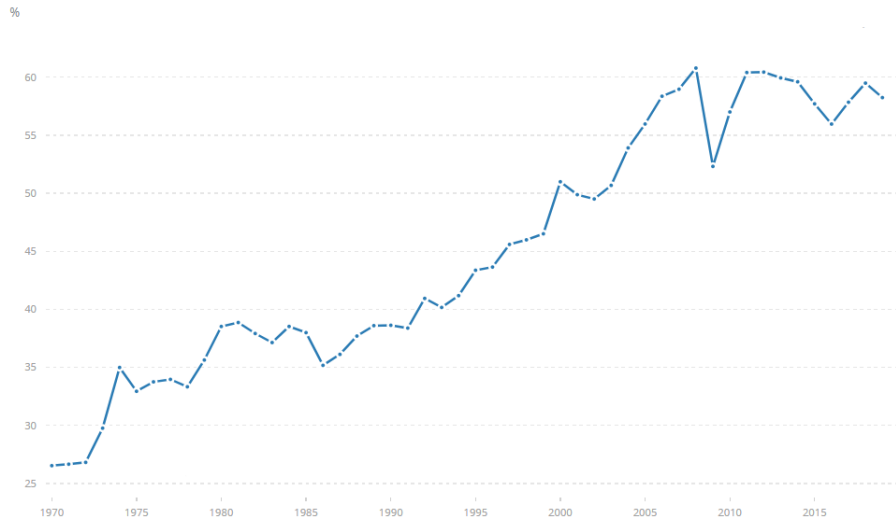


Figura 3.1 - Porcentaje de PBI mundial asociado al comercio internacional [75].

Es por esto que se han desarrollado múltiples medios de transporte para poder realizar el traslado de los productos alrededor del mundo. Los medios como el camión, el tren, el barco y el avión, logran generar una gran diversidad de modelos de cargas, velocidades y costos. Estos aspectos se pueden combinar de forma de priorizar el área que se crea conveniente según el rubro, el tipo de producto y su estado.

A partir de la generación de estos medios de transporte y su interacción es que se llega a lo que se conoce como transporte multimodal. Una definición establecida por la Convención de Ginebra en 1980 es la siguiente: “Se efectiviza por medio de al menos dos modos de porteo disímiles, sin ruptura de la unidad de carga desde su recepción por el acarreador o consolidación, bajo la responsabilidad de una persona que asume por la totalidad del trayecto hasta la desconsolidación y entrega de los bienes al consignatario”[76]. Esto implica que hay una interacción de uno o más tipos de vehículos en el transporte de una carga desde que sale de su origen hasta que llega a su destino. Por ejemplo, la utilización de camiones que trasladan la mercadería al puerto para que luego mediante barco llegue a su destino es una forma de transporte multimodal.

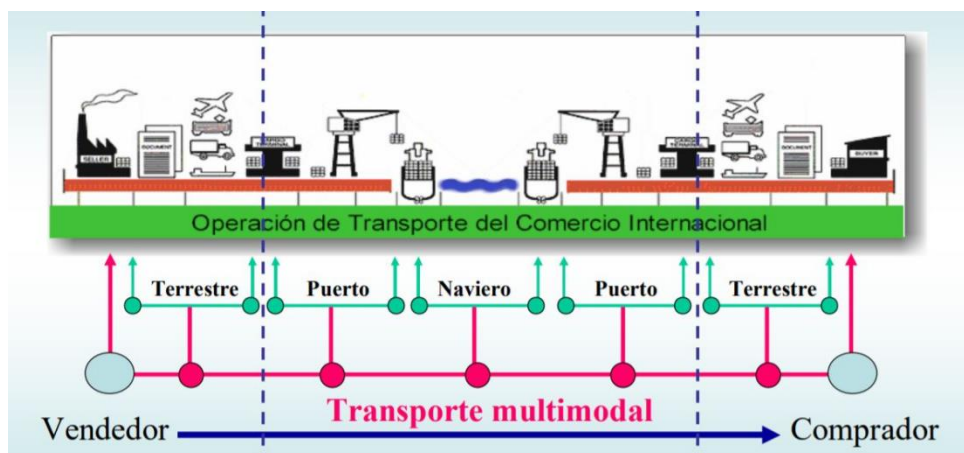


Figura 3.2 - Operación del comercio Internacional utilizando múltiples medios de transporte [77].

El transporte multimodal hoy en día se da tanto en el ámbito internacional como también se da en el manejo de las cargas nacionales. Para ambos casos las empresas involucradas pueden o no formar parte de una sociedad. Además, tanto en lo nacional como en lo internacional existen normativas que regulan los derechos y obligaciones de los transportistas en los tramos en los que se ven involucrados.

3.3. Transporte de trozas

En la presente Sección se desarrollan las diferentes modalidades de transporte de trozas, existiendo diferenciación entre los que se utilizan para el movimiento de corta y larga distancia. Cada modalidad está diseñada para completar exitosamente la extracción de trozas desde los montes hasta los destinos de carga, restringido por las herramientas disponibles y las condiciones naturales del lugar.

Usualmente el transporte de trozas se divide en dos etapas, una etapa inicial donde el producto se mueve dentro del monte, desde el punto de cosecha hasta un acopio, y una etapa secundaria donde las trozas son transportadas desde un acopio a los puntos de consumo o a los centros de acopio. Dependiendo de la ubicación geográfica y del bioma en que se encuentre, son las facilidades o dificultades que presenta cada etapa[78].

Etapla inicial

Dentro de la etapa inicial del transporte de trozas, se encuentra un grupo altamente en desuso en la actualidad, pero que alguna vez fue el motor de la economía mundial. Este grupo corresponde al transporte de tracción a sangre, ya sea humana o animal[78].

Continuando con la línea temporal de evolución del transporte referente a la etapa inicial, se encuentra el arrastre por poleas acopladas a máquinas a vapor, posteriormente sustituidos por tractores con motores a combustión.

Existiendo territorios con pronunciadas pendientes, se diseñaron sistemas de transporte que utilizan dichas pendientes para transformar la energía gravitatoria en energía cinética.

Podemos encontrar dentro de este grupo, el transporte por cables aéreos, los cuales son elevados sobre el monte por medio de soportes y son utilizados usualmente para descender las trozas desde lo alto del monte al llano. Basado también en la transformación de energía se diseñó el monocarril, una especie de vía única por el interior del monte, donde se transportan las trozas en vagones[78].

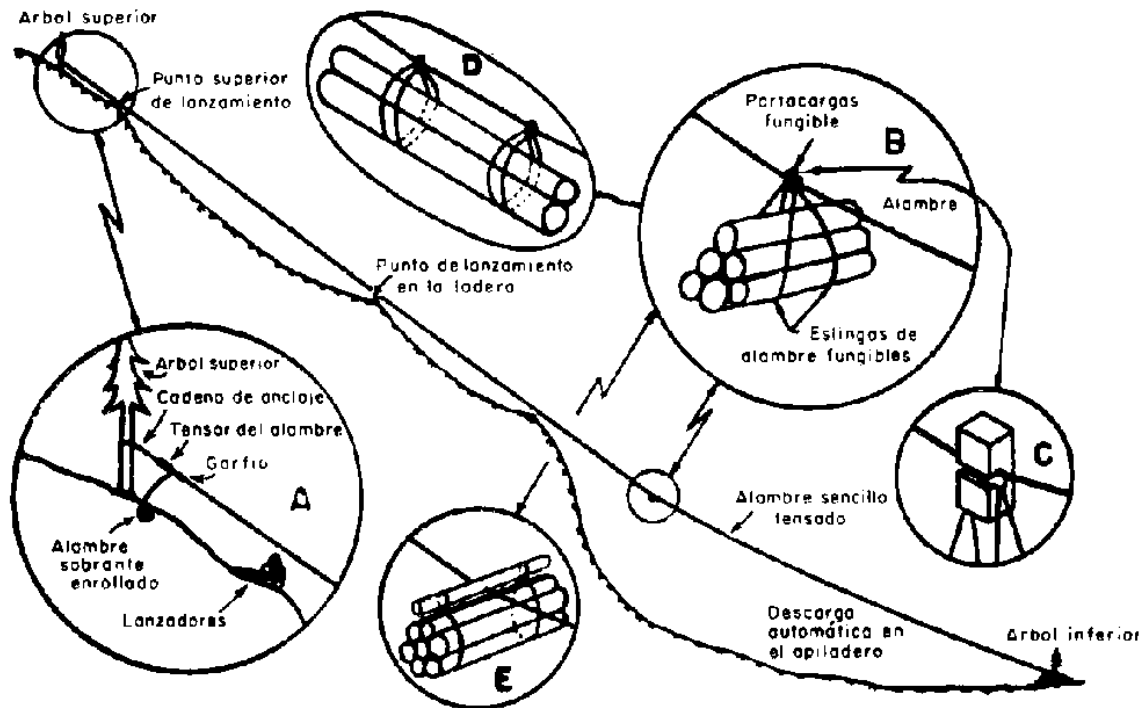


Figura 3.3 - Sistema simple de gravedad [78].



Figura 3.4 - Movimiento de trozas mediante cables propulsados [79].

La evolución de la tecnología y la investigación nos lleva a la actualidad, donde la gran mayoría de las trozas son extraídas en la etapa inicial por camiones, ya que presentan gran versatilidad y una inversión asociada relativamente baja en comparación a los métodos antes mencionados.

Etapas secundaria

Esta etapa está usualmente relacionada al movimiento de largas distancias, lo que asociándolo a una economía de escala se refleja en una tendencia al transporte de grandes volúmenes.

Con el surgimiento de la locomotora a vapor, el transporte por ferrocarril fue el preferido a nivel mundial durante muchos años[78].



Figura 3.5 - Carga ferroviaria en Uruguay. Fuente: Imagen extraída de la video presentación de SELF.

El surgimiento de los motores a combustión, la disminución de los costos de producción de vehículos y carreteras, han desplazado con los años la posición dominante del ferrocarril, tomando fuerza el transporte de camiones con remolque o sus variantes de acople[78].



Figura 3.6 - Camión Tritren [80].

Paralelamente a los movimientos de transporte terrestre, en los casos que los biomas así lo permitan, existe el transporte fluvial. Dentro del grupo de transporte fluvial, hay múltiples variantes, desde trozas sostenidas por flotación propia impulsada por la corriente, hasta barcos motorizados especialmente diseñados para el transporte de trozas[78].



Figura 3.7 - Transporte de madera por flotación [91].

4. Definición del Problema

En la presente Sección se define el objetivo del trabajo y se expone la información relevante que lo fundamenta. Se describe cómo se encuentra la infraestructura y el mercado uruguayo en lo referente al transporte y demanda de trozas.

4.1. Objetivo del proyecto

El objetivo del proyecto fue en primer lugar el de realizar una revisión de la literatura sobre la planificación de transporte de productos forestales, sobre todo en países con un desarrollo fuerte en esa industria, confeccionando un documento de estado del arte, prestando especial atención a las variantes investigadas, los modelos matemáticos propuestos, así como los procedimientos de resolución y los resultados obtenidos.

En una segunda etapa se debía proponer un modelo matemático que sirva de base para el estudio de transporte de carga forestal, que puede servir de herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la optimización de recorridos y frecuencias para el transporte de la madera, desde los diferentes lugares de origen hacia los posibles destinos. Este modelo debe considerar también cumplir con la demanda existente, minimizar los costos de los fletes, evitar la congestión de las rutas y ampliar alternativas al sistema tradicional de transporte.

4.2. Descripción del caso.

La información desarrollada se organiza por un lado en presentar la situación actual y por otro lado se exponen los principales resultados de la encuesta realizada a empresas transportistas del sector.

4.2.1. Situación del Uruguay

En los últimos años ha habido un sostenido incremento en la demanda de productos provenientes de la actividad forestal en el Uruguay, causado principalmente por la instalación de dos plantas de celulosa y una futura planta ya en construcción [82]. En base a esta situación, se encuentra una oportunidad de análisis en el proceso de abastecimiento de trozas desde los montes a los distintos puntos de demanda.

En las Figuras 4.1 y 4.2 se muestra la evolución y crecimiento tanto de la superficie plantada del territorio uruguayo como de los metros cúbicos extraídos.

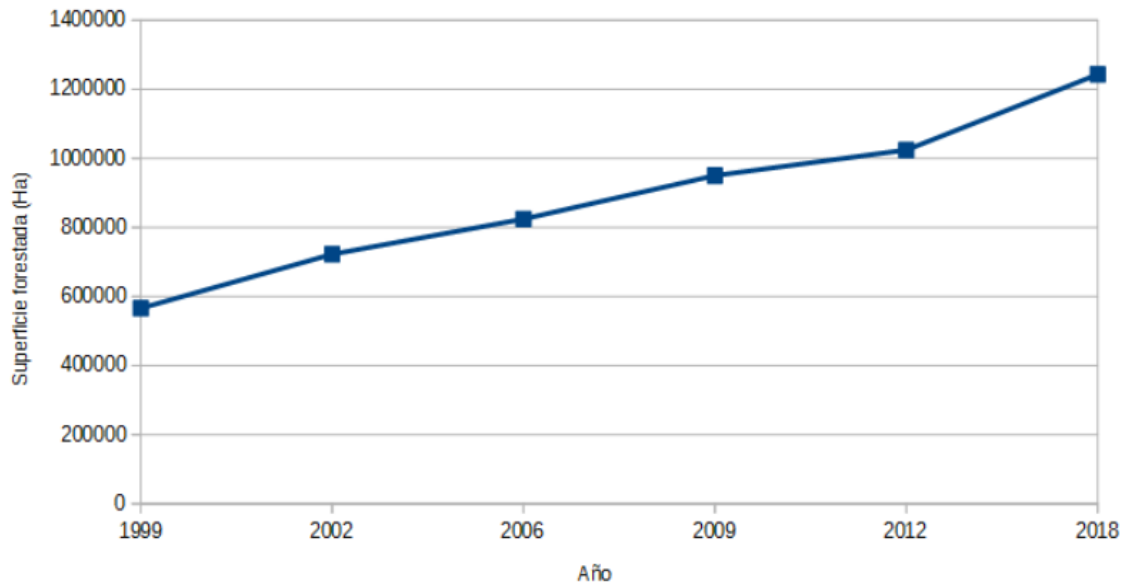


Figura 4.1 - Evolución de superficie plantada [83].

Extracción de madera por destino

En millones de metros cúbicos

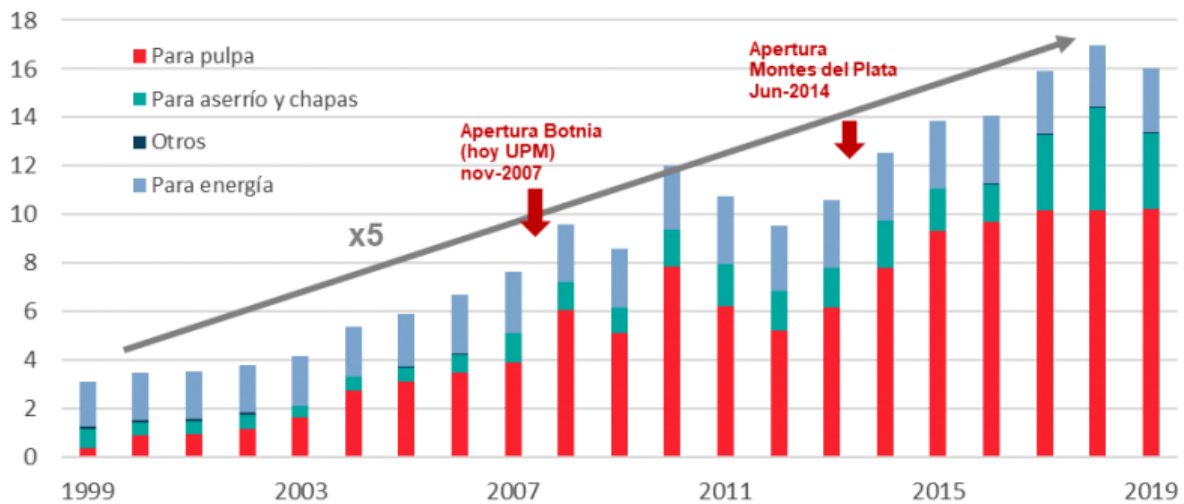


Figura 4.2 - Extracción de madera por destino final [84].

En 2019 el exdirector de transporte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas declaró: “Va a haber mucho incremento de la carga, entonces se debe desarrollar la intermodalidad [...] Es necesario tener apta la red vial, pero el gobierno también ha visto necesario el mejoramiento de las vías fluviales navegables y la recuperación del ferrocarril mediante el Proyecto Ferrocarril Central” [85].

La infraestructura actual cuenta con una amplia red de carreteras que logra una buena cobertura del territorio nacional. En la Figura 4.3 se muestra la red vial del territorio uruguayo y se las clasifica según si es un corredor internacional, ruta primaria, secundaria o terciaria.

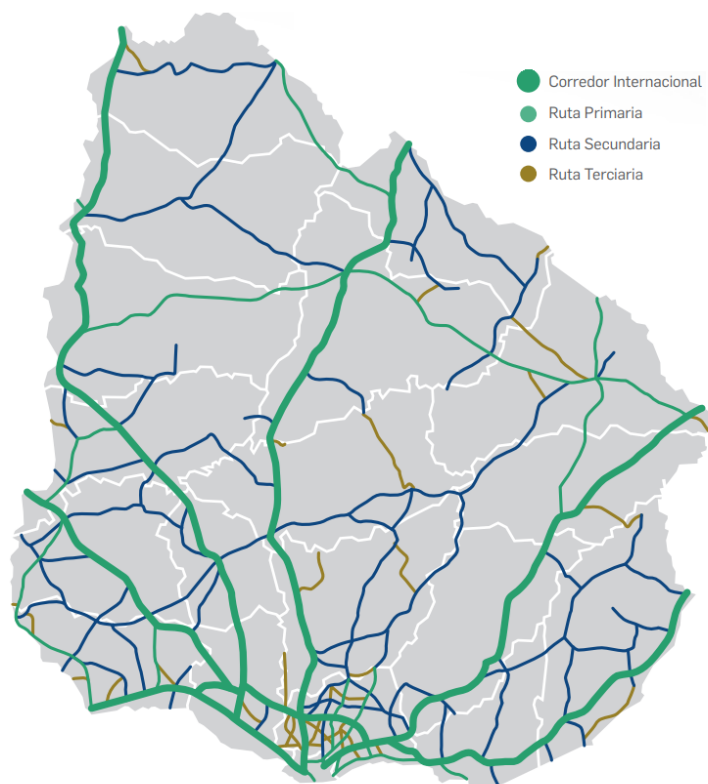


Figura 4.3 - Red vial territorio uruguayo [86].

Los camiones que circulan por estas rutas transportan trozas, ganados, semillas, entre otros productos de producción nacional como también el transporte internacional.

En el caso del transporte forestal, los camiones manejan un peso bruto de aproximadamente 45 toneladas. En los últimos años se han dispuesto corredores para la utilización de bitrenes (57 toneladas) y tritrenes (74 toneladas).

En la Tabla 4.1 se detalla la cantidad de Km correspondientes a cada clasificación de la red vial. Tomando en cuenta el índice de densidad media (relación entre longitud de red vial y superficie en km² del área de estudio) Uruguay se encuentra mejor posicionado que los países de la región. En la Sección 2.2.3 se profundiza en la infraestructura de transporte del Uruguay y su posicionamiento a nivel regional y global.

Tabla 4.1 - Clasificación y dimensión de la red vial uruguaya.

Clasificación de la red	Longitud total incluyendno doble vía (km)	Longitud en doble vía (km)
Corredor internacional	2420	132
Primaria	1458	81
Secundaria	3814	0
Terciaria	1005	0
Longitudes totales (km)	8607	213

Fuente: Banco de Desarrollo de América Latina [87].

Por otra parte, se cuenta con una red de vías férreas en condiciones deterioradas y una nueva vía de tren en construcción que conecta el puerto de Montevideo con el centro del país, lugar donde estará situada la nueva planta de celulosa. Esta construcción permitirá pasar de una capacidad de carga de 18 toneladas por eje de vagón a 22 toneladas y aumentar la velocidad promedio de 40 km/h a 80 km/h.

Tabla 4.2 - Dimensión de red ferroviaria según tramo y capacidad de carga.

Tramo	Longitud (km)	Carga (ton/eje)
Zona Metropolitana	46,2	18
Línea Rivera	573,3	18
Línea Minas	81	18
Línea Río Branco	432	18
Líneas del Litoral	314 (fraccionadas)	12-20

Fuente: Portal MTOP [88].

La Figura 4.4 muestra la red ferroviaria de Uruguay con las vías que se encuentran en estado activo y también aquellas que actualmente están en desuso. Se destaca la centralización de las diferentes vías hacia el puerto de Montevideo.

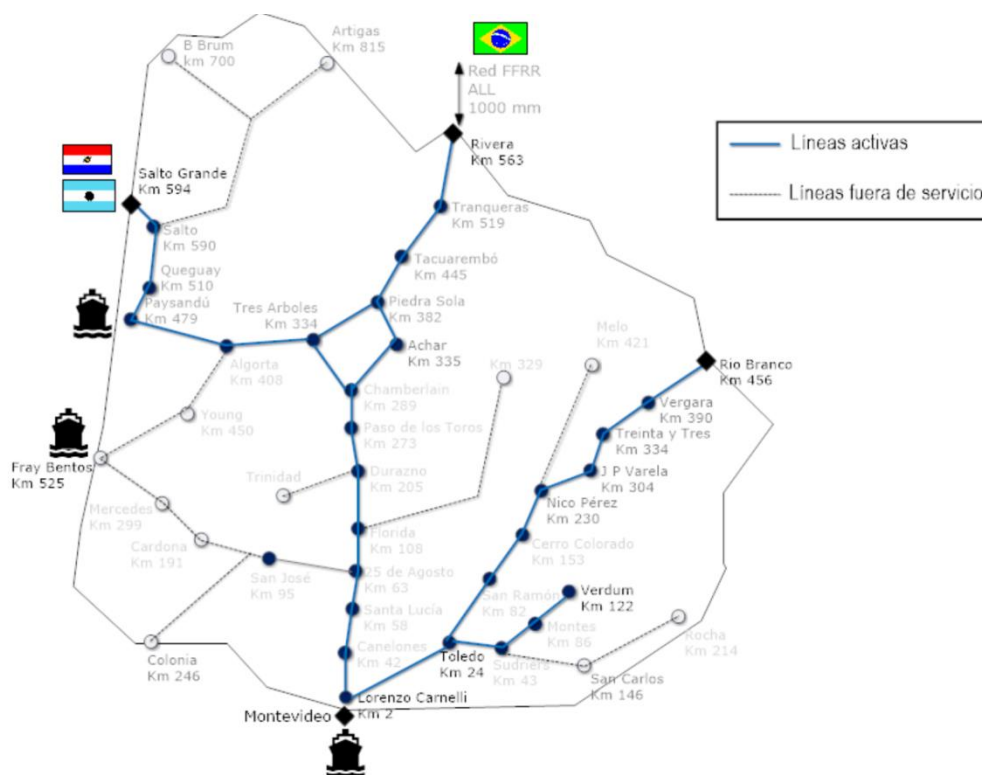


Figura 4.4 - Red ferroviaria de Uruguay [88].

4.2.2. Encuesta a grupo de interés

Como forma de aproximarnos al sector del transporte y con el objetivo de obtener una visión más enfocada de la realidad de nuestro país, es que se decidió realizar una encuesta en un grupo de interés.

Este cuestionario permitió contactarnos con ocho empresas transportistas vinculadas a la Asociación de Transportistas Forestales, que se encuentran distribuidas en el centro y litoral de nuestro país las cuales nos dieron, desde su perspectiva, cuáles son las principales dificultades del sector.

Principales resultados

Por un lado, al consultarles sobre cómo planifican sus viajes y las rutas a realizar, en el 100% de los casos sus clientes definen los caminos a utilizar y para ello se apoyan en softwares de optimización de ruteo y que son controlados mediante geolocalización. Otro dato que se destaca es que en todos los casos sus clientes pertenecen al sector de la celulosa.

Por otro lado, se les solicitó que evaluaran el nivel de impacto que les generan los siguientes ítems a su operación con el objetivo de encontrar tendencias y develar dificultades.

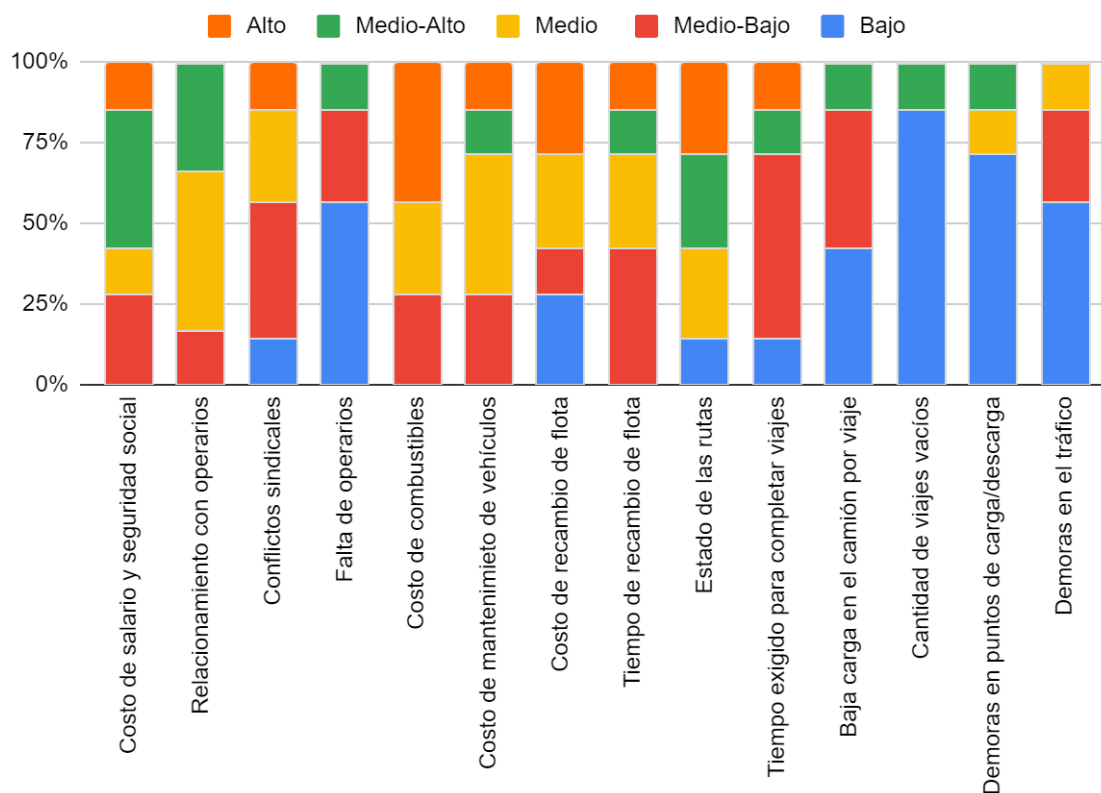
Los ítems por clasificar fueron las siguientes:

- Costo de salario y seguridad social de operarios
- Relacionamiento con operarios
- Conflictos sindicales
- Falta de operarios
- Costo de combustibles
- Costo de mantenimiento de vehículos
- Costo de recambio de flota
- Tiempo de recambio de flota exigida por el cliente
- Estado de las rutas
- Tiempo exigido para completar viajes
- Baja carga en el camión por viaje
- Cantidad de viajes vacíos
- Demoras en puntos de carga/descarga
- Demoras en el tráfico

Para evaluarlos se les brindó un rango del tipo: alto, medio alto, medio, medio bajo y bajo dependiendo del nivel de impacto en sus actividades. A continuación, se presentan los resultados en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 - Resultados de encuesta realizada a transportista sobre impacto en actividades.

¿En qué nivel impactan los siguientes ítems el desarrollo de sus actividades?



Fuente: Elaboración propia.

Como resultado se obtuvo que los principales ítems que afectan la operación son el costo de los salarios, el costo de combustible, el costo de mantenimiento y estados de las rutas.

Tanto los salarios como el consumo de combustible se pueden relacionar y optimizar si se realiza una correcta planificación del transporte. Por otro lado, el costo de mantenimiento y estados de las rutas son ítems directamente relacionados, dado que las irregularidades existentes en las rutas impactan en la mecánica del camión y sus componentes. Según datos relevados en el Informe de Índice de Costos del Transporte [89], el impacto de los costos de mantenimiento está asociado directamente a la sensibilidad de la economía nacional frente a variaciones de la economía global. Por ejemplo, durante el 2020 el precio de las cubiertas en el mercado global aumentó 5%, mientras que en el mercado nacional se tradujo en un aumento del 18,5 %.

4.3. Modelado

Para contextualizar el problema es necesario introducir las principales entidades que se tendrán en cuenta.

Por un lado, están los lugares generadores de oferta de materia prima, es decir: áreas forestadas que se encuentran dispersas por todo el territorio, existiendo zonas con mayor densidad de montes. Por otro lado, los centros de acopio son aquellos lugares ubicados en zonas estratégicas, próximos a las vías de tren, donde los camiones tendrán acceso para dejar las trozas con el objetivo de ser almacenadas para luego despachadas por tren. Es importante comentar que el centro de acopio debe contar con una infraestructura adecuada para la carga y descarga de trenes y camiones.

Por último, los destinos son los lugares donde se recibe la materia prima, es decir, son quienes generan la demanda.

Los dos principales medios de transporte analizados son el camión y el tren. En el caso del camión, este se va a utilizar tanto para ir en ambos sentidos del origen al destino, como del origen al centro de acopio y volver, así como desde el centro de acopio a destino en caso de ser necesario.

Para poder realizar de mejor manera el análisis de los resultados, se define en próximas Secciones relaciones entre el volumen transportado por un camión con el volumen transportado por el tren. Este último es muy sensible a las condiciones de infraestructura.

El análisis se realiza en un período de tiempo determinado. Este período se puede dividir en días, semanas o meses, de acuerdo con los datos que se tengan de oferta y demanda, así como de qué tan detallada se necesita que sea la planificación de las entregas.

Para la operación de transporte de trozas se realizaron las siguientes suposiciones:

- Respecto a los vehículos de transporte, se asumió una flota homogénea de camiones, es decir que las toneladas o m^3 que son capaces de transportar los camiones son las mismas para todos. Esta simplificación se aproxima bastante a la realidad y nos evita incorporar parámetros de capacidad, lo cual puede complejizar la solución. Además, se asume que los camiones irán cargados a máxima capacidad, lo cual también tiene sentido dado que los puntos de oferta superan ampliamente la capacidad de estos.
- Se consideró un centro de acopio de carga y uno de descarga por cada vía de tren. Es decir, un tramo de vía está definido por un único punto de carga y un único punto de descarga, de forma contraria el tren se podría ir cargando en múltiples puntos de la vía, generando la necesidad de mantener un inventario dentro del tren en cada recorrido.
- Se considera la posibilidad de que existan dos tipos de puntos de descarga, uno coincidente con el punto de destino, y otro, un centro acopio que se conecta vía carretera con diversos destinos. Se brinda la opción de utilizar la vía férrea en ambos sentidos.

- Como se mencionó en esta misma Sección anteriormente, es necesario generar una relación de carga entre camiones y trenes. Para el modelo desarrollado, se utilizó un factor M equivalente a la cantidad de camiones que puede trasladar un tren. Teniendo en cuenta que el tren es cargado a máxima capacidad, queda definida la relación tren-camión
- Respecto a cuál es la situación al inicio del período, en el caso de la oferta, la misma se inicia con una cantidad de inventario determinada y no se irá reponiendo durante los períodos de programación. Por lo tanto, la oferta disponible deberá ser mayor a las demandas conjuntas de todos los destinos.
- En cuanto a los centros de acopio, estos estarán vacíos al inicio del período y se irán cargando y descargando a medida que pase el tiempo. Se asume despreciable los costos de almacenamiento dentro de los centros de acopio para cortos periodos de tiempo. En los casos de análisis se utilizaran periodos de 7 días. En caso de querer analizar periodos mas grandes estos se deberían evaluar.
- Si analizamos los valores de costos para cada tramo, el mismo estará compuesto por valores de referencia del mercado, el cual está relacionado directamente con los km cargados a realizar. A este valor se le adiciona el costo de carga y descarga de las trozas. Esta aproximación se encuentra detallada en la Sección 6.2.
- Dado que se asume una flota homogénea y con una relación entre carga de camiones por tren, es posible utilizar al camión como unidad de medida de la oferta y la demanda, así como también en los viajes.
- Se toma en cuenta la posibilidad de que existan contratos de cumplimiento de abastecimiento diario, definiendo un compromiso de entrega para cada período en los destinos que corresponda. Este compromiso se lo define como demandas mínimas.
- Se define una demanda global que debe ser completada para cada destino a lo largo de todos los períodos. Esta demanda puede ser mayor o igual a la suma de las demandas mínimas para cada destino. Se acota la cantidad de viajes máximos permitidos por período en camión y en tren.

5. Modelo Matemático

En la siguiente Sección se presenta y desarrolla el modelo matemático diseñado para utilizar como herramienta de análisis según los posibles escenarios a estudiar, los cuales se desarrollan en la Sección 7.

5.1. Objetivo

Obtener una planificación de los viajes a realizar para abastecer la demanda de trozas minimizando los costos generados asociados a las distintas combinaciones de transporte carretero y ferroviario.

5.2. Formulación

A continuación, se presenta y explica el modelo, sus parámetros, variables, restricciones y función objetivo.

5.2.1. Conjuntos

- O : Conjunto de n nodos los cuales representan los orígenes.
- A : Conjunto de m nodos que representa a los centros de acopio.
- D : Conjunto de p nodos que representan los destinos.
- T : Conjunto t de períodos.

5.2.2. Parámetros

- a_{ij} : costo de la ruta por carretera que une el origen i con el centro de acopio j , con $i \in O, j \in A$.
- b_{ik} : costo de la ruta por carretera que une el origen i con el destino k , con $i \in O, k \in D$.
- c_{jk} : costo de la ruta ferroviaria que une el centro de acopio j con el destino k , con $j \in A, k \in D$.
- d_{jf} : costo de transporte ferroviario entre dos centros de acopio j, f con $j \in A, f \in A$.
- e_{jf} : costo de la ruta carretera entre un centro de acopio j y un destino k , con $j \in A, k \in D$.
- Dm_k : demanda total, dependiente de cada punto de consumo, a cumplir en la totalidad de los períodos, con $k \in D$.

- $Comp_{kt}$: compromiso de entrega mínimo, dependiente de cada punto de consumo k y de cada período t , con $k \in D, t \in T$.
- Of_i : Stock de troza disponible al comienzo de la planificación para cada origen i , con $i \in O$.
- M_j : relación máxima de camiones por tren asociados al centro de acopio j , con $j \in A$.
- $Cmax$: capacidad máxima de transporte en camiones para cada período.
- $Tmax_j$: la cantidad de trenes máxima asociado al flujo del centro de acopio j , con $j \in A$.

5.2.3. Variables

x_{ijt} : Cantidad de viajes por carretera entre los orígenes i y los centros de acopio j en el período t , $\{i \in O, j \in A, t \in T \setminus \{0\}\}$

u_{ikt} : Cantidad de viajes por carretera entre orígenes i y destino k en el período t , $\{i \in O, k \in D, t \in T \setminus \{0\}\}$.

v_{jkt} : Cantidad de viajes ferroviarios entre el centro de acopio j y destino k en el período t , $\{j \in A, k \in D, t \in T \setminus \{0\}\}$.

w_{jft} : Cantidad de viajes ferroviarios que se realizan desde cierto centro de acopio j a otro centro de acopio f en el período t , $\{j \text{ y } f \in A, t \in T \setminus \{0\}\}$.

z_{jkt} : Cantidad de viajes por carretera desde el centro de acopio j al destino k en el período t , $\{j \in A, k \in D, t \in T \setminus \{0\}\}$.

r_{jt} : Inventario existente en el centro de acopio j en el período t , $\{j \in A, t \in T\}$.

s_{kt} : Cantidad de viajes en camión que restan realizar al período t para cumplir con la demanda total del destino k , $\{k \in D, t \in T\}$.

La Figura 5.1 es un esquema representativo de los nodos y sus conexiones de forma de apoyar la interpretación del modelo.

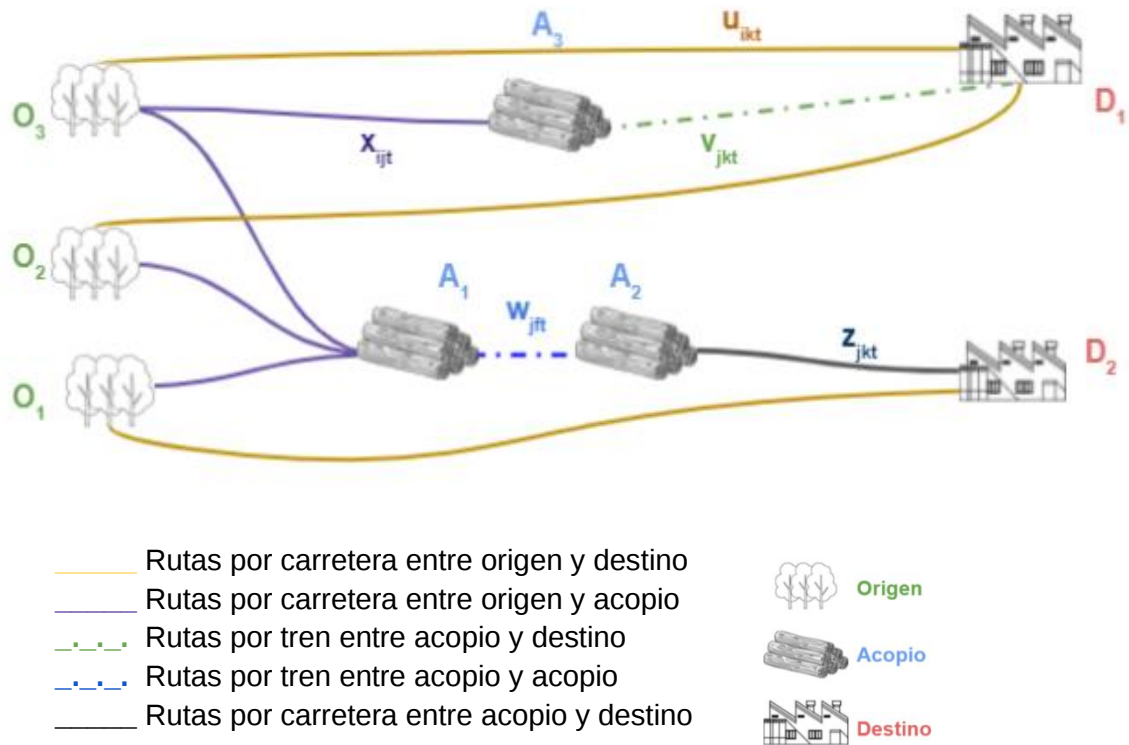


Figura 5.1 - Representación gráfica del problema. Fuente: Elaboración propia.

5.2.4. Formulación del problema

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{i \in O} \sum_{j \in A} (x_{ijt} * a_{ij}) + \sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{i \in O} \sum_{k \in D} (u_{ikt} * b_{ik}) \\
 & + \sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{j \in A} \sum_{k \in D} (v_{jkt} * c_{jk}) \\
 & + \sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{j \in A} \sum_{f \neq j \in A} (w_{jft} * d_{jf}) + \sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{j \in A} \sum_{k \in D} (z_{jkt} * e_{jk}) \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$s_{k0} = Dm_k, \quad \forall k \in D \quad (2)$$

$$r_{j0} = 0, \quad \forall j \in A \quad (3)$$

$$Of_i - \sum_{j \in A} \sum_{t \in T \setminus \{0\}} x_{ijt} - \sum_{k \in D} \sum_{t \in T \setminus \{0\}} u_{ikt} \geq 0, \forall i \in O \quad (4)$$

$$s_{k(t-1)} - \sum_{i \in O} u_{ikt} - \sum_{j \in A} v_{jkt} * M_j - \sum_{i \in O} z_{jkt} = s_{kt}, \forall k \in D, t \in T \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$r_{j(t-1)} + \sum_{i \in O} x_{ijt} - \sum_{k \in D} v_{jkt} * M_j - \sum_{k \in D} z_{jkt} + \sum_{f \in A} w_{fjt} * M_f - \sum_{f \in A} w_{jft} * M_j = r_{jt}, \forall j \in A, t \in T \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{i \in O} u_{ikt} * \sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{j \in A} v_{jkt} * M_j + \sum_{t \in T \setminus \{0\}} \sum_{j \in A} z_{jkt} \geq Dm_k, k \in D \quad (7)$$

$$\sum_{i \in O} u_{ikt} + \sum_{j \in A} v_{jkt} * M_j + \sum_{j \in A} z_{jkt} \geq Comp_{kt}, \quad \forall k \in D, t \in T \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in O} \sum_{k \in D} u_{ikt} + \sum_{i \in O} \sum_{j \in A} x_{ijt} + \sum_{j \in A} \sum_{k \in D} z_{jkt} \leq Cmax, \quad \forall t \in T \setminus \{0\} \quad (9)$$

$$\sum_{k \in D} v_{jkt} + \sum_{f \neq j \in A} w_{jft} + \sum_{f \neq j \in A} w_{fjt} \leq Tmax_j, \quad \forall j \in A, t \in T \quad (10)$$

$$x_{ijt} \geq 0 \forall i \in O, \forall j \in A, t \in T \setminus \{0\} \quad (11)$$

$$u_{ikt} \geq 0 \forall i \in O, \forall k \in D, t \in T \setminus \{0\} \quad (12)$$

$$v_{jkt} \geq 0 \forall k \in D, \forall j \in A, t \in T \setminus \{0\} \quad (13)$$

$$w_{jft} \geq 0 \forall j \in A, \forall f \in A, t \in T \setminus \{0\} \quad (14)$$

$$z_{jkt} \geq 0 \forall j \in A, \forall k \in D, t \in T \setminus \{0\} \quad (15)$$

$$r_{jt} \geq 0 \forall j \in A, t \in T \quad (16)$$

$$s_{kt} \geq 0 \forall k \in D, t \in T \quad (17)$$

La función objetivo está definida por la expresión (1) donde el primer término contabiliza el costo generado por todos los viajes realizados por carretera entre un origen y un centro de acopio para todo el período analizado. El segundo término contabiliza los costos generados por todos los viajes realizados entre un origen y un destino para todo el período analizado. El tercer término contabiliza los costos generados por los viajes vía tren, entre centros de acopio y destinos para todo el período analizado. El cuarto término contabiliza los costos generados por los viajes vía carretera, entre centros de acopio y destinos para todo el período analizado. El último término contabiliza el costo generado por el transporte vía tren entre centros de acopio para todo el período analizado.

La familia de ecuaciones número (2) a modo de inicialización, asigna en el período 0 los valores de demanda total a cada uno de los destinos. Luego la familia de ecuaciones (3) en el período 0, inicializan los centros de acopio con un valor de 0, indicando que los mismos están vacíos. La familia de ecuaciones (4) indica que la suma de todos los viajes realizados desde los orígenes a los centros de acopio y desde los orígenes a los destinos no puede ser mayor a la oferta de materia prima que se determinó en el inicio para cada origen. Mediante la familia de restricciones (5) obtenemos el valor de demanda restante por cumplir cd_{kt} para cada período para cada destino, mediante el balance de la demanda restante del período anterior ($t - 1$) menos los viajes que llegaron por carretera y los viajes que llegaron por tren. En la familia de restricciones (6) se obtiene la oferta de materia prima medida en cantidad de viajes cargados que hay en los centros de acopio. Es decir, tomando la oferta en ($t - 1$) que teníamos en el centro de acopio, a la misma le sumamos los viajes que arribaron en camión y le restamos los viajes que salieron por tren. El cumplimiento de la Demanda total al finalizar todos los períodos se exige en la familia de restricciones (7), mediante el conteo de todos los viajes realizados por carretera y por tren para cada período. Los mismos deben ser mayores o iguales a la Demanda total asignada al inicio. En las restricciones (8) se exige que se verifique el cumplimiento de la demanda diaria mínima por período $Comp_{kt}$, donde contabilizamos para ese período t en cada destino k , que la suma de ingresos en camión u_{ikt} y de trenes v_{jkt} supere o iguale el valor de la demanda mínima. Mediante las restricciones (9) se acota el número de camiones que pueden circular por período, donde la suma de salidas desde origen a centros de acopio (x_{ijt}) y los que van directo a los puntos de Demanda (u_{ikt}), donde ellos no pueden superar un valor tope (C_{max}) de camiones transportados por período. Por último, mediante la familia de restricciones (10) se acota superiormente el número de viajes por tren desde centros de acopio a puntos de Demanda (v_{jkt}) y entre centros de acopio (w_{jft}) que se puede realizar por período con el valor de $Tmax_j$.

5.3. Validación del modelo

Para verificar un funcionamiento correcto del modelo y que las salidas se encuentren dentro de los parámetros esperados, es que se realizan múltiples casos de prueba. Entre ellos se probaron casos bases, casos de borde y casos de estrés.

Dentro de los casos se analiza el comportamiento del modelo cuando se tiene oferta suficiente, cuando hay una oferta insuficiente para abastecer la demanda, cuando la oferta es igual a 0, la demanda iguala a la oferta, cuando no hay suficientes camiones o trenes para completar los viajes y cuando se varían los costos de algún medio de transporte.

5.3.1. Caso base y casos de borde

En esta sub-Sección se desarrollan algunos de los casos de prueba realizados, junto con sus resultados. Dentro de la Tabla 5.4 se presentan de forma esquemática todas las pruebas realizadas y se puede ampliar sobre las mismas en el Anexo I.

Para interpretar todas las tablas presentes en esta sub-Sección se debe entender que las filas hacen referencia a los valores relevantes de la solución brindada, siendo “Costo” el valor de la función objetivo. Las filas x , u , v , w , z representan la suma de los valores adquiridos por las variables para cada prueba. Es decir, para el caso 1, si sumamos los valores que tomó x en cada período t , el mismo nos da 420 y por lo tanto son 420 los viajes entre orígenes y centros de acopio. La fila “Solución S/N” toma el valor S en el caso que el solver encuentre solución óptima y N en el caso que no la encuentre. Por otra parte, la fila encabezada con “Sol.Esperad S/N” toma el valor S si a nuestro entender ese caso de prueba debería tener solución factible, tomando el valor N en caso contrario.

CASO DE PRUEBA 1: Oferta suficiente para abastecer la demanda de todos los clientes.

Objetivo: Analizar el cumplimiento de la demanda en un caso en donde los datos deberían permitir un correcto abastecimiento.

Tabla 5.1 - Resumen resultado Caso de prueba 1.

Caso de prueba	1: Oferta suficiente para abastecer demanda
Costo	59.800
x	420
u	405
v	7
w	5
z	175
Solución S/N	S
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis: Todos los destinos fueron abastecidos por el monte más próximo a cada uno, por camión y/o por tren. El resultado es el esperado ya que la oferta era suficiente para abastecer a cada nodo destino. El tiempo de procesamiento es despreciable y el consumo de memoria igual a 0.7 Mb.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots 7)$$

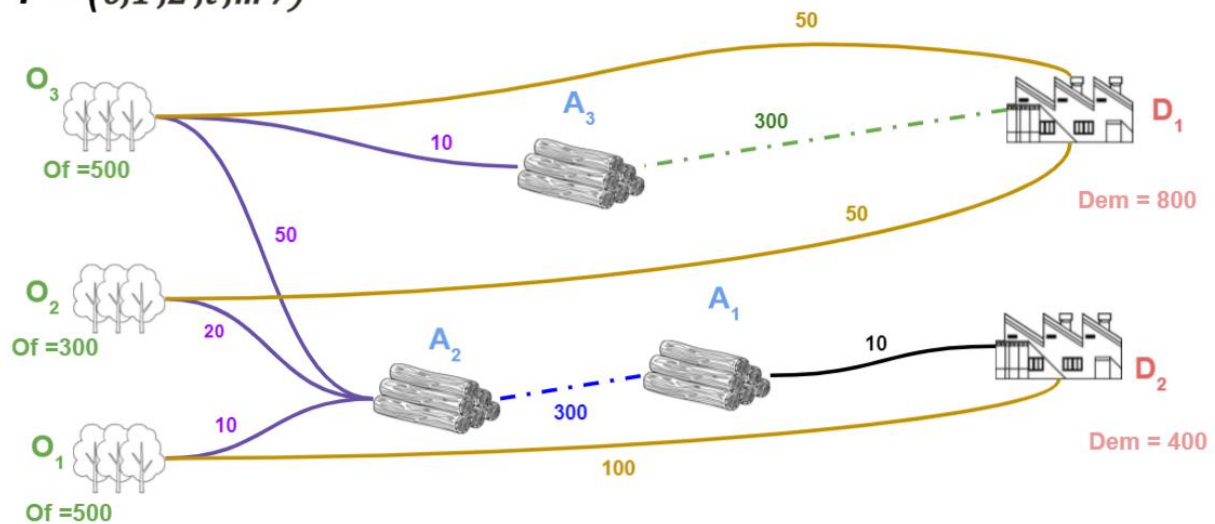


Figura 5.2 - Diagrama de flujo caso de prueba 1. Fuente: Elaboración propia.

CASO DE PRUEBA 2: Demanda total mayor a la oferta

Objetivo: Analizar si el modelo logra o no cumplir con la demanda. Representa un caso de desbordamiento.

5.2 - Resumen resultado Caso de prueba 2.

Caso de prueba	2 : Demanda total mayor a la oferta
Costo	0
x	0
u	0
v	0
w	0
z	0
Solución S/N	N
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis: Dada la restricción impuesta del cumplimiento de demanda, el modelo devuelve la solución esperada, siendo esta que el modelo no tiene solución. Esto se da ya que la totalidad de la oferta entre todos los orígenes es menor que la demanda requerida por todos los destinos.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots, 7)$$

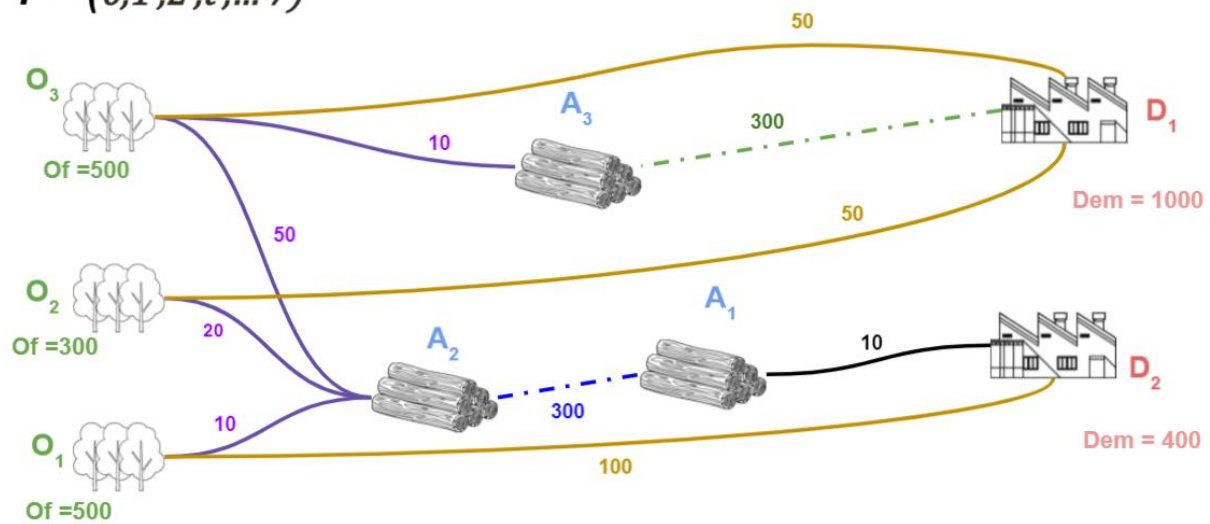


Figura 5.3 - Diagrama de flujo caso de prueba 2. Fuente: Elaboración propia.

CASO DE PRUEBA 5 - Limitación de camiones

Objetivo: Analizar si el modelo logra o no cumplir con la demanda para la situación donde no hay suficientes camiones para concretar la demanda mínima.

Tabla 5.3 - Resumen resultado Caso de prueba 5.

Caso de prueba	5 - Limitación de camiones
Costo	0
x	0
u	0
v	0
w	0
z	0
Solución S/N	N
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis: Es correcto que no se logre una solución dado que no es posible abastecer ni los acopios ni los destinos por completo según la demanda mínima diaria establecida. La totalidad de los casos de prueba se resumen la Tabla 5.4

Tabla 5.4 - Valores relevantes en casos de pruebas.

Caso de prueba	Costo	x	u	v	w	z	Solución S/N	Sol. Esperad S/N
1: Oferta suficiente para abastecer demanda	59800	420	405	7	5	175	S	S
2 : Demanda total mayor a la oferta	0	0	0	0	0	0	N	S
3 - Oferta disponible igual a cero	0	0	0	0	0	0	N	S
4 - Demanda igual a oferta	59800	420	405	7	5	175	S	S
5 - Limitación de camiones	0	0	0	0	0	0	N	S
6 - Disminución del costo del camión	31700	420	780	7	5	175	S	S
7 - No hay trenes disponibles	80000	0	1200	0	0	0	N	S
8 - No hay camiones disponibles	0	0	0	0	0	0	N	S

Fuente: Elaboración Propia.

5.3.2. Casos de estrés

Las pruebas de rendimiento o estrés se diseñan para garantizar que el sistema procese su carga pretendida. Generalmente, esto implica efectuar una serie de pruebas donde se aumenta la carga, hasta que el rendimiento del sistema se vuelve inaceptable[19a].

Es por esto que se realizaron combinaciones de variación de períodos (7, 14 y 30), variación de cantidad de centros de acopio disponibles (2 y 5) y diferentes límites de tiempos de procesamiento (120s, 600s, 1800s).

Al igual que en la Sección anterior, aquí se presenta un caso de estrés y los restantes se desarrollan en el Anexo I.

Para los casos donde la cantidad de centro de acopio era de 5, se decidió acotar el tiempo de procesamiento de este en tres tiempos diferentes con el objetivo de observar si esta variación también afectaba el resultado final.

CASO DE PRUEBA Estrés 2 - Múltiples orígenes, destinos y acopios para T=14.

Objetivo: Exigir y analizar el comportamiento del solver ante situaciones de alto estrés computacional. Ejercicio con 14 períodos, 2 y 5 centros de acopio y 120, 600 y 1800 segundos de tiempo de procesamiento.

Tabla 5.5 - Resumen resultado Caso de prueba Estrés 2.

	Acopios	Costo	x	u	v	w	z	Tiempo proceso (s)	Memoria (Mb)
CASO DE PRUEBA Estrés 2 - Múltiples Orígenes, destinos y acopios para T=14.	2	734.855.995	0	38.000	0	0	0	0,1	13,3
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	120	157.1
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	600	396.7
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	1800	736.9

Fuente: Elaboración Propia

Comparación: Dentro de los casos de prueba a distintos tiempos de resolución se mantiene la solución y la organización de viajes. En cuanto a comparar con el modelo de menor cantidad de acopios, se ve una disminución en el costo total de un 7,9% correspondiente a la disponibilidad de transporte adicional. Se mantiene el número de camiones utilizados por la necesidad de transportar las trozas a los acopios.

Al igual que en la sub-Sección anterior, la Tabla 5.6 resumen la totalidad de los resultados de los casos realizados, ampliando sobre los mismo en el Anexo I.

Tabla 5.6 - Valores relevantes en casos de estrés.

	Acopios	Costo	x	u	v	w	z	Tiempo proceso (s)	Memoria (Mb)
CASO DE PRUEBA Estrés 1 - Múltiples Orígenes, destinos y acopios para T=7.	2	367.424.496	0	19.000	0	0	0	0,1	6,9
	5	334.354.705	0	19.000	5	0	0	0,5	9,5
CASO DE PRUEBA Estrés 2 - Múltiples Orígenes, destinos y acopios para T=14.	2	734.855.995	0	38.000	0	0	0	0,1	13,3
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	120	157.1
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	600	396.7
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	1800	736.9
CASO DE PRUEBA Estrés 3 - Múltiples Orígenes, destinos y acopios para T=30.	2	1.450.484.474	0	76.000	0	0	0	0,1	27,9
	5	1.441.022.770	0	76.000	112	0	0	120	333
	5	1.441.022.771	0	76.000	112	0	0	600	1062
	5	1.441.022.772	0	76.000	112	0	0	1800	2409

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las situaciones analizadas, se logra ver que el modelo responde según lo esperado, lo cual se da en situaciones sencillas y variantes de ellas. Lo mismo ocurre con la sobrecarga de variables y datos donde en un corto tiempo obtiene una solución, la cual a pesar del paso del tiempo no logra mejorar.

6. Relevamiento y generación de datos

En la siguiente Sección se desarrollan las fuentes y metodologías utilizadas para obtener los datos relevantes para el posterior análisis.

6.1. Fuentes de información

La obtención de los principales datos se logra mediante:

- Utilización de portales gubernamentales o plataformas del sector.
 - Geoportal Forestal del Uruguay [91] - Bajo la órbita del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, presenta información de la cartografía nacional forestal, tipos de suelo y principales consumidores.
 - Geoportal [86] - Bajo la órbita del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, presenta información sobre la infraestructura de transporte del Uruguay.
- Entrevistas con referentes del sector ferroviario y carretero con el fin de obtener información relevante tal como costos asociados a cada sector o particularidades operativas de cada uno de ellos.
- Plataforma Google Maps [92] para la obtención de las distancias entre puntos geográficos.

6.2. Selección de nodos

Una vez que el modelo se valida, realizando casos de prueba descritos en la Sección 5.2 y profundizados en el Anexo I, se avanza a la siguiente etapa la cual consta de construir un caso de análisis representativo de la realidad local, que permita tener un valor de referencia base para la posterior elaboración de distintos escenarios y a partir de ellos obtener información de valor.

En el proceso de investigación del Estado del Arte, así como en la construcción del Modelo, se relevaron datos de la realidad forestal uruguaya, como también características de su transporte. Este relevamiento consistió en determinar los principales puntos de consumo de trozas y las zonas de forestación, para luego calcular las distancias entre las combinaciones de nodos posibles.

Puntos de Consumo

Los puntos de consumo quedan determinados por las dos plantas de celulosa existentes y una tercera planta en construcción, el puerto de Montevideo y una serie de aserraderos ubicados a lo largo del país. Dado que la planta de Conchillas es abastecida parcialmente desde el puerto M'bopicuá, se selecciona la zona de Fray Bentos como un nodo, el cual incluye la demanda de madera de la planta, así como la de los puertos M'bopicuá y Fray Bentos.

Se utiliza la información del Geoportal Forestal [91] para relevar las zonas representativas de aserraderos en base a los datos disponibles de consumo. Las Tablas 6.1

y 6.2 muestran información de los consumos en Aserraderos, Plantas de Celulosa y Puertos de la región.

Tabla 6.1 - Consumo de madera anual en aserraderos por localidad.

Aserraderos	Consumo (m3/año)
Zona Rivera	328.800
Zona Tranqueras	191.519
Zona Tacuarembó	304.100
Zona Montevideo	54.840
Melo*	
Treinta y Tres*	
Colonia*	
Minas*	
Durazno*	
San José*	
Paysandu*	

Fuente: MGAP [91]

*Consumo no significativo o variable.

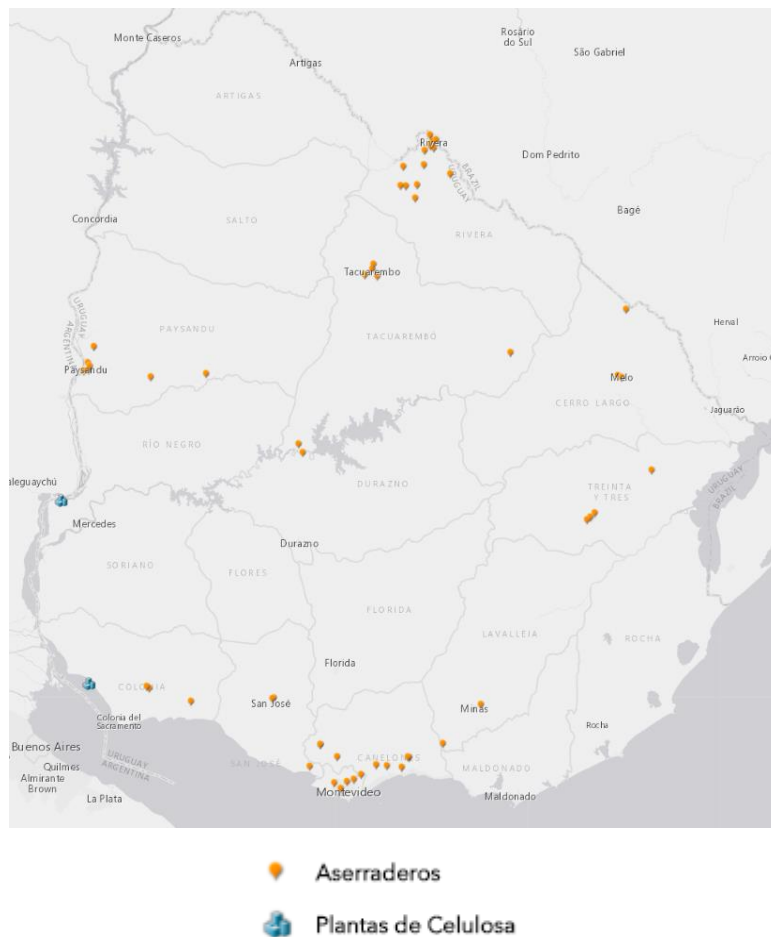


Figura 6.1- Localización de aserraderos y plantas de celulosa [91].

Se decide incluir como punto de demanda a Rivera (D5) y Tacuarembó (D6) que unifican la demanda de los aserraderos de la zona (se incluye la demanda de la zona de Tranqueras en la de Rivera). En estos casos se dispone de la información de consumo anual y se lo transforma a viajes en camión bajo parámetros que se explican en la Sección 6.3.

Para el caso de las plantas de celulosa, se parte de su producción nominal declarada en ADT [91]. Se utiliza una relación de consumo medio para Eucalyptus (m3/ODT) con su respectivo ajuste de humedad, lo cual permite obtener un valor aproximado del consumo de madera [93]. Se debe tener en cuenta que la mitad del consumo del D3 es transportada por vía fluvial.

En el caso del Puerto, se toman las exportaciones totales anuales.

Tabla 6.2 - Destinos seleccionados con su consumo estimado de madera (m3) y diario (camiones).

Destino	Nombre	Consumo anual (m3)	Consumo diario (Camiones)
D1	Zona Fray Bentos**	7.039.156	452
D2	Planta de Celulosa Paso de los Toros*	6.652.800	427
D3	Planta de Celulosa de Conchillas	2.534.400	163
D4	Puerto de Montevideo	1.590.981	138
D5	Aserraderos Rivera	520.319	33
D6	Aserraderos Tacuarembó	304.100	20

Fuente: Elaboración Propia

*Consumo aproximado por la futura producción nominal declarada.

**Incluye la demanda de la planta, puerto de Fray Bentos y la demanda al puerto de M'boicua.

Puntos de origen

En Uruguay existen zonas de alta concentración de plantaciones [91]. Es por esto que cada origen toma el valor de oferta de la zona forestada y no de una plantación en particular. Como resultado se obtuvieron 132 zonas de oferta dispersas por todo el territorio uruguayo.

En base al contacto con algunas empresas del rubro, se obtuvo información de las cantidades cosechadas en determinado período de tiempo. Este valor varía en función de la disponibilidad en cada origen, condiciones climáticas y las condiciones de acceso a los predios.

Puntos de acopio

En la Tabla 6.3 se puede apreciar los puntos seleccionados para conformar la red de vías y acopios, los cuales se basan en la red vial ferroviaria actual del Uruguay. Se entiende conveniente utilizar como centro de acopio lo que hoy corresponde a estaciones de trenes.

86

Centro de acopio	Nombre
A1	Centro de acopio Paso de los Toros
A2	Centro de acopio 25 de Agosto
A3	Centro de acopio Zona Paysandú
A4	Centro de acopio Zona Rivera
A5	Centro de acopio Zona Este

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6.2 se presenta la configuración de todos los puntos de interés y la red vial ferroviaria. En azul se representan los orígenes, en verde los puntos de destino y en rojo los centros de acopio.

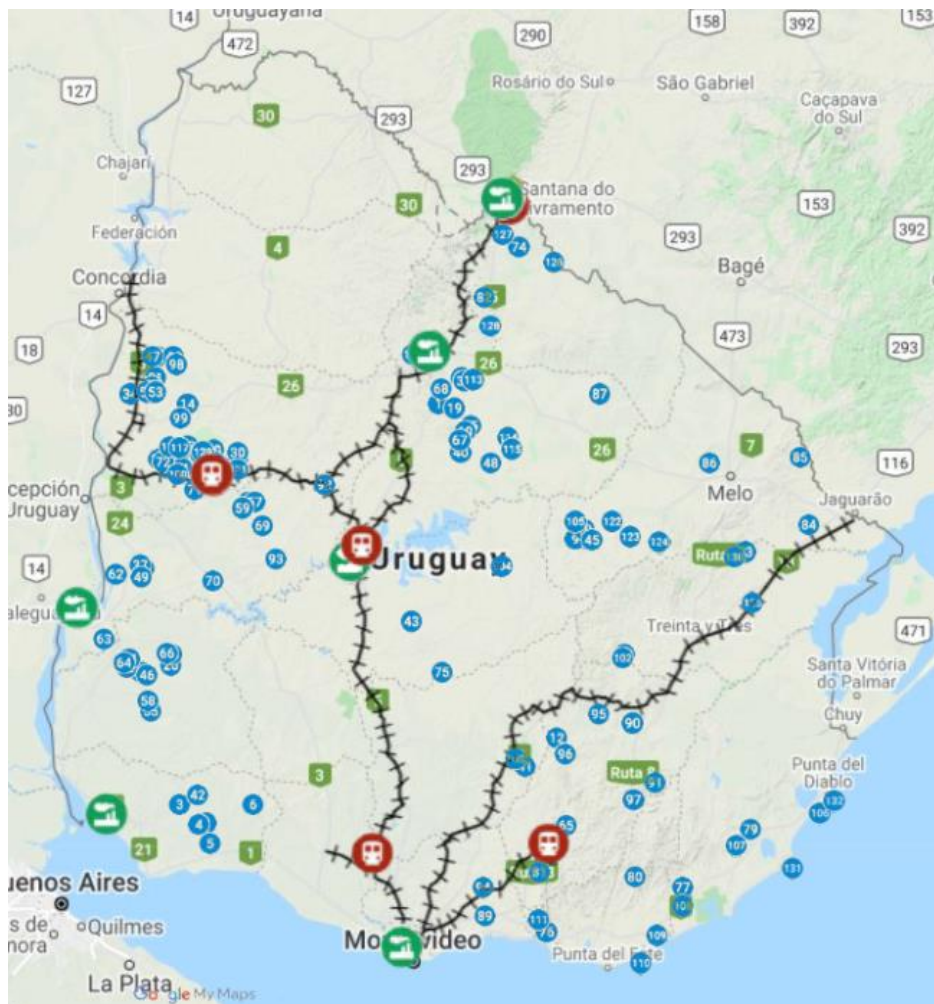


Figura 6.2- Geolocalización de los orígenes (Azul), destinos (Verde) y centros de acopio (Rojo).

Fuente: MTOP [86] y elaboración propia.

6.3. Generación de matrices y obtención de parámetros

Una vez determinados los nodos de origen, destino y centros de acopio y habiéndolos posicionado en el mapa, utilizando la plataforma Google Maps [92] se logra generar la matriz de distancia en kilómetros entre los nodos. A partir de la matriz de distancia y de los datos de costo por kilómetro para cada medio de transporte es que se obtienen las matrices de costos.

Costos de transporte carretero

La Intergremial de Transporte Profesional de Carga terrestre del Uruguay (ITPC en adelante) nuclea Asociaciones Gremiales y Cámaras Empresariales que trabajan en conjunto para definir tarifas referenciales de costos para los distintos tipos de rubros económicos. En este caso, se toman los últimos valores de referencia publicados[94] asociados al transporte de maderas de trozas.

Se utilizan los valores publicados en dólares (U\$S), con el objetivo de intentar aislar el efecto inflación sobre los costos. Dichos costos se validaron en entrevistas con prestadores de servicios de transporte carretero, existiendo variaciones en algunos negocios puntuales. Estos negocios estaban usualmente asociados a contratos realizados por empresas intermediarias entre los productores forestales y consumidores finales.

Costo de Carga

Según la bibliografía relevada, el costo del metro cúbico cargado es de aproximadamente USD 1,1[95]. Por otra parte, en aras de conseguir un valor actualizado de este costo, se puso en contacto con empresas prestadoras de servicios logísticos forestales en Uruguay, llegando a un valor promedio de USD 1,4 por metro cúbico cargado.

Capacidad de Carga de Camiones y Trenes

Del contacto con empresas de transporte ferroviario uruguayo, se obtuvo información relevante de la operativa en el país. Se puede asumir que la capacidad de carga depende de: la especie a transportar (efecto densidad), la longitud de las trozas, las condiciones de las vías, las características de los vagones, entre otros. Tomando en cuenta todas estas variantes, un tren cargado puede transportar aproximadamente entre 810 y 935 toneladas. Además, se consiguió un valor medio del costo de ton/km que se maneja en el mercado actual, el cual se considera representativo para modelar el caso de prueba.

Por otra parte, el transporte carretero también se encuentra influenciado por la especie a transportar, la longitud de las trozas, las condiciones de carreteras y caminos vecinales y el tipo de camión y acople a utilizar. En base a la encuesta y a entrevistas realizadas con distintos prestadores de servicios logísticos, se entiende razonable tomar un valor aproximado de 32 toneladas de carga por camión.

Transformación de unidades de medida

Las bases de información y los costos a las que se tuvieron acceso se presentaban en distintas unidades de medida (toneladas, metros cúbicos, metros estéreos).

Para unificar las bases de cálculo se utilizan ratios de conversión entre las unidades de medidas previamente mencionadas.

Se realizó un relevamiento extenso para dar con valores representativos de densidad para el cálculo de la relación tonelada – metro cúbico [96] y para la relación de metros cúbicos con metros cúbicos estéreos [97].

7. Experimentación numérica

La finalidad de esta Sección es realizar un análisis del comportamiento de los costos y de la asignación de los viajes para escenarios que se consideran representativos de la realidad, así como también posibles futuros escenarios.

7.1. Análisis de escenarios

Dentro de esta Sección se presentan 7 escenarios en los cuales se realizan variaciones a los principales aspectos de la red. Estos escenarios comienzan con la ejecución de un caso base que representa la situación actual. Este caso sirve para un posterior análisis del comportamiento de las variables según los diferentes parámetros o conjuntos que se modifiquen. En los siguientes casos se evalúan ampliaciones en la red ferroviaria y proyecciones de aumento de oferta y demanda de trozas con la incorporación de nuevos puntos de consumo. Por otra parte, se analizan los resultados de un caso de abastecimiento por zona finalizando con diversos escenarios en donde se mejora la infraestructura vial como también la capacidad de los medios de transporte.

Para todos los casos de análisis realizados, según lo que se definió en la Sección 3.1, representan una planificación operativa donde se diseñan los recorridos y se asignan los volúmenes desde los puntos de oferta a los de demanda. Además para todos los casos, excepto el 7.1.6, el horizonte de planificación es de 7 días, siendo el caso de extrema demanda un análisis de 10 días (7.1.6).

Para apoyar la comprensión se vuelve a presentar la Figura 5.1

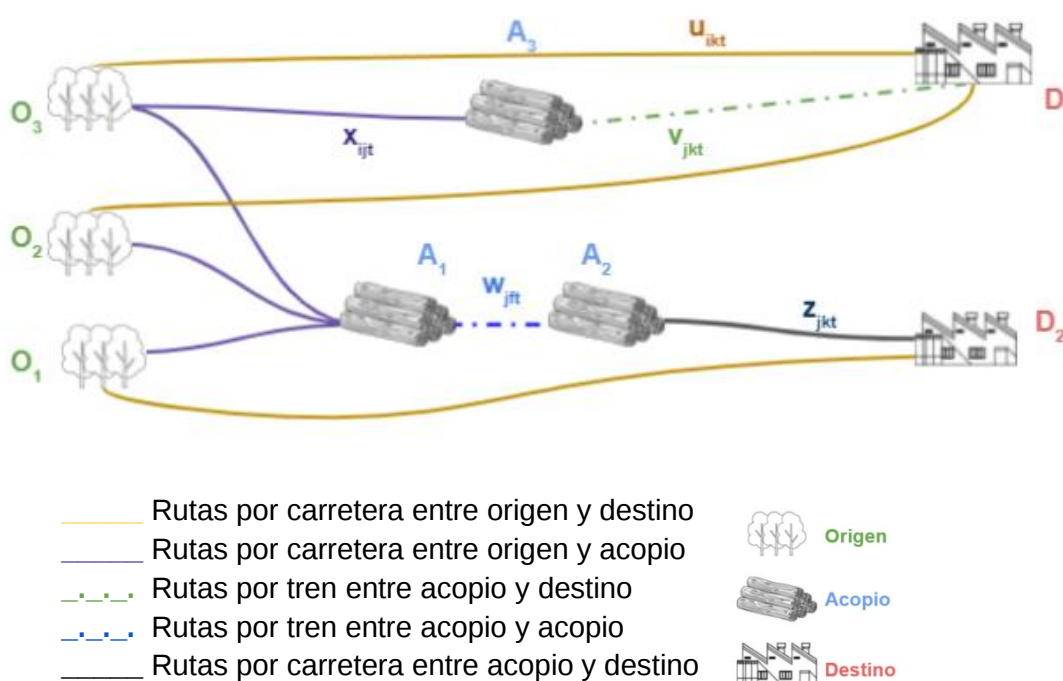


Figura 5.1 - Representación gráfica del problema. Fuente: Elaboración Propia.

7.1.1. Análisis del escenario base

La prueba consiste en crear un escenario base que represente lo más real posible la situación actual. Esto permite que este caso se pueda utilizar como punto de referencia para la comparativa de los restantes escenarios.

Se tienen en cuenta, en referencia a locaciones, 132 orígenes disponibles, los centros de acopio de la zona de Paso de los Toros (A1) y el ubicado en 25 de Agosto (A2), con los destinos Zona Fray Bentos (D1) , Planta de Celulosa Conchillas(D3),Puerto de Montevideo (D4), Aserraderos de rivera (D5) y Aserraderos de Tacuarembó (D6).

Como se menciona en la Sección 5, no todos los orígenes están disponibles al mismo tiempo, es por esto que se selecciona de forma aleatoria un 75% de los orígenes disponibles para abastecer la demanda. Para la selección aleatoria se utilizó la función “ALEATORIO.ENTRE”¹ que provee Excel, la cual devuelve un número entero aleatorio entre un set de números ingresados. En la Figura 7.1 se muestran los destinos y centros de acopio que son utilizados, en amarillo y rojo respectivamente. Lo representado en color gris son puntos de interés inhabilitados en este análisis.

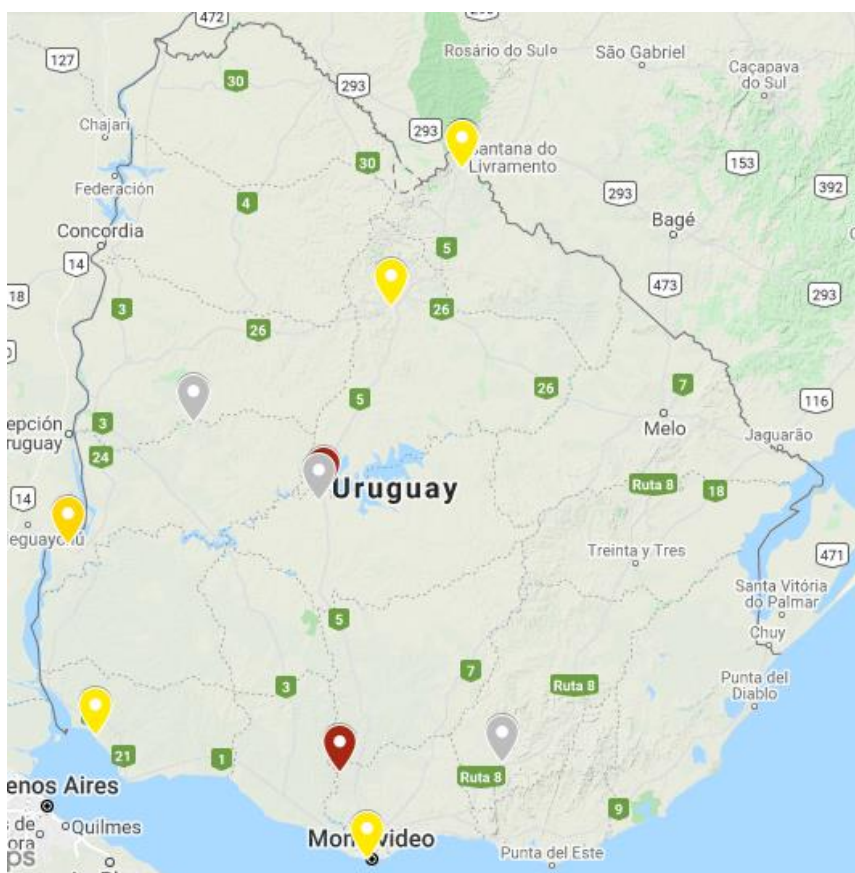


Figura 7.1 Ubicación de centros de acopio y destinos.

Fuente: Elaboración Propia.

El resultado de la prueba es el esperado ya que confirma que el tren no se encuentra en uso por falta de rentabilidad. La solución se presenta en la Tabla 7.1 y refleja la cantidad de viajes asociados a cada variable y el valor de la función objetivo. En la misma se presenta la utilización de viajes en camión origen-destino mediante la variable u .

Se realiza la misma prueba con otro grupo aleatorio de orígenes y con la totalidad de estos habilitados, resultando en una variación del valor de la función objetivo, pero utilizando únicamente viajes origen-destino en ambos casos.

De estas combinaciones de datos de entradas se desprende que la variación de costos está asociada a la proximidad de los orígenes a los puntos de consumo, ya que al admitir más orígenes el valor de la función objetivo disminuye.

Se observa una baja competitividad del tren en estas condiciones, donde existe la posibilidad de realizar viajes de distancias cortas por corredores secundarios vía carretera.

Tabla 7.1 Resumen de resultados del problema caso de estudio 1 con el conjunto de orígenes 1.

Destino	u	v	z	Costo
D1	3.171	0	0	5.720.198
D3	1.146	0	0	
D4	974	0	0	
D5	241	0	0	
D6	144	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	0	0		

Fuente: Elaboración Propia.

El valor de la función objetivo es de USD 5.720.198 y corresponde a la asignación de 5.676 viajes en camiones que se realizaron entre origen y destino directamente (u).

7.1.2. Extensión de vías férreas

Este caso tiene como objetivo analizar el comportamiento de la asignación de los viajes cuando se habilitan tramos de vía del tren y estaciones que actualmente se encuentran fuera de servicio o en malas condiciones.

Mediante el estudio de las zonas forestadas junto con las actuales vías de tren, tanto en uso como en desuso, se seleccionan tres nuevos centros de acopios. Los mismos se encuentran ubicados en las zonas de Paysandú (A3), Rivera (A4) y Este del país (A5). La Figura 7.2 muestra los centros de acopio utilizados y las vías de tren existentes.

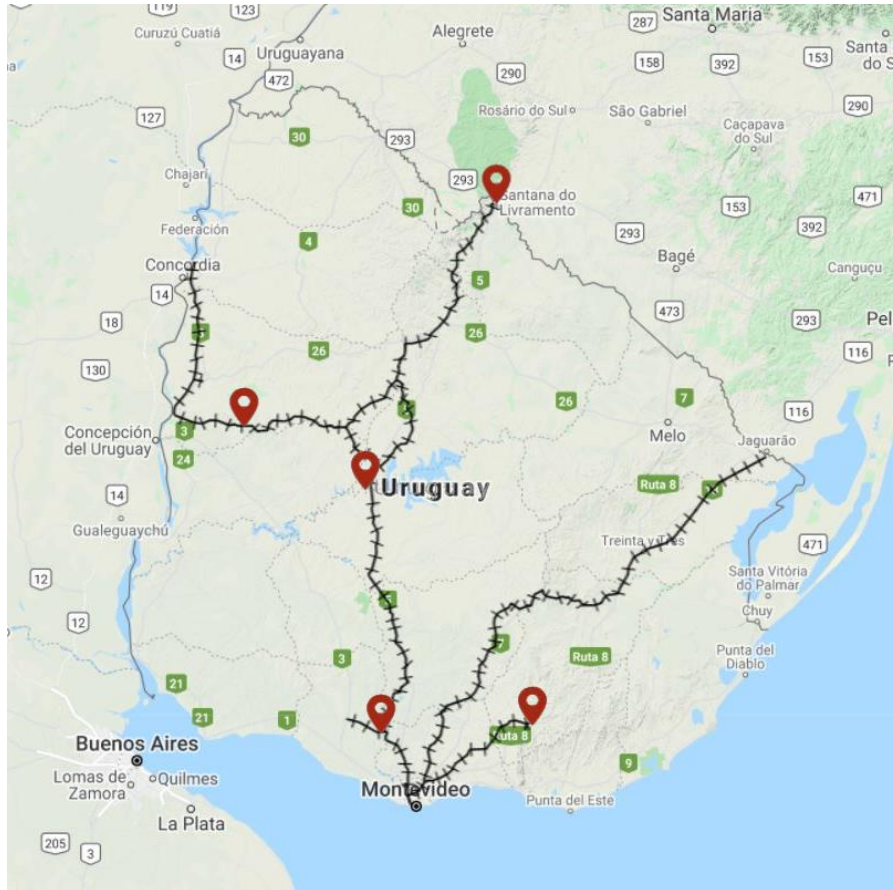


Figura 7.2 Ubicación de centros de acopio añadidos sobre la base ferroviaria uruguaya.
Fuente: MTOP [86], Elaboración Propia.

Esto genera que se creen nuevas rutas disponibles para la circulación del tren.

Este caso fue probado con tres combinaciones de orígenes diferentes. De la misma forma que en el caso 1, con dos conjuntos al 75% y con la totalidad de los orígenes disponibles.

Como analíticamente el resultado de las tres pruebas es el mismo solo se muestran los resultados numéricos de uno de los conjuntos reducidos (75%) en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Resumen de resultados del problema caso de estudio 2 con el conjunto de orígenes 1.

Destino	u	v	z	Costo
D1	3.171	0	0	5.719.747
D3	1.146	0	0	
D4	948	1	0	
D5	241	0	0	
D6	144	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	26	0		

Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso el resultado obtenido es de 5.650 viajes por carretera entre los orígenes y los destinos (u), 26 viajes por carretera a un único acopio (x) y 1 viajes por tren desde el acopio al destino (v).

Si se comparan los resultados presentados en Tabla 7.1 y Tabla 7.2 se ve que en esta última la solución planteada utiliza un viaje de tren para el destino 4. Como consecuencia de la reducción de camiones que llegan a destino, se reduce el valor de la función objetivo USD 441. Este ahorro representa un ahorro menor al 0,001% del costo total, por lo que se lo puede considerar despreciable.

Se considera que la principal causa por la cual el D4, que representa el Puerto de Montevideo, es el único que se ve beneficiado con el uso del tren en estas circunstancias, es debido a qué es el único destino que se le permite el ingreso del tren al predio, siendo la descarga de las trozas in situ. Esto permite ahorrar en los rubros de carga y descarga y en el uso de camiones por tramos cortos entre centros de acopio y destinos.

7.1.3. Aumento de la demanda a lo largo de los años

En este análisis el cambio que se presenta es la apertura de una nueva planta de celulosa en el centro del país (D2). La misma permite el ingreso del tren al predio y por lo tanto la descarga de las trozas se realiza in situ.

Para el resto de los nodos, se asume que las plantas ya se encuentran trabajando a capacidad máxima y por lo tanto no aumentará su producción. Luego para los Puertos y los Aserraderos se considera un aumento de la demanda según la tasa de consumo anual mundial, la cual fue de 2.4% para el período 2010-2015 [98].

Por otra parte, la oferta se incrementa según lo previsto en la Figura 4.1, donde el sector forestal pasa de 565.000 Ha plantadas en 1999 a 1.000.000 de Ha plantadas en 2018. Este incremento corresponde a un 3.05% anual para Uruguay. Por otra parte, la tasa media anual internacional toma un valor de 1.2% para el período 2010- 2015 [99]. Para los posteriores análisis se utilizan los 132 orígenes disponibles variando su oferta.

Además de aumentar la demanda, se asume una mejora de la infraestructura de la red vial en el tramo Paso de los Toros - Montevideo, es por esto que la relación de camiones por tren aumenta únicamente para este tramo. Esta mejora corresponde a un ahorro de los costos de transporte por tren de aproximadamente un 27%, pasando de una relación de camiones por tren (parámetro M) de 26 a 33.

En esta Sección se aíslan los efectos de inflación de costos, ya que el foco está en los análisis del transporte en distintas combinaciones de oferta-demanda.

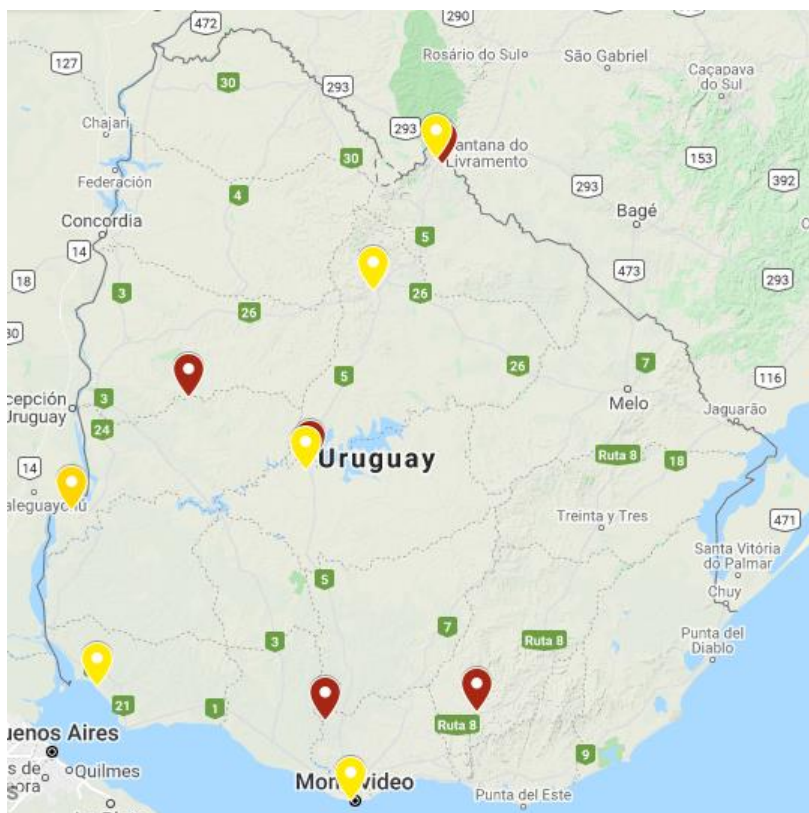


Figura 7.3 Ubicación de centros de acopio y destinos para el caso 6.3. Fuente: Elaboración Propia.

A) Aumento de la demanda para los próximos 2 años

Para este caso de análisis, se aumenta la oferta y la demanda de nuestros puntos de análisis a razón de las tasas de incremento representativa de Uruguay tal cual se desarrolla en el comienzo de esta Sección. El aumento resultante del período analizado fue de 6,1% y 4,8% respecto a los valores utilizados en el caso 7.1.1 de oferta y demanda respectivamente. La Tabla 7.3 representa el resultado obtenido para el caso 3 A.

Tabla 7.3 Resumen de resultados del problema caso de estudio 3 A.

Destino	u	v	z	Costo
D1	3.171	0	0	7.851.339
D2	2.997	0	0	
D3	1.146	0	0	
D4	943	3	0	
D5	252	0	0	
D6	150	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	78	0		

Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso el resultado obtenido es de 8.659 viajes por carretera entre los orígenes y los destinos (u), 78 viajes por carretera a un único acopio (x) y 3 viajes por tren desde el acopio al destino (v)

B) Aumento de la demanda para los próximos 10 años

Análogamente al caso A, se aumenta la oferta y la demanda de los puntos de análisis a razón de las tasas de incremento representativas de Uruguay. El aumento resultante del período analizado fue de 35% y 26% respecto a los valores actuales de Oferta y Demanda respectivamente.

Tabla 7.4 Resumen de resultados del problema caso de estudio 3 B.

Destino	u	v	z	Costo
D1	3.217	0	0	7.458.784
D2	2.945	2	0	
D3	1.146	0	0	
D4	1.154	3	0	
D5	303	0	0	
D6	180	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	52	0		
A4	0	0		
A5	78	0		

Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso el resultado obtenido es de 8.945 viajes por carretera entre los orígenes y los destinos (u), 130 viajes por carretera a dos acopios (x) y 5 viajes por tren desde el acopio hacia 2 destinos (v)

En los resultados de los escenarios A y B se puede observar que se mantiene la lógica de abastecimiento vía tren únicamente en aquellos destinos que cuenta con descarga en el lugar de demanda. La solución presentada plantea la utilización de dos centros de acopio para abastecer el puerto de Montevideo y la planta de Paso de los Toros. Estos destinos completan su demanda con entregas directas vía carretera desde otros puntos de origen.

En cuanto a los viajes anteriormente mencionados. El centro de acopio de Zona Paysandú (A3) se utiliza para cargar el tren con trozas provenientes de orígenes cercanos, para luego abastecer La planta de Celulosa de Paso de los Toros (D2). Por otro lado, el centro de acopio de Zona Este (A5) abastece el Puerto de Montevideo (D4).

Comparando los escenarios A y B, en el segundo, a pesar de tener una demanda mayor que en el primero, el costo de la función objetivo es menor. Esta variación puede estar dada por la relación de Oferta-Demanda en cada escenario. En el escenario A, el valor de la oferta es 4% mayor a la demanda, mientras que en el escenario B el margen es del 27%,

pudiendo satisfacer la demanda desde orígenes más cercanos con un costo asociado menor. Se entiende que esto puede ocurrir, ya que al comienzo de la puesta en marcha de la planta de Celulosa de Paso de los Toros (D2), es posible que el mercado todavía se encuentre en preparación para satisfacer su demanda, debido a que el ciclo de reposición del Eucaliptus es de entre 9 y 12 años.

7.1.4. Análisis de cosecha por zona.

La centralización de la cosecha por zona puede alentar al uso de los centros de acopio y por lo tanto el uso del tren. Realizar un análisis del comportamiento de los costos para este tipo de planificación puede ser soporte para la generación de nuevas vías de tren y de centros de acopio.

Por un lado, se seleccionan tres zonas, litoral, norte y este para estudiar su capacidad de abastecer cada una de ellas a cada punto de demanda de forma independiente. Es decir, se realizan 18 pruebas, 3 por cada destino, con el objetivo de observar desde qué zona se ve beneficiado el abastecimiento en términos económicos.

En la Figura 7.4 se señalan las zonas representativas seleccionadas.

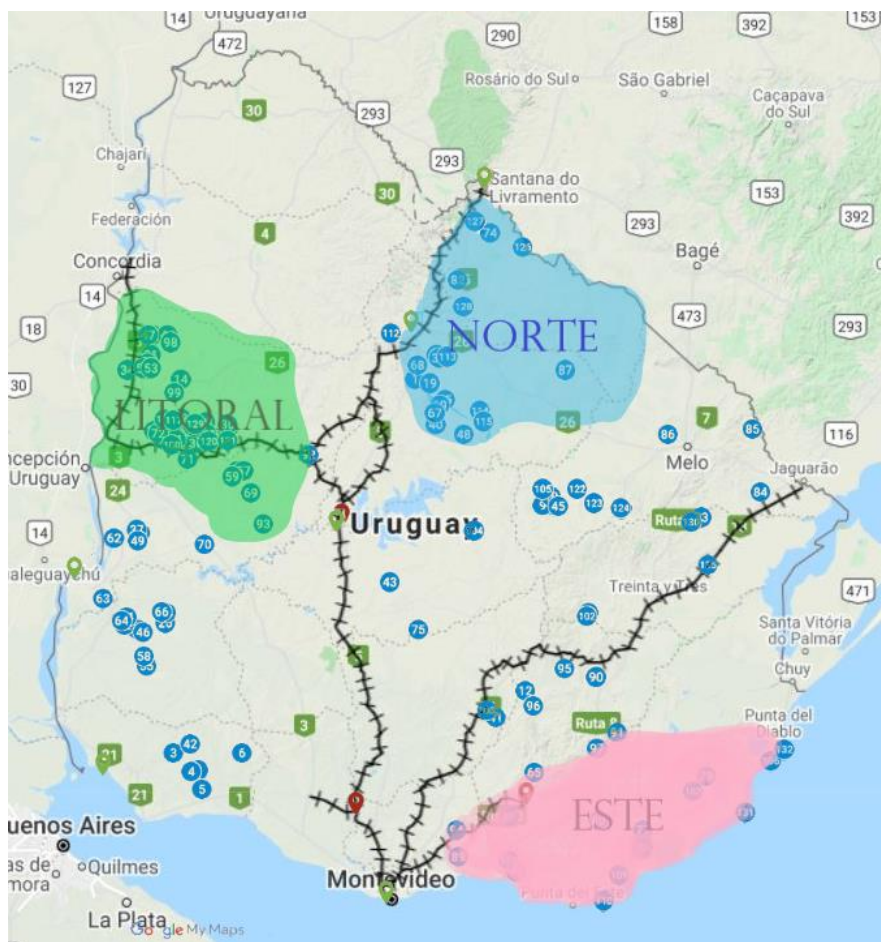


Figura 7.4 - Puntos representativos por zona. Fuente: Elaboración Propia.

Como resultado de estas pruebas se obtuvieron los datos presentados en la Tabla 7.5. En esta se puede ver que existe una zona que favorece a la operación en términos económicos para cada destino.

Para interpretar la tabla a continuación se debe recordar que, u representa los viajes por carretera desde los orígenes a los destinos, v representa los viajes por tren desde los acopios a los destinos, x representa los viajes por camión desde los orígenes a los acopios, w representa los viajes en tren entre acopios y z representa los viajes por camión desde los acopios a los destinos.

Tabla 7.5 - Resumen de resultados para el caso de estudio 4.

Destino	Origen	u	v	x	w	z	Costo total
D1	Litoral	3.171					2.462.741
	Norte	3.171					4.114.533
	Este	3.171					4.654.819
D2	Litoral	2.997					2.607.536
	Norte	2.997					2.612.163
	Este	2.997					3.734.683
D3	Litoral	1.146					1.343.958
	Norte	1.146					1.582.171
	Este	1.146					1.453.379
D4	Litoral	625	19	396			1.329.065
	Norte	224	25	797			1.352.943
	Este	813	8	208			854.332
D5	Litoral	200	2	52			307.826
	Norte	252					176.382
	Este	186	2	66			382.411
D6	Litoral	150					147.828
	Norte	150					100.604
	Este	150					210.168

Fuente: Elaboración Propia.

En este análisis se aprecia que los destinos Zona Fray Bentos (D1), Planta de Celulosa Paso de los Toros (D2), Planta de Celulosa de Conchilla (D3) y Aserraderos de Tacuarembó (D6) no se ven beneficiados por el uso del tren en el esquema de oferta zonal. En cuanto a los destinos Puerto de Montevideo (D4) y Aserraderos de Rivera (D5) si se utiliza. Esto representa un cambio en cuanto al caso 7.1.3- A, donde no se utilizaba el tren para llegar hasta el D5.

Con la locación tomada para los centros de acopios en la Sección 6.2 y las condiciones de infraestructura ferroviarias asumidas, el único destino que encuentra conveniente la utilización del tren para las tres zonas analizadas es el Puerto de Montevideo (D4).

En la Tabla 7.6 se presenta una comparativa de los costos y ahorros entre un escenario de tren disponible y uno sin tren disponible. El ahorro que se genera por la utilización del tren alcanza un valor porcentual máximo aproximado de 4,2% (D4- Zona Norte)

y un valor mínimo de aproximadamente 0% (D4- Zona Litoral), donde la variación de costos no representa un ahorro sustancial.

Tabla 7.6 - Resumen de variación de costos para el caso de estudio 4.

Destino	Origen	Costo con tren	Costo sin tren	Ahorro
D4	Litoral	1.329.065	1.330.157	0,08%
	Norte	1.352.943	1.412.034	4,18%
	Este	854.332	886.076	3,58%
D5	Litoral	307.826	309.348	0,49%
	Norte	176.382	176.382	0,00%
	Este	382.411	385.398	0,78%

Fuente: Elaboración Propia.

7.1.5. Análisis de impacto por el uso de Tritrenes

En el año 2021 se aprobó el uso del tritren (vehículo carretero de alta capacidad) en rutas nacionales, lo que permite que un tractor pueda transportar un peso bruto de hasta 72 toneladas y 48 toneladas netas.

A nivel mundial, Suecia comenzó en 2007 pruebas piloto de transporte carretero de alta capacidad en el rubro forestal, con unidades que pueden llegar a transportar 90 toneladas de peso bruto. Desde 2018, el parlamento definió un corredor en el cual quedan habilitados vehículos de hasta 72 toneladas de peso bruto.

Por otra parte, Finlandia aprobó en 2019 una legislación que habilita el uso de vehículos de 76 toneladas de peso bruto y se encuentra haciendo pruebas con vehículos de hasta 88 toneladas de peso bruto [99].

La utilización de transporte carretero de carga de alta capacidad no solo tiene impacto a nivel económico, sino que trae consigo un desarrollo de nuevas tecnologías. Estas tecnologías presentan beneficios tanto en aspectos ambientales (asociado a niveles de contaminación por tonelada transportada) como también en seguridad[99].

En la Figura 7.5 se presenta de forma gráfica el rango de disminución de costos asociados a la operación de transporte en vehículos carreteros de alta capacidad, contra el transporte carretero estándar[100].

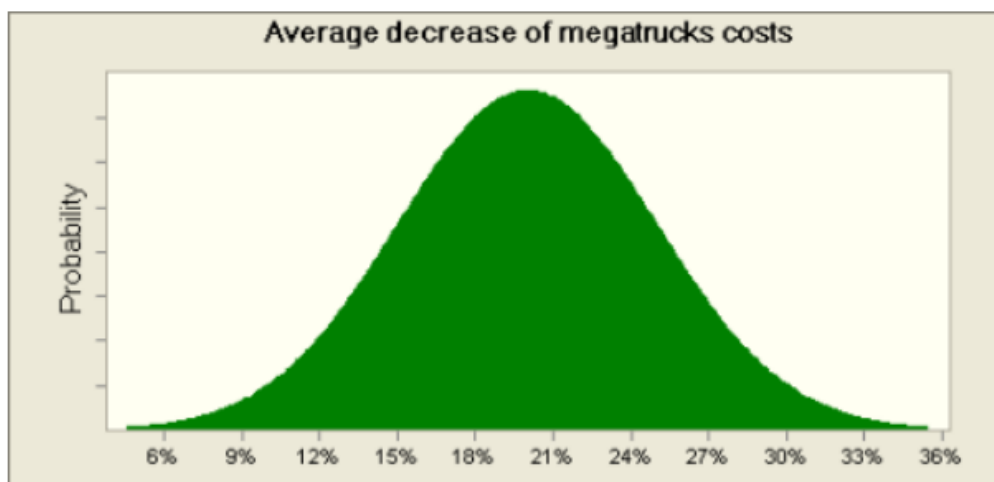


Figura 7.5 - Porcentaje promedio de ahorro por el uso de tritrenes o Longer and Heavier Vehicle [100].

Para este análisis se toma un ahorro del 20% en el precio por tonelada del transporte carretero. Se plantean dos escenarios, uno donde el 30% de la flota son vehículos carreteros de alta capacidad y otro donde el 60% tiene esas características. Estos escenarios implican que el valor de carga media por camión se desplaza a 36,8 y 41,6 toneladas respectivamente.

En la Tabla 7.7 se presenta un resumen de los costos del escenario en donde el 30% de la flota son vehículos carreteros de alta capacidad. Si se compara el resultado de la función objetivo con la del caso A de la Sección 7.1.3 podemos ver que el tren pierde competitividad, bajando la cantidad de trenes que llegan al Puerto de Montevideo (D4). Por otra parte, en términos de costos, se alcanza un ahorro del 7,1% y un decremento de aproximadamente 16% en cantidad de camiones que llegan a destino.

Tabla 7.7 - Resumen de resultados para el caso de estudio 5 - Escenario 30%.

Destino	u	v	z	Costo
D1	2743	0	0	7.294.265
D2	2593	0	0	
D3	992	0	0	
D4	838	2	0	
D5	219	0	0	
D6	131	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	46	0		

Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso el resultado obtenido es de 7.516 viajes por carretera entre los orígenes y los destinos (u), 46 viajes por carretera a un único acopio (x) y 2 viajes por tren

desde el acopio hasta el destino (v).

En el escenario donde un 60% de la flota son vehículos carreteros de alta capacidad, se mantiene la misma planificación de viajes en tren que en el escenario anterior, llegando mediante esa vía únicamente al Puerto de Montevideo (D4). En términos de costo, este escenario representa un ahorro del 5,8% en comparación a la función objetivo del caso anterior y del 12,5% en comparación a la del caso 7.1.3 - A. Por otra parte, en términos de cantidad de viajes que llegan a destino, este escenario representa un decremento del 11,8% en comparación al caso anterior y 25,9% en comparación al caso 7.1.3 - A

Tabla 7.8 - Resumen de resultados para el caso de estudio 5 - Escenario 60%.

Destino	u	v	z	Costo
D1	2.418	0	0	6.870.539
D2	2.285	0	0	
D3	875	0	0	
D4	739	2	0	
D5	194	0	0	
D6	116	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	40	0		

Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso el resultado obtenido es de 6.627 viajes por carretera entre los orígenes y los destinos (u), 40 viajes por carretera a un único acopio (x) y 2 viajes por tren desde el acopio hasta el destino (v).

7.1.6. Análisis ante situaciones puntuales de extrema demanda

Casos como la llegada de un buque al puerto o la presencia de climas adversos pueden incidir en la sobre exigencia del medio carretero en circunstancias puntuales. Se busca analizar cómo estas variaciones afectan al funcionamiento de la matriz de transporte bimodal.

Como caso de estudio, se toma el ejemplo de un embarque de 90 mil toneladas en trozas de madera al buque Mineral Gent en el Puerto de Montevideo ocurrido el 11 de Mayo de 2021. Esta operación requirió 10 días y unos 3000 viajes en camión. La madera proviene de distintos productores forestales con distancias de entre 300 y 450 km [101].



Figura 7.6 Fila de camiones a la espera de cargar el buque Mineral Gent [101].

A efectos del modelo, se analiza el caso a 10 días, definiendo que en ese plazo el Puerto de Montevideo (D4) alcanza una demanda extrema equivalente a 3000 camiones.

El objetivo fue lograr una comparativa en la cantidad de viajes utilizados y el porcentaje de viajes concretados en tren sobre la cantidad de viajes totales y no una comparativa de costos ya que en este caso se alteró el período analizado en relación a los casos anteriores (pasa de 7 a 10 días).

Esta demanda extrema representa aproximadamente un aumento al doble de la demanda diaria del caso 7.1.3-A. La Tabla 7.9 presenta un análisis análogo al del caso 7.1.3-A pero con un período de 10 días mientras que la Tabla 7.10 presenta un resumen de los resultados del caso de demanda extrema.

Tabla 7.9 - Resumen de resultados para el caso de estudio 7.1.3-A con T=10.

Destino	u	v	z	Costo
D1	4527	0	0	10.621.013
D2	4279	0	0	
D3	1634	0	0	
D4	1354	4	0	
D5	357	0	0	
D6	212	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	104	0		

Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso el resultado obtenido es de 12.363 viajes por carretera entre los orígenes y los destinos (u), 104 viajes por carretera a un único acopio (x) y 4 viajes por tren desde el acopio hasta el destino (v).

Tabla 7.10 - Resumen de resultados para el caso de estudio 6 con demanda extrema en D4.

Destino	u	v	z	Costo
D1	4527	0	0	12.296.892
D2	4279	0	0	
D3	1634	0	0	
D4	2636	14	0	
D5	357	0	0	
D6	212	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	364	0		

Fuente: Elaboración Propia.

Para este caso el resultado obtenido es de 13.645 viajes por carretera entre los orígenes y los destinos (u), 364 viajes por carretera a un único acopio (x) y 14 viajes por tren desde el acopio hasta el destino (v).

Se puede observar que en la Tabla 7.10 se tiene una ratio de utilización de tren del 12.3% (364 en una demanda de 3000) mientras que en la Tabla 6.9 el ratio es de 7.1% (104 en una demanda de 1458).

Si se toma la situación de extrema demanda desarrollada en la Tabla 7.10 y se compara con el mismo caso pero restringiendo el uso del tren a cero viajes permitidos, Tabla 7.11, se ve que el costo sufre un aumento del 0,1% en los totales de la operación

Tabla 7.11 - Resumen de resultados para el caso de estudio sin trenes.

Destino	u	v	z	Costo
D1	4527	0	0	12.310.961
D2	4279	0	0	
D3	1634	0	0	
D4	3000	0	0	
D5	357	0	0	
D6	212	0	0	
Acopio	x	w		
A1	0	0		
A2	0	0		
A3	0	0		
A4	0	0		
A5	0	0		

Fuente: Elaboración Propia.

7.1.7. Análisis del comportamiento del tren ante variaciones en los costos.

En este escenario se observa cómo se comportaron las asignaciones de los viajes en tren cuando se varían diferentes aspectos de los costos que están involucrados en la operación.

Como primer escenario se comparan los ahorros que se generaron al disminuir los costos de tonelada por kilómetro del tren versus los costos del caso de análisis 7.1.3-A. La reducción se hizo en múltiples porcentajes, 1%, 5%, 10%, 20% y 50%, los resultados se presentan en la Tabla 7.12.

Además de las reducciones de costos se analiza el nivel de utilización (cantidad de viajes utilizados/cantidad de viajes disponibles) de cada posible combinación de viaje en tren.

Tabla 7.12 - Resumen de resultados para la variación costos USD/ton.km en la operación transporte en tren.

% Disminucion costo	Ahorro (USD)	Nuevo costo (USD)	% Ahorro vs 6.1.3-A	Cantidad de viajes					
				A1	A2	A3	A4	A5	Total viajes en tren
0%	0	7.851.339	0,0%	0	0	0	0	3	3
1%	0	7.851.189	0,0%	0	0	0	0	3	3
5%	3.986	7.847.353	0,1%	0	0	0	7	3	10
10%	8.969	7.842.370	0,1%	0	0	0	7	3	10
20%	18.442	7.832.897	0,2%	0	0	0	7	3	10
30%	28.968	7.822.371	0,4%	0	0	0	7	4	11
50%	52.363	7.798.976	0,7%	0	0	1	7	7	15

Fuente: Elaboración Propia.

En este caso se observa una leve reducción de los costos totales, ya que impactan únicamente en un rango de 3 a 15 trenes por período de un total de 63 viajes totales disponibles a utilizar. Además se ve como para el tramo que inicia el centro de acopio de Zona

Rivera (A4) el uso del tren es del 100% de los disponibles a partir de una reducción del 5%, convirtiendo a ese acopio en un punto sensible a los ajustes de costos.

En un segundo caso de análisis, se permite el uso de trenes de mayor capacidad reduciendo el costo por tonelada transportada. Además, se aumenta la frecuencia de viajes permitidos por tramos a 3 trenes para cada *t*. Los resultados se encuentran en la Tabla 7.13.

Tabla 7.13 - Resumen de resultados para la variación costos USD/ton.km y ampliación capacidad del tren.

% Disminucion costo	Ahorro	Nuevo costo	% Ahorro vs 6.1.3-A	Cantidad de viajes					
				A1	A2	A3	A4	A5	Total viajes
0%	63.957	7.787.382	0,8%	0	0	0	21	3	24
1%	66.648	7.784.691	0,9%	0	0	0	21	3	24
5%	77.429	7.773.910	1,0%	0	0	0	21	5	26
10%	91.511	7.759.828	1,2%	0	0	1	21	5	27
20%	120.187	7.731.152	1,5%	0	0	1	21	6	28
30%	149.765	7.701.574	1,9%	0	0	1	21	11	33
50%	213.558	7.637.781	2,7%	0	0	2	21	12	35

Fuente: Elaboración Propia.

Lo que se destaca de este caso, aparte de la reducción de costos, es ver como nuevamente el centro de acopio de Zona de Rivera (A4) alcanza un 100% de utilización de trenes.

Por último, se analiza la reducción de los costos de carga y descarga. En esta situación la modificación afecta no solo a los trenes sino también a los camiones. Los resultados se presentan en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14 - Resumen de resultados para la variación costos USD/ton cargada.

% Disminucion costo	Ahorro	Nuevo costo	% Ahorro vs 6.1.3-A	Cantidad de viajes					
				A1	A2	A3	A4	A5	Total viajes en tren
0%	0	7.851.339	0,0%	0	0	0	0	3	3
1%	11.477	7.839.862	0,2%	0	0	0	0	3	3
5%	52.761	7.798.578	0,7%	0	0	0	7	3	10
10%	76.596	7.774.743	1,0%	0	0	0	7	3	10
20%	214.344	7.636.995	2,7%	0	0	0	7	3	10
30%	321.761	7.529.578	4,1%	0	0	0	7	3	10
50%	536.542	7.314.797	6,8%	0	0	0	7	4	11

Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que los ahorros en los costos son significativamente mayores comparándolos con los casos anteriores, mientras que la asignación de viajes es muy similar a la situación planteada en la Tabla 7.12.

En ningún caso, incluso con una disminución del 50% en los costos, se logra la completa utilización del tren. De estos resultados se deduce que los posibles ahorros que

genera el uso del tren son superados por los ahorros provenientes de no realizar viajes cortos de origen a centro de acopio. En la gran mayoría de los casos, los viajes largos en camión desde el origen a destino son económicamente más convenientes.

Por otro lado se puede concluir que el de Zona Rivera (A4) se ve fuertemente beneficiado por las mejoras tanto en costo como en infraestructura y por lo tanto es recomendable realizar una análisis financiero para estudiar posibles inversiones que mejoren ese tramo.

8. Conclusiones

A continuación se desarrollan las conclusiones y un breve resumen de los resultados obtenidos en el presente proyecto. Durante el desarrollo de las distintas etapas que engloban este trabajo de grado, se profundizó en los aspectos que se ven involucrados en el transporte de trozas en el mundo, pero principalmente en el Uruguay.

Mediante la búsqueda en diversas fuentes es que se logra generar una visión global de la actualidad e incluso aproximar, a grandes rasgos, escenarios futuros. De forma de alcanzar el primer objetivo, se desarrolló en este documento la Sección 2 - Estado del Arte, la cual describe las principales problemáticas del rubro a nivel mundial y regional, diversos software utilizados para apoyar la toma de decisiones en el proceso de planificación y además incluye el desarrollo de la situación actual del sector forestal y su evolución.

El segundo objetivo de este proyecto consistió en desarrollar un modelo matemático que permita analizar escenarios representativos del abastecimiento de trozas mediante el uso de camiones y trenes. Se considera que el mismo cumple con la función propuesta de forma acertada, obteniendo como resultado la asignación óptima de viajes entre los orígenes y destinos involucrados mediante los medios de transporte definidos. Además, el valor obtenido por la función objetivo es el resultado de los costos de la operación, generada a partir de los datos relevados. Si bien se consideran estos datos como representativos, los resultados de todos los análisis pueden llegar a variar según las características de los acuerdos comerciales y de las eficiencias de las máquinas de arrastre (tractores y locomotoras).

En lo referente a conclusiones generadas a partir de los resultados de los diferentes escenarios se puede mencionar que, en primer lugar, se ve que los costos del transporte forestal y la utilización de los distintos medios de transporte son totalmente dependientes de la ubicación de la madera. Es decir, la proximidad de los nodos de origen a los destinos o a los centros de acopio es la principal causa de los incrementos o disminuciones de los costos. En los múltiples escenarios planteados se vio como aquellos destinos que contaban con descarga en el propio lugar contaban con ventaja al momento de reducir sus costos utilizando el tren, mientras que para aquellos destinos que no contaban con esta infraestructura, el hecho de tener que realizar una carga y descarga extra, volvió poco rentable la utilización de este medio.

Es por esto que se observa el papel fundamental que juegan los costos de carga y descarga en cómo se administra la distribución de transporte, viéndose en el escenario 7.1.7 como la variación de estos impactan más que otra variación de costos presentes en la operación.

En cuanto a conclusiones relacionadas con las mejoras en infraestructura vial y mejoras de capacidad vemos que en ambos casos existen ahorros en los costos, pero estos ahorros deben ser de alguna forma comparados con las inversiones que se llevaron a cabo para lograr crear esos cambios. Esta clase de análisis no fue llevada adelante en este proyecto por sobrepasar los objetivos del mismo, pero se entiende que las entidades que sí cuentan con la información aquí ausente pueden utilizar estos resultados para analizar si llevar adelante o no la inversión.

Cabe destacar que de las vías férreas que existen actualmente, el centro de acopio de Zona Rivera (A4) y el trayecto que llega hasta Rivera revelan un gran potencial para llevar adelante mejoras, dado que antes pequeños ahorros en los costos, este tramo logra saturarse de forma muy rápida. Por otro lado, existe una relación fuerte entre el centro de acopio de Zona Este (A5) y el Puerto de Montevideo, siendo un punto frecuentemente utilizado para el abastecimiento de este último. Es por esto que se cree importante también avanzar sobre un análisis de mejoras tanto de infraestructura como de área forestada.

Como se menciona en la Sección 2.1.1.4 el transporte de trozas en camiones es la cara más visible de la producción forestal y su crecimiento trae acompañado problemas de siniestralidad, demoras y deterioro en la infraestructura carretera si no se planifica correctamente [102]. Teniendo esto en cuenta, se puede ver que las alternativas de transporte multimodal como puede ser la utilización del ferrocarril, presentan puntos fuertes y se deben considerar en el balance, en busca de una mejor distribución de tráfico en carreteras nacionales.

Otro aspecto destacable es que el modelo se puede adaptar, por lo que se proponen algunas extensiones que se pueden realizar. Por un lado, en este proyecto se basó en el transporte bimodal de trozas pero se considera interesante la integración del transporte fluvial ya que como se menciona en la Sección 2.2.3, Uruguay cuenta con una amplia red de ríos y de puertos de gran nivel. Por otro lado, se cuenta con la posibilidad de que sean segmentados los orígenes según sus propietarios y que los mismos solo abastezcan al destino correspondientes. También es posible realizar un análisis de la ubicación estratégica de nuevos centros de acopio ubicados en tramos ya existentes o analizar la extensión de vías hacia nuevas zonas. Con respecto a la distribución del transporte, se pueden plantear diferentes escenarios limitando la utilización de los distintos tipos de transporte. Por ejemplo, se podría limitar la cantidad de vehículos que circulan por las carreteras, fomentando de alguna manera la utilización de otras alternativas de transporte.

9. Referencias

- [1] Buchholz D.(2016) Bin-Picking Cham: Springer International Publishing.
- [2] Glover F.(1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. En Computer and Operations Research. p. 533-549. vol 13 (5).
- [3] Fernandez J. Producción Forestal en el Uruguay - Balance y perspectiva: ANIU. [Online]
Acceso 3 de Agosto de 2021.
Disponible en: https://aniu.org.uy/wp-content/uploads/2021/05/Produccion_forestal_Uruguay_20210504.pdf
- [4] Uruguay XXII. Sector forestal en Uruguay. [Online].
Acceso 7 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/a29771e03cc49e42fe516c01b0d271dc0fcf4cbe.pdf>.
- [5] Audy JF, D'amours S, Rönnqvist M. (2012) Planning methods and decisions support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. vol 28.
- [6] Schwab K. (2019) World Economic Forum - The Global Competitiveness Report.
- [7] Sánchez R, Lardé J, Chauvet P, Jaimurzina A. (2017) Inversiones en infraestructura en América Latina: tendencias, brechas y oportunidad.
- [8] González M, Trujillo L.(2003) Análisis de la eficiencia de los servicios de infraestructura en España: Una aplicación al tráfico de contenedores.
- [9] The Journal of Commerce (2018). Top 50 global port rankings 2018. [Online].
Acceso 8 de Agosto de 2021.
Disponible en: https://www.joc.com/port-news/top-50-global-port-rankings-2018_20190809.html.
- [10] Hernández Marcial M.(2017) Determinación de los costos de transporte de carga, caso de estudio: Transporte de acero. Tesis de Licenciatura. Universidad Autonoma del Estado de México.
- [11] Murphy G.(2003) Reducing Trucks on the Road through Optimal Route Scheduling and Shared Log Transport Services. En Southern Journal of Applied Forestry. p. 189-205. vol 27 (3).
- [12] Golob T, Recker W.(1987) An Analysis of Truck-Involved Freeway Accidents Using Log-Lineal Modeling. En Journal of Safety Research p. 375-395. vol 19 (5).
- [13] Observatorio de Ministerio de Industria, Energía y Minería [Online].
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://observatorio.miem.gub.uy/oie/pbi>
- [14] Banco Central del Uruguay. Informe de PBI por Industria. [Online].
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.bcu.gub.uy/Estadisticas-e-Indicadores/Paginas/Presentacion%20Cuentas%20Nacionales.aspx>.
- [15] Uruguay Forestal. [Online].
Acceso 2 de Agosto de 2021.

- Disponible en: <http://www.spf.com.uy/uruguay-forestal>.
- [16] Centro de Innovación en Organización Industrial de la Universidad de Montevideo.(2020) Informe anual 2020 del Índice de Costos del Transporte de Carga Automotor.
- [17] Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Índice de Precios. [Online].
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.mtop.gub.uy/vialidad/boletin-de-precios>.
- [18] Cacciali E, Cammarota M, Scavone M.(2017) Situación de la vialidad Uruguaya. Asociación Uruguaya de Caminos.
- [19] MTOP-DINAPLO. Observatorio Nacional de Transporte y Logística. [Online].
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://observatorio.mtop.gub.uy/>.
- [20] Audy J, Marques A, Rönqvist M, Epstein R, Weintraub A.(2014) Transportation and Routing. En The Management of Industrial Forest Plantations.Springer. p. 269-295.
- [21] Weintraub A, Epstein R, Morales R, Seron J, Traverso P.(1996) A Truck Scheduling System Improves Efficiency in the Forest Industries. En Journal on Applied Analytics.: INFORMS. p. 1-12. vol 26 (4).
- [22] Diario El Observador. El transporte de carga, talón de Aquiles de la forestación. [Online].
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.elobservador.com.uy/nota/el-transporte-de-carga-talon-de-aquiles-de-la-forestacion-20129818420>.
- [23] Instituto militar de estudios superiores. Mapa Logístico del Uruguay [Online].
Acceso 10 de Julio de 2020.
Disponible en: <http://www.imes.edu.uy/new/wp-content/uploads/2017/05/PUBLICAS/MONOGRAFIA%204512%2005.pdf>
- [24] Instituto Nacional de Logística. Infraestructura Ferroviaria. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.inalog.org.uy/es/red-ferroviaria/>.
- [25] Ferrocarril en Uruguay. [Online].
Acceso 7 de Agosto de 2021.
Disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Ferrocarril_en_Uruguay#/media/Archivo:Uruguayan_railway_network_map-es-2.png.
- [26] MTOP. Información, mapa, velocidades máximas y mínimas. [Online].
Acceso 10 de Setiembre de 2020.
Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas/politicas-y-gestion/informacion-mapa-velocidades-maximas-minimas>.
- [27] Ministerio de Transporte y Obras Públicas. PROYECTO "FERROCARRIL CENTRAL". [Online]
Acceso 10 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas/comunicacion/publicaciones/proyecto-ferrocarril-central>.
- [28] Fermi MJ. Revista Forestal. [Online].

- Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.revistaforestal.uy/wp-content/uploads/2019/12/F25-Log%C3%ADstica.pdf>.
- [29] Schwab K. World Economic Forum (2016-2017) - The Global Competitiveness Report .
- [30] Instituto Nacional de Logística. Infraestructura Portuaria. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.inalog.org.uy/es/infraestructura-puertos-libres/>.
- [31] Comisión Administrativa del Río Uruguay. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.caru.org.uy/web/>.
- [32] Calvo R, De Leon N, Sanz N. (2010) Los puertos de Fray Bentos y el impacto de la planta de celulosa UPM (Ex Botnia). Tesis de Grado. Montevideo: Facultad de Ciencias Económicas y de Administración.
- [33] MGAP. Oficina de Programación y Políticas Agropecuarias. [Online]
Acceso 5 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas>.
- [34] Sociedad de Productores Forestales. Área forestada. [Online].
Acceso 7 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.spf.com.uy/forestacion-zonas-forestadas/>.
- [35] MGAP. Geoportal Forestal del Uruguay. [Online]
Acceso 5 de Agosto de 2021.
Disponible en:
<https://web.sniq.gub.uy/arccgisprtal/apps/webappviewer/index.html?id=b90f805255ae4ef0983c2bfb40be627f>.
- [36] Uruguay XXI. Sector Forestal. [Online]
Acceso 8 de Agosto de 2021.
Disponible en: http://www.camaramercantil.com.uy/uploads/cms_news_docs/Sector-Forestal-2016.pdf.
- [37] Fermi MJ. Revista Forestal - El debe mayor. [Online]
Acceso 5 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.revistaforestal.uy/logistica/el-debe-mayor.html>.
- [38] GlobalPetrolPrices. Gasoline prices. [Online]
Acceso 10 de Julio de 2020.
Disponible en: https://es.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/.
- [39] FAO. Estadísticas de productos forestales. [Online]
Acceso 8 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938@180723/es/>.
- [40] Palmgren M, Rönnqvist M, Varbrand P. (2004) A near-exact method to solve the log-truck scheduling problem. En International Transactions in Operations Research. p. 447-464. vol 11(4).
- [41] Berbeglia G, Cordeau J, Gribkovskaia I, Laporte G. (2007) Static pickup and delivery problems: A classification scheme and survey. En TOP. p. 1-31. vol 15.

- [42] Ryan D, Rönnqvist M.(1995) Solving truck despatch problems in real time. Department of Engineering Science, The University of Auckland.
- [43] Rönnqvist M, Sahlin H, Carlsson D.(1998) Operative planning and dispatching of forestry. En Linköping University.
- [44] Rönnqvist M.(2003) Optimization in Forest. En Mathematical Programming. p. 267–284. vol 97.
- [45] Dantzig G, Ramser J.(1959) The truck dispatching problem. En Management Science. p. 80-91. vol 6 (1).
- [46] Toth P, Vigo D.(2006) The Granular Tabu Search and Its Application to the Vehicle-Routing Problem. En Journal on Computing. p.333-346. vol 15 (4).
- [47] Lüer A, Benavente M, Bustos J, Venegas B. El Problema de Rutas de Vehículos: Extensiones y Métodos de Resolución, estado del Arte. Workshop Internacional Conference.
- [48] Forsberg M, Frisk M, Rönnqvist M. (2005) FlowOpt – A Decision Support Tool for Strategic and Tactical Transportation Planning in Forestry. En International Journal of Forest Engineering.p. 101-114. vol 16.
- [49] Weintraub A, Romero C, Bjørndal T, Epstein R, Miranda J.(2007) Handbook Of Operations Research In Natural Resources. Springer;.1st ed
- [50] Konar A. (1999) Behavioral and cognitive modeling of the human brain. En Artificial intelligence and soft computing.
- [51] Araújo C.(2017) Multy-agent system for forest transport activity planning. En CERNE. p. 329-337.vol 23 (3)
- [52] Udomwannakhet J, Pimolpatchara V, Saengkarn M, Kwanjira K, Blay Ruiz J, Ammarapala V. (2008) A review of multimodal transportation optimization model. En International Conference on Business and Industrial Research.p. 333-338. 5th.
- [53] Xiong G, Wang Y. (2014) Best routes selection in multimodal networks using multi-objective genetic algorithm. En [Journal of Combinatorial Optimization](#). p. 655–673. vol 28.
- [54] GonzálezM. Procedimiento de generación de columnas. Aplicaciones a problemas logísticos. [Online]
Acceso 8 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/13156>.
- [55] Barnhart C, Johnson E., Nemhauser G., Savelsbergh M, Vance P.(1998) Branch-and-Price: Column Generation for Solving Huge Integer Programs. Tesis. School of Industrial and Systems Engineering Georgia Institute of Technology.
- [56] Rousseau L, Pesant G, Rix G. (2014) A column generation algorithm for tactical timber transportation planning. En Journal of the Operational Research Society. p. 278-287.[vol. 66 \(2\)](#)
- [57] Rocha L, González E, Orjuela J.(2011) Una revisión al estado del arte del problema de ruteo de vehículos: Evolución histórica y métodos de solución. En Ingeniería. p. 35-55. vol 16 (2)

- [58] Olivera A.(2004) Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos.Reportes Técnicos 04-08. UR. FI – INCO.
- [59] Clarke G, Wright J. (1962) Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. En Operations Research. p. 568-581. vol 12 (4).
- [60] Toth , Vigo D. (2003) The Granular Tabu Search and Its Application to the Vehicle-Routing Problem. En INFORMS Journal on Computing. p. 333-346. vol 15 (4).
- [61] Mole R., Jameson R. (1976) A Sequential Route-Building Algorithm Employing a Generalised Savings Criterion. En Operational Research Quarterly p. 503-511. vol 27 (2)
- [62] Christofides N, Mingozzi A, Toth P. (1979) The vehicle routing problem. En Combinatorial Optimization. p. 315– 338.
- [63] Solomon M.(1987) Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. En Operations Research. p. 254-265.vol 35 (2)
- [64] Potvin J, Rousseau J.(1993) A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. En European Journal of Operational Research. p. 331-340. vol 66 (3)
- [65] Golden B, Assad A, Levy L, Gheysens F.(1984) The fleet size and mix vehicle routing problem. En Computers & Operations Research. p. 49-66.vol 11 (1)
- [66] Kirkpatrick S, Gelatt Jr C, Vecchi M.(1983) Optimization by Simulated Annealing. En Science. p. 671-680.Vol. 220 (4598)
- [67] Selviaridis K, Spring M.(2007) Third party logistics: a literature review and research agenda. En The International Journal of Logistics Management. p. 125-150. vol. 18 (1)
- [68] Epstein R, Karlsson J, Rönnqvist M, Weintraub A. (2007) Harvest Operational Models in Forestry. En Handbook Of Operations Research In Natural Resources. vol. 99.
- [69] Robinson T.(1994) Tour Generation for Log Truck Scheduling.
- [70] Gendreau M, Hertz A, Laporte G. (1994) A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. En Management Science. p. 1276-1290. vol 40 (10).
- [71] Rodrigues T, Gomes M, Barbosa-Póvoa A.(2007) A new matheuristic approach for the multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. En OR Spectrum: Quantitative Approaches in Management. p. 75-110. vol 42 (1).
- [72] D'Amours , Rönnqvist , Weintraub.(2008) Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. En Information Systems and Operational Research. p. 265-281. vol 46 (4).
- [73] Rönnqvist, M. (2003). Optimization in forestry. Mathematical programming, 97° ed (1), p. 267-284.
- [74] de Almeida V., Skroder G., Mattos G. y González-Silva P. (2021). Strategic planning of freight transportation to support smart cities design: the Brazilian soybean case. Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia, 98, 104-116.
- [75] Banco Mundial. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NE.TRD.GNFS.ZS>.
- [76] Instituto Nacional de Logística. Análisis del Transporte Multimodal en Uruguay. [Online]

- Acceso 3 de Agosto de 2021.
Disponible en: https://www.oas.org/cip/docs/Presentaciones%20Políticas%20Públicas%20Uruguay/12%20federico%20stanham_V.3.0-1.pdf
- [77] Rubiato Elizalde JM. ; (2001). Mejores prácticas de transporte intermodal en las Américas: estudio de casos de exportaciones del Mercosur al NAFTA. Serie de Recursos Naturales e Infraestructura; 33° ed.
- [78] Miranda Thaine OS. (2005) Diseño del método de extracción de árboles caídos en el Parque Nacional Tunari Cochabamba: Universidad Mayor de San Simón. [Online]
Acceso 3 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos26/parque-tunari/parque-tunari.shtml>
- [79] Seilbahnen, Wyssen. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.wyssenseilbahnen.com/laufwagen/>.
- [80] Diario La Mañana. Fueron aprobados los tritrenes. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.xn--lamaana-7za.uy/agro/fueron-aprobados-los-tritrenes/>.
- [81] Oestreich D. Log raft on Mississippi. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.rockislandpreservation.org/postcards-from-home/log-raft-on-mississippi/>.
- [82] Boscana M, Boragno L, Arriaga E. Boletín Estadísticas Forestales: Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. [Online]
Acceso 3 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/boletin-estadisticas-forestales-2021>
- [83] Sociedad de Productores Forestales del Uruguay. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.spf.com.uy/uruguay-forestal/>.
- [84] Sociedad de Productores Forestales del Uruguay. La contribución del complejo forestal a la economía uruguaya. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.spf.com.uy/2020/12/15/la-contribucion-del-complejo-forestal-a-la-economia-uruguaya/>.
- [85] Revista Forestal. Por Partida Triple. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <http://www.revistaforestal.uy/logistica/por-partida-triple.html>.
- [86] Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Geoportal. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://geoportal.mtop.gub.uy/>.
- [87] Banco de Desarrollo de América Latina. Uruguay: análisis del sector transporte (Serie informes sectoriales. Infraestructura). [Online]
Acceso 3 de Agosto de 2021.

- Disponible en: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/393>
- [88] Portal Ministerio de Transporte y Obras Pública. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas>.
- [89] Centro de Innovación en Organización Industrial. Informe anual 2020 del Índice de Costos del Transporte de Carga Automotor. [Online]
Acceso 3 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.um.edu.uy/noticias/en-2020-los-costos-de-transporte-de-uruguay-aumentaron-5-en-pesos-uruguayos-y-disminuyeron>
- [90] Sommerville I. (2011) Ingeniería de Software. 9°ed. Pearson.
- [91] Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Geoportal Forestal de Uruguay. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en:
<https://web.snig.gub.uy/arccgisportal/apps/webappviewer/index.html?id=b90f805255ae4ef0983c2bfb40be627f>.
- [92] Google Maps. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.google.com.uy/maps/>.
- [93] Doldán J. (2007) Evaluación de parámetros de calidad de E. Globulus y E. Maidenii de las plantaciones uruguayas para pulpa de celulosa; Presentado en: International Colloquium on Eucalyptus Pulp ICEP. 3 ed. p. 4-8
- [94] Intergremial de Transporte Profesional de Carga Terrestre del Uruguay. Tarifas y precios de referencias - Transporte de madera, 2018. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: <https://www.intergremial.com/site/index.php/tarifas/precios-referencia/34-precio-maderas-feb2018>.
- [95] López S, Gianmbruno F. (2010). Medición de activos forestales en Uruguay; [Tesis de grado] Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Ciencias Económicas y de Administración.
- [96] Food and Agriculture Organization of the United Nations (2020). Yearbook of Forest Products. 72° ed.
- [97] Food and Agriculture Organization of the United Nations (1981). El eucalipto en la repoblación forestal. 11° ed.
- [98] Payn T, Jean-Michel C, Smith P, Kimberley M, Kollert W, Liu S, et al. (2015) Changes in planted forests and future global implications. En Forest Ecology and Management: Elsevier. p. 57-67.
- [99] International Transport Forum. (2019) High Capacity Transport Towards Efficient, Safe and Sustainable Road Freight. 69° ed.
- [100] Christidis P, Leduc G. (2009) Longer and Heavier Vehicles for Freight Transport.
- [101] Administración Nacional de Puertos. Nuevo embarque de 90 mil toneladas de madera a China por el puerto de Montevideo. [Online]
Acceso 2 de Agosto de 2021.
Disponible en: www.anp.com.uy/inicio/comunicacion/noticias/nuevo-embarque-de-90-mil-toneladas-de-madera-china-por-el-puerto-de-montevideo

- [102] Murphy G. (2003). Reducing Trucks on the Road through Optimal Route Scheduling and Shared Log Transport Services. *Southern Journal of Applied Forestry*. 27 (3), 198–205.

10. Anexos

10.1. Anexo I- Validación del modelo.

En la presente Sección se explicitan las pruebas realizadas con el objetivo de dar validez al modelo.

Las siguientes son referencias gráficas que aplican para todas las imágenes de la correspondiente Sección.

-  Rutas por carretera entre origen y destino
-  Rutas por carretera entre origen y acopio
-  Rutas por tren entre acopio y destino
-  Rutas por tren entre acopio y acopio
-  Rutas por carretera entre acopio y destino



Todos los casos de prueba fueron realizados con el solver GLPK LP/MIP, en su versión v4.63, en un ordenador Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz GPU NVIDIA GeForce GTX 960M 4GB y Memory Samsung 8.0 GB.

CASO DE PRUEBA 1: Oferta suficiente para abastecer demanda

Objetivo: Analizar el cumplimiento de la demanda en un caso en donde los datos deberían permitir un correcto abastecimiento.

Tabla 10.1 - Resumen resultado Caso de prueba 1

Caso de prueba	1: Oferta suficiente para abastecer demanda
Costo	59.800
x	420
u	405
v	7
w	5
z	175
Solución S/N	S
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis: Todos los destinos fueron abastecidos por el monte más próximo a cada uno, por camión y por tren. El resultado es el esperado. Tiempo de procesamiento despreciable y consumo de memoria igual a 0.7 Mb.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots, 7)$$

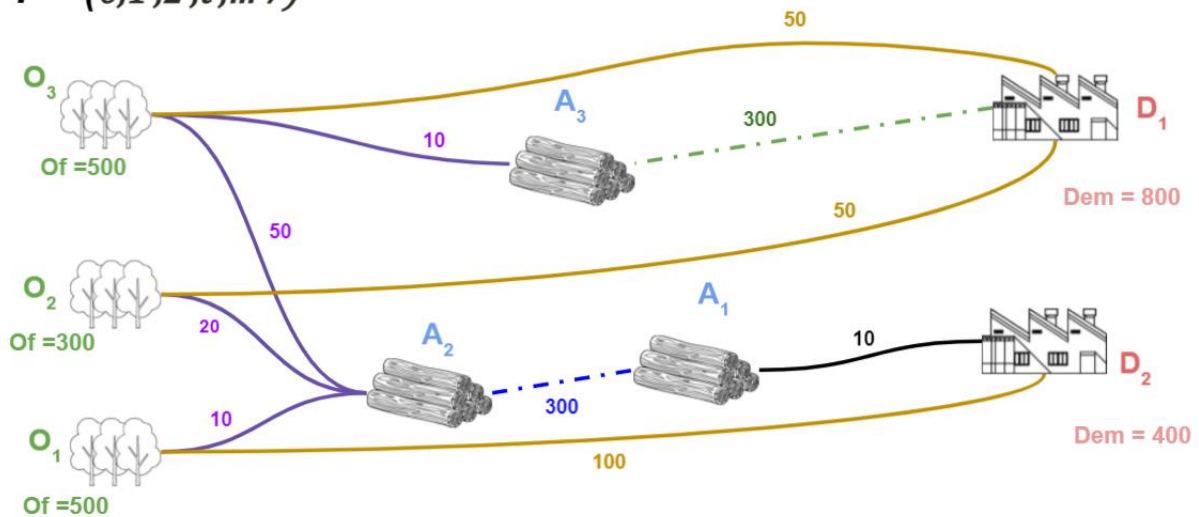


Figura 10.1 - Diagrama de flujo caso de prueba 1. Fuente: Elaboración Propia.

CASO DE PRUEBA 2: Demanda total mayor a la oferta

Objetivo: Analizar si el modelo logra o no cumplir con la demanda. Caso de desbordamiento.

Tabla 10.2 - Resumen resultado Caso de prueba 2.

Caso de prueba	2 : Demanda total mayor a la oferta
Costo	0
x	0
u	0
v	0
w	0
z	0
Solución S/N	N
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia

Análisis: Dada la restricción impuesta del cumplimiento de demanda, el modelo devuelve la solución esperada dado que la totalidad de la oferta entre todos los orígenes es menor que las demanda requerida por todos los destinos.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots, 7)$$

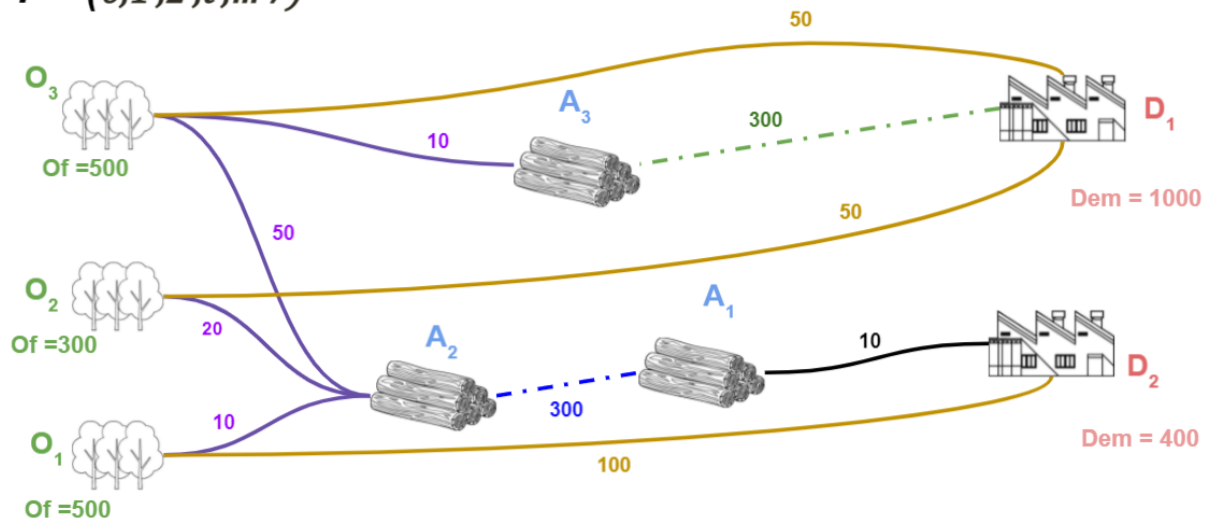


Figura 10.2 - Diagrama de flujo caso de prueba 2. Fuente: Elaboración Propia.

CASO DE PRUEBA 3 - Oferta disponible igual a cero

Objetivo: Analizar si el modelo logra o no cumplir con la demanda. Caso de desbordamiento.

Tabla 10.3 - Resumen resultado Caso de prueba 3.

Caso de prueba	3 - Oferta disponible igual a cero
Costo	0
x	0
u	0
v	0
w	0
z	0
Solución S/N	N
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis: Dada la restricción impuesta del cumplimiento de demanda, el modelo devuelve la solución esperada ya que no cuenta con oferta de materia prima para abastecer a los destinos.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots, 7)$$

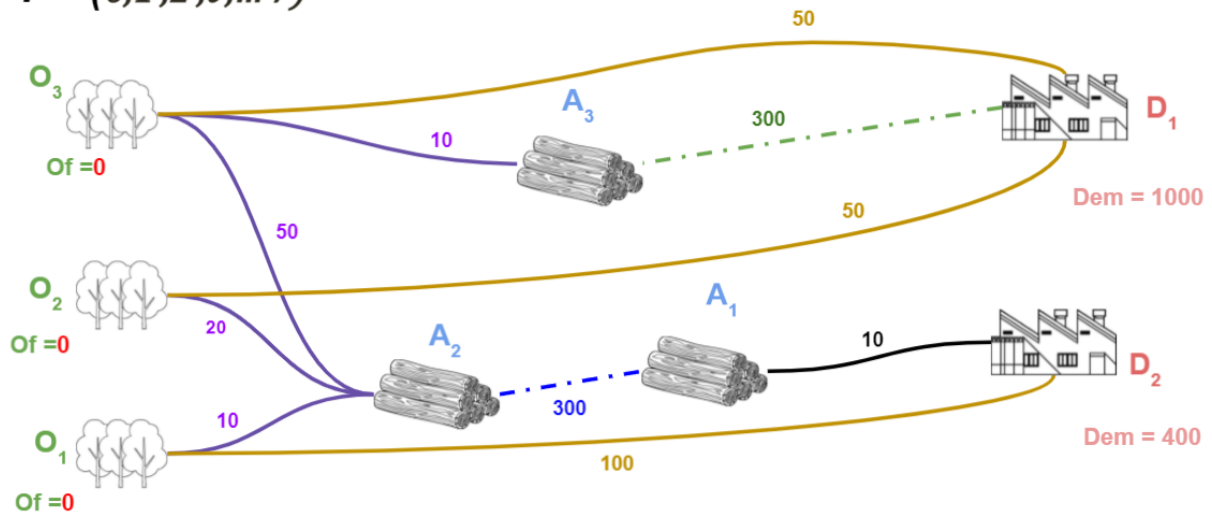


Figura 10.3 - Diagrama de flujo caso de prueba 3. Fuente: Elaboración Propia. Fuente: Elaboración Propia.

CASO DE PRUEBA 4 - Demanda igual a oferta

Objetivo: Analizar si el modelo logra o no cumplir con la demanda. Caso de borde

Tabla 10.4 - Resumen resultado Caso de prueba 4

Caso de prueba	4 - Demanda igual a oferta
Costo	59.800
x	420
u	405
v	7
w	5
z	175
Solución S/N	S
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia

Análisis: La solución es la esperada. No solo el modelo encuentra una solución sino que es la misma que en el *Caso de prueba 1*.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots, 7)$$

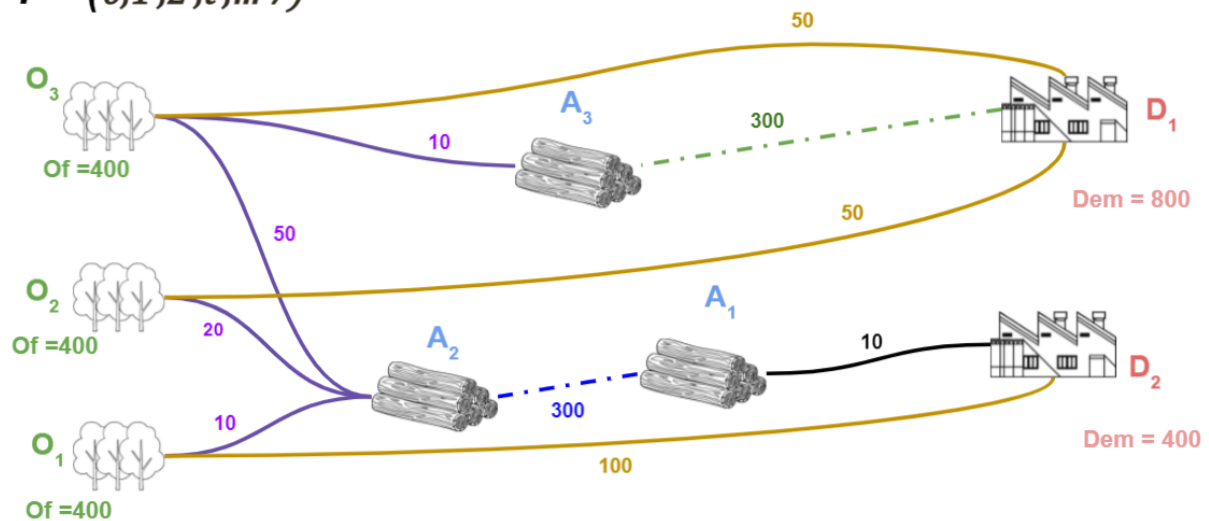


Figura 10.4 - Diagrama de flujo caso de prueba 4. Fuente: Elaboración Propia.

CASO DE PRUEBA 5 - Limitación de camiones

Objetivo: Analizar si el modelo logra o no cumplir con la demanda para la situación donde no hay suficientes camiones para concretar la demanda mínima.

Tabla 10.5 - Resumen resultado Caso de prueba 5

Caso de prueba	5 - Limitación de camiones
Costo	0
x	0
u	0
v	0
w	0
z	0
Solución S/N	N
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia

Análisis: Es correcto que no se logre una solución dado que no es posible abastecer ni los acopios ni los destinos por completo según la demanda mínima diaria establecida.

CASO DE PRUEBA 6 - Disminución del costo del camión.

Objetivo: Analizar si el costo mínimo encontrado disminuye respecto a la solución del Caso de prueba 1.

Tabla 10.6 - Resumen resultado Caso de prueba 6.

Caso de prueba	6 - Disminución del costo del camión
Costo	31.700
x	420
u	780
v	7
w	5
z	175
Solución S/N	S
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis: La combinación realizada es la misma que en el caso de prueba 1, ya que la utilización del tren es más económica que su equivalencia en transporte carretero. Efectivamente el valor de la función objetivo es mejor que en el caso 1.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots, 7)$$

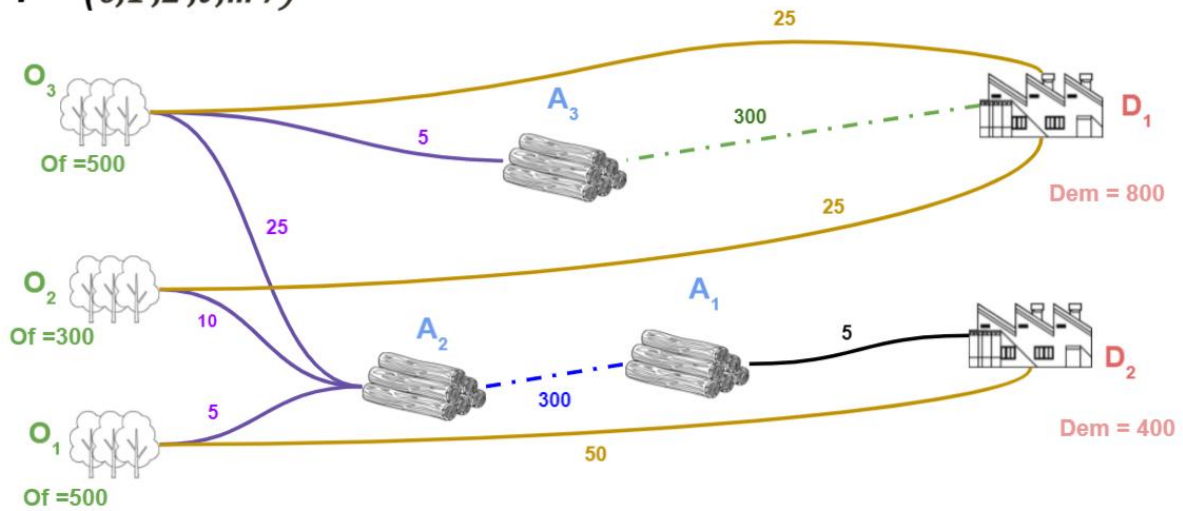


Figura 10.5 - Diagrama de flujo caso de prueba 6. Fuente: Elaboración Propia.

CASO DE PRUEBA 7 - No hay trenes disponibles.

Objetivo: Analiza si el modelo encuentra o no una solución, debiendo hacer todos los viajes en camión.

Tabla 10.7 - Resumen resultado Caso de prueba 7

Caso de prueba	7 - No hay trenes disponibles
Costo	80.000
x	0
u	1.200
v	0
w	0
z	0
Solución S/N	N
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia

Análisis: El modelo logra encontrar una solución utilizando únicamente los camiones disponibles a un valor de función objetivo mayor que en el *caso de prueba 1*.

CASO DE PRUEBA 8 - No hay camiones disponibles

Objetivo: Analizar cómo se comporta el modelo cuando no hay camiones disponibles, los cuales son necesarios para llevar trozas desde el origen al acopio y desde origen a destino. Caso de desbordamiento.

Tabla 10.8 - Resumen resultado Caso de prueba 8

Caso de prueba	8 - No hay camiones disponibles
Costo	0
x	0
u	0
v	0
w	0
z	0
Solución S/N	N
Sol.Esperad S/N	S

Fuente: Elaboración Propia

Análisis: El resultado concuerda con el resultado esperado dado que no es posible mover las cargas únicamente con trenes.

Pruebas de estrés.

En una primera instancia, se probó el *caso de prueba 1* variando los períodos de 7 a 14 y luego a 30. Para todos los casos el tiempo de solución fue despreciable y entendiendo

que no se generó un estrés considerable se continuó modificando otras variables y analizando su comportamiento para los períodos ya mencionados.

Para los siguientes casos de prueba, se incrementa a 73 el número de orígenes, variando los períodos en 7, 14 y 30 días, con el correspondiente aumento lineal de las demandas y ofertas. Para dicho caso, vemos que la resolución óptima del escenario se sigue dando en un tiempo despreciable. Por lo que procedemos a aumentar el número de acopios utilizados de 2 a 5 como se ve en el siguiente esquema.

$$T = (0, 1, 2, t, \dots, T)$$

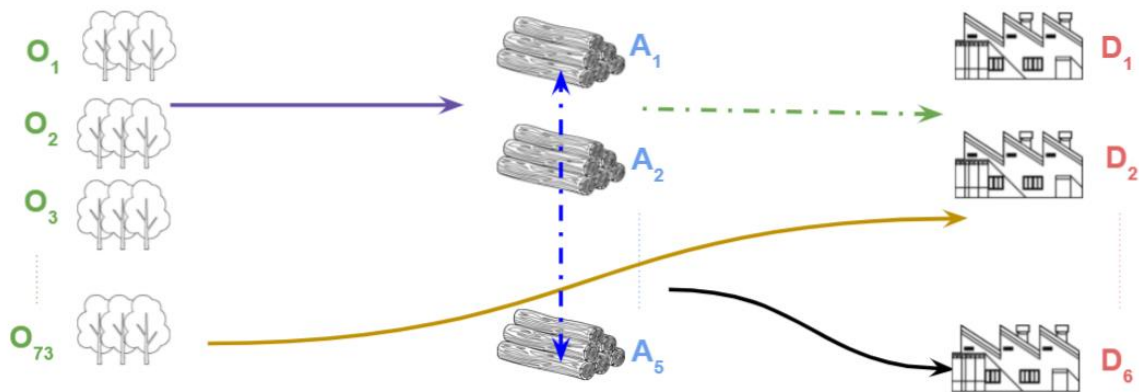


Figura 10.6 - Diagrama de flujo caso prueba de estrés. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se analizan los casos estudiados y se comparan con la primera prueba de estrés realizada.

CASO DE PRUEBA Estrés 1 - Múltiples orígenes, destinos y acopios para $T=7$.

Objetivo: Exigir y analizar el comportamiento del solver ante situaciones de alto estrés computacional. Ejercicio con 7 períodos.

Tabla 10.9 - Resumen resultado Caso de prueba Estrés 1.

	Acopios	Costo	x	u	v	w	z	Tiempo proceso (s)	Memoria (Mb)
CASO DE PRUEBA Estrés 1 - Múltiples Orígenes, destinos y acopios para $T=7$.	2	367.424.496	0	19.000	0	0	0	0,1	6,9
	5	334.354.705	0	19.000	5	0	0	0,5	9,5

Fuente: Elaboración Propia.

Comparación: Tal como se esperaba, al darle mayor posibilidad de vías de transporte, el costo mínimo se redujo en un 9%, correspondiente al uso de 5 trenes, mientras que el valor de camiones circulados se mantiene al considerar el transporte a los acopios, y que el destino tiene la posibilidad de descargar trenes.

CASO DE PRUEBA Estrés 2 - Múltiples orígenes, destinos y acopios para $T=14$.

Objetivo: Exigir y analizar el comportamiento del solver ante situaciones de alto estrés computacional. Ejercicio con 14 períodos.

Tabla 9.10 - Resumen resultado Caso de prueba Estrés 2.

	Acopios	Costo	x	u	v	w	z	Tiempo proceso (s)	Memoria (Mb)
CASO DE PRUEBA Estrés 2 - Múltiples Orígenes, destinos y acopios para T=14.	2	734.855.995	0	38.000	0	0	0	0,1	13,3
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	120	157.1
	5	676.778.513	0	38.000	11	0	0	600	396.7

Fuente: Elaboración Propia

Comparación: Dentro de los casos de prueba a distintos tiempos de resolución se mantiene la solución y la organización de viajes. En cuanto a comparar con el modelo de menor cantidad de acopios, se vé una disminución en el costo total de un 7,9% correspondiente a la disponibilidad de transporte adicional. Nuevamente se mantiene el número de camiones utilizados por la necesidad de transportar las trozas a los acopios.

CASO DE PRUEBA Estrés 3 - Múltiples orígenes, destinos y acopios para T=30.

Objetivo: Exigir y analizar el comportamiento del solver ante situaciones de alto estrés computacional. Ejercicio con 30 períodos.

Tabla 10.11 - Resumen resultado Caso de prueba Estrés 3.

	Acopios	Costo	x	u	v	w	z	Tiempo proceso (s)	Memoria (Mb)
CASO DE PRUEBA Estrés 3 - Múltiples Orígenes, destinos y acopios para T=30.	2	1.450.484.474	0	76.000	0	0	0	0,1	27,9
	5	1.441.022.770	0	76.000	112	0	0	120	333
	5	1.441.022.771	0	76.000	112	0	0	600	1062
	5	1.441.022.772	0	76.000	112	0	0	1800	2409

Fuente: Elaboración Propia.

Comparación: Como en el caso anterior, se mantiene la misma solución óptima al variar el tiempo de resolución. Y comparando nuevamente con el caso de los 2 acopios, se obtiene una disminución en los costos de aproximadamente un 0.5 %.

Conclusión

A partir de las situaciones analizadas, se ve que el modelo responde según lo esperado, lo cual se da en situaciones sencillas y variantes de ellas. Lo mismo ocurre con la sobrecarga de variables y datos donde en un corto tiempo obtiene una solución, la cual a pesar del paso del tiempo no logra mejorar.

10.2. Anexo II - Matrices de datos

La siguiente Sección se utiliza para presentar todos los datos utilizados para generar cada escenario para los análisis desarrollados.

A lo largo de todo el trabajo se utilizaron diferentes parámetros y factores para poder llevar la información relevada a unidades comunes. Estos valores se presentan en la Tabla AII - 1.

Tabla AII-1 Parámetros y factores utilizados.

Parámetro	Valor
Factor de conversión de apilamiento.	0,64
Relación ton/m3 apilada FAO.	0,75
Toneladas por camión bitren.	32
Toneladas por camión tritren.	48
Costo de carga/descarga por camión en USD.	59,73
Costo de transporte en tren en USD por ton.km.	0,05
Toneladas por tren básico.	832
Toneladas por tren ampliado.	1056

Fuente: Elaboración Propia

En el caso de los costos de transporte por camión, los mismos se segmentan según la distancia total, resultando en la Tabla AII-2 obtenida del portal de la Intergremial de transporte profesional de carga terrestre del Uruguay.

Tabla AII-2 Costos de transporte en camión por kilómetro.

Precio x Km	USD
hasta 50	12,59
50 a 100	7,19
101 a 150	4,98
151 a 250	4,14
251 a 350	3,38
351 a 450	3,01
más de 450	2,74

Fuente: Intergremial de transporte profesional de carga terrestre del Uruguay.

A modo de ejemplo se presenta una de las matrices de distancias utilizadas. Similares a la Tabla AII - 3 se generan las matrices O-D, O-A, A-A, A-D por tren, A-D por carretera. Las mismas luego se multiplicaron por los costos correspondientes, obteniendo las mismas matrices pero con valores de costos por tramo.

La Tabla AII- 3 corresponde a la matriz de distancia entre los acopios y los destinos.

Tabla AII-3 Distancia A-D

Nro Acopio	D1	D2	D3	D4	D5	D6
A1	205	-	250	251	251	145
A2	255	213	186	78	463	358
A3	134	184	279	352	339	217
A4	462	251	501	502	-	119
A5	382	266	313	125	523	411

Fuente: Elaboración Propia