



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Modelo para la planificación eficiente del transporte forestal:

Un análisis del transporte bimodal de trozas

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)

Índice

1. Introducción.....	11
2. Marco teórico	13
2.1. Planificación del transporte	13
2.2. Transporte multimodal.....	14
2.3. Transporte de trozas	16
3. Definición del Problema.....	21
3.1. Objetivo del proyecto.....	21
3.2. Descripción del caso.	21
3.3. Modelado	27
4. Modelo Matemático	29
4.1. Objetivo.....	29
4.2. Formulación	29
4.3. Validación del modelo	33
5. Relevamiento y generación de datos.....	39
5.1. Fuentes de información.....	39
5.2. Selección de nodos.....	39
6. Experimentación numérica	45
6.1. Análisis de escenarios.....	45
7. Conclusiones.....	63
Referencias	65
8. Anexos	69
8.1. Anexo I- Validación del modelo.....	69
8.2. Anexo II - Matrices de datos	79
8.3. Anexo III - Estado del arte.....	81

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 también 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.

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 de la forestación 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.

Índice Tablas

•	Tabla 3.1 - Clasificación y dimensión de la red vial uruguaya.	25
•	Tabla 3.2 - Dimensión de red ferroviaria según tramo y capacidad de carga.	26
•	Tabla 3.3 - Resultados de encuesta realizada a transportista sobre impacto en actividades.	28
•	Tabla 4.1 - Resumen resultado Caso de prueba 1.	36
•	Tabla 4.2 - Resumen resultado Caso de prueba 2.	37
•	Tabla 4.3 - Resumen resultado Caso de prueba 5.	38
•	Tabla 4.4 - Valores relevantes en casos de pruebas.	39
•	Tabla 4.5 - Resumen resultado Caso de prueba estrés 2.	39
•	Tabla 4.6 - Valores relevantes en casos de pruebas de estrés.	40
•	Tabla 5.1 - Consumo de madera anual en aserraderos por localidad.	42
•	Tabla 5.2 - Destinos seleccionados con su consumo estimado de madera (m ³) y diario (camiones).	43
•	Tabla 5.3 - Selección de centros de acopios.	44
•	Tabla 6.1- Resumen de resultados del problema caso de estudio 1 con el conjunto de orígenes 1.	50
•	Tabla 6.2 Resumen de resultados del problema caso de estudio 2 con el conjunto de orígenes 1.	51
•	Tabla 6.3 Resumen de resultados del problema caso de estudio 3 A.	53
•	Tabla 6.4 Resumen de resultados del problema caso de estudio 3 B.	54
•	Tabla 6.5 - Resumen de resultados para el caso de estudio 4.	56
•	Tabla 6.6 - Resumen de variación de costos para el caso de estudio 4.	57
•	Tabla 6.7 - Resumen de resultados para el caso de estudio 5 - escenario 30%.	58
•	Tabla 6.8 - Resumen de resultados para el caso de estudio 5 - escenario 60%.	59
•	Tabla 6.9 - Resumen de resultados para el caso de estudio 6.1.3-A con T=10.	60
•	Tabla 6.10 - Resumen de resultados para el caso de estudio 6 con demanda extrema en D4.	61
•	Tabla 6.11 - Resumen de resultados para el caso de estudio sin trenes.	62

- Tabla 6.12 - Resumen de resultados para la variación costos USD/ton.km en la operación transporte en tren. 62
- Tabla 6.13 -Resumen de resultados para la variación costos USD/ton.km y ampliación capacidad del tren 63
- Tabla 6.14 -Resumen de resultados para la variación costos USD/ton cargada. 63

Índice de Figuras

•	Figura 2.1 - % del PBI asociado al comercio internacional	17
•	Figura 2.2 - Operación del comercio internacional utilizando múltiples medios de transporte.	17
•	Figura 2.3 - Sistema simple de gravedad.	19
•	Figura 2.4 - Movimiento de trozas mediante cables propulsados.	19
•	Figura 2.5 - Carga ferroviaria en Uruguay.	20
•	Figura 2.6 - Camión Tritren.	20
•	Figura 2.7 - Transporte de madera por flotación.	21
•	Figura 3.1 - Evolución de superficie plantada.	24
•	Figura 3.2 - Extracción de madera por destino final.	24
•	Figura 3.3 - Red vial territorio uruguayo.	25
•	Figura 3.4 - Red ferroviaria de Uruguay.	26
•	Figura 4.1 - Representación gráfica del problema.	33
•	Figura 4.2 - Diagrama de flujo caso de prueba 1.	37
•	Figura 4.3 - Diagrama de flujo caso de prueba 2.	38
•	Figura 5.1 - Localización de aserraderos y plantas de celulosa.	42
•	Figura 5.2 - Geolocalización de los orígenes, destinos y centros de acopio.	44
•	Figura 6.1 - Ubicación de centros de acopio y destinos.	49
•	Figura 6.2 - Ubicación de centros de acopio añadidos sobre la base ferroviaria uruguaya.	51
•	Figura 6.3 - Ubicación de centros de acopio y destinos para el caso 6.3.	53
•	Figura 6.4 - Puntos representativos por zona.	55
•	Figura 6.5 - Porcentaje promedio de ahorro por el uso de tritrenes o “Longer and Heavier Vehicle”	58
•	Figura 6.6 Fila de camiones a la espera de cargar el buque Mineral Gent.	60

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).
- ANIU: Academia Nacional de Ingeniería Uruguay
- Bioma: Región geográfica delimitada por la existencia de determinada flora, fauna y condiciones climáticas
- 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
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- GLPK: GNU Linear Programming Kit
- 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).
- Set: Llamamos set a los distintos conjuntos de orígenes seleccionados.
- Troza: Tronco aserrado
- VRP: Problema de Enrutamiento de vehículos.