

SII, Simposio Argentino de Informática Industrial

## Un modelo MILP para el transporte óptimo de troncos en una industria forestal

Maximiliano Bordón<sup>1</sup>, Jorge Marcelo Montagna<sup>1</sup>, Gabriela Corsano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Desarrollo y Diseño, CONICET-UTN, Avellaneda 3657, S3002GJC Santa Fe, Argentina  
{mbordon, mmontagna, gcorsano}@santafe-conicet.gov.ar

**Resumen.** En el presente trabajo se desarrolla un modelo de programación matemática mixto-entero lineal para el problema de asignación de cargas (origen-destino) y ruteo diario de camiones en la industria forestal. El modelo determina simultáneamente cuáles frentes de cosecha abastecerán a las distintas plantas consumidoras de troncos, la asignación de camiones a los viajes así generados y el ruteo de los mismos, diferenciándose en este sentido de la mayoría de los modelos que se encuentran en la literatura para la industria forestal. Además, cada camión parte y regresa a un punto fijo conocido (pernocte), por lo que representa también una decisión del modelo en qué frente de cosecha cada camión inicia su recorrido. La capacidad del enfoque propuesto es evaluada mediante un caso de estudio y los resultados obtenidos son analizados.

### 1 Introducción

El problema de ruteo de camiones ha sido ampliamente estudiado a lo largo del tiempo. El transporte de troncos en la industria forestal representa un gran impacto en los costos (en algunos casos del 40%), por lo que implementar mejoras en la planificación diaria representaría un ahorro significativo para las empresas del sector.

Las empresas forestales deben tomar a diario decisiones relacionadas con la distribución de los productos desde su punto de origen hacia las plantas que los demandan. Este tipo de distribución implica el movimiento de cargas completas de camiones, por lo que los viajes a realizar son del tipo directo (no existe recolección de materias primas en múltiples puntos de origen de los productos). De esta manera, un viaje directo se compone de un viaje de ida con carga a un único punto de destino (planta) y su correspondiente retorno vacío, ya sea a un nuevo punto de origen (frente de cosecha, de aquí en más) para realizar una nueva carga o bien uno de retorno hacia el lugar desde el que se inició el recorrido (punto de pernocte). Los transportistas no deben exceder su jornada laboral, por lo tanto la cantidad de viajes con carga que pueden realizar está restringida.

Estos problemas pueden formularse y resolverse mediante modelación matemática, siendo del tipo NP-completo. Dada su complejidad en encontrar soluciones en tiempos razonables de resolución, se han propuesto distintos enfoques en la literatura

basados en algoritmos de descomposición y heurísticos (búsquedas tabú, generación de columnas, algoritmos genéticos, entre otros). Braekers y col. [1] realizan una revisión exhaustiva de los trabajos publicados en el área de ruteo en los últimos cinco años, mientras que Audy y Rönnqvist [2] y Rönnqvist [3] detallan los métodos de planificación y sistemas de soporte a las decisiones para el ruteo de vehículos en el área forestal y los modelos de optimización aplicados, respectivamente. El Hachemi y col. [4] proponen un enfoque de resolución jerárquico, en el que en una primera instancia resuelven un problema de programación mixta entera lineal (MILP) para definir las cargas completas a enviar a cada industria desde los bosques, y en una segunda instancia realizan el ruteo y scheduling de camiones a través de dos enfoques: una búsqueda local basada en restricciones y un enfoque híbrido entre programación con restricciones y búsqueda local basada en restricciones. En [5] también se plantea un enfoque de resolución jerárquico, donde en una primera etapa generan los destinos de las cargas con un modelo de programación lineal (LP). Luego establecen nodos de transporte (nodos que definen el origen y destino de los camiones con carga completa) basados en ese resultado y, en una segunda etapa utilizan una búsqueda tabú para realizar el ruteo de dichos nodos de transporte. Gronalt y Hirsch [6] aplican una búsqueda tabú unificada para realizar el scheduling de viajes (previamente definidos) en camiones a los que se asignan. En [7], Palmgren y col. presentan un modelo basado en una pseudo-generación de columnas, el cual es resuelto aplicando un procedimiento de Branch&Price, en donde cada columna representa una ruta factible de un camión. De manera similar, en [8] se modela el problema a través de un MILP el cual se resuelve utilizando generación de columnas para generar dinámicamente nuevas rutas. Audy y col. [9] plantean un problema semanal que resuelven por descomposición: en una primera instancia generan un set de rutas factibles vía “constraint programming” (CP), luego resuelven la asignación de camiones a las rutas con un MILP, y finalmente realizan el scheduling utilizando CP. En [10] los autores plantean la resolución del problema semanal en dos fases, en una primera instancia generan los viajes a realizar vía MILP y, posteriormente, realizan el ruteo y scheduling de camiones con la misma metodología (MILP). Bredström y Rönnqvist [11] plantean un MILP para resolver un problema de ruteo y scheduling de camiones con ventanas de tiempo y sincronización en los clientes a visitar por los equipos de cosecha, y proponen una heurística para resolver problemas de tamaño real. En [12] los autores presentan una serie de implementaciones alternativas basadas en el concepto de búsqueda por vecindad y analizan la performance de esas variantes en el problema del transporte de madera. Amrouss y col. [13] actualizan el modelo presentado en [10] considerando la aparición de imprevistos y el consecuente re-scheduling. En conclusión, los trabajos presentes en la literatura recurren a algoritmos de descomposición en algunos casos y heurísticos en otros para resolver eficientemente el problema del transporte de troncos de la industria forestal. En algunos enfoques, las cargas en los distintos frentes de cosechas ya están asignadas y lo que se resuelve es el scheduling. Pero, no se han encontrado en la literatura, enfoques para resolver de manera exacta e integrada el problema de transporte de troncos de la industria forestal.

En este trabajo se aborda el problema del ruteo de camiones mediante la formulación de un modelo MILP, el cual se resuelve de manera exacta, sin recurrir a algoritmos de descomposición ni heurísticos. A diferencia de los modelos encontrados

en la literatura, el enfoque de resolución utilizado incorpora las decisiones de asignación de cargas (flujo entre orígenes y destinos) a las decisiones típicas del ruteo de camiones, sin considerar el scheduling de tales camiones, ni en los orígenes ni en los destinos. Básicamente, se desea determinar el número de camiones necesarios para satisfacer la demanda de troncos de las plantas involucradas, y el recorrido que hará cada camión, con el objetivo de minimizar los costos totales de transporte. Cada camión parte desde un punto conocido (pernocte) y regresa a dicho punto. Los troncos son recogidos de distintos frentes de cosecha y llevados a las plantas de acuerdo al tipo de materia prima que éstas demanden. La formulación propuesta es ejemplificada a través de un caso de estudio, mientras que la performance del modelo es evaluada a través de distintos escenarios de diferentes tamaños, en donde puede observarse que la solución óptima se obtiene en un tiempo razonable de cálculo. En particular, el escenario 6 analizado representa una configuración típica de una empresa argentina.

## 2 Descripción del problema

El problema considerado en este trabajo involucra distintas plantas  $i$  que elaboran productos a partir de diferentes tipos de materia prima (troncos). Cada planta tiene una demanda conocida de materia prima  $m$ ,  $Demanda_{i,m}$ , aunque no todas requieren de las mismas materias primas  $m$ . Estas materias primas provienen de distintos frentes de cosecha  $f$ , los cuales tienen una capacidad máxima disponible de cada materia prima ( $Oferta_{f,m}$ ). Se cuenta con un conjunto de camiones idénticos disponibles  $c$  que transportan troncos de la misma longitud (no se permite el transporte simultáneo de distintos tipos de materia prima). Todos los camiones  $c$  pueden transportar cualquier tipo de materia prima y tienen un número limitado de viajes  $N_v$  a realizar en el día, producto de estar limitada su jornada laboral a diez horas.

Cada camión  $c$  se aloja en un único nodo de pernocte  $p$ , desde el que parte y al que regresa luego de completar todos los viajes. El número de nodos de pernoctes  $N_p$  es conocido, como así también el conjunto de camiones que están establecidos en cada uno de estos nodos.

El recorrido a realizar por cada camión comprende una sucesión de viajes, en donde cada viaje  $v$  se compone de: un viaje con carga desde un frente de cosecha  $f$  a una planta  $i$ , y de un viaje vacío que parte desde la planta  $i$  y que puede ser de retorno hacia un frente de cosecha  $f'$  (igual o distinto al frente de cosecha desde el cual empezó el viaje  $v$ ) para la realización de un nuevo viaje con carga, o bien de regreso al nodo de pernocte  $p$  desde el cual inició el recorrido. El recorrido de todo camión  $c$  contiene además un viaje (vacío) de salida desde su nodo de pernocte  $p$  hacia el primer frente de cosecha  $f$  a visitar y un viaje (vacío) de regreso desde la última planta  $i$  visitada hacia su correspondiente nodo de pernocte  $p$ .

Dada la información de velocidades medias de camiones con y sin carga, las distancias entre los distintos nodos de pernocte  $p$  y los frentes de cosecha  $f$ , las distancias entre los frentes de cosecha  $f$  y las plantas  $i$ , las distancias entre las plantas  $i$  y los nodos de pernocte  $p$ , la oferta de materia prima  $m$  del frente de cosecha  $f$ , la demanda de materia prima  $m$  de cada planta  $i$ , los costos por kilómetro recorrido con y sin carga, los costos fijos por utilización de cada camión, el tiempo máximo

permitido de utilización de cada camión  $c$  y la cantidad de camiones disponibles, se desea determinar:

- (i) El trayecto realizado en cada viaje  $v$ , es decir, qué frente de cosecha  $f$  abastece a qué planta  $i$  con determinada materia prima  $m$ .
- (ii) La asignación de los viajes  $v$  a los camiones  $c$ .
- (iii) La secuencia de realización de los viajes  $v$  en cada camión  $c$  al que fueron asignados.

Con el objetivo de minimizar los costos totales, compuestos por los costos fijos de utilización de camiones y los costos de viajes con y sin carga, tal que se satisfaga el requerimiento de las plantas y que se respeten los tiempos máximos de todos los camiones a utilizar.

### 3 Modelo matemático propuesto

El modelo propuesto permite determinar conjuntamente cuáles son las cargas completas que deben generarse para satisfacer la demanda de distintas plantas, a qué camiones asignarlas y en qué orden deben de ser ejecutadas en cada camión. Los tiempos de carga y descarga de troncos se incluyen en los tiempos de viaje con carga por ser considerados constantes e independientes de los camiones que se utilizan. No se consideran restricciones de sincronización en los frentes de cosecha ni en las plantas.

Las cargas completas de determinada materia prima  $m$  que se envían desde los frentes de cosecha  $f$  no deben superar la disponibilidad de tal materia prima en dichos frentes de cosecha (ec. 01):

$$\sum_c \sum_v \sum_{i \in I_m} VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} \leq Oferta_{f,m} \quad \forall f, \forall m \quad (01)$$

En donde  $VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA}$  es la variable binaria que representa la realización por parte del camión  $c$  del viaje  $v$  con carga que une el frente de cosecha  $f$  con la planta  $i$ ,  $I_m$  es el conjunto que relaciona las plantas con las materias primas que pueden recibir, y  $Oferta_{f,m}$  es el parámetro que representa la cantidad de materia prima  $m$  disponible en el frente de cosecha  $f$ , medida en número de cargas completas.

Las cargas completas de determinada materia prima  $m$  que se envían a la planta  $i$  deben ser al menos la cantidad de cargas que la planta requiere (ec. 02):

$$\sum_c \sum_v \sum_f VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} \geq Demanda_{i,m} \quad \forall m, \forall i \in I_m \quad (02)$$

Aquí,  $Demanda_{i,m}$  es el parámetro que representa el número de cargas de materia prima  $m$  requerida por la planta  $i$ .

En las ecuaciones (ec. 03) y (ec. 04) se establece que cada viaje es realizado a lo sumo una vez por cada camión:

$$\sum_f \sum_i VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} \leq ASIG_c \quad \forall c, \forall v \quad (03)$$

$$\sum_f \sum_i VIAJE_{c,v,f,i}^{VUELTA} \leq ASIG_c \quad \forall c, \forall v \quad (04)$$

En donde  $VIAJE_{c,v,f,i}^{VUELTA}$  representa el viaje vacío entre dos viajes sucesivos a realizar por el camión  $c$ , y  $ASIG_c$  es la variable binaria que define la utilización o no del camión  $c$ .

La restricción (ec. 05) establece que si el camión  $c$  tiene asignado su primer viaje desde un frente de cosecha  $f$  a una planta  $i$ , entonces necesariamente debe partir desde el nodo de pernocte  $p$  en el que se encuentra hacia dicho frente de cosecha  $f$ :

$$\sum_i VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} = \sum_{p \in C_p} VIAJE_{c,v,p,f}^{SALIDA} \quad \forall c, \forall f, \quad v = 1 \quad (05)$$

En donde  $VIAJE_{c,v,p,f}^{SALIDA}$  es la variable binaria que representa el trayecto inicial del camión  $c$  (válida únicamente para el primer viaje a realizar) que comienza en el nodo de pernocte  $p$  para arribar al primer frente de cosecha  $f$  y  $C_p$  es el conjunto que relaciona al camión  $c$  con su nodo de pernocte  $p$ , es decir, cada camión  $c$  pertenece a un único nodo de pernocte  $p$ . Dado que los viajes  $v$  se realizan en orden creciente, la variable  $VIAJE_{c,v,p,f}^{SALIDA}$  sólo tomará valor 1 cuando  $c$  sea utilizado y el orden de  $v$  sea 1.

Si el camión  $c$  se utiliza, entonces necesariamente debe realizar un viaje vacío de ida desde el nodo de pernocte hacia un frente de cosecha  $f$  (ec. 06) para realizar el primer viaje, como así también ha de realizar un viaje vacío de retorno desde la última planta  $i$  visitada al nodo de pernocte  $p$  desde el que comenzó el circuito (ec. 07):

$$\sum_{p \in C_p} \sum_f VIAJE_{c,v,p,f}^{SALIDA} = ASIG_c \quad \forall c, \quad v = 1 \quad (06)$$

$$\sum_{p \in C_p} \sum_v \sum_i VIAJE_{c,v,p,i}^{REGRESO} = ASIG_c \quad \forall c \quad (07)$$

En donde  $VIAJE_{c,v,p,i}^{REGRESO}$  es la variable binaria que representa la realización del viaje de retorno al nodo de pernocte  $p$  desde el que partió el camión  $c$  luego de visitar la última planta  $i$ .

La restricción (ec. 08) establece que si el camión  $c$  no realiza el viaje con carga  $v$ , tampoco realiza el viaje de vuelta vacío para comenzar un nuevo viaje con carga:

$$\sum_f VIAJE_{c,v,f,i}^{VUELTA} \leq \sum_f VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} \quad \forall c, \forall v, \forall i \quad (08)$$

La restricción (ec. 09) obliga a que se realice un viaje con carga desde un frente de cosecha  $f$  hacia una planta  $i'$  sólo si existe un viaje vacío que llega al frente de cosecha  $f$  proveniente de alguna industria  $i$ :

$$\sum_i VIAJE_{c,v-1,f,i}^{VUELTA} = \sum_i VIAJE_{c,v,f,i'}^{IDA} \quad \forall c, \forall v > 1, \forall f \quad (09)$$

Si no se utiliza un camión  $c$ , entonces éste no debe realizar ningún viaje (ni de ida ni de vuelta) a una planta  $i$  (ec. 10 y 11). Además, si alguno de estos viajes se realiza con el camión  $c$ , éste ha de utilizarse. De la misma manera, si el camión  $c$  se asigna, luego algún viaje con carga desde algún frente de cosecha  $f$  a alguna planta  $i$  debe realizarse (ec. 12):

$$VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} \leq ASIG_c \quad \forall c, \forall v, \forall f, \forall i \quad (10)$$

$$VIAJE_{c,v,f,i}^{VUELTA} \leq ASIG_c \quad \forall c, \forall v, \forall f, \forall i \quad (11)$$

$$ASIG_c \leq \sum_v \sum_f \sum_{i \in I_m} \sum_m VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} \quad \forall c \quad (12)$$

La restricción (ec. 13) ordena los viajes con carga para cada camión en forma creciente, es decir, si  $v$  no se realiza, tampoco se realiza  $v+1$ . Se agregaron restricciones de este tipo para la utilización de camiones del mismo nodo de pernocte, que por limitaciones de espacio se omiten en el trabajo.

$$VIAJE_{c,v+1,f,i}^{IDA} \leq \sum_{f'} \sum_{i'} VIAJE_{c,v,f',i'}^{IDA} \quad \forall c, \forall v, \forall f, \forall i \quad (13)$$

En (ec. 14) se establece que luego de un viaje con carga  $v$  cada camión puede o bien volver al nodo de pernocte  $p$  o bien dirigirse hacia un nuevo frente de cosecha  $f$  para iniciar un nuevo viaje:

$$\sum_f VIAJE_{c,v,f,i}^{VUELTA} + \sum_{p \in C_p} VIAJE_{c,v,p,i}^{REGRESO} = \sum_f VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} \quad \forall c, \forall v, \forall i \quad (14)$$

Las restricciones (ec. 15) y (ec.16) establecen el tiempo total de utilización de cada camión  $c$  y el límite máximo de tiempo en ruta de dicho camión, respectivamente:

$$\begin{aligned} TIEMPO_c = & \sum_p \sum_f VIAJE_{c,v=1,p,f}^{SALIDA} * DPFC_{p,f} / Vvacio + \\ & \sum_v \sum_f \sum_i VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} * DFCIND_{f,i} / Vcarga + \\ & \sum_v \sum_f \sum_i VIAJE_{c,v,f,i}^{VUELTA} * DFCIND_{f,i} / Vvacio + \\ & \sum_p \sum_v \sum_i VIAJE_{c,v,p,i}^{REGRESO} * DPIND_{p,i} / Vvacio \quad \forall c \end{aligned} \quad (15)$$

$$TIEMPO_c \leq DURACION \quad \forall c \quad (16)$$

En donde  $TIEMPO_c$  es la variable continua que representa el tiempo de utilización del camión  $c$ ,  $DPFC_{p,f}$  es la distancia (en kilómetros) entre el nodo de pernocte  $p$  y el frente de cosecha  $f$ ,  $DFCIND_{f,i}$  es la distancia (en kilómetros) entre el frente de cosecha  $f$  y la planta  $i$ ,  $DPIND_{p,i}$  es la distancia (en kilómetros) entre el nodo de

pernocte  $p$  y la planta  $i$ ,  $Vvacio$  es la velocidad media de viaje vacío (en kilómetros por hora) de cada camión,  $Vcarga$  es la velocidad media de viaje con carga (en kilómetros por hora) de cada camión, y  $DURACION$  es el máximo tiempo en ruta permitido para cada camión (en horas).

El objetivo que se persigue con esta formulación es minimizar el costo total de operación, compuesto por el costo de todos los viajes con y sin carga más el costo fijo por utilizar camiones:

$$\begin{aligned} \min FO = & \\ & Cvacio * \sum_c (DIST\_SALIDA_c + DIST\_VACIO_c + DIST\_REGRESO_c) + \\ & Ccarga * \sum_c DIST\_CARGA_c + \\ & Cfijo * \sum_c ASIG_c \end{aligned}$$

En donde  $Cvacio$  es el costo por kilómetro recorrido sin carga,  $Ccarga$  es el costo por kilómetro recorrido con carga y  $Cfijo$  es el costo fijo por utilización del camión.  $DIST\_SALIDA_c$  representa la distancia recorrida por el camión  $c$  para ir desde su nodo de pernocte  $p$  hasta el primer frente de cosecha  $f$ ,  $DIST\_CARGA_c$  es la distancia recorrida por el camión  $c$  para transportar la carga entre un frente de cosecha  $f$  y una industria  $i$ ,  $DIST\_VACIO_c$  es la distancia recorrida por el camión  $c$  desde una industria  $i$  y el siguiente frente de cosecha  $f$  a visitar, y  $DIST\_REGRESO_c$  representa la distancia recorrida por el camión  $c$  para retornar a su nodo de pernocte  $p$  luego de visitar la última industria  $i$ . En (ec. 17) a (ec. 20) se calculan las distancias de todos los viajes realizados (con y sin carga) para cada camión  $c$ :

$$DIST\_CARGA_c = \sum_v \sum_f \sum_i VIAJE_{c,v,f,i}^{IDA} * DFCIND_{f,i} \quad \forall c \quad (17)$$

$$DIST\_VACIO_c = \sum_v \sum_f \sum_i VIAJE_{c,v,f,i}^{VUELTA} * DFCIND_{f,i} \quad \forall c \quad (18)$$

$$DIST\_SALIDA_c = \sum_{p \in C_p} \sum_f VIAJE_{c,v,p,f}^{SALIDA} * DPFC_{p,f}, \quad \forall c, \quad v = 1 \quad (19)$$

$$DIST\_REGRESO_c = \sum_{p \in C_p} \sum_v \sum_i VIAJE_{c,v,p,i}^{REGRESO} * DPIND_{p,i}, \quad \forall c \quad (20)$$

#### 4 Resultados obtenidos

El modelo propuesto fue implementado para una cadena de suministro forestal que consiste de 5 frentes de cosecha, 2 plantas (aserradero y papelera), y 3 nodos de

pernocte. Hay dos tipos de materias primas: aserrable ( $m1$ ) y pulpable ( $m2$ ). Se tienen 50 camiones y las demandas totales ascienden a 100 viajes (cargas completas a las dos fábricas). En la Tabla 1 se presentan las distancias entre las plantas y los frentes de cosecha, en la Tabla 2 las distancias entre los nodos de pernocte y las plantas, y en la Tabla 3 las distancias entre los nodos de pernocte y los frentes de cosecha. Todas las distancias se miden en kilómetros y representan el trayecto más corto entre cada par de nodos.

Las velocidades medias con y sin carga consideradas son 55 y 65 kilómetros por hora, respectivamente. Los costos por kilómetro recorrido con y sin carga son \$25 y \$15, respectivamente. El costo fijo por utilización de camión asciende a \$150. La cantidad máxima de viajes a realizar por cada camión es de 3, y el tiempo máximo disponible de cada camión es de 10 horas por día. En las Tablas 4 y 5 se presenta la cantidad ofertada de cada materia prima en cada frente de cosecha y la cantidad demandada de cada materia prima en cada industria, respectivamente.

**Tabla 1.** Distancias (en kilómetros) entre las plantas y los frentes de cosecha

<b>Planta / Frente de cosecha</b>	<b>f1</b>	<b>f2</b>	<b>f3</b>	<b>f4</b>	<b>f5</b>
<b>Aserradero (i1)</b>	82	182	72	172	156
<b>Pastera (i2)</b>	80	44	144	82	126

**Tabla 2.** Distancias (en kilómetros) entre las plantas y los nodos de pernocte

<b>Plantas / Pernocte</b>	<b>p1</b>	<b>p2</b>	<b>p3</b>
<b>Aserradero (i1)</b>	40	146	142
<b>Pastera (i2)</b>	162	64	100

**Tabla 3.** Distancias (en kilómetros) entre los frentes de cosecha y los nodos de pernocte

<b>Frente de cosecha / Pernocte</b>	<b>p1</b>	<b>p2</b>	<b>p3</b>
<b>f1</b>	82	85	82
<b>f2</b>	190	44	144
<b>f3</b>	108	102	170
<b>f4</b>	152	140	40
<b>f5</b>	184	64	200

**Tabla 4.** Cantidad ofertada de materia prima (en cargas completas) en frentes de cosecha

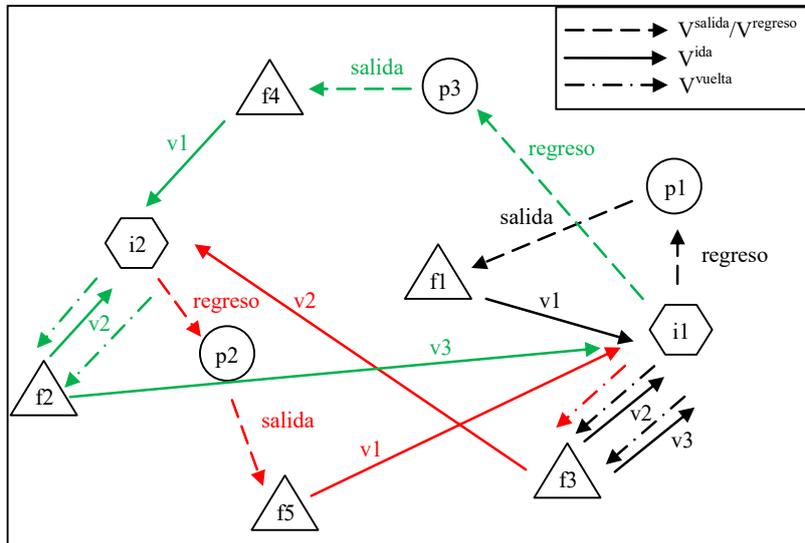
<b>Frente de cosecha / Materia prima</b>	<b>m1</b>	<b>m2</b>
<b>f1</b>	5	7
<b>f2</b>	15	8
<b>f3</b>	11	17
<b>f4</b>	9	13
<b>f5</b>	20	14

**Tabla 5.** Cantidad demandada de materia prima (en cargas completas) en plantas

Planta / Materia prima	m1	m2
Aserradero (i1)	50	
Pastera (i2)		50

El modelo fue implementado y resuelto en el software GAMS versión 24.7.3, con Cplex 12.6.3, en una PC de escritorio con un procesador Intel Core i7, 3.60 GHz y memoria RAM de 8 Gb. La formulación involucra 4700 variables binarias, 551 variables continuas y 6960 ecuaciones, y fue resuelto en 76.01 s. La solución óptima emplea un total de 40 camiones con un costo total de \$445890.

En la Figura 1 se muestran los resultados obtenidos para tres de los camiones utilizados, por cuestiones de espacio no se describe el resto.



**Fig. 1.** Circuitos camiones c4 (negro), c13 (rojo) y c39 (verde).

En la Tabla 6 se presentan los trayectos a realizar por todos los camiones, con la duración de la ruta determinada. El tamaño de este problema es semejante al que se puede encontrar en industrias forestales argentinas.

Para valorar la performance del enfoque propuesto, se ejecutaron otros casos de estudio con distintas configuraciones: variación en la cantidad de cargas completas demandadas por las plantas y modificación de la cantidad de frentes de cosecha activos. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 7. Se impuso un límite de 15 minutos de resolución por considerarse éste un tiempo razonable de ejecución en un caso real.

Tabla 6. Circuito a realizar por cada camión seleccionado

Camión	Vsalida	Vida	Vvuelta	Vida	Vvuelta	Vida	Vregreso	Tiempo (hrs)
c1	p1-f1	f1-i1	i1-f1	f1-i1	i1-f1	f1-i1	i1-p1	8.8727
c2	p1-f1	f1-i2	i2-f2	f2-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	9.7343
c3	p1-f1	f1-i2	i2-f2	f2-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	9.7343
c4	p1-f1	f1-i1	i1-f3	f3-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	8.2014
c5	p1-f1	f1-i2	i2-f2	f2-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	9.7343
c6	p1-f1	f1-i2	i2-f2	f2-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	9.7343
c7	p1-f1	f1-i2	i2-f2	f2-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	9.7343
c8	p1-f1	f1-i2	i2-f2	f2-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	9.7343
c9	p1-f1	f1-i1	i1-f3	f3-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	8.2014
c10	p1-f1	f1-i2	i2-f2	f2-i1	i1-f3	f3-i1	i1-p1	9.7343
c13	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c14	p2-f5	f5-i2	i2-f4	f4-i2	i2-f4	f4-i2	i2-p2	9.7650
c15	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c16	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c17	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c18	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c19	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c20	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c21	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c22	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c23	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c24	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c25	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c26	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c27	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c28	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c29	p2-f5	f5-i2	i2-f4	f4-i2			i2-p2	7.0126
c30	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c31	p2-f5	f5-i1	i1-f5	f5-i2			i2-p2	9.4965
c32	p2-f5	f5-i1	i1-f5	f5-i2			i2-p2	9.4965
c33	p2-f5	f5-i1	i1-f3	f3-i2			i2-p2	8.5315
c34	p2-f5	f5-i2	i2-f4	f4-i2	i2-f4	f4-i2	i2-p2	9.7650
c39	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538
c40	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538
c41	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538
c42	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538
c43	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538
c44	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538
c45	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538
c46	p3-f4	f4-i2	i2-f2	f2-i2	i2-f2	f2-i1	i1-p3	9.7538

**Tabla 7.** Evaluación de la performance del modelo propuesto

Escenario	#Frentes Cosecha	#Cargas Completas Demandadas	#Camiones Disponibles/ Utilizados	#Variables Discretas/ Continuas	#Restricciones	Tiempo CPU (segs)	GAP %
1*	5	100	50 / 40	4700 / 551	6960	74.73	0.00%
2	3	100	50 / 34	3200 / 551	4856	6.52	0.00%
3	10	100	50 / 34	8450 / 551	12220	364.08	0.00%
4	5	150	80 / 53	7520 / 881	11130	513.36	0.00%
5	3	150	80 / 50	3200 / 551	4856	7.20	0.00%
6	10	150	80 / 54	13520 / 881	19540	900.74	1.23%
7	5	75	50 / 28	4700 / 551	6960	204.01	0.00%
8	3	75	50 / 26	3200 / 551	4859	19.80	0.00%
9	10	75	50 / 25	8450 / 551	12220	24.13	0.00%

\* Ejemplo presentado en este trabajo

Cabe destacar que el modelo permite además calcular los tiempos parciales de los viajes, es decir, hora de arribo a cada frente de cosecha y a cada planta, como así también las distancias recorridas en cada viaje. Al momento de planificar detalladamente el transporte diario, se deberán agregar restricciones de scheduling para evitar el arribo simultáneo de dos o más camiones a un mismo frente de cosecha o a una misma planta.

En la Tabla 7 se puede observar que el modelo propuesto para casos de tamaño real (demandas superiores a las 100 cargas completas) arroja soluciones cercanas a la óptima en únicamente uno de los escenarios, con un tiempo máximo de resolución de 15 minutos.

## 5 Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo se propuso un modelo MILP para la generación de viajes con carga, asignación de esos viajes a camiones y el ruteo de los mismos. La ventaja del modelo presentado radica en la ejecución simultánea de tales decisiones en un tiempo de cómputo razonable.

El modelo es evaluado mediante un caso de estudio, y, testeado además, con problemas de distintos tamaños, mostrando en todos los casos que el enfoque resuelve eficientemente el problema abordado.

Cabe mencionar que en los modelos que se encuentran en la literatura se conoce de antemano el destino de las cargas (o se lo genera en una etapa previa a través de un enfoque por descomposición). En este trabajo, a diferencia de esos enfoques el destino de cada viaje se genera junto con el ruteo del camión. Dada la complejidad del problema (NP-completo), el tiempo de resolución incrementará drásticamente con el número de variables consideradas.

La planificación de transporte en esta industria tiene la característica de que un conjunto reducido de frentes de cosecha suministran materia prima a algunas pocas plantas, utilizando un número importante de camiones. Por lo tanto, es común que varios camiones realicen el mismo recorrido, solapándose de esta manera en los

frentes de cosecha o en las plantas. Por lo tanto, como trabajo a futuro se incorporarán restricciones de sincronización y ventanas de tiempo en estos nodos para la programación de los arribos de los camiones.

## Referencias

1. Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300–313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
2. Audy, J., & Rönnqvist, M. (2012). Planning Methods and Decision Support Systems in Vehicle Routing Problems for Timber Transportation : A Review Planning Methods and Decision Support Systems in Vehicle Routing Problems for Timber Transportation : A Review.
3. Rönnqvist, M. (2003). Optimization in forestry. *Mathematical Programming*, 97(1), 267–284. <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0444-0>
4. El Hachemi, N., Gendreau, M., & Rousseau, L.-M. (2013). A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 40(3), 666–673. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.02.002>
5. Flisberg, P., Lidén, B., & Rönnqvist, M. (2009). A hybrid method based on linear programming and tabu search for routing of logging trucks. *Computers & Operations Research*, 36(4), 1122–1144. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.012>
6. Gronalt, M., & Hirsch, P. (2007). Log-Truck Scheduling with a Tabu Search Strategy. In *Metaheuristics* (Vol. 39, pp. 65–88). Boston, MA: Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-71921-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-71921-4_4)
7. Palmgren, M., Rönnqvist, M., & Varbrand, P. (2004). A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*, 11(4), 447–464. <https://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2004.00469.x>
8. Rey, P. A., Muñoz, J. A., & Weintraub, A. (2009). A Column Generation Model for Truck Routing in the Chilean Forest Industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 47(3), 215–221. <https://doi.org/10.3138/infor.47.3.215>
9. Audy, J.-F., El Hachemi, N., & Rousseau, L. (2011). Solving a Combined Routing and Scheduling Problem in Forestry. *Proceedings of Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*. May 25-27, (November 2016), 10.
10. El Hachemi, N., El Hallaoui, I., Gendreau, M., & Rousseau, L.-M. (2015). Flow-based integer linear programs to solve the weekly log-truck scheduling problem. *Annals of Operations Research*, 232(1), 87–97. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1527-4>
11. Bredström, D., & Rönnqvist, M. (2008). Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*, 191(1), 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.07.033>
12. Derigs, U., Pullmann, M., Vogel, U., Oberscheider, M., Gronalt, M., & Hirsch, P. (2012). Multilevel neighborhood search for solving full truckload routing problems arising in timber transportation. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 39, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2012.10.037>
13. Amrouss, A., El Hachemi, N., Gendreau, M., & Gendron, B. (2017). Real-time management of transportation disruptions in forestry. *Computers & Operations Research*, 83, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.008>