



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Optimización en la planificación de servicios de cosecha forestal

Tesis de Maestría

Víctor Viana Céspedes

Programa de Posgrado en Investigación de Operaciones
Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay
Junio de 2018



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY



Optimización en la planificación de servicios de cosecha forestal

Tesis de Maestría

Víctor Viana Céspedes

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Investigación de Operaciones, Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Investigación de Operaciones.

Directores:

Dra. Lorena Prádenas - Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Chile

Dr. Héctor Cancela - Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, UdelaR

Montevideo – Uruguay

Junio de 2018

Viana Céspedes, Víctor

Optimización en la planificación de servicios de cosecha forestal / Víctor Viana Céspedes. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, 2018. XV, 97 p.: il.; 29, 7cm.

Directores:

Lorena Prádenas - Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, Chile

Héctor Cancela - Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, UdelaR

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Investigación de Operaciones, 2018.

Referencias bibliográficas: p. 74 – 84.

1. Asignación, 2. Ruteo, 3. Programación Lineal, 4. Replanificación.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Julio Arce

Dr. Franco Robledo

Dr. Roberto Scoz

Montevideo – Uruguay
Junio de 2018

(Dedicatoria)

A mi esposa Aldana, y a mis hijos Inés, Paula y Franco. Por su amor, paciencia, apoyo constante, y por ser grandes inspiradores.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mis directores de tesis, la Dra. Lorena Pradenas y al Dr. Héctor Cancela, por la guía constante en este trabajo, por sus aportes y consejos, y por la motivación que en todo momento me dieron. También quisiera agradecer al Dr. Fernando Resquín, la Dra. Cecilia Rachid (INIA) y al Dr. Alejandro Olivera (compañero docente de la carrera de Ingeniería Forestal) por ser quienes propusieron el tema de estudio y aportaron mucha información al respecto.

*Tell me and I forget, teach me
and I may remember, involve me
and I learn. (Dime y lo olvido,
enséñame y lo recuerdo,
involúcrame y lo aprendo)*

Benjamin Franklin, 1706 - 1790

RESUMEN

La gestión de los recursos forestales implica la toma de decisiones a nivel estratégico, táctico y operativo, con consecuencias tanto a corto como a largo plazo. Uno de los componentes de esta cadena de toma de decisiones corresponde a la cosecha forestal, que es de importancia por su alto impacto en los costos de producción. Una planificación eficiente de las operaciones de cosecha puede reducir significativamente los costos asociados con la logística y mejorar el desempeño económico de las empresas del sector. En Uruguay, casi el 75 % del total de las operaciones de cosecha forestal para la producción de celulosa es realizada por empresas contratistas, por lo que son un actor importante en la cadena de suministro. Este estudio tiene como objetivo optimizar la asignación y ruteo de los equipos de cosecha de los contratistas forestales, los cuales deben ser localizados entre los lugares a cosechar durante el año. Como parte de este trabajo se realiza una búsqueda sistemática de la literatura relacionada con la optimización de la planificación de la cosecha forestal. Se opta por utilizar la metodología de *mapping study* a tales efectos. Esta tesis propone un modelo de optimización combinatoria para este problema, basado en el Problema del Múltiple Vendedor Viajero con Múltiples Depósitos (MmTSP). Los experimentos numéricos han demostrado que las instancias de tamaño realista pueden ser resueltas por software de programación matemática estándar en un tiempo razonable. Esta formulación permite visualizar potenciales ganancias en planificación conjunta de varios contratistas en relación con la planificación por separado. Además se propone algoritmos para la reprogramación de las recorridas de cosechas, en los casos de falla de equipos o de indisponibilidad temporal de los bloques de cosecha, por ejemplo cuando el acceso a estos, se ve impedido por largo periodos de lluvia. Este modelo puede ser utilizado como una herramienta eficiente y práctica de apoyo a la programación anual de cosecha forestal y la asignación de equipo para las empresas contratistas, lo que conduce a mejores planes de calidad y oportunidades de mejora.

Palabras claves:

Asignación, Ruteo, Programación Lineal, Replanificación.

ABSTRACT

The management of the forest resources involves decision making at strategic, tactical, and operational levels, with both short and long term consequences. One of the components of this decision making chain corresponds to forest harvesting, which is a step of vital importance because of its high impact on production costs. An efficient planning of harvesting operations can significantly lower costs associated with logistics and improve the economic performance of companies in the sector. In Uruguay, almost 75 % of the total forestry operations destined to the production of pulp are in charge of contractor companies, which are an important player in the supply chain. This work aims to optimize the scheduling and routing of the contractors' harvesting equipment, which must be relocated between the places to be harvested in a season.

As part of this thesis a systematic search of the literature related to optimization methods for forest harvest planning is carried out employing the mapping study methodology. This work proposes a combinatorial optimization model for this problem, based on the Multi Depot Multiple Traveling Salesman Problem (MmTSP). Numerical experiments have shown that instances of realistic size can be solved by standard mathematical programming software in a reasonable time. This formulation allows to visualize the profits in the joint planning of several contractors against the case where each contractor makes a separate planning. In addition, some algorithms are proposed for the reprogramming of harvest tours in the case of equipments failure and in the case and in the case of temporary unavailability of the harvest blocks, for example when access is impeded by long periods of rain. This model can then be used as an efficient and practical tool for helping to develop the annual forest harvesting scheduling and equipment allocation for contractor companies, leading to better quality plans and improvement opportunities.

Keywords:

Assignment, Routing, Linear programming, Replanning.

Lista de figuras

1.1	Evolución del PBI de la industria de la celulosa, papel y cartón(en miles de millones de pesos corrientes) [1].	1
1.2	Evolución del área forestada en Uruguay desde 1975. Fuente: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, División General Forestal.	2
1.3	Lineas férreas actuales del Uruguay. Fuente: AFE (2016). Las grandes plantas de celulosa se encuentran cerca de Fray Bentos y de Colonia del Sacramento, donde no llegan lineas férreas activas.	3
1.4	Software de gestión forestal como Remsoft, generan el listado de las áreas para cosechar en cada periodo, junto al volumen de madera disponible en cada lugar. Fuente: Remsoft [2]	5
1.5	Ejemplo de una planificación anual de cosecha en distintos bloques, que son asignados a diferentes contratistas. Datos proporcionados por Montes del Plata.	7
1.6	En una primera etapa, partiendo de la demanda de la fábrica de celulosa y de los activos forestales disponibles, se planifica, que bloques serán cosechados en cada periodo de tiempo. Luego, se asigna a los equipos de cosecha los lugares donde realizarán el trabajo.	8
2.1	Esquema del sistema de cosecha <i>cut-to-length</i> . Extraído de Forest Energy Portal(http://www.forestenergy.org)	14
2.2	Esquema del sistema de cosecha <i>full-Tree</i> . Extraído de Forest Energy Portal(http://www.forestenergy.org)	14
2.3	Harvester en el sistema de cosecha <i>cut-to-length</i> . Extraído de http://www.phelox.com.uy	15
2.4	Feller buncher, maquinaria más pesada que el <i>harvester</i> . Extraído de http://www.viarural.com.uy	15

2.5	Forwarder, trasladando un carga de madera. Extraído de http://www.viarural.com.uy	16
2.6	Rendimiento de un harvester. Extraído de Bredstrom et al. [3] .	17
2.7	Rendimiento de un forwarder. Extraído de Bredstrom et al. [3] .	18
3.1	Cantidad de trabajos de cada base obtenidos en la búsqueda y la cantidad de trabajos luego seleccionados por cumplir los criterios de inclusión.	27
3.2	Gráfico con las coincidencias de trabajos entre las distintas bases.	28
3.3	Distribución por año de la cantidad de trabajos seleccionados. .	28
3.4	Porcentaje de artículos obtenidos de la búsqueda sistemática, que utilizan determinada técnica de optimización.	29
4.1	Recorridos a realizar de los diferentes equipos de cosecha.	47
4.2	Esquema simplificado de cosecha en determinados periodos de tiempo (t_1 , t_2 y t_3)	47
4.3	En la parte de arriba de la figura se puede ver la planificación original del problema, donde falla el equipo de cosecha antes de ir al bloque 2. En la parte de abajo se ve la reprogramación un vez ejecutado el algoritmo correspondiente.	56
4.4	En este ejemplo el bloque 2 queda inaccesible, luego de la reprogramación es intercambiado en el orden por el bloque 3. . . .	59
5.1	Georeferenciación de los puntos de cosecha y bases de operaciones en QGIS.	61
5.2	Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 1. Los tours para las cosechas son 0-2-1-3-4-5-6-0 y 0-9-8-7-11-10-12-0. Largo total recorrido es de 679 <i>km</i>	63
5.3	Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 2. Los tours para las cosechas son 0-5-9-11-12-8-7-13-2-0 y 0-6-14-10-4-1-15-3-0, de un largo total de 862 <i>km</i>	64
5.4	Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 1 y caso 2 integrados. Los tours para las cosechas son 0-5-15-14-13-11-4-3-1-0, 0-2-6-9-10-12-8-0, 28-18-19-20-21-7-17-16-28 y 28-26-24-23-22-25-27-28. Largo total recorrido es de 1307 <i>km</i>	65

5.5	En (a) se ve el caso 4, con 15 bloques en Rivera. En (b) se ve el caso 5, con 19 bloques en Tacuarembó. En (c) se ve el caso integrado, caso 6.	67
5.6	Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 1 con las ventana de tiempo intercambiadas, bloque 5 y 6. Ahora el recorrido total de los dos equipos es de 773 km.	70

Lista de tablas

3.1	Términos alternativos (en ingles) para formar las cadenas de búsqueda	26
3.2	Resumen de los trabajos más destacados sobre planificación y optimización de cosecha forestal.	44
4.1	Resumen de los conjuntos de datos	49
4.2	Resumen de los parámetros del problema	50
5.1	Datos de los bloques de cosecha del caso 1.	62
5.2	Datos de los bloques de cosecha del caso 2.	62
5.3	Dimensión de los problemas relativos a los casos del 1 al 6.	66
5.4	Caso con 11 contratistas con sus respectivas bases de operaciones.	68
5.5	Comparativa de aplicar el modelo a cada caso por separado y de manera integrada por grupo.	68
5.6	Resultados de la planificación original, y de la replanificación luego de una falla de equipos.	69
1.1	Matriz de distancias ficticias entre 10 puntos de cosecha.	92
1.2	Ventanas de tiempo para la cosecha, volúmenes de madera y distancias a las bases de operaciones, para 10 bloques de cosecha.	92
1.3	Matriz de distancias ficticias entre 20 puntos de cosecha.	93
1.4	Ventanas de tiempo para la cosecha, volúmenes de madera y distancias a las bases de operaciones, para 20 bloques de cosecha.	93

Tabla de contenidos

Lista de figuras	x
Lista de tablas	XIII
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Descripción del Problema	4
1.3 Motivación y aportes de este trabajo	6
1.4 Hipótesis y Objetivos	6
1.4.1 Objetivos Generales	8
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5 Organización del documento	9
2 La cosecha forestal y tipos de planificación	11
2.1 Introducción	11
2.2 Sistemas de cosecha forestal	12
2.3 Máquinas utilizadas en la cosecha	14
2.4 Tipos de planificación	17
2.4.1 Planificación estratégica	19
2.4.2 Planificación táctica	19
2.4.3 Planificación operacional	21
2.5 El proceso de trabajo en la industria forestal en Uruguay	22
2.6 Comentarios finales	23
3 Revisión Bibliográfica	24
3.1 Metodología	24
3.2 Comentario de los trabajos más destacados	29
3.3 Conclusiones	44

4	Materiales y métodos	46
4.1	Problemas y supuestos de modelado	46
4.2	Modelo de programación entera mixto	48
4.2.1	Variables del modelo	50
4.2.2	Función Objetivo	51
4.2.3	Restricciones	51
4.2.4	Complejidad y discusión del tamaño del modelo	53
4.2.5	Modelo matemático completo	54
4.3	Análisis del caso con fallas de equipos	55
4.4	Análisis del caso con pérdida de bloques de cosecha	57
5	Resultados computacionales	60
5.1	Casos de prueba	60
5.1.1	Escenario 1	61
5.1.2	Escenario 2	63
5.1.3	Escenario 3	65
5.1.4	Escenario 4	67
5.1.5	Escenario donde fallan equipos de cosecha	69
5.1.6	Escenario de indisponibilidad de bloques de cosecha	69
6	Consideraciones finales	71
6.1	Conclusiones	71
6.2	Trabajos futuros	72
	Referencias bibliográficas	74
	Anexos	85
	Anexo 1 Datos procesados	86
1.1	Datos geográficos y de volumen de madera de los casos de prueba	86
1.1.1	Caso 1	86
1.1.2	Caso 2	87
1.1.3	Caso 3	88
1.1.4	Caso 4	89
1.1.5	Caso 5	90
1.1.6	Caso 6	91
1.1.7	Casos de prueba de replanificación en caso de falla de equipos	92

Anexo 2	Código en AMPL del Modelo Matemático	94
---------	--	----

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

Uruguay históricamente se desarrolló económicamente en base al sector agrícola-ganadero, pero en los últimos años el sector forestal ha tomado mucho impulso, sobre todo desde la instalación de las plantas industriales de UPM(2007) y Montes del Plata(2014), donde la producción de celulosa pasa de aportar el 0,2 % del PBI del país en el año 2006 al 1,3 % en el año 2015 [1].

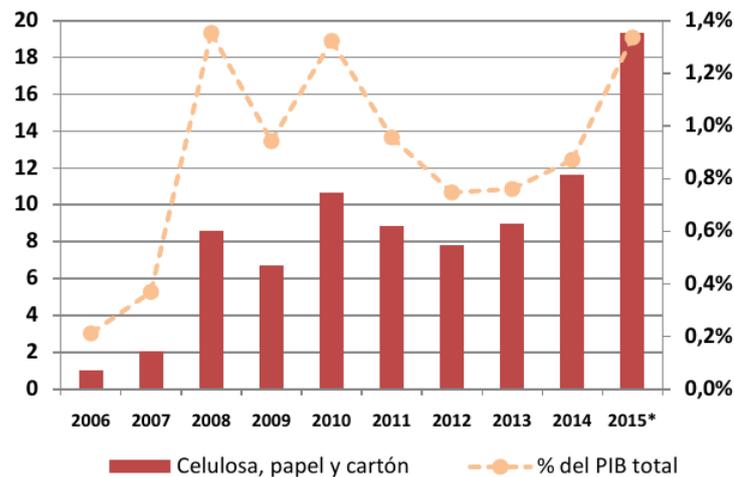


Figura 1.1: Evolución del PBI de la industria de la celulosa, papel y cartón(en miles de millones de pesos corrientes) [1].

En el año 2012, Uruguay disponía de una superficie plantada de 990.030 hectáreas [4] y como se puede apreciar en la gráfica de la figura 1.2 existe un crecimiento pronunciado desde el año 1999.

La celulosa es actualmente uno de los principales productos de exportación del Uruguay. Esto impulsa directamente las necesidades de cosecha maderera para alimentar la producción de las multinacionales ya mencionadas, UPM con un consumo anual de más de $3.500.000 m^3$, y Montes del Plata con un consumo anual estimado de $5.000.000 m^3$. Estudios recientes han mostrado la factibilidad de instalar una tercera planta productora de pasta de celulosa en el interior del país [5], debido a la alta disponibilidad de madera destinada a ello que habrá en los próximos 15 años, 10 millones de m^3 en promedio anuales. En la figura 1.3 se puede apreciar la ubicación actual de las principales fábricas de celulosa y la posible ubicación de la tercera planta.

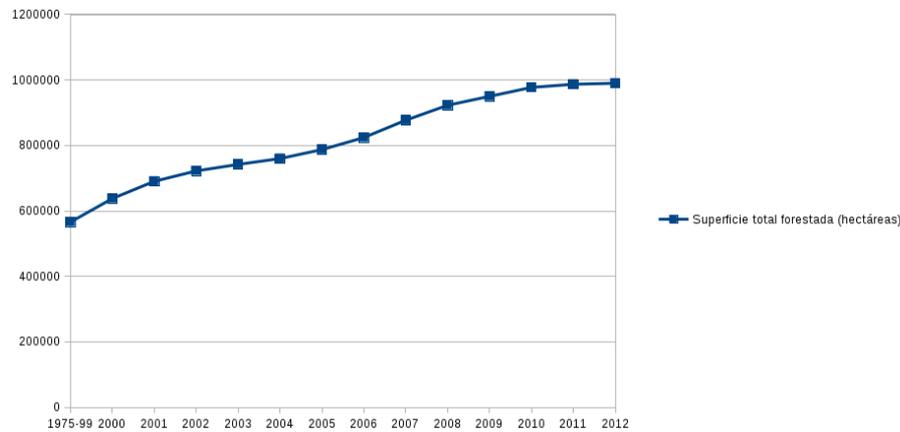


Figura 1.2: Evolución del área forestada en Uruguay desde 1975. Fuente: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, División General Forestal.

Las empresas mencionadas, y otras que no producen pasta de celulosa, poseen plantaciones en gran parte del país. Algunas de estas forestaciones son propias y otras en conjunto con productores ganaderos por intermedio de alianzas comerciales. Estas empresas contratan los servicios de cosecha, de carga y transporte de la madera cortada a terceros, llamados empresas contratistas forestales. La optimización del servicio que prestan estos servicios contratados es objeto de estudio en este trabajo. Nos enfocaremos en los servicios de cosecha forestal y carga.

El poco desarrollo vial del Uruguay, con trazados de carreteras principales muy lejos de las grandes plantaciones forestales, rutas secundarias en mal estado [6] [7] y escaso uso del medio ferroviario, hace que los costos insumidos en el transporte de madera hacia las plantas de industrialización sean altos, alcanzando al 70% de los costos de toda la cadena productiva [8]. La red

ferroviaria de Uruguay cuenta con una extensión de 3.073 km, de los cuales desde finales del siglo XX, solo 1.652 km se encuentran en operación. En la figura 1.3 vemos el trazado férreo actual que no avanza en casi más de medio siglo [9] [10]. Mientras que otros en países como por ejemplo Brasil, algunas plantas de celulosa tienen una distancia promedio de 50 kilómetros con las plantaciones, en Uruguay superan largamente los 200 kilómetros en la mayoría de los casos. Otros factores a considerar son los climáticos con periodos largos de lluvia que pueden afectar de manera importante la extracción de madera de los montes [11].

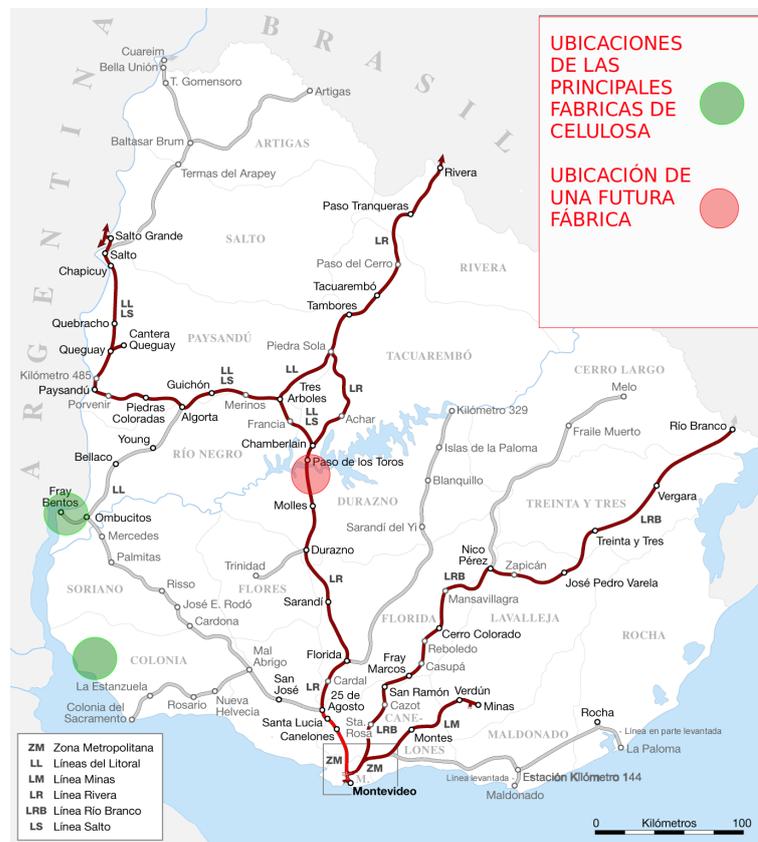


Figura 1.3: Líneas férreas actuales del Uruguay. Fuente: AFE (2016). Las grandes plantas de celulosa se encuentran cerca de Fray Bentos y de Colonia del Sacramento, donde no llegan líneas férreas activas.

La planificación forestal es un problema de toma de decisiones de alta complejidad que involucra la participación de diversos factores: sistemas ecológicos, productivos y económicos ([12], [13], [14]). Esto hace que la planificación de operaciones de cosecha sea compleja y afecte el resultado económico de las empresas. La cosecha forestal tiene vital importancia debido a su alto impacto

en los costos de producción, por lo tanto, planificar ésta de manera eficiente puede incurrir también en la baja de los costos asociados a la logística. La gestión de los recursos forestales plantea la toma de decisiones en ambientes complejos, donde esas decisiones implican consecuencias tanto a corto como a largo plazo. En lo que se refiere a la producción de madera para pasta de celulosa, en Uruguay el 75 % del total de las operaciones de cosecha son realizados por empresas contratistas, por lo que estos son un actor importante en la cadena de suministro. En este trabajo nos proponemos estudiar como optimizar el recorrido a lo largo de un año de los lugares a los cuales deben concurrir estas empresas para extraer la madera.

1.2. Descripción del Problema

En la producción de madera para la fabricación de pasta de celulosa, a partir de los ocho años los árboles pueden ser cosechados. En general en la planificación de cosecha se considera, además de las demandas de las plantas industriales, aspectos como: tipo de especies, distancias a las plantas, estructura de edades de las plantaciones, curvas de crecimiento y condiciones medioambientales. La cosecha de los montes se realiza según un plan anual de cortas, lo que permite hacerla de manera sustentable. Además se debe considerar el cuidar de la salud y seguridad de las personas implicadas en la tarea, e informar a los establecimientos vecinos sobre la actividad a desarrollar. Antes de la cosecha se efectúan tareas preparatorias relacionadas con: caminos, señalización, definición de zonas de mantenimiento y gestión de residuos. Las actividades de cosecha se realizan en su mayor parte de forma mecanizada y consideran:

- Volteo y desramado de árboles.
- Descortezado y trozado de madera.
- Carga y traslado de la madera fuera del predio.

Considerando el inventario forestal, cada año las empresas que fabrican pasta de celulosa planifican la cosecha para ese periodo. Por lo tanto, dependiendo de la demanda que tengan, se asigna a cada contratista los lugares en los cuales se debe cosechar, solicitándole en cada caso:

- Cosechar las áreas o bloques pedidos.

bien diferenciadas; una primera etapa donde se asigna a cada bloque disponible el periodo de tiempo en que podrá ser cosechado, y la siguiente etapa que consiste en asignar a equipo de cosecha esos bloques.

1.3. Motivación y aportes de este trabajo

Como docente de la Sede Tacuarembó de la UdelaR, en la carrera de Ingeniería Forestal (es la única sede donde se dicta esta carrera en Uruguay), estoy en contacto con un equipo de investigadores relacionados con el tema forestal, instalados en los Polos de Desarrollo Universitario (PDU) y otros actores del sector industrial vinculados a la industria forestal. Estos son una importante fuente de referencias para este estudio. Los Polos de Desarrollo Universitario, son grupos de docentes conformados por equipos multidisciplinarios para enseñanza, investigación y extensión, sobre diversas áreas de interés definidas previamente, entre ellas, el sector forestal.

En Uruguay existen pocos antecedentes de aplicación de la Investigación Operativa (IO) a la industria forestal. Esta tesis pretende ser una de las primeras experiencias en ese sentido. Según se expresa en [15] “El sector forestal se caracteriza por la multidimensionalidad de sus sistemas, desde la gestión de las masas hasta aspectos de logística y aprovechamiento de los recursos forestales. Bajo este contexto la IO es el enfoque versátil y robusto para abordar los problemas de dichos sistemas”.

Dado que la cadena productiva que aborda este problema comienza con la cosecha forestal, el contratista forestal se convierte en un actor importante de la misma, como ya se dice en la sección 1.1. Muchas veces estos contratistas no participan en las decisiones de planificación, por lo que creemos que este trabajo puede aportar una metodología que permita a estas pequeñas o medianas empresas obtener ahorros importantes en la operativa de cosecha y por lo tanto aumentar la calidad de sus servicios.

1.4. Hipótesis y Objetivos

Se plantea la hipótesis en este estudio que es posible mejorar el recorrido que realizaran los distintos equipos de cosecha forestal durante la planificación, y además que es posible formular y resolver un modelo matemático que permita

Contratista	Bloque	Pedido de cosecha (en m ³) en cada mes del 2016											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	1		11.288	29.545	26.549	26.033	9.518						
	2	33.180	19.812				18.751	34.358	36.250	24.016	22.143	19.347	32.029
	3	13.000											
	4		4.618	7.360	6.720	7.040	3.584						
	5	3.257	2.628										
	6						4.320	8.400	9.200	8.800	8.400	2.042	
B	7								16.577	21.923	20.226		
	8												
	9	10.028	15.675	17.618	16.110	7.736							
	10					8.666	17.059	17.731	17.868	3.984			
C	11										338	9.100	546
	12									1.162	8.123		
	13			3.817	3.859	4.210	4.607	4.297	4.821	4.202			
	14												
F	15	7.000											
	16			10.618	25.533	28.155	20.475						
	17	8.551	20.712	8.761									
	18						4.368	21.523	15.794				
	19								3.453	22.845	5.783		
	20										17.342	22.915	26.787
	21					9.398	11.139	9.720	9.712	10.721	9.457	12.363	
	22												
	23												
	24	9.814	14.608	13.227	10.562	755							
D	25												
	26	11.206	17.979	19.255	3.812								
	27					17.690	16.417						
	28												
	29				13.194	101							
	30						1.290	18.368	18.927	18.479	18.136	18.265	19.123
E	31				6.698	10.927	12.692	11.683	12.725	13.007	8.553	9.847	10.671
	32												
	33	6.268	8.000	8.000									
	34				3.681	5.243	7.608	8.145	8.145	7.775	8.515	8.145	7.775
	35												
	36	6.000	8.000	8.000									
	37					2.000	4.285	5.894	7.550	3.262			
G	38												
	39												
	40	1.573	3.058	3.203	3.203	1.236							
	41										1.255	35	
H	42									13.519	21.039	20.877	20.418
	43												
	44	15.359	16.541	18.004	19.117	19.007	18.618	18.758	18.749	7.285			
I	45	13.057	21.102										
	46									5.566	11.022	11.547	11.708
	47					15.308	19.960	17.145	18.780	9.304			
	48												
	49			12.597	19.638	4.150							
N	50	12.154	6.293	8.412	8.453	7.650	6.319	8.229	6.779	3.867			
	51									3.728	7.586	7.726	8.278
	52												
	53												
J	54			19.530	18.497	18.850	22.963						
	55												
	56							17.862	20.440	22.134	20.265	21.238	1.253
	57												19.668
	58	24.000	26.000										
Total	174446	196311	187948	185626	194156	203974	202113	209195	200233	189882	183673	158256	

Figura 1.5: Ejemplo de una planificación anual de cosecha en distintos bloques, que son asignados a diferentes contratistas. Datos proporcionados por Montes del Plata.

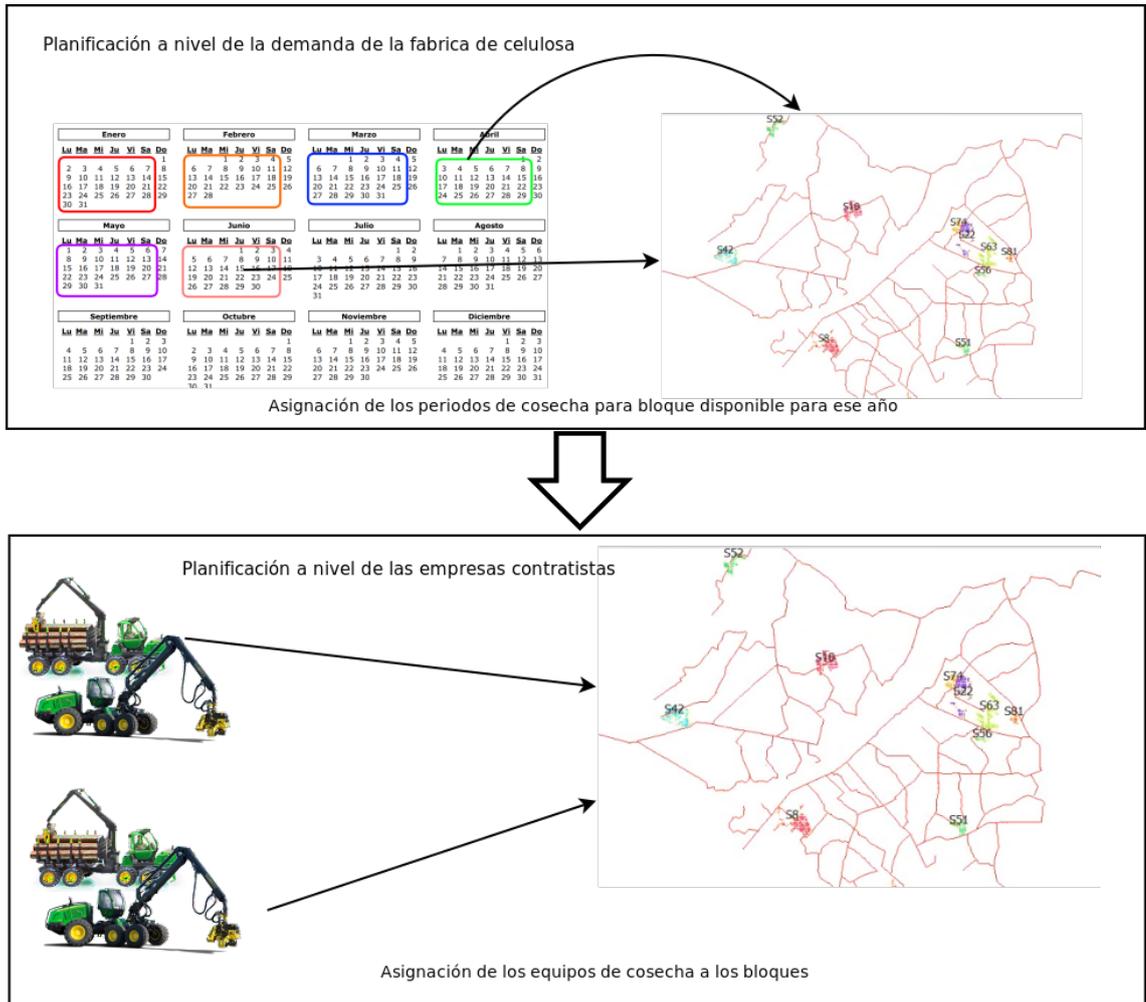


Figura 1.6: En una primera etapa, partiendo de la demanda de la fábrica de celulosa y de los activos forestales disponibles, se planifica, que bloques serán cosechados en cada periodo de tiempo. Luego, se asigna a los equipos de cosecha los lugares donde realizarán el trabajo.

apoyar la toma de decisiones tácticas de la asignación de estos equipos a los lugares de trabajo.

1.4.1. Objetivos Generales

Optimizar la secuencia en la que los contratistas realizan las operaciones, con el fin de minimizar costos de desplazamientos y otros costos operativos que se identifiquen.

1.4.2. Objetivos específicos

- Investigar como se desarrollan los servicios contratados para ejecutar la planificación anual de la cosecha forestal.
- Investigar sobre el estado del arte y realizar una revisión bibliográfica sobre el tema.
- Formular, resolver y evaluar un modelo matemático que permita apoyar la toma de decisiones en la planificación táctica de la asignación de los predios para cosechar a empresas contratistas forestales a lo largo de un año.
- Discutir situaciones comunes en la práctica, como la rotura de equipos y la indisponibilidad de bloques durante un cierto período de tiempo; proponer una solución en base al modelo matemático propuesto para resolver estas situaciones.
- Implementar computacionalmente el modelo formulado.
- Generar un conjunto de instancias estructuradas de acuerdo a problemas reales que permitan inferir diferentes conclusiones y aporten a la toma de decisiones de la planificación táctica.

1.5. Organización del documento

El presente documento está estructurado en 6 capítulos. En el capítulo actual (capítulo 1) se presentó el contexto de la industria forestal uruguaya y la definición del problema a tratar, también se presenta las hipótesis asumidas y se plantea los objetivos de la tesis. En el capítulo 2 se hace una descripción de los sistemas de cosecha forestal más usados y se ve una definición de los tipos de planificación estratégica, táctica y operativa; también se agrega al capítulo el contexto de trabajo de los contratistas forestales en Uruguay. En el capítulo 3 se muestra la Revisión Bibliográfica de los temas relacionados con este trabajo, utilizando la metodología de *mapping study*. Además en este capítulo se incluye el resumen de lecturas de los trabajos más importantes que se tomaron como referencia.

En el capítulo 4 se propone el modelo matemático para resolver el problema descrito y los algoritmos para atender los casos de indisponibilidad temporal de equipos y/o bloques de cosecha. En este capítulo también se presentan los casos de pruebas elegidos para ejecutar el modelo. En el capítulo 5 se realiza

el plan de pruebas y se ejecutan los casos elegidos en el capítulo anterior. Se discute los resultados obtenidos de ejecutar las diferentes configuraciones del modelo, también se muestran los resultados de la ejecución de los algoritmos para resolver los casos de indisponibilidad de bloques y equipos de cosecha. Por último en el capítulo 6 se presentan las consideraciones finales, conclusiones, algunas recomendaciones y trabajos futuros propuestos.

Este trabajo ha dado lugar a las siguientes publicaciones y presentaciones:

- Una presentación inicial de avances fue publicado como poster en *I International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture*(BigDSSAgro 2017) [16].
- El planteo del modelo matemático para el problema de ruteo y asignación de equipos de cosecha fue aceptado para presentar en el *50^o Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional* (SBPO 2018) [17].
- El planteo del problema de replanificación de los tours en caso de falla de equipos fue aceptado para presentar en la *XIX Conferencia Latinoamericana de Investigación Operativa* (CLAIO 2018)[18].

Capítulo 2

La cosecha forestal y tipos de planificación

2.1. Introducción

Como se dijo anteriormente, la madera con destino a celulosa es uno de los principales productos que Uruguay exporta actualmente [19].

Se entiende por cosecha forestal “al conjunto planificado de actividades relacionado con la corta, procesamiento, extracción y carga de trozas u otras partes aprovechables de los árboles, para su posterior transformación final, considerando sus efectos a corto, mediano y largo plazo sobre los recursos naturales” [20]. Según Arce et al. [21], la cosecha representa la operación final de un ciclo de producción forestal, en la que se obtienen los productos más valiosos, constituyendo uno de los factores que determinan la rentabilidad del bosque y es también la actividad que más sufre el proceso de mecanización.

Debemos tener en cuenta que la cosecha es una de las actividades más importantes que inciden en el costo final de la madera, por lo tanto es necesario estudiar los métodos que contribuyan a realizar esta fase de forma más óptima y eficiente, obteniendo así un mayor beneficio y aprovechamiento maderero. La productividad operacional de la cosecha varía en función de la pendiente del terreno, y del volumen por árbol entre otros factores [22].

Leonello et al. [23] señalan que la cosecha junto con el transporte en forestación representan el 50 % o más de los costos totales de la madera puesta en la industria, por lo tanto es necesario un constante interés por nuevas técnicas que desarrollen esta actividad de forma más eficiente y apuntando a un mayor

aprovechamiento del material leñoso.

Según Machado de Assis [24] la cosecha es una actividad que envuelve las etapas necesarias para retirar la madera del bosque: corte, extracción, carga y transporte. A continuación se describen dichas etapas, según el mismo autor:

- **Corte:** incluye las operaciones de apeo, desrame, trozado y preparación de la madera para el apilado. El apeo puede ser manual (hacha), semi-mecanizado (motosierra) o mecanizada (cosechadoras forestales). El desrame y trozado es la retirada de las ramas remanentes y la reducción del fuste en trozas menores respectivamente. Puede ser manual (hacha o motosierra), semi-mecanizada o mecanizada (*harvester*). El descortezado es la retirada de la corteza del árbol, para esta actividad los equipos utilizados pueden ser descortezador mecánico portátil, descortezador mecánico de tambor rotativo o con *harvester*.
- **Extracción:** es el movimiento de la madera del local de corte hasta el borde de los caminos, esta etapa puede ser hecha de forma suspendida, es decir apoyada en una plataforma o un tractor auto cargable.
- **Carga:** actividad que coloca la madera sobre el vehículo de transporte, pudiendo ser el principal o el de extracción.
- **Transporte:** es la actividad que lleva la madera del área de cosecha para el patio de las industrias. Estas actividades y sus variantes son integradas entre sí formando los sistemas de cosecha forestal.

2.2. Sistemas de cosecha forestal

El sistema de cosecha de madera está basado en herramientas, equipamientos, máquinas y personas involucradas en el área de cosecha. El método de cosecha depende de cuál es la forma en que la madera es depositada en el camino de acceso, y de la cantidad de procesos que ocurren después del corte final del árbol [25].

Según Machado [26] existen básicamente 5 sistemas de cosecha los cuales se clasifican de acuerdo al largo de las trozas y a la forma como son extraídas hasta el local de procesamiento, estas serían:

- **Sistemas de árboles enteros (*full-tree*):** En el sistema de árboles enteros el árbol es volteado y arrastrado para afuera del rodal, donde el procesamiento completo es hecho en locales previamente elegidos. Las

máquinas que componen este sistema son *feller-buncher*, *skidder*, y un procesador, la primera máquina realiza el trabajo de apeo y el *skidder* el arrastre para el posterior procesamiento. En este sistema se requiere un elevado índice de mecanización y puede ser utilizado tanto en terrenos planos o accidentados.

- **Sistema de árboles completos (*whole-tree*):** El sistema de árboles completos tiene como estrategia retirar el árbol con parte de su sistema radicular y llevarlo para los borde de los caminos, o para patios temporarios donde procesarlo. Este sistema se vuelve interesante solamente en los casos en que la raíz tiene valor comercial.
- **Sistema de astillado (*chipping*):** En este sistema los árboles son apeados, desramados, descortezados y transformados en chips o astillas en el lugar de corte. Posteriormente son extraídos y transportados para la industria.
- **Sistema de trozas cortas (*cut-to-length*) :** El sistema de cosecha de trozas cortas o *cut-to-length* (CTL), es el más utilizado en los países escandinavos y en Uruguay. Es caracterizado por la realización de todos los trabajos complementarios al corte, desramado, descortezado y trozado en el mismo lugar donde el árbol fue apeado, para después ser transportados hasta el borde del camino y dejarlos apilados prontos para la carga. El largo de las trozas utilizadas es variable, y las máquinas con las que se trabajan en conjunto son el *harvester* y *forwarder*. En la figura 2.1 se puede ver un esquema de este sistema de cosecha.
- **Sistema de trozas largas (*tree-length*) :** En el sistema de trozas largas, luego que el árbol es cortado se realiza el desrame y descortezado en el lugar. Está diseñado para terrenos accidentados, en comparación con el sistema de trozas cortas, se puede decir que presenta menores costos por tonelada de madera y que causa mayores daños sobre el terreno. En general las máquinas que se utilizan son *feller* para la corta y *skidder* para el arrastre. En cuanto a la mecanización en cosecha, el escenario mundial y nacional muestra una tendencia a la sustitución de sistemas de cosecha de trozas largas (con *feller buncher* y *skider*) por sistemas de cosecha denominados de troza corta (con *harvester* y *forwarder*). En la figura 2.2 se puede ver un esquema de este sistema de cosecha.



Figura 2.1: Esquema del sistema de cosecha *cut-to-length*. Extraído de Forest Energy Portal(<http://www.forestenergy.org>)



Figura 2.2: Esquema del sistema de cosecha *full-Tree*. Extraído de Forest Energy Portal(<http://www.forestenergy.org>)

2.3. Máquinas utilizadas en la cosecha

Clasificadas como de gran porte, las máquinas forestales utilizadas en las diversas etapas de la cosecha mecanizada son pesadas, con elevada potencia en el motor y mayor velocidad de desplazamiento. Estas características permiten movilidad y proporcionan aumento significativo en la capacidad operacional, una vez que realizan mayor cantidad de trabajo en menos tiempo. Las principales máquinas utilizadas en Uruguay para la cosecha forestal son:

- **Harvester:** la cosechadora *harvester* es un máquina forestal constituida de un tractor, con una brazo hidráulico para alcanzar los árboles y un cabezal que puede ejecutar simultáneamente las operaciones de apeo, desrame, descortezado, trozado y apilado de la madera [22]. Los *harvesters* son máquinas de avanzada tecnología y muy bien aceptadas por la capacidad que poseen de trabajar en condiciones variables y situaciones adversas. En la figura 2.3 podemos ver un *harvester* en el lugar de

cosecha.



Figura 2.3: Harvester en el sistema de cosecha *cut-to-length*. Extraído de <http://www.phelox.com.uy>

- **Feller buncher:** es tractor forestal derrumbador y acumulador, con función de cortar y acumular varios árboles, formando paquetes de trozas o árboles. El cabezal es una pieza de constitución rígida, donde está localizado el dispositivo de corte que puede ser compuesto por un disco dentado, una tijera de doble acción, una sierra o un sable y los brazos acumuladores, todos accionados por un sistema hidráulico [26]. En la figura 2.4 podemos ver un *feller buncher* en el lugar de cosecha.



Figura 2.4: Feller buncher, maquinaria más pesada que el *harvester*. Extraído de <http://www.viarural.com.uy>

- **Forwarder:** esta máquina tiene como finalidad retirar la madera dentro del rodal hacia el borde de los caminos. Es utilizada en los sistemas de trozas cortas, en conjunto con el *harvester*. Su peso puede variar de 9 a 12 toneladas, y la potencia del motor entre 70 a 120 kw [24]. Los tractores forestales autocargables o *forwarder* originalmente fueron fabricados en Canadá y perfeccionados en los países escandinavos, son en su mayoría, máquinas articuladas con capacidad de carga entre 5 y 20 toneladas. En la figura 2.5 se puede apreciar el *forwarder* trasladando una carga de madera.



Figura 2.5: Forwarder, trasladando un carga de madera. Extraído de <http://www.viarural.com.uy>

Para calcular el rendimiento, el tiempo que tarda una máquina en cosechar o cargar un bloque de cosecha, necesitamos considerar las características de la máquina y las propiedades del área de cosecha. Esto se hace con las llamadas funciones de rendimiento. Cada función proporciona cuántos metros cúbicos son cosechados o cargados por hora estándar. Hay muchas posibilidades para tales funciones, pero la mayoría de las empresas utilizan funciones simples y sencillas, ya que son fáciles de usar. La función de rendimiento de las máquinas

puede expresarse como lo hace Bredstron et al. [3]:

$$p_{harvester}(x) = a_{so}x^2 + b_{so}x + c_{so} \quad (2.1)$$

$$p_{forwarder}(y) = d_{so}y^2 + e_{so}y + f_{so} \quad (2.2)$$

Donde x es el tamaño promedio del árbol (m^3 de madera sólidos bajo la corteza), y la distancia para la carga (en m), s el tamaño del árbol: pequeño, medio, grande o muy grande, y o la operación: tala completa o poda. Todos los coeficientes a_{so}, \dots, f_{so} son específicos de la marca de la máquina, y se miden a través de muchas pruebas en diferentes condiciones y áreas. En las figuras 2.6 y 2.7, ilustramos las funciones de funcionamiento típicas para los *harvester* y los *forwarder*, respectivamente.

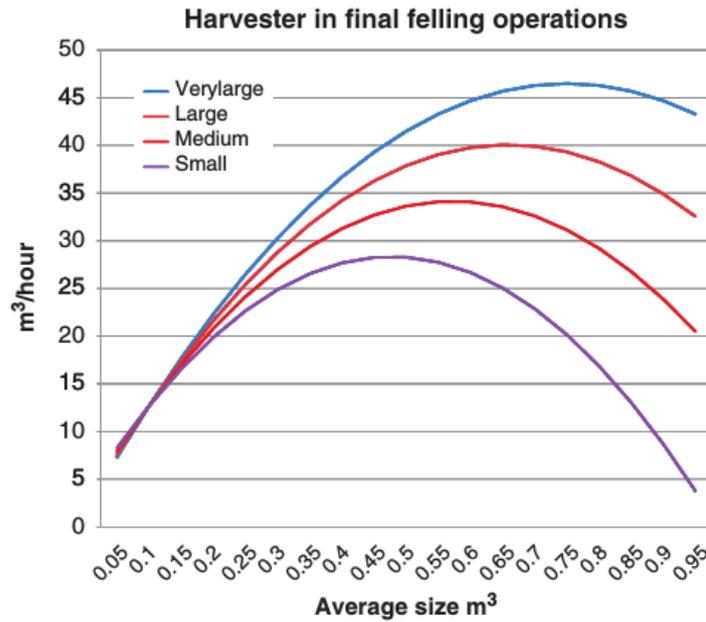


Figura 2.6: Rendimiento de un harvester. Extraído de Bredstrom et al. [3]

2.4. Tipos de planificación

La planificación de la cosecha forestal es un proceso de toma de decisiones que permite organizarla desde una perspectiva sostenible y multifuncional para un determinado periodo de tiempo. Podemos establecer jerárquicamente tres tipos de planificación: la estratégica que es la encargada de tomar decisiones a largo plazo; la planificación táctica que se basa en la planificación estratégica

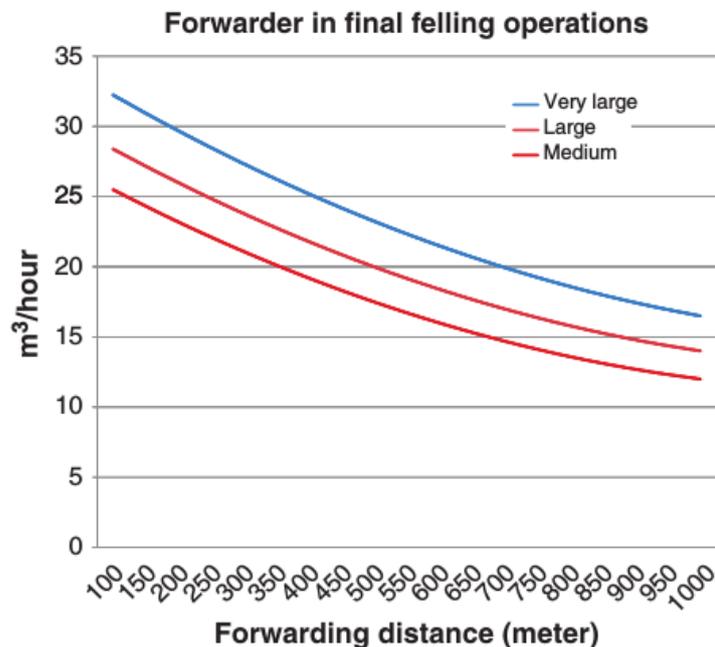


Figura 2.7: Rendimiento de un forwarder. Extraído de Bredstrom et al. [3]

para conducir las actividades a realizar a mediano plazo y la planificación operativa, que es la que lleva a cabo las actividades de corto plazo [27].

La planificación estratégica forestal requiere de decisiones de tipo espacial y temporal. Estas decisiones no son fáciles de tomar por el alcance y versatilidad involucrada (por ejemplo busca tomar decisiones a largo plazo sobre cientos o miles de hectáreas, en decenas o cientos de años). En lo que se refiere a la producción forestal, se busca obtener constancia y sostenibilidad en el tiempo que permita la posibilidad de volver a utilizar la tierra y a su vez poder maximizar los beneficios empresariales.

Para la planificación táctica forestal, en general se toman decisiones a mediano plazo, alrededor de 2 a 3 años. Al igual que la planificación estratégica busca generar decisiones sustentables que no afecten al entorno ni a los recursos utilizados, a elegir las mejores formas de extraer la madera; mejorar técnicas y evaluar todas las ventajas y desventajas de las decisiones [28]. Esto incide en las decisiones sobre transporte y en el mantenimiento de los accesos a las plantaciones forestales. También debe gestionar bien los recursos disponibles, por ejemplo la maquinaria necesaria para la tala de arboles.

En la planificación operativa forestal se realizan todas las actividades para la extracción del bosque y toma de decisiones en el lugar de cosecha que involucran la implementación de la faena diaria. Se definen también los implementos

de trabajo a utilizar, así como el análisis de la seguridad de las tareas, etc.

La planificación de la cadena de suministro en la industria de productos forestales abarca una amplia gama de decisiones, desde estratégicas a operacionales. A continuación se ilustran el alcance de estas decisiones, siguiendo las ideas detalladas en Carlsson et al. [29].

2.4.1. Planificación estratégica

La planificación estratégica en la industria de los productos forestales es una planificación a largo plazo. La toma de decisiones estratégicas incluye tomar decisiones relacionadas con estrategias de manejo forestal, tratamientos silvícolas, áreas a conservar, construcción de caminos forestales, apertura, cierre, localización y adquisición de nuevas plantas industriales, inversiones en procesos (máquinas, equipos de transporte, tecnología), desarrollo de productos y mercados, estrategias de planificación y localización de inventarios [30].

El enfoque de planificación elegido tiene un gran impacto en decisiones de inversión. Por lo tanto, el enfoque de planificación define parámetros importantes con respecto a la tecnología necesaria, capacidad, niveles de inventario y distancias máximas a los clientes. Tales decisiones implican naturalmente la evaluación de cómo la inversión encajará en toda la logística, incluyendo decidir qué mercados están disponibles para los productos basándose en las tendencias anticipadas, cómo debe realizarse la distribución de los productos y a qué costo, además de cómo la producción de las unidades necesarias a partir de los insumos suministrados [30].

Otros elementos, como el suministro de energía, también podrían ser cruciales. El tipo de tenencia de la tierra forestal también puede afectar la forma en que se toman las decisiones estratégicas de la cadena de suministro. La madera podría provenir de terrenos públicos, terrenos privados o ambos, y cada tipo requiere diferentes programas de adquisiciones [29].

2.4.2. Planificación táctica

Después de la planificación estratégica, el siguiente nivel en la estructura de planificación jerárquica es la planificación táctica o a mediano plazo. La planificación táctica es ligeramente diferente dependiendo de si se está tratando un problema de manejo forestal o un problema de planificación de producción / distribución. En la ordenación forestal, los enfoques de planificación jerárquica

se aplican ampliamente, ya que permiten abordar inicialmente el problema de la planificación táctica sin tener en cuenta las cuestiones espaciales. Una vez hecho esto, el problema está estrechamente restringido espacialmente [30].

Si bien los problemas de planificación estratégica de la ordenación forestal abarcan generalmente alrededor de 100 años, los problemas de planificación táctica se revisan a menudo cada año durante un período de planificación de cinco años. En la planificación de problemas relacionados con cuestiones de producción y de distribución, la planificación táctica normalmente se refiere a las reglas de asignación que definen qué unidad o grupo de unidades es responsable de ejecutar las diferentes actividades de la cadena de suministro o qué recursos o grupo de recursos se utilizarán. También establece las reglas en términos de plazos de producción y de distribución, clasificación de lotes y políticas de inventario [31].

La planificación táctica permite definir estos dos tipos de reglas a través de un análisis global de la cadena de suministro. La planificación táctica también sirve de puente entre la planificación estratégica global a largo plazo y la planificación operativa detallada a corto plazo que tiene una influencia directa en las operaciones reales de la cadena (por ejemplo, ruteo de camiones, programas de producción). La planificación táctica también debe asegurar que la planificación operacional posterior se ajuste a las directrices establecidas durante la etapa de planificación estratégica, aunque el horizonte de planificación es mucho más corto. Las decisiones tácticas típicas se refieren a la asignación de clientes y la definición de la capacidad de distribución necesaria. La planificación avanzada requerida para la distribución depende del modo de transporte [31].

Otra razón importante para la planificación táctica está ligada a la estacionalidad de la cadena de suministro, lo que aumenta la necesidad de una planificación anticipada. La estacionalidad tiene una gran influencia en la etapa de adquisición. Una de las razones de esta estacionalidad es el cambio de las condiciones climáticas a lo largo del año, lo que puede hacer imposible el transporte de troncos durante ciertos periodos debido a la falta de capacidad de carga en los caminos forestales causada por los largos periodos de lluvia, por ejemplo. En muchas áreas del mundo, la estacionalidad también desempeña un papel en las operaciones de cosecha [31].

Otra área en la que la planificación táctica puede ser útil es la proyección del presupuesto. La mayoría de las empresas ejecutan una importante tarea de

planificación al proyectar el presupuesto anual para el año siguiente, decidir qué productos ofrecer a los clientes y en qué cantidades. En el proceso de elaboración de estas decisiones las empresas deben evaluar las implicaciones de sus decisiones en toda la cadena de suministro (adquisición, producción y distribución) con el objetivo de maximizar los beneficios netos [31].

2.4.3. Planificación operacional

El tercer nivel de planificación es la planificación operacional o de corto plazo, que es la que precede y determina las operaciones del mundo real. Por esta razón, este proceso de planificación debe reflejar adecuadamente la realidad detallada en la que tienen lugar las operaciones. El momento preciso de las operaciones es crucial. En general no basta con saber la semana o el mes en que debe realizarse una determinada acción; el período de tiempo debe ser definido en términos de días u horas [29].

La planificación operativa se suele distribuir entre las diferentes instalaciones o unidades de las instalaciones, debido a la enorme cantidad de datos que deben manipularse a nivel operativo (por ejemplo, el número de unidades de almacenamiento y otros recursos específicos) [29].

Dentro del proceso de producción, un tipo de problema de planificación operacional se refiere a la interrupción de la cadena de suministro que debe ser resuelto por muchas de las plantas de destino de la madera. La programación de los diferentes productos que se mueven a través de las líneas de fabricación es también un típico problema de planificación operacional, al igual que el control de procesos que involucra decisiones de planificación operacional en tiempo real [29].

Otro tipo de problema de planificación operativa se ocupa de los problemas relacionados con el transporte, específicamente el ruteo y despacho realizado en varios puntos de la cadena de suministro. Por ejemplo, es necesario decidir que camiones van a usarse para transportar la madera del bosque a las plantas de industrialización o para transportar productos terminados a otros destinos [29].

2.5. El proceso de trabajo en la industria forestal en Uruguay

Para la especie más extendida que es el eucalipto, el proceso de trabajo tarda ocho años, los cuales abarcan desde la preparación de los plantines, hasta su plantación y cosecha. Este lapso se puede considerar que se planifica estratégicamente. Luego de ese tiempo de plantado el monte, se procede al corte, descortezado y trozado de la madera. En nuestro país, la gran mayoría de las empresas que se dedican a brindar el servicio de cosecha forestal, lo hace de manera mecanizada (utilizando *harvester* y *forwarder*), quedando casi ya en desuso los sistemas manual y semimecanizado.

Como se expresó en la sección 1.1, el 75 % de las operaciones de cosecha forestal son realizadas por empresas contratistas. Generalmente las grandes empresas forestales a fin de hacerse de los servicios de cosecha y transporte de la madera convocan a una licitación a terceros. En dicha licitación son establecidas desde las pautas de trabajo y de como operar en la cosecha, hasta la maquinaria a usar y la duración del contrato.

Según Pou Ferrari [32], la planificación de la cosecha está íntimamente vinculada a los requerimientos de las fábrica de celulosa, la ubicación y las características de los suelos donde se encuentran las plantaciones, atendiendo a recursos humanos, económicos, ambientales y de seguridad y salud ocupacionales. Cada año las empresas realizan la planificación táctica de la cosecha, donde preparan un plan específico por predio o monte, que considera la información del plan de manejo forestal y los estudios de impacto ambiental y social. A las actividades de preparación de operaciones (caminos, colocación de carteles y definición de zonas de mantenimiento, y la gestión de residuos) se agrega la cosecha propiamente dicha y el acopio de la madera.

El Plan de Cosecha define la planificación de todos los procesos principales de la empresa (inventario forestal, dimensionamiento de las capacidades de cosecha, optimización de recursos) . Para ello se cuenta con herramientas informáticas que mejoran la productividad del operador, y disminuyen las incertidumbres vinculadas con variables climáticas [33].

Hay trabajos académicos realizados en Brasil [34] que refieren a la propuesta de modelos de optimización (programación lineal) para planificación de la cosecha a nivel táctico y operacional, que fueron aplicados a un caso de estudio basado en datos de 2005 a 2007 de la empresa Botnia/Forestal Oriental

; si bien se indica que la herramienta puede generar ganancias en eficiencia, no se reporta si la misma fue incorporada a nivel de producción por la empresa.

Finalmente, están las actividades de servicios *tercerizados* que se encargan de la carga de la madera en el monte, su transporte en camiones y posterior descarga en las plantas de celulosa; éstas no son incluidas en el alcance de este trabajo.

2.6. Comentarios finales

En esta sección se vio de forma detallada los distintos sistemas de cosecha forestal más utilizados en la actualidad. También se hizo una descripción de las principales máquinas que se usan en la cosecha. Prácticamente todos los contratistas en Uruguay utilizan un sistema de cosecha mecanizada como los ya descritos, y gran parte de ellos el sistema *cut-to-length*. Estos sistemas de cosecha así como la maquinaria involucrada tienen como origen países con un desarrollo de la industria forestal muy anterior al del Uruguay. También se hizo un análisis de los sistemas de planificación utilizados en la industria forestal, qué periodos de tiempo abarca cada uno, y que actividades involucraría. Este trabajo aborda un problema de planificación táctica, ya que para la cosecha forestal se maneja un horizonte de tiempo de un año o varios meses del año. También puede considerarse como un problema de planificación operativa, ya que por falla del equipamiento de cosecha o indisponibilidad de cosechar en determinados bloques, hace que se vuelva a planificar la cosecha de manera inmediata.

Capítulo 3

Revisión Bibliográfica

Este capítulo incluye la revisión de la literatura, de los enfoques, teorías y conceptos pertinentes en que se fundamenta la investigación. Se basa fundamentalmente en la exposición de otros trabajos sobre el tema estudiado. El objetivo de este capítulo es presentar la interpretación de trabajos que se han ocupado previamente de la cuestión central de esta tesis.

3.1. Metodología

Como parte del trabajo de esta tesis, se realizó una búsqueda ordenada y exhaustiva en la literatura existente de problemas que estén relacionados con los tratados aquí. Con el fin de reducir el sesgo que puede ocurrir al no tenerse en cuenta algunos trabajos, se plantea la necesidad de utilizar algún método que permita tener una visión general de la investigación. Se opta por utilizar la metodología de *Mapping Study*(MS) [35], que también es conocida como *Systematic Mapping Study* o *Scoping Study*. Se realiza un estudio de mapeo sistemático para categorizar y resumir la información existente sobre algunas preguntas que se plantearan. El mapeo sistemático es un método relevante para estructurar un campo de investigación, se puede considerar como una metodología que ofrece un mapa visual resumido de los trabajos relativos a un tema [36].

En el artículo "*Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*" [37], se señala que el MS es una revisión que utiliza la misma metodología que la *Systematic Literature Review* (SLR, tradicionalmente utilizada en el área de la Medicina) [38], cuyo objetivo es identificar y

clasificar toda la investigación relacionada con un tema. Además los autores de ese trabajo agregan que el MS proporciona una visión general de un área temática e identifica si hay temas con suficientes estudios primarios como para realizar una SLR. A su vez, identifica temas en los que se necesitan más estudios primarios y proporciona una visión global de la literatura. De esta forma, permite a los nuevos investigadores conocer que hay que leer en el área de interés y cuáles son los autores más importantes.

Un *Mapping Study* implica varias etapas y las mismas se presentan a continuación [39]:

- **Definición de la *Research Question*:** Las *Research Questions* son las preguntas que se plantean inicialmente para guiar la búsqueda de artículos [37]. Estas preguntas deben definirse cuidadosamente para cada estudio seleccionado. Estas preguntas extraídas dependen de los títulos de los artículos y los estudios relevantes [40] [41]. Los resultados obtenidos de este proceso ayudan a los investigadores en el campo específico para acceder a la información requerida lo más rápido posible. En nuestro caso nos podríamos plantear preguntas que tengan que ver con la temática de la optimización en la planificación de cosechas forestales. A efectos de este trabajo planteamos las siguientes preguntas, a la que le agregamos la mismas preguntas en inglés, ya que gran parte de la literatura está en ese idioma:

- *¿Cómo optimizar la planificación de las cosechas forestales? (How to optimize the planning of the forest harvests?)*
- *¿Como planificar de manera óptima la cosecha forestal? (How to plan optimally the forest harvest?)*

- **Creación de las cadenas de búsqueda:** Para poder crear las cadenas de búsqueda, es esencial determinar las palabras claves, que surgen a partir de las *Research Questions* antes planteadas. El número de trabajos y su relevancia para nuestro estudio de investigación depende de la selección de palabras clave adecuadas [42]. Además, es necesario seleccionar un conjunto de términos alternativos a las palabras claves que determinan, mediante la aplicación de conectivas booleanas, las cadenas de búsqueda. Las palabras claves que se podría usar serían:

Optimización, Planificación, Cosecha forestal, en la tabla 3.1 vemos los términos alternativos para las palabras claves elegidas, todas

en el idioma inglés. En 3.1 y 3.2 se muestran ejemplos de cadenas de búsqueda para las bibliotecas Science Direct y Scopus.

Listing 3.1: Ejemplo de cadena de búsqueda para la base Science Direct.

```
pub-date > 2011 and
TITLE-ABSTR-KEY(Optimization) and
TITLE-ABSTR-KEY(Planning or Scheduling) and
TITLE-ABSTR-KEY(Forest Harvesting or Forest harvest)
[All Sources(Agricultural and Biological Sciences,Computer Science,Decision
Sciences,Engineering,Mathematics)]
```

Listing 3.2: Ejemplo de cadena de búsqueda para la base Scopus.

```
TITLE-ABS-KEY ( optimization AND ( planning OR scheduling ) AND (
"forest harvest" OR "Forest Harvesting" ) ) AND PUBYEAR > 2011
AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA , "AGRI " ) OR LIMIT-TO (
SUBJAREA , "DECI " ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA , "COMP " ) OR
LIMIT-TO ( SUBJAREA , "ENGI " ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA ,
"MATH " ) )
```

Palabras claves	Términos alternativos
Optimization	-
Planning	Scheduling
Forest Harvesting	Forest harvest

Tabla 3.1: Términos alternativos (en inglés) para formar las cadenas de búsqueda

- **Selección de las bibliotecas digitales:** Se seleccionan las bibliotecas digitales sobre las cuales se realizan las búsquedas. En este estudio incluyen ScienceDirect, Scopus, SpringerLink, Reaxys y EBSCO, todas accesibles desde el portal Timbó de Uruguay.
- **Desarrollo de la estrategia de búsqueda:** En esta etapa se deciden los criterios que determinan la selección de los artículos encontrados a partir de las cadenas de búsqueda. Se busca trabajos publicados entre los años 2012 y 2017, en las siguientes áreas de interés: Agricultura, Ciencias de la decisión, Ingeniería, Ciencias de la Computación y Matemática. Se eligen los documentos (resúmenes, artículos, disertaciones y capítulos) que sean parte de publicaciones académicas arbitradas (revistas, *conference proceeding*, libros, tesis de posgrado, etc.)
- **Ejecución de la metodología:** Se realizan las búsquedas, aplicando las

cadena definidas sobre las bibliotecas digitales seleccionadas. Una vez que se obtienen los trabajos, se aplican los criterios de exclusión e inclusión para la selección de los mismos. Se filtró los trabajos recuperados de las búsquedas para excluir los no alineados con los objetivos del estudio. Como criterio de inclusión se consideraron estudios cuyo enfoque principal sea la planificación de cosecha forestal. Como criterios de exclusión, los documentos cuyo enfoque principal son los aspectos biológicos de las plantaciones, transferencia de carbono, previsión de incendios, manejos forestales a largo plazo, manejo silvícola, etc. El proceso de selección del estudio se ejecutó de esta manera: (i) se leen títulos y resúmenes, y se eliminan trabajos que no cumplieran con los criterios de inclusión; (ii) luego se descargan todos los documentos restantes, se leen su introducción y conclusión, y se eliminan los estudios que coincidían con los criterios de exclusión.

Como resultado de la búsqueda, se obtuvieron 130 trabajos, en la figura 3.1 se puede ver la gráfica de las cantidades de artículos encontrados en cada base, y cuantos fueron seleccionados luego de cumplir los criterios de inclusión. Sumando los trabajos seleccionados en cada fuente, resulta un número de 72 trabajos de interés.

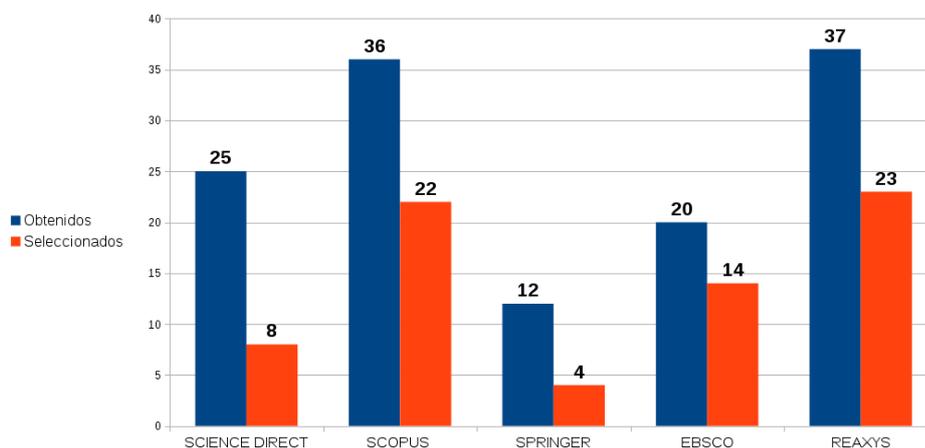


Figura 3.1: Cantidad de trabajos de cada base obtenidos en la búsqueda y la cantidad de trabajos luego seleccionados por cumplir los criterios de inclusión.

En la figura 3.2 se muestran las coincidencias de trabajos entre las distintas bases.

De los 72 trabajos seleccionados, eliminando los trabajos que se repiten

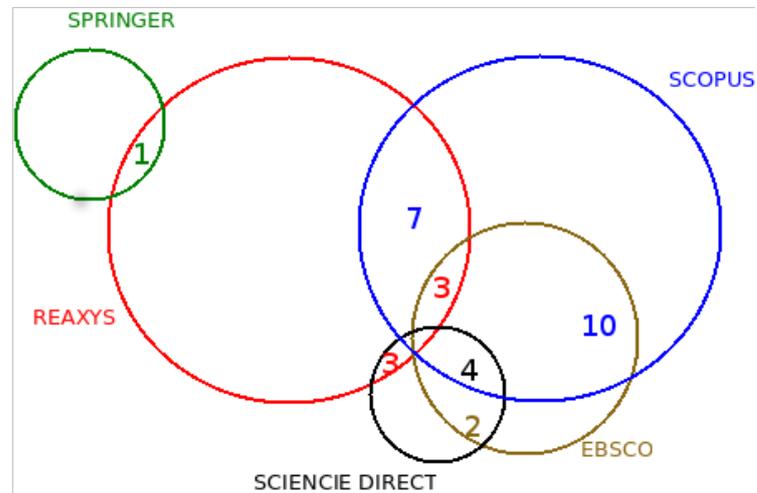


Figura 3.2: Gráfico con las coincidencias de trabajos entre las distintas bases.

entre dos bases o más tenemos 45 trabajos distintos. En la figura 3.3 se puede apreciar la distribución por año de publicación.

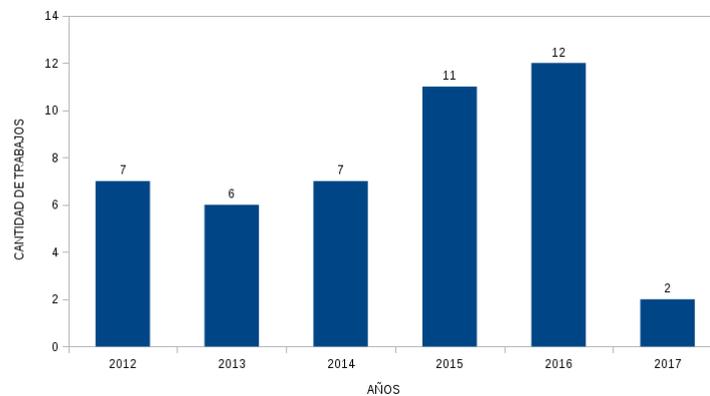


Figura 3.3: Distribución por año de la cantidad de trabajos seleccionados.

Si agrupamos los estos trabajos según la técnica de optimización utilizada, hay un gran porcentaje (más de la mitad) que utilizan la programación lineal entera, según se ve en la Figura 3.4. De los restantes trabajos, es también importante la presencia de trabajos que utilizan heurísticas específicas (18,8%). Otras técnicas importantes de Investigación de Operaciones están representadas pero en mucho menor proporción.

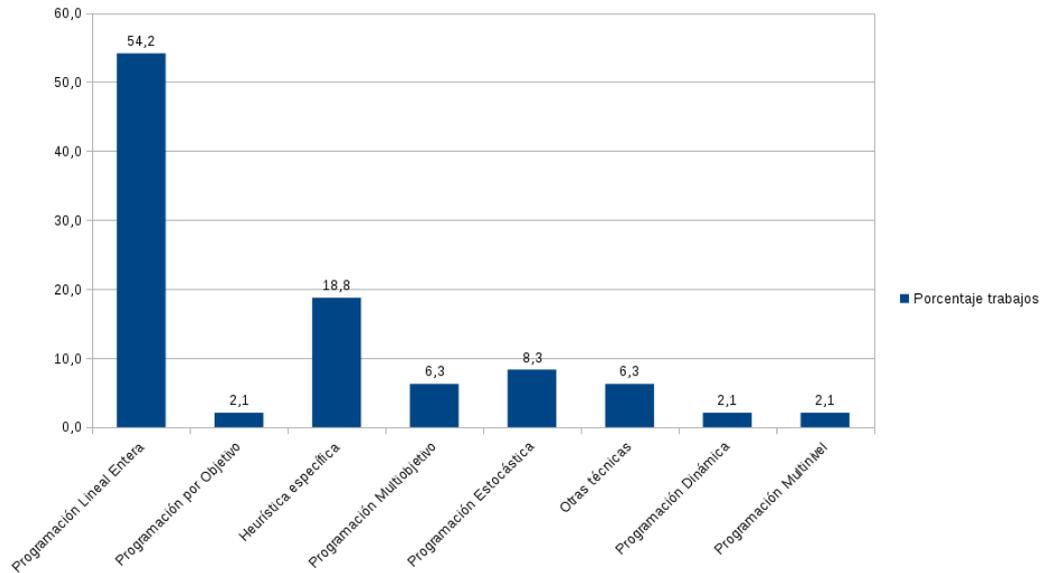


Figura 3.4: Porcentaje de artículos obtenidos de la búsqueda sistemática, que utilizan determinada técnica de optimización.

3.2. Comentario de los trabajos más destacados

A continuación se hará un breve comentario de cada trabajo seleccionado según los criterios de inclusión de esta revisión bibliográfica.

En Marques et al. [43] el estudio se centra en las decisiones de gestión forestal emprendidas por los propietarios de bosques industriales privados, en relación con la planificación forestal a mediano y corto plazo. Se describe problemas de decisión de planificación de cosecha táctica y operativa particulares, con énfasis en sus decisiones comerciales específicas, así como en los enfoques de modelado y solución que a menudo se encuentran en la literatura. Los problemas cubiertos incluyen: programación de operaciones de cosecha, asignación del equipos, secuencia de cosecha, adjudicación del servicio de cosecha y estrategias de clasificación. Se aborda además los problemas de planificación integrada, distinguiendo entre los problemas con las decisiones de anticipación, utilizados para acomodar el impacto sobre o desde otros problemas de planificación, y los problemas completamente integrados con más de un tipo de decisiones comerciales.

Las actividades de planificación de los equipos de cosecha (*harvester* y *forwarder*) y el transporte son fundamentales para la adquisición eficiente de

madera de los bosques hasta las fábricas. El proceso de planificación implica muchas decisiones integradas que consideran los aspectos de proceso, espaciales y temporales. El aspecto espacial se refiere a qué área se debe cosechar, a qué equipo de la máquina utilizar, a la fábrica a la que se asignará la madera y dónde almacenar la madera. El aspecto temporal se refiere a cuándo cosechar, cuándo transportar para satisfacer la demanda específica y cuándo almacenar la madera. Las decisiones temporales también incluyen la determinación de un cronograma detallado para cada equipo de cosecha. Esto es complicado porque el equipo de cosecha tiene diferentes bases de operaciones y diferentes sistemas de máquinas con sus descripciones y capacidades de rendimiento específicas. El problema de planificación general puede formularse en un modelo de optimización, pero dicho modelo es demasiado grande para su uso práctico y no puede resolverse en un tiempo razonable. Frisk et al. [44] proponen un esquema de descomposición en el que se resuelve una secuencia de modelos agregados, o partes limitadas del modelo, para encontrar rápidamente soluciones de alta calidad.

En el trabajo de Linfati-Medina et al. [45], se modela y resuelve el problema de planificación táctica en la cosecha forestal, considerando diferentes rodales, canchas de trozado y el reemplazo de productos. En este estudio, se consideró una empresa forestal que dispone de terrenos con bosques para explotar y satisfacer la demanda de aserraderos, celulosa y la exportación. Desde las canchas de trozado, se realiza el envío de productos a cada destino. Para resolver el problema de planificación táctica en la cosecha forestal, se selecciona la regla de trozado más apropiada para cada uno de los rodales a cosechar, de modo de generar los productos requeridos cumpliendo con la demanda y maximizando las utilidades totales. Además, se considera la posibilidad de entregar al cliente un producto de mejor calidad que lo solicitado siempre y cuando el producto a enviar cumpla con los requerimientos.

El problema fue formulado como un problema de programación lineal entera mixta (PLEM), con las siguientes decisiones para cada uno de los periodos:

- Qué áreas cosechar en cada uno de los períodos, qué cantidad de rollizos producir.
- Regla de trozado a utilizar en cada uno de los rodales a cosechar.
- Qué canchas de trozado que abastecerán total o parcialmente cada uno de los clientes.

- Niveles de stock.
- Cantidad de productos entregado a los clientes.

Las restricciones naturales del problema son las siguientes:

- Disponibilidad de rodales para cosechar, cada uno con su regla de trozado.
- La demanda debe ser satisfecha completamente en el periodo requerido.
- Capacidad máxima de stock, en canchas (con un stock inicial) y períodos.
- Inventario inicial de cada producto en cada cancha.
- Envío de materia prima entre los rodales y canchas de trozado.

Como resultado se obtuvo un modelo matemático de PLE Mixta que permite hacer un análisis de la solución obtenida y proponer: mercados o clientes para los excesos de productos; precios mínimos de venta para estos productos; precios y volúmenes a pagar por productos a otros proveedores y análisis de escenarios para evaluar la inversión en nuevos activos.

Kangas et al. [46] realizan un estudio donde las cosechas forestales deben agruparse en el tiempo y en el espacio. Se aplica dando a cada subregión de Finlandia los objetivos que deben cumplir en un proceso de planificación de nivel táctico, y las cosechas se agrupan manualmente en grupos predefinidos de rodales (departamentos) adyacentes. Para cada uno de los departamentos, se determinaron 91 diferentes programas (planes) de cosecha a nivel de planta usando los ingresos de un período y el valor del bosque al final como objetivos. El plan jerárquico agrupó las cosechas y logró los objetivos establecidos mejor que un plan de referencia preestablecido.

En otros trabajos como el de Ouhimmou et al. [47], se aborda el problema de la selección de las áreas de cosecha y la asignación de madera a las fábricas en la planificación táctica (horizonte de planificación de 5 años). Se desarrolló un enfoque multiobjetivo, para minimizar los costos (considerando numerosos criterios: costo de adquisición, distancia de transporte, costo de transporte, acceso en periodos de nieve o lluvia, volumen de la madera obtenida, presupuesto de silvicultura, porcentaje de certificación y dispersión espacial) y minimizar la dispersión de las áreas a ser cosechadas.

Respecto a los métodos exactos para resolver problemas de manejo forestal utilizando restricciones de área, Martins et al. [48] describen un enfoque de *branch-and-price* para el modelo de *clúster* [49], mostrando que esta formulación mejora la del modelo de *bucket* [50]. El algoritmo se probó en bosques

reales e hipotéticos que variaban de 45 a 2945 rodales y se emplearon horizontes temporales de tres a doce períodos. Los resultados muestran que las soluciones obtenidas por el enfoque propuesto estuvieron dentro del 1 % de la solución óptima y se lograron en un tiempo de cálculo corto.

St. John and Tóth [51] proponen un enfoque fundamentalmente diferente en la programación de la cosecha forestal, que define los volúmenes de los rodales y los ingresos obtenidos de la madera cosechada como variables y utiliza ecuaciones diferenciales y álgebra de Boole para las unidades forestales de transición de un período de planificación a otro. Muestran a través de tres conjuntos de experimentos computacionales que este nuevo modelo es una alternativa computacionalmente prometedora.

Las formulaciones exactas actualmente desarrolladas para problemas de programación de cosecha con restricciones espaciales, consideran solo una cosecha a lo largo del tiempo para unidades forestales individuales. Yoshimoto and Konoshima [52] proponen un nuevo método para formular este problema, permitiendo cosechas múltiples a lo largo del tiempo, mediante el uso de álgebra matricial común. Se utiliza una matriz de adyacencia espacial para la ubicación de las unidades forestales, y una matriz de adyacencia de actividad reciente, introducida para identificar actividades concurrentes de cosecha en un conjunto de posibles tratamientos para una unidad forestal. El producto Kronecker de estas dos matrices de adyacencia se usa para generar todas las restricciones de adyacencia para tratamientos entre todas las unidades forestales para evitar cosechas adyacentes.

Uno de los mayores desafíos que enfrentan los administradores forestales en la planificación forestal está relacionado con los problemas logísticos de la cosecha forestal. La planificación operativa debe considerar simultáneamente las preocupaciones económicas y ambientales, buscando aumentar la eficiencia y mitigar el daño ambiental. La inclusión de aspectos espaciales en la cosecha forestal se realiza generalmente a través de restricciones de adyacencia. Los principales enfoques para resolver este tipo de problema son los modelos ARM (Modelo de Restricción de Área) y URM (Modelo de Restricción de Unidad). En este contexto, Augustynczyk et al. [53] realizan el estudio de la planificación forestal optimizada de 236 rodales de *Pinus taeda* y *Eucalyptus sp.*, incorporando restricciones clásicas como área disponible, flujo de madera, entre otros, y restricciones ARM y URM, evaluando sus efectos en los resultados de la optimización. Es posible concluir que los enfoques modelo ARM y URM

son alternativas viables para resolver problemas de programación de cosecha forestal, siendo el enfoque ARM más adecuado para este caso de estudio, debido a la posibilidad de una mayor rentabilidad respetando las áreas de cosecha máxima.

La asignación de rodales para cosechar es una tarea difícil, dada la complejidad de las operaciones de coordinación y porque la cosecha contribuye mucho al costo total de la producción de madera. Tradicionalmente, las políticas de cosecha forestal han pretendido minimizar las áreas sin talar, llevando a la fragmentación de la cosecha, y han reducido así el hábitat del bosque interior y afectado negativamente la eficiencia operativa. Augustynczyk et al. [54], propone dos estudios:

- incluir la conectividad de los predios a cosechar en un modelo de planificación forestal, y
- evaluar los impactos de reforzar la conectividad en los resultados económicos.

Se aplicaron dos enfoques de agrupamiento de la cosecha:

- un modelo basado en el problema del árbol de expansión mínimo para reforzar la conectividad de recolección y
- un enfoque de *Simulated Annealing* [55] para la consideración simultánea de la conectividad de los sitios de cosecha y el flujo de madera.

El proceso de optimización redujo el radio medio de cosecha y aumentó el área promedio cosechada, reduciendo así los costos marginales.

Las técnicas heurísticas se han utilizado cada vez más para abordar los complejos problemas de planificación forestal en las últimas décadas. Sin embargo, estas sólo pueden proporcionar soluciones aceptables para problemas difíciles, en lugar de garantizar que se ubicará la solución óptima. Dong et al. [56] evalúan sistemáticamente el rendimiento de un algoritmo *Simulated Annealing* con tres variantes: búsqueda de vecindarios, búsqueda híbrida y búsqueda de reversión.

El uso de una técnica de reversión durante el proceso de búsqueda con una metaheurística ha recibido poca atención en el manejo forestal y los problemas de planificación. La reversión implica la interrupción de la secuencia de eventos que se utilizan para explorar el espacio de solución y la reiniciación del proceso de búsqueda desde un punto de partida conocido de alta calidad.

Bettinger et al. [57] exploraron cuatro tipos de reversión cuando se aplican a tres tipos diferentes de metaheurísticas, demostrando que son prometedoras para un problema de planificación forestal explorado.

Otro trabajo como el de Fonseca et al. [58], muestra la planificación del raleo y cosecha forestal en zonas públicas teniendo en cuenta 1) la edad óptima de los árboles para la corta, 2) la densidad máxima permitida de masa, 3) el volumen mínimo a cortar, 4) la garantía de ingresos para cada uno de los rodales en un período de al menos dos años, 5) ingresos equilibrados durante la duración del período de cosecha. Se utilizó programación lineal entera (PLE) para abordar el problema, buscando maximizar los ingresos relacionados con el raleo y cosecha, teniendo en cuenta las limitaciones mencionadas anteriormente.

La planificación estratégica de la cosecha forestal y conservación de especies son dos enfoques antiguos pero que a menudo no son tratados en conjunto. Marshalek et al. [59] utiliza un modelo de programación entera para comparar el rendimiento de la cosecha en diferentes paisajes simulados con diferentes valores de diversidad de especies. Se exploran tres clases de planes de reserva de bosques y cosecha: óptimo, aleatorio y fijo. Este trabajo concluye que los planes de cosecha sin una reserva fija de bosques salvan más especies que los que sí la tienen.

La planificación de la cosecha forestal para maximizar los beneficios económicos también debe considerar criterios adicionales, como el funcionamiento de la biodiversidad del bosque gestionado. Los requisitos de biodiversidad están determinados por el tamaño, la forma y la distribución de las unidades de cosecha y los rodales forestales. Kašpar et al. [60] presentan un enfoque de criterios múltiples donde se maximiza el volumen de cosecha, mientras que también se consideran los aspectos ambientales. Este modelo incluye restricciones espaciales estrictas, funciones objetivo múltiples con tres objetivos y soluciones alternativas de acuerdo con la prioridad real del administrador. Los resultados muestran que el patrón espacial y otras demandas espaciales afectan las posibilidades de cosecha. Siguiendo esta misma línea de investigación, los mismos autores en otro trabajo, Kašpar et al. [61], presentan un nuevo modelo de programación de cosecha con restricciones espaciales con el objetivo de maximizar el valor actual neto y concentrar los lugares de cosecha en cada período.

Para la protección del hábitat de la vida silvestre en los modelos de programación de cosecha, una forma de abordar las cuestiones de conservación

consiste en exigir que se mantengan grandes parcelas contiguas de bosque sin cosechar. Carvajal et al. [62] presentan una nueva metodología de programación entera y prueba su implementación en cinco instancias de bosques medianos disponibles públicamente. Este enfoque permite obtener soluciones casi óptimas para múltiples instancias de período de tiempo razonables.

Los modelos de optimización utilizados para la planificación forestal pueden ser computacionalmente complejos y los datos forestales reales para probarlos son muy demandados. Muchas veces se utilizan casos hipotéticos de plantaciones forestales, aunque su capacidad para adaptarse a las características reales es limitada y ofrecen poco control sobre las métricas importantes, como la adyacencia de los rodales. Passolt et al. [63] describen un nuevo método para generar casos hipotéticos con características especificadas. El nuevo método puede producir paisajes con una amplia gama de especificaciones, cubriendo las características de las plantaciones reales y extendiéndose a casos extremos que es poco probable que se encuentren en la realidad. Al mismo tiempo, el método proporciona una mayor flexibilidad y control sobre los paisajes generados que los métodos anteriores.

La combinación de la simulación de rodales y optimización es una forma eficiente de estudiar los escenarios de cosecha de un área forestal. Lappi et al. [64] desarrollan un simulador que genera para cada unidad de cosecha una cantidad de programas de tratamiento. La programación lineal (PL) se puede utilizar para estudiar cómo se pueden combinar los programas de nivel del rodal en un esquema más grande considerando objetivos y limitaciones alternativos.

Vopěnka et al. [65] muestran el desarrollo de la herramienta Optimal, una extensión de ArcGIS® que devuelve la distribución espacial de las unidades para cada período de cosecha. Esta permite a los administradores forestales crear y explorar varios escenarios y aumentar la eficiencia en la programación de la cosecha forestal. La herramienta está conectada al software de optimización GUROBI®, y facilita el diseño espacial y temporal de las unidades de cosecha. Esta solución proporciona una forma efectiva de crear escenarios de programación de cosecha forestal.

También Chung et al. [66] desarrollan el software llamado SNAP para ArcGIS®, que se ha desarrollado para agilizar la programación y la planificación del transporte para las áreas de cosecha de madera. Utilizando modernas técnicas de optimización, se puede utilizar para programar espacialmente la cosecha de madera teniendo en cuenta los costos de cosecha, productos múltiples,

destinos alternativos y sistemas de transporte. SNAP para ArcGIS® intenta maximizar un valor presente neto o minimizar los costos descontados de la cosecha y el transporte en el horizonte de planificación, al mismo tiempo que cumple con el volumen de cosecha y las limitaciones de superficie. SNAP proporciona una herramienta analítica fácil de usar para una planificación espacial sofisticada de la cosecha de madera.

Solokov y Syuney [67] introducen una descripción de nuevas herramientas para las empresas forestales, como ser herramientas de optimización para el ruteo y la planificación de equipos de cosecha, secuencia de cosechas, estimación de biomasa y la planificación de las redes de caminos. Los resultados muestran que el conjunto de herramientas se puede utilizar para admitir un amplio rango de planificación de las decisiones en el nivel de la empresa.

También otro trabajo, Augustynczyk et al. [68], muestran que las operaciones de cosecha son más eficientes cuando las áreas se agrupan. Con ello, es posible reducir el desplazamiento de maquinaria y los costos relacionados con la construcción y mantenimiento de caminos. En este contexto, el objetivo del estudio fue evaluar diferentes estrategias para la agrupamiento de los rodales en una plantación forestal. Se aplicaron dos enfoques: uno con *Goal Programming* [69], con el objetivo de seleccionar las áreas a cosechar y un modelo de PLE para incluir las inversiones viales en la planificación estratégica forestal.

En el artículo de Bachmatiuk et al. [70] se analiza el desempeño de diferentes implementaciones de *Simulated Annealing* para resolver el problema de la maximización del Valor Actual Neto (VAN) de la madera cosechada. Presentan una comparación del desempeño de la implementación típica de la heurística con la implementación donde se cambian hasta tres opciones de decisión simultáneamente en cada iteración. Además se compara los resultados de la heurística con una formulación MIP.

Kašpar et al. [71] también comparan la programación entera y *Simulated Annealing* para planificar la cosecha (elección de áreas a cosechar). Se creó un modelo matemático simple para la optimización de la cosecha para un período de 30 años (de 10 años cada uno). Se analizaron las relaciones de vecindad entre las áreas a cosechar y se crearon restricciones espaciales para el modelo utilizando una matriz de adyacencia. Se comparan las aplicaciones de ambos métodos de optimización en la planificación de la cosecha forestal.

En la misma tónica, según Smaltschinski et al. [72], la agrupación de los sectores de cosecha forestal reduce los movimientos de la maquinaria y del

personal. Además, se simplifica el posterior transporte de la madera comparado a cuando los rodales están dispersos. Este estudio desarrolló un método analítico para agrupar las cosechas con respecto a la red espacial de caminos. La distancia euclidiana es sustituida por el camino más corto entre los rodales. Este método de agrupación se basa en un árbol de expansión mínimo. Se aplica la triangulación de Delaunay [73] para llenar la matriz de distancia que reduce el tiempo de cálculo de las mismas de $O(n^2)$ a $O(n)$. Con esto se logra que unidades de cosecha estén adecuadamente agrupadas espacialmente por el método implementado, donde los obstáculos topográficos pueden evitarse automáticamente y la necesidad de reubicar la maquinaria se reduce, así como la distancia total de transporte.

Las limitaciones espaciales y ambientales en los problemas de optimización del manejo forestal, se han convertido en un desafío para los investigadores, principalmente debido a la naturaleza combinatoria de estos problemas. Moreira et al. [74] desarrolla un modelo de PLE Mixta que garantiza una conectividad mínima entre áreas naturales fragmentadas al tiempo que maximiza el beneficio o la producción de las plantaciones forestales industriales.

Lograr el equilibrio y la sostenibilidad de la cosecha para minimizar la fragmentación de los ecosistemas forestales es importante. A partir de los análisis presentados en el estudio de Marušák et al. [75], se presenta un modelo de programación entera multiobjetivo de cosecha que minimiza la fragmentación y maximiza el área cosechada.

Los bordes en los bosques creados luego de una cosecha alteran el paisaje y pueden afectar muchos factores ambientales. Estos factores ambientales alterados tienen una variedad de impactos sobre el crecimiento y la estructura del bosque, pueden cambiar los rendimientos de la cosecha y el hábitat de la vida silvestre. Ross and Tóth [76] presentan un modelo de planificación de la cosecha que puede realizar un seguimiento y controlar el desarrollo espacio-temporal de los bordes del bosque. Esto permite que el analista de recursos forestales imponga limitaciones a la producción de bordes en un intento por cumplir una variedad de objetivos de producción y sostenibilidad.

Könnyű y Tóth [77] describen un algoritmo de planos de corte [78] [79] [80] para un problema de programación entera que surge en la programación de la cosecha forestal. Una de las restricciones más comunes es que el área contigua a las cosechadas no exceda un máximo en un periodo de tiempo determinado. Estas restricciones denominadas de adyacencias hacen que el problema de pla-

nificación de la cosecha sea combinatorio y muy difícil de resolver. El algoritmo de plano de corte propuesto se inicia con un modelo sin restricciones de área y añade restricciones sólo si se produce una violación durante la optimización. Dado que las violaciones son menos probables si el área máxima es grande, el número de restricciones se reduce al mínimo.

En este contexto, la investigación de da Silva et al. [81] buscó formular con PLE la aplicación del algoritmo de Floyd-Warshall [82] para generar rutas de producción maderera, minimizando los costos de producción resultantes de las actividades de cosecha y mantenimiento de caminos forestales. Los escenarios fueron simulados considerando el horizonte de planificación de cinco años con periodicidad anual.

Manning y McDill [83] examinaron los ajustes de parámetros óptimos para mejorar la eficiencia de resolución de modelos de planificación de cosecha con restricciones de adyacencia utilizando la herramienta de ajuste optimizador Cplex® 11.2 de Ilog. Un total de 640 conjuntos de problemas se utilizaron para determinar la configuración óptima de los parámetros y luego se resolvieron tanto en la configuración predeterminada como en la óptima. En general, el tiempo de solución promedio fue menor para un conjunto de problemas determinado utilizando los parámetros óptimos en comparación con los parámetros predeterminados. Los resultados discutidos proporcionan un enfoque simple para disminuir el tiempo de solución de resolver problemas de planificación de cosechas con restricciones de adyacencia.

Fotakis et al. [84] introduce el operador espacial para algoritmos genéticos, con el fin de mejorar su eficiencia para la planificación multiobjetivo de la cosecha forestal. En un problema típico de planificación de cosecha con dos objetivos: a) maximizar el volumen de madera y b) minimizar los niveles de sedimentos. Se utiliza NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) como un algoritmo genético estándar para la integración y la evaluación de la metodología propuesta. Este enfoque ofrece posibles aplicaciones a un amplio espectro de problemas de planificación espacial en la cosecha forestal.

Pasando al tema de transporte, según Bont [85] la red de caminos es la columna vertebral del manejo forestal. Al crear o rediseñar una red de caminos forestales, una cuestión importante es fijar la disposición espacial y el estándar de dimensionamiento de esos caminos. En este trabajo se consideran dos tipos de problemas, en primer lugar la construcción de la nueva red de caminos forestales en un área sin tal desarrollo aún, y en segundo lugar el rediseño

de la red de caminos existentes para nuevas restricciones. Para cada situación del problema se presenta un método que permite detectar automáticamente el diseño óptimo de carreteras y de la planificación de cosechas. El método tiene como objetivo identificar una red de caminos que simultáneamente minimice el costo de cosecha, el costo de la construcción y mantenimiento y el costo de transporte durante todo el ciclo de vida.

En el trabajo de Najafi y Richards [86] se presenta un modelo de optimización con PLE Mixta para diseñar un sistema de caminos forestales para los camiones y otros de acceso a los rodales para maquinaria de cosecha. La red diseñada es jerárquica, dado que los dos tipos de vehículos requieren estándares de caminos significativamente diferentes, y la madera sólo puede ser transferida de los accesos a los rodales a caminos forestales, y ser transportada de los sitios de cosecha a los puntos de salida que conectan la red de caminos forestales con las rutas públicas. El modelo minimiza el costo total de construcción y mantenimiento de carreteras. Se puede utilizar para desarrollar alternativas de sistemas viales para apoyar el proceso de planificación del sistema de acceso total.

Las decisiones de construcción de carreteras y de planificación de la cosecha se basan principalmente en estimaciones de madera disponible que se sabe que contiene errores. Palma et al. [87] presentan una formulación robusta de un problema de construcción de caminos y planificación de cosechas, de varios periodos en el que se busca protección contra la infactibilidad de demanda mínima a pesar de la existencia de estimaciones de madera, que se definen como rangos continuos de valores en lugar de estimaciones puntuales (como suele ser el caso) en este tipo de problemas.

Flisberg et al. [88] desarrollan un modelo integrado para la planificación táctica de cosecha y logística durante varios años. Se incluye tanto la mejora de los caminos como el transporte entre las áreas de cosecha y las industrias. Lo primero es particularmente importante cuando se trata de problemas de acceso cuando existe deshielo o fuertes lluvias.

En Meignan et al. [89], se presenta un procedimiento de búsqueda adaptativa randomizada (GRASP) [90] para resolver un problema similar al anterior. La heurística se implementó en un sistema de apoyo a la decisión, y se realizaron experimentos con instancias reales y generadas al azar para demostrar el rendimiento y la eficiencia práctica del enfoque propuesto. Una comparación con redes de caminos forestales diseñadas manualmente muestra una clara ven-

taja para el método propuesto. En otro trabajo más reciente [91] los mismos autores presentan un sistema de planificación interactivo para la ubicación de caminos forestales. Este sistema de apoyo a la toma de decisiones se basa en un enfoque heurístico denominado búsqueda interactiva de *large neighborhood*. El objetivo de este proceso de optimización cooperativa es explotar la experiencia del usuario en el dominio del problema, por un lado para guiar la búsqueda de una solución hacia partes intuitivamente interesantes, y por otro lado generar soluciones más prácticas que integran aspectos del problema de decisión que no son capturados por la función objetivo.

Predecir la disponibilidad de materias primas en cada rodal junto con la demanda de madera es difícil. Por lo tanto, la incorporación de la incertidumbre en el problema de planificación de cosecha es esencial para obtener planes que no fluctúen drásticamente en el futuro. En Bajgiran et al. [92], se propone un modelo robusto de planificación de la cosecha formulado a partir del método de restricción de cardinalidad. Este último proporciona algunas ideas sobre el ajuste del nivel de robustez del plan de cosecha sobre el horizonte de planificación y la protección contra la incertidumbre. También se realiza un conjunto de experimentos basados en la simulación de *Monte Carlo* para validar mejor el enfoque de optimización propuesto.

Una fuente sustancial de incertidumbre puede medirse comparando sistemáticamente los rendimientos históricos con las proyecciones para un gran número de operaciones de cosecha. Para Robinson et. al [93] estas comparaciones pueden representarse como una distribución de los rendimientos futuros potenciales, que pueden utilizarse de diversas maneras. En primer lugar, se puede utilizar para calcular la probabilidad de lograr al menos un rendimiento mínimo esperado, lo que permite tomar decisiones de manejo forestal basadas en el riesgo. En segundo lugar, la medida de la incertidumbre puede ser utilizada como una penalización en la función objetivo durante la optimización, lo que permite diseñar planes de recolección robustos a la incertidumbre. Tercero, la medida de la incertidumbre puede ser minimizada en la función objetivo. Eyvindson y Kangas [94] desarrollan específicamente los modelos utilizados en el artículo anterior y demuestran un método para manejar el riesgo a la baja.

Veliz et al. [95] considera importante el problema de la planificación forestal a mediano plazo con un enfoque integrado, considerando tanto las decisiones de cosecha como las de construcción de caminos en presencia de incertidumbre. Se utiliza un modelo de múltiples etapas demostrando que un método de

descomposición basado en escenarios (*progressive hedging*) es competitivo con con las soluciones directas (sin tener en cuenta la incertidumbre).

Garcia-Gonzalo et al. [96] proponen incorporar las variaciones en el crecimiento y el rendimiento de la madera debido a la incertidumbre del cambio climático en el proceso de decisión de cosecha forestal, lo que hace al modelo útil para apoyar las decisiones de los planificadores forestales bajo la incertidumbre climática. Muchas veces la programación de la cosecha forestal es un ejercicio de gestión complicado debido a los usos diversos y competitivos de los recursos forestales, como la productividad económica, la áreas reservadas para la recreación y la sostenibilidad de la flora y la fauna. En un esfuerzo por garantizar la viabilidad a largo plazo de los recursos forestales, las restricciones generalmente se colocan en el tamaño de las áreas de cosecha, las rotaciones de cosecha y la proximidad entre las áreas intervenidas, Wei et al. [97] desarrolla nuevos modelos de optimización que explican explícitamente la incertidumbre espacial en la programación de cosecha. Los resultados de las aplicaciones demuestran la efectividad de esta nueva perspectiva.

Referencia	Objetivos	Técnicas usadas
Marques et al., 2014 [43]	Planificación de cosecha táctica y operativa	PLE
Frisk et al., 2016 [44]	Planificación de los equipos de cosecha y transporte	PLE Mixta
Linfati-Medina et al., 2016 [45]	Planificación táctica en la cosecha forestal considerando demanda de productos finales	PLE Mixta
Kangas et al., 2014 [46]	Planificación táctica de cosecha, agrupadas en tiempo y espacio	Programación Estocástica
Ouhimmou et al., 2015 [47]	Planificación táctica, selección de las áreas de cosecha y asignación de madera a las fábricas	Programación multiobjetivo
Martins et al., 2015 [48]	Algoritmo <i>branch-and-price</i> para la asignación de lugares de cosecha	PE

St. John and Tóth, 2015 [51]	Programación de la cosecha forestal	Ecuaciones diferenciales, Álgebra de Boole
Yoshimoto and Konoshima, 2016 [52]	Programación de cosecha con restricciones espaciales	Álgebra matricial, PLE
Augustynczyk et al., 2015 [53]	Planificación de cosecha con restricciones ARM y URM	PLE
Augustynczyk et al., 2016 [54]	Planificación con agrupamiento de cosecha	<i>Simulated Annealing</i> , Algoritmo para hallar árbol de recubrimiento mínimo
Dong et al., 2016 [56]	Evaluación de variantes en una heurística	<i>Simulated Annealing</i>
Bettinger et al., 2015 [57]	Evaluación de 4 tipos de reversión a 3 heurísticas distintas	Meta-heurísticas con variantes
Fonseca et al., 2012 [58]	Planificación de raleo y cosecha forestal	PLE
Marshalek et al., 2014 [59]	Rendimiento de la cosecha en paisajes simulados	PLE
Kašpar et al., 2015 [60]	Programación de cosecha con restricciones espaciales	Programación multiobjetivo
Kašpar et al., 2016 [61]	Programación de cosecha con restricciones espaciales	PLE
Carvajal et al., 2013 [62]	Programación de cosecha con restricciones de conectividad	PLE
Passolt et al., 2013 [63]	Generación de casos hipotéticos para planificación de cosecha	Teselación de Voronoi
Lappi et al., 2014 [64]	Simulación de escenarios de cosecha	PL
Vopěnka et al., 2015 [65]	Desarrollo de aplicación Optimal	PL
Tambien Chung et al., 2012 [66]	Desarrollo de aplicación SNAP	PL
Solokov y Syuney, 2014 [67]	Desarrollo de sistema de optimización para el ruteo y la planificación de cosecha	Programación dinámica

Augustynczyk et al., 2016(b) [68]	Evaluación de estrategias de agrupamiento de lugares de cosecha	Programación por objetivos
Bachmatiuk et al., 2015 [70]	Maximización del Valor Actual Neto (VAN) de la madera cosechada	<i>Simulated Annealing</i>
Kašpar et al., 2013 [71]	Comparación programación entera y <i>Simulated Annealing</i> para la planificación de cosecha	<i>Simulated Annealing</i> , PLE
Smaltschinski et al., 2012 [72]	Agrupación de los sectores de cosecha forestal	Algoritmo para hallar árbol de recubrimiento mínimo
Moreira et al., 2013 [74]	Modelo de conectividad máxima entre áreas forestales fragmentadas	PLE Mixta
Marušák et al., 2015 [75]	Minimizar la fragmentación y maximizar el área cosechada	Programación multiobjetivo
Ross and Tóth, 2016 [76]	Planificación con control de bordes en las áreas de cosecha	PLE Mixta
Könnyű y Tóth, 2013 [77]	Programación de cosecha con restricciones de adyacencia	PLE
da Silva et al., 2016 [81]	Generación de rutas de producción maderera	PLE
Manning y McDill, 2016 [83]	Ajustes de parámetros para mejorar la eficiencia de resolución de problemas de cosecha con restricciones de adyacencia	PLE
Fotakis et al., 2012 [84]	Planificación multiobjetivo de la cosecha forestal	Algoritmo Genético
Bont, 2016 [85]	Diseño de caminos forestales y planificación de cosecha	PLE Mixta
Najafi y Richards, 2013 [86]	Diseño de caminos forestales y acceso de la maquinaria a los rodales	PLE Mixta
Palma et al., 2014 [87]	Diseño de caminos forestales y planificación de cosecha, teniendo en cuenta infactibilidad de demanda	Programación estocastica

Flisberg et al., 2014 [88]	Diseño de caminos forestales y planificación de cosecha considerando problema de acceso a los rodales	PLE
Meignan et al., 2012 [89]	Diseño de caminos forestales	GRASP
Meignan et al., 2015 [89]	Sistema de planificación interactivo para la ubicación de caminos forestales	Heurística de búsqueda interactiva
Bajgiran et al., 2016 [92]	Planificación de la cosecha formulado a partir del método de restricción de cardinalidad	Programación estocástica
Robinson et. al, 2016 [93]	Comparación de rendimientos históricos con proyecciones de cosecha	PLE
Eyvindson y Kangas, 2017 [94]	Comparación de rendimientos históricos con proyecciones de cosecha	PLE
Veliz et al., 2015 [95]	Planificación forestal de cosecha y construcción de caminos forestales	Programación multinivel, Programación estocástica
Garcia-Gonzalo et al., 2016 [96]	Planificación de la cosecha considerando efectos del cambio climático	PLE
Wei et al., 2013 [97]	Planificación de cosecha teniendo en cuenta la incertidumbre espacial	PLE

Tabla 3.2: Resumen de los trabajos más destacados sobre planificación y optimización de cosecha forestal.

3.3. Conclusiones

En este capítulo se presenta un resumen de los trabajos encontrados sobre la optimización en la planificación de la cosecha forestal. Se hace uso de un estudio de mapeo sistemático como metodología de búsqueda. De varias bibliotecas digitales, se obtienen 130 documentos en total, y se seleccionan 45 trabajos como estudios primarios relacionados con el tema principal. Los resultados proporcionan una visión general de los estudios pertinentes existentes que se encuentran en la literatura. Si bien los trabajos de Marques et al. [43] y

Frisk et al. [44] plantean el tema de asignación de los lugares para cosechar a diferentes equipos, ninguno de estos trabajos contemplan el recorrido de estos equipos durante la temporada completa de cosecha, punto importante en este trabajo de tesis. De los restantes estudios, ninguno corresponde exactamente al problema planteado en la tesis.

El uso de los modelos de optimización permite beneficios en distintas etapas esenciales de la gestión forestal, sobre todo en la cosecha. Este relevamiento permite ver el tipo de técnicas utilizadas por los investigadores (Programación Lineal Entera, Programación Multiobjetivo, Heurísticas, etc.), siendo la Programación Lineal Entera la más utilizada.

Capítulo 4

Materiales y métodos

En esta sección, desarrollamos el modelo de optimización incluyendo algunas suposiciones. Dado que los equipos de cosecha forestal parten desde sus bases de operaciones respectivas y regresan a ellas una vez completadas todas las cosechas asignadas, y como cada bloque de cosecha será visitado por un solo equipo durante todo el periodo, se encontró una gran similitud de nuestro problema con el Problema de Múltiple Vendedor Viajero con Múltiples Depósitos (MmTSP) [98] con destinos fijos. En el MmTSP con destino fijo los vendedores parten de varias ciudades de origen (o depósitos, dependiendo del contexto del problema) y regresan a las mismas, formando recorridos para que cada ciudad o cliente sea visitado exactamente por un vendedor y las duraciones de esas visitas permanezcan dentro de ciertos límites [99].

4.1. Problemas y supuestos de modelado

En el modelo planteado se propone resolver el problema que consiste en determinar los recorridos a realizar por los diferentes equipos de cosechas pertenecientes a cada contratista forestal, a través de los diferentes bloques que están disponibles para la cosecha en ese año; minimizando los costos de transportes entre los distintos bloques de cosecha y las bases de operaciones.

En la figura 4.1 se muestra un ejemplo de esquema de recorridos que realizan 4 equipos a los lugares de cosecha. En este ejemplo, se observan dos bases de operaciones (que pueden corresponder a dos contratistas forestales distintos) con dos equipos cada uno.

Como se mencionó en la sección 1.2 cada bloque debe ser cosechado en

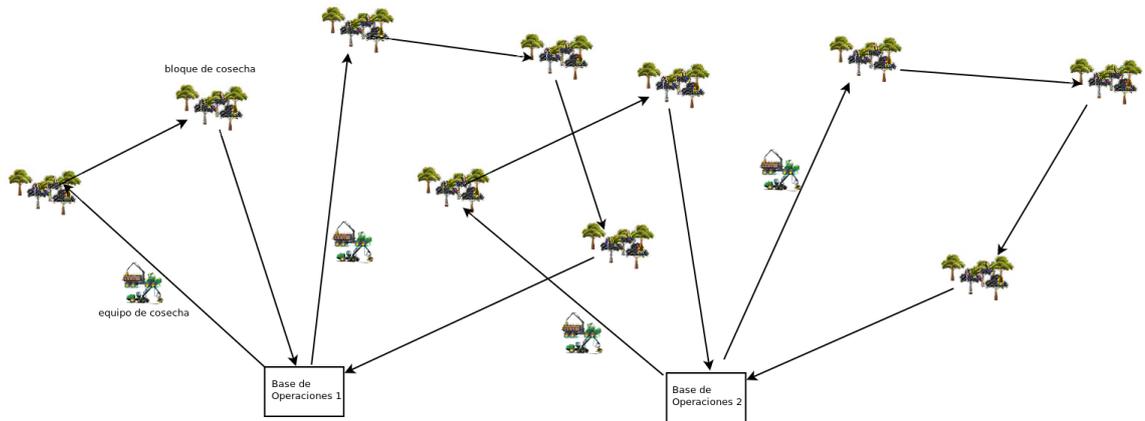


Figura 4.1: Recorridos a realizar de los diferentes equipos de cosecha.

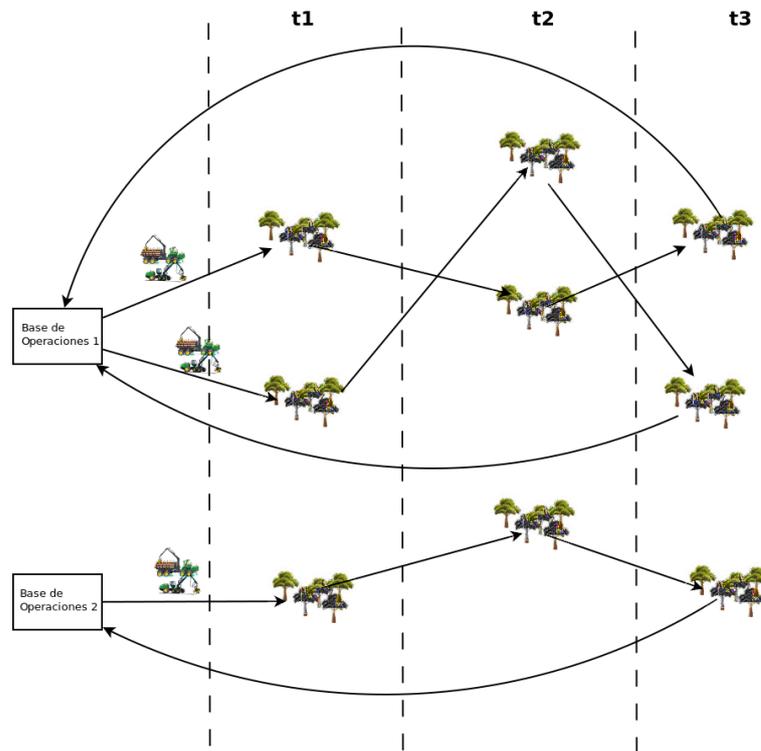


Figura 4.2: Esquema simplificado de cosecha en determinados periodos de tiempo (t_1 , t_2 y t_3)

determinado periodo de tiempo, lo que asegura a la empresa satisfacer la demanda en cada instante (de manera mensual por ejemplo) En la figura 4.2 se muestra de manera simplificada el trayecto de los equipos de cosecha partiendo desde una base de operaciones a través de los predios asignados según la agenda de la fábrica de celulosa.

4.2. Modelo de programación entera mixto

El modelo propuesto en el presente estudio considera datos de entrada, variables de decisión, función objetivo y restricciones. Cada uno de estos se describe a continuación.

Conjunto de índices del modelo

A continuación se describen los conjuntos y los datos de entrada.

- Los contratistas forestales establecen sus bases de operaciones en distintos lugares del país, desde allí se movilizan hasta los diferentes lugares de cosecha. Además de ser centros de administración, también se localizan en cada base los talleres mecánicos para la maquinarias de cosecha y vehículos de transporte.

Definimos como \mathbf{F} al conjunto de las bases de operaciones de los contratistas forestales, quienes corresponden a los *depósitos* del MmTSP. Eventualmente cada contratista puede disponer de más de una base de operaciones. Los equipos de cosecha de cada contratista son enviados a los diferentes destinos de cosecha (bloques), cada contratista podrá atender varias cosechas a la vez, cada uno con un equipo diferente.

Los equipos parten y regresan a la misma base de operaciones, ellos se asemejan a los *viajantes* del MmTSP. En general, los equipos de cosecha constan de cualquier agrupación de máquinas. Sin embargo, en muchos casos trabajan en un par, que comprende una cosechadora (harvester) y un equipo de carga (forwarder). En el modelo propuesto, asumimos esta característica y además que esos equipos siempre están disponibles.

- Los bloques de cosecha son los predios a cosechar en los diferentes periodos durante ese año, llamemos \mathbf{B} al conjunto de bloques (predios) a cosechar, a estos los asimilamos a los *clientes* que deben visitar los *viajantes* en el MmTSP .
- La planificación anual es dividida en distintos periodos de tiempo, que pueden ser semanas, quincenas, meses o bimestres, en este caso denotamos como \mathbf{T} al conjunto de periodos de tiempos para cosechar los bloques. La unidad de tiempo elegida para este trabajo será el mes.

En la tabla 4.1 se resumen los conjuntos detallados anteriormente.

Notación	Descripción
F	Conjunto de las bases de operaciones de los contratistas forestales
B	Conjunto de bloques (predios) a cosechar en el año
T	Conjunto de periodos de tiempos (meses del año) en que se va a cosechar cada bloque

Tabla 4.1: Resumen de los conjuntos de datos

Parámetros del modelo

A continuación vamos a identificar los parámetros del problema, donde se encuentran los costos asociados en el traslado de los equipos de cosecha entre los diferentes lugares.

- C_{ij} es el costo de desplazamiento entre el bloque de cosecha o base de operaciones i y el bloque o base de operaciones j ($i, j \in F \cup B$), en este trabajo se considera como la distancia que deben recorrer los equipos de cosecha para trasladarse de un bloque a otro, y desde o hacia una base de operaciones. También se puede considerar como el costo económico de mover máquinas entre las diferentes áreas de cosecha, por ejemplo si la distancia entre las áreas de cosecha sobrepasa un cierto límite se debe utilizar un remolque para mover las máquinas (*harvester* y *forwarder*), de lo contrario las máquinas pueden ser conducidas ellas mismas directamente al siguiente bloque. También se puede considerar como el costo de movilidad entre cada uno de los bloques y las bases de operaciones.
- m_f es la cantidad de equipos de cosecha pertenecientes a un contratista forestal que tiene como base de operaciones a f , $f \in F$.
- $Tmin_i$ es el momento (mes del año) donde se puede comenzar a cosechar el bloque i , $Tmin_i \in T$.
- $Tmax_i$ es el fin del periodo (mes del año) en el que se podrá cosechar el bloque i , $Tmax_i \in T$.
- L la cantidad máxima de bloques que un equipo de cosecha puede visitar.
- M la cantidad mínima de bloques que un equipo de cosecha puede visitar.
- D_t es la demanda total de madera en tiempo t .
- v_i es el volumen de madera disponible en cada bloque de cosecha i . Para este trabajo consideramos que el volumen de madera se mantiene fijo durante toda la planificación.

En la tabla 4.2 se resumen los parámetros detallados anteriormente.

Notación	Descripción
C_{ij}	costo desplazamiento entre los lugares i y j , donde $i, j \in F \cup B$
m_f	es la cantidad de equipos de cosecha que tiene la base de operaciones f .
$Tmin_i$ y $Tmax_i$	ventana de tiempo para cosechar el bloque i
L	la cantidad máxima de bloques que un equipo puede visitar
M	la cantidad mínima de bloques que un equipo puede visitar
D_t	demanda total de madera en el tiempo t
v_i	volumen de madera estimada del bloque i

Tabla 4.2: Resumen de los parámetros del problema

4.2.1. Variables del modelo

Nos interesa identificar la secuencia óptima de cosecha para cada equipo perteneciente a un contratista forestal. Por lo tanto, definimos la variable binaria x_{ij}^f en 4.1 como:

$$x_{ij}^f = \begin{cases} 1, & \text{si un equipo de cosecha de la base } f \text{ se traslada desde el lugar } i \text{ al } j \\ & \text{siendo } i, j \in F \cup B \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4.1)$$

Los diferentes puntos en que se desplazan los equipos de cosecha pueden ser bases de operaciones o bloques de cosecha. Cada equipo sale y retorna a su respectiva base de operaciones una vez terminado el recorrido. Por lo tanto que un equipo de cosecha se traslade desde un bloque de cosecha a su base de operaciones f , lo expresariamos como sigue:

$$x_{if}^f, \text{ donde } f \in F, i \in B. \quad (4.2)$$

Además tenemos en cuenta que $x_{ii}^f = 0, \forall i \in B \cup F, \forall f \in F$.

Definimos la variable binaria y_i^t en (4.3) como:

$$y_i^t = \begin{cases} 1, & \text{si un bloque } i \text{ es cosechado en el periodo } t \\ 0, & \text{si no} \end{cases} \quad (4.3)$$

De esta manera se puede identificar en que periodo de tiempo fue cosechado un bloque.

Definimos también la variable u_i , que representa la cantidad de bloques

visitados por un equipo de cosecha cuando está visitando el i -ésimo bloque, esta variable ayudará a formular las restricciones en el número de bloques a visitar y en la eliminación de sub-rutas. Dado que L es la cantidad máxima de bloques que un equipo puede visitar; por lo tanto, $1 \leq u_i \leq L$ para todo $i \geq 2$. Además, siendo M es el número mínimo de bloques que un equipo debe visitar, si $x_{if}^f = 1, f \in F$, entonces se debe cumplir que $M \leq u_i \leq L$.

4.2.2. Función Objetivo

Como propósito principal tenemos el de minimizar los costos de traslado entre bloques de cosecha, y del traslado entre los bloques de cosecha y las bases de operaciones.

Definimos como la función objetivo a z , el costo total de los traslados entre los diferentes bloques de cosecha y las bases de operaciones. Debemos considerar el costo del traslado inicial desde una base de operaciones al primer bloque del recorrido, y el costo del traslado final desde el último bloque del recorrido hacia la base de operaciones. Para este trabajo, se considera la distancia entre todos los puntos (bloques de cosecha o base de operaciones) como simétricas.

$$z = \sum_{f \in F} \sum_{i \in B} (C_{fi} x_{fi}^f + C_{if} x_{if}^f) + \sum_{f \in F} \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} C_{ij} x_{ij}^f \quad (4.4)$$

En el primer sumando de (4.4), tenemos la suma de los costos de traslado desde cada base de operaciones a los primeros bloques de cosecha en las respectivas recorridas, más la suma de los costos de traslado desde los últimos bloques del tour a las bases de operaciones de origen; en el segundo sumando, tenemos la suma de los costos de traslados entre los bloques de cosecha de cada recorrida.

La función objetivo del problema de optimización se expresa como sigue:

$$\text{mín } z \quad (4.5)$$

4.2.3. Restricciones

$$\sum_{i \in B} x_{fi}^f = m_f, \forall f \in F \quad (4.6)$$

La restricción (4.6) garantiza que exactamente los m_f equipos de cosecha parten desde cada una de las bases de operaciones respectivas.

$$\sum_{f \in F} \sum_{i \in B \cup F, i \neq j} x_{ij}^f = 1, \forall j \in B \quad (4.7)$$

La restricción (4.7) asegura que cada bloque de cosecha sea visitado por un único equipo de cosecha disponible.

$$\sum_{i \in B \cup F, i \neq j} x_{ij}^f - \sum_{i \in B \cup F, i \neq j} x_{ji}^f = 0, \forall j \in B \quad (4.8)$$

La continuidad de la rutas para los bloques de cosecha y las bases de operaciones se representa por la restricción (4.8), que asegura que para cada bloque de cosecha, el equipo que lo visita provenga desde un y solo un lugar distinto, y se traslada a un y solo un bloque distinto o a la base de operaciones de donde partió originalmente.

$$u_i + (L - 2) \sum_{f \in F} x_{fi}^f - \sum_{f \in F} x_{if}^f \leq L - 1, \forall i \in B \quad (4.9)$$

$$u_i + \sum_{f \in F} x_{fi}^f + (2 - M) \sum_{f \in F} x_{if}^f \geq 2, \forall i \in B \quad (4.10)$$

Las restricciones (4.9) y (4.10) las podemos denominar restricciones de límite, dado que imponen límites superior e inferior a la cantidad de bloques visitados por cada equipo de cosecha, e inicializan el valor de u_i en 1 si y solo si i es el primer bloque en la recorrida para cualquier equipo.

$$\sum_{f \in F} x_{fi}^f + \sum_{f \in F} x_{if}^f \leq 1, \forall i \in B \quad (4.11)$$

La desigualdad (4.11) prohíbe que un vehículo visite sólo un bloque partiendo desde una base de operaciones, y regrese a la misma inmediatamente. Esta restricción es redundante cuando $M \geq 2$.

$$u_i - u_j + L \sum_{f \in F} x_{ij}^f + (L - 2) \sum_{f \in F} x_{jf}^f \leq L - 1, \forall i \in B, \forall j \in B, i \neq j \quad (4.12)$$

Con la restricción (4.12) se asegura que $u_j = u_i + 1$ si y solo si $x_{ij}^f = 1$. Por

lo tanto, prohíbe la formación de cualquier sub-ruta entre los nodos en B , por lo que es la restricción de eliminación de sub-tours de la formulación.

$$u_i \geq Tmin_i, \forall i \in B \quad (4.13)$$

$$u_i \leq Tmax_i, \forall i \in B \quad (4.14)$$

Con las restricciones (4.13) y (4.14) aseguramos que cada bloque sea visitado en una ventana de tiempo prefijada.

$$\sum_{\substack{t \leq Tmax_i \\ t \geq Tmin_i}} y_i^t = 1, \forall i \in B \quad (4.15)$$

Con la restricción (4.15) vinculamos las variables y para cada bloque de cosecha, indicando que en cada ventana de tiempo sólo una puede estar activa (en valor 1).

$$u_i = \sum_{\substack{t \leq Tmax_i \\ t \geq Tmin_i}} ty_i^t, \forall i \in B \quad (4.16)$$

Con la restricción (4.16) u_i toma el valor de t que corresponde a la única y_{it} activa para cada bloque i .

$$\sum_{i \in B} y_i^t v_i \geq D_t, \forall t \in T \quad (4.17)$$

La restricción (4.17) asegura que se cumplan los requerimientos de demanda para cada periodo de tiempo.

Toda la formulación anterior del modelo es válida cuando $2 \leq M \leq \lfloor (n - 1)/m_f \rfloor$ y $L \geq M$.

4.2.4. Complejidad y discusión del tamaño del modelo

Según las definiciones de las variables x_{ij}^f , y_i^t y u_i , vistas anteriormente, podemos decir que la cantidad total de las variables del problema es del orden $O(variables) = O(variable_x) + O(variable_y) + O(variable_u) = O(|B| \times |B| \times |F|) + O(|B| \times |T|) + O(|B|) = O(|B|^2 \times |F|)$.

Tomando en cuenta las familias de restricciones definidas (desde (4.6) a (4.17)), la cantidad de restricciones del problema es del orden de

$$O(\text{restricciones}) = \sum_{i=1}^{i=12} O(\text{restriccion}_i) = O(|B|^2).$$

Según los trabajos de Kota y Jármai [100] y de Assaf et al. [101], el problema MmTSP es NP-Hard. Es fácil reducir el MmTSP a nuestro problema; partiendo de una instancia del MmTSP se le agregan $Tmin_i = 1$ y $Tmax_i = |B| \forall i \in B$ (también $v_i = 0 \forall i \in B$ y $D_t = 0 \forall t \in T$). De esta manera, obtenemos una instancia de nuestro problema cuya solución óptima es idéntica a las solución optima del problema MmTSP original. Si podemos encontrar una solución a nuestro problema en tiempo polinomial, también podemos encontrar una solución de tiempo polinomial para MmTSP, por lo tanto, el problema que estamos tratando es al menos tan difícil como el MmTSP, podemos decir que también es NP-Hard.

4.2.5. Modelo matemático completo

$$\min \sum_{f \in F} \sum_{i \in B} (C_{fi} x_{fi}^f + C_{if} x_{if}^f) + \sum_{f \in F} \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} C_{ij} x_{ij}^f \quad (4.18)$$

sa

$$\sum_{i \in B} x_{fi}^f = m_f, \forall f \in F \quad (4.19)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{i \in B \cup F, i \neq j} x_{ij}^f = 1, \forall j \in B \quad (4.20)$$

$$\sum_{i \in B \cup F, i \neq j} x_{ij}^f - \sum_{i \in B \cup F, i \neq j} x_{ji}^f = 0, \forall j \in B \quad (4.21)$$

$$u_i + (L - 2) \sum_{f \in F} x_{fi}^f - \sum_{f \in F} x_{if}^f \leq L - 1, \forall i \in B \quad (4.22)$$

$$u_i + \sum_{f \in F} x_{fi}^f + (2 - M) \sum_{f \in F} x_{if}^f \geq 2, \forall i \in B \quad (4.23)$$

$$\sum_{f \in F} x_{fi}^f + \sum_{f \in F} x_{if}^f \leq 1, \forall i \in B \quad (4.24)$$

$$u_i - u_j + L \sum_{f \in F} x_{ij}^f + (L - 2) \sum_{f \in F} x_{jf}^f \leq L - 1, \forall i \in B, \forall j \in B, i \neq j \quad (4.25)$$

$$u_i \geq Tmin_i, \forall i \in B \quad (4.26)$$

$$u_i \leq Tmax_i, \forall i \in B \quad (4.27)$$

$$\sum_{t \geq Tmin_i}^{t \leq Tmax_i} y_i^t = 1, \forall i \in B \quad (4.28)$$

$$u_i = \sum_{t \geq Tmin_i}^{t \leq Tmax_i} ty_i^t, \forall i \in B \quad (4.29)$$

$$\sum_{i \in B} y_i^t v_i \geq D_t, \forall t \in T \quad (4.30)$$

4.3. Análisis del caso con fallas de equipos

En el análisis anterior el supuesto es que tanto los equipos como los bloques de cosecha están disponibles durante todo el proceso. Pero en el caso que un equipo deja de estar disponible durante el tour de cosecha (por avería de una máquina por ejemplo), el modelo debe volver a ejecutarse con los bloques todavía no cosechados, existiendo la posibilidad de que el problema sea ahora no factible. Como estrategia de modelado para esta situación se opta por incorporar bloques (nodos) ficticios al modelo, al que llamaremos bloques de mantenimiento. El equipo de cosecha una vez que falla o no está disponible durante determinado tiempo es asignado a los bloques de mantenimiento durante esos periodos.

En el algoritmo 1 se plantea el procedimiento de reprogramación de los tours en caso de una falla en algún equipo. El modelo de programación matemática vuelve a resolverse con el agregado de los nuevos bloques.

En la figura 4.3 se observa un ejemplo de reprogramación. En este caso falla un equipo de cosecha una vez que termina con el bloque 1 y se traslada al bloque 2. luego de realizada la reprogramación este equipo es asignado a un bloque de mantenimiento. En la figura se puede ver que en tiempo 2, los bloques a cosechar son el 2 o 5, 8 y 10. Si el volumen de madera de los bloques 5, 8 y 10 o de 2, 8 y 10 no satisfacen la demanda del periodo 2, el problema no será factible.

Algoritmo 1: Algoritmo de reprogramación en caso de falla de equipos.

Require: E = conjunto de equipos de cosecha que fallaron en tiempo t , cada uno con su respectiva base de operaciones f

Ensure: $factible \in \{true, false\}$, si el problema es factible; z = costo total de los tours de cosecha; $tours[]$ = recorrido de cosecha reprogramado para cada contratista

for all $f \in F / equipo_f \in E$ **do**
 {se agregan los bloques de mantenimiento k , según la cantidad de equipos que fallan.}
 $B = B + \{k\}$
 {se agrega la restricción que el bloque de mantenimiento sea visitado en tiempo $t + 1$ }
 $y_k^{t+1} = 1$

for all $b \in B / x_{*b}^f = 1$ y $y_b^t = 1$ **do**
 {se agrega la restricción para que haya un enlace desde el ultimo bloque visitado por el equipo que falla y el bloque de mantenimiento}
 $x_{bk}^f = 1$

end for

end for
 {se ejecuta el modelo con el nuevo conjunto de bloques de cosecha}
 $[factible, z, tours[]] = ejecutar-MIP(F, B, T)$

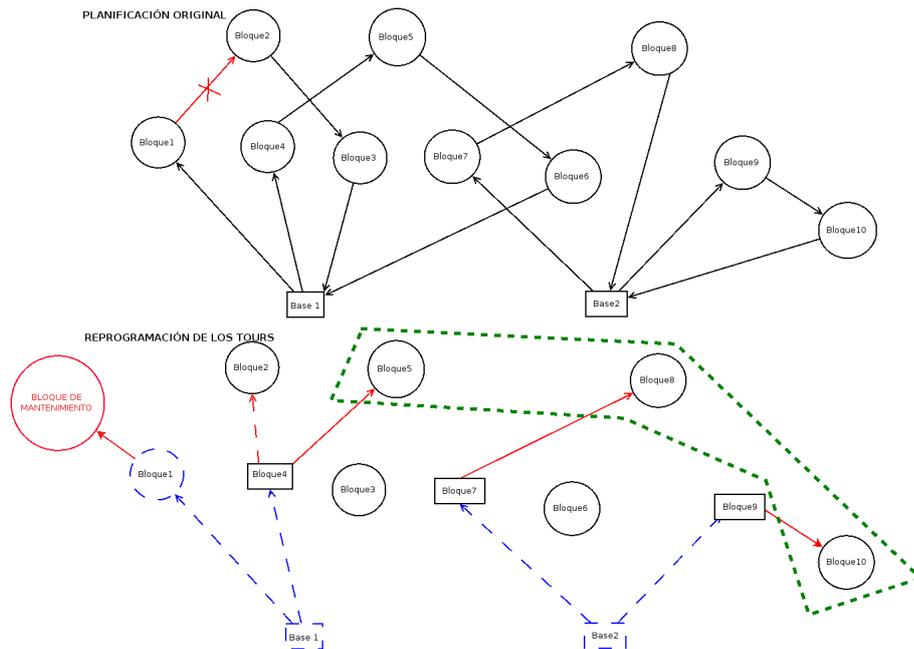


Figura 4.3: En la parte de arriba de la figura se puede ver la planificación original del problema, donde falla el equipo de cosecha antes de ir al bloque 2. En la parte de abajo se ve la reprogramación un vez ejecutado el algoritmo correspondiente.

La otra posibilidad de infactibilidad que se presenta es si la capacidad de cosecha con la cantidad nueva de equipos no es suficiente para cubrir los bloques a ser visitado en un periodo de tiempo. Volviendo a la figura 4.3, puede ser que el bloque 2 y el 5 deban ser cosechados en el mismo periodo de tiempo,

si los bloques 8 y 10 también están en la misma situación, la no factibilidad se puede dar si solo hay 3 equipos de cosecha disponibles.

En la práctica, la indisponibilidad de un equipo de cosecha es en tiempos menores a un periodo de cosecha (por ejemplo, sería de cuestión de días en un contexto donde se planifica la cosecha en meses). Por lo que la posibilidad de sea la necesaria la replanificación por estos casos es muy poco probable. En cambio, la no disponibilidad de los lugares de cosecha es más probable que suceda, y podría ocasionar inconvenientes si no es solucionado a la brevedad.

4.4. Análisis del caso con pérdida de bloques de cosecha

Los bloques de cosechas pueden no estar disponibles en ciertos periodos de tiempo, por ejemplo por inclemencias climáticas, como se dijo en la sección 1.1. Para el caso de la no disponibilidad de un bloque de cosecha en cierto periodo de tiempo, se puede intercambiar ese bloque con otro, que tenga un tiempo de cosecha mayor al bloque inaccesible, y este será cosechado más adelante. También se debe considerar para elegir el bloque con cual hacer el intercambio, que este a una distancia cercana y que posea un volumen de madera similar a fin de seguir contemplando la demanda del periodo. En el algoritmo 2 se puede ver el procedimiento para reprogramar las recorridas de cosechas en estos casos.

Algoritmo 2: Algoritmo de reprogramación en caso de no disponibilidad de los bloques de cosecha en cierto periodo de tiempo.

Require: B' = conjunto de bloques de cosecha no disponibles en tiempo t

Ensure: $factible \in \{true, false\}$, si el problema es factible; z = costo total de los tours de cosecha; $tours[]$ = recorrido de cosecha reprogramado para cada contratista
 {para los siguientes periodos, se evalúa si hay bloques inaccesibles}

for all $b \in B'$ **do**

{se obtienen el volumen de madera del bloque y la demanda de ese periodo}

$vm = volumenMadera(b)$;

for all $b' \in$ bloques NO cosechados **do**

{se obtienen el volumen de madera del bloque a evaluar así como la demanda de ese periodo}

$t' = periodoCosecha(b')$;

$vm' = volumenMadera(b')$;

$d' = demandaPeriodo(t')$;

{se evalúa si es factible el intercambio}

if $d - vm + vm' \geq d$ and $d' - vm' + vm \geq d'$ **then**

{agrego como restricciones que los bloques sean cosechados en esos momentos}

$y_{b'}^t = 1$;

$y_b^{t'} = 1$;

stop forall();

end if

end for

end for

{se ejecuta el modelo con el nuevo conjunto de bloques de cosecha}

[$factible, z, tours[]$] = ejecutar-MIP(F, B, T)

En la figura 4.4 se puede apreciar un ejemplo, donde el bloque 2 queda inaccesible y es intercambiado por el bloque 3 en el orden de cosecha.

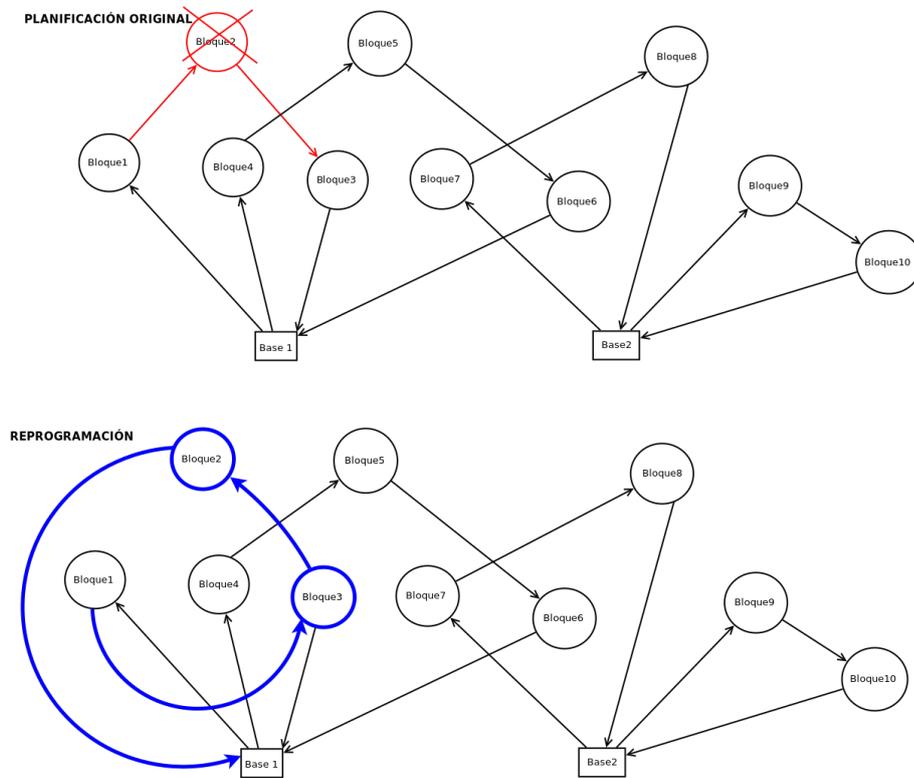


Figura 4.4: En este ejemplo el bloque 2 queda inaccesible, luego de la reprogramación es intercambiado en el orden por el bloque 3.

Capítulo 5

Resultados computacionales

En este capítulo se presenta el plan de pruebas y se ejecutan los casos elegidos en el capítulo 4. Se discute los resultados obtenidos de ejecutar las diferentes configuraciones del modelo, también se muestran los resultados de la ejecución de los algoritmos para resolver los casos de indisponibilidad de bloques y equipos de cosecha.

El modelo se implementa en un script utilizando el lenguaje de modelado AMPL, se utiliza el solver CPLEX versión 12.6.3.0, se ejecutó el modelo en un servidor con sistema operativo CentOS Linux release 7.2.1511 (Core), de 64 bit, con 8 procesadores Intel® Core™ i7 y 15 GB de RAM.

5.1. Casos de prueba

Para la obtención de datos de prueba se utilizó la Cartografía Digital Forestal publicada por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) en 2012 [102]. Los mapas se georeferenciaron utilizando QGIS (figura 5.1) y se obtienen de cada mapa las coordenadas de las principales plantaciones forestales de los departamentos de Uruguay. Luego, para formar los juegos de datos, se eligieron subconjuntos de estas plantaciones, utilizando sorteos con distribuciones uniformes y sin reemplazo. Los cálculos de distancia se realizan utilizando la API de Google Maps [103] (programando un script en Python), obteniéndose la matriz de distancia entre los puntos de cosecha y las bases de operaciones.

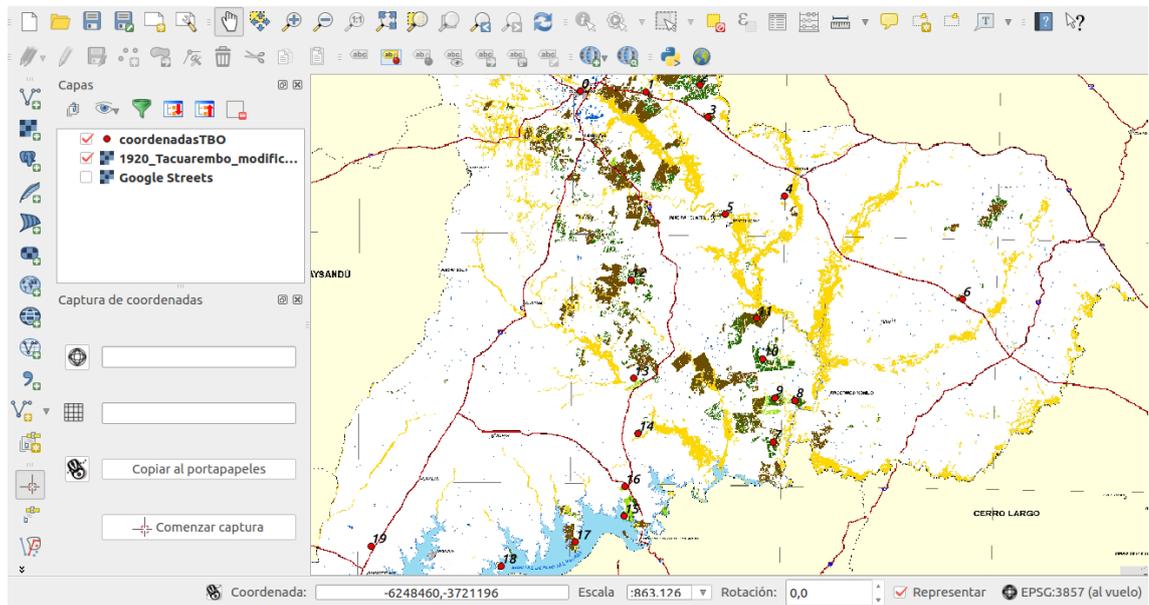


Figura 5.1: Georeferenciación de los puntos de cosecha y bases de operaciones en QGIS.

5.1.1. Escenario 1

En este escenario se resolvieron de forma independiente dos casos de prueba, ubicados respectivamente en los departamentos de Tacuarembó y Rivera (Uruguay). Como primer caso de prueba (caso 1), se eligió dentro del catálogo de plantaciones forestales del MGAP 12 puntos de cosecha al azar en Tacuarembó, de la especie eucaliptos o pino. Los datos de dichos bloques se pueden ver en la tabla 5.1. Se consideran 2 equipos de cosecha y una base de operaciones situada en la ciudad capital. La geolocalización de la base y los bloques de cosecha está disponible en el anexo 1.1.1. Tanto la ventana de periodos para la cosecha, como el volumen estimado de madera en cada bloque, fueron sorteados siguiendo una distribución uniforme, de un rango de periodos de tiempo y de posibles medidas de volúmenes para un bloque de cosecha. Se consideró un demanda de madera para cada periodo de 22000 m^3 . Para este ejemplo el conjunto $T = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$.

Bloque	Periodos para la cosecha	Volumen de madera (m^3)
1	2-5	18894
2	1-4	12580
3	1-4	11796
4	2-5	8796
5	2-5	18041
6	3-6	18303
7	3-6	15379
8	1-4	9072
9	1-4	11023
10	3-6	9651
11	1-4	13455
12	3-6	17015

Tabla 5.1: Datos de los bloques de cosecha del caso 1.

Como segundo caso (caso 2), se elige 15 puntos de cosecha en el departamento de Rivera, la base de operaciones se sitúa en la capital de ese departamento, y se tienen disponibles 2 equipos para la cosecha. Las coordenadas geográficas de la base y los bloques de cosecha está disponible en el anexo 1.1.2. En este caso se configura una demanda de $12578 m^3$ mensuales. Para este caso el conjunto $T = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$. Los datos de cada bloque se ven en la tabla 5.2.

Bloque	Periodos para la cosecha	Volumen de madera (m^3)
1	5-6	12247
2	8-9	8673
3	7-8	11646
4	4-5	9104
5	1-2	16662
6	1-2	12455
7	6-7	14758
8	5-6	8496
9	2-3	11823
10	3-4	11705
11	3-4	12726
12	4-5	15761
13	7-8	15315
14	2-3	13837
15	6-7	13458

Tabla 5.2: Datos de los bloques de cosecha del caso 2.

Para el caso 1, se aplicó el modelo con estos datos, con el solver mencionado

anteriormente. El mismo encontró el resultado óptimo o en tiempos muy breves, de menos de 1.30 segundos. El recorrido óptimo obtenido se puede apreciar en la figura 5.2, con un largo total de 679 *km*.

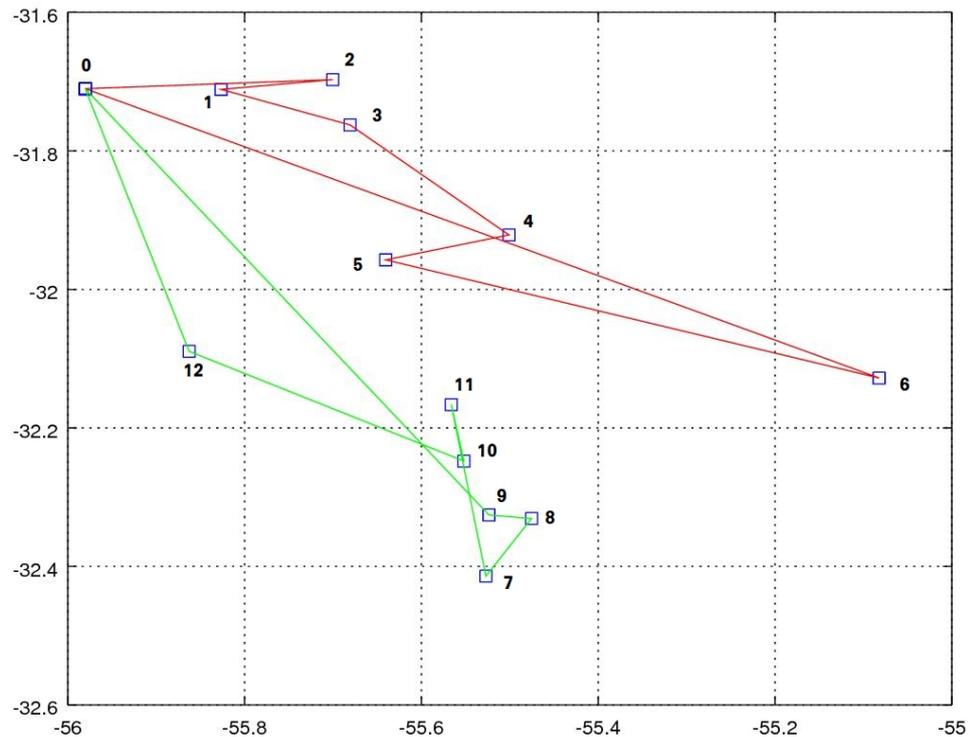


Figura 5.2: Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 1. Los tours para las cosechas son 0-2-1-3-4-5-6-0 y 0-9-8-7-11-10-12-0. Largo total recorrido es de 679 *km*.

Para el caso 2, se aplicó el modelo con estos datos, con el solver mencionado anteriormente. El mismo encontró el resultado óptimo, en tiempos muy breves, de menos de 1 segundo. El recorrido óptimo obtenido se puede apreciar en la figura 5.3, con un largo total de 862 *km*.

5.1.2. Escenario 2

Para este caso (caso 3) se considera de manera integrada los casos 1 y 2 o sea, se ejecuta el modelo para un escenario compuesto de las 2 bases de operaciones (pertenecientes a contratistas distintos que acuerdan coordinar sus actividades de cosecha) y los 27 bloques de cosecha.

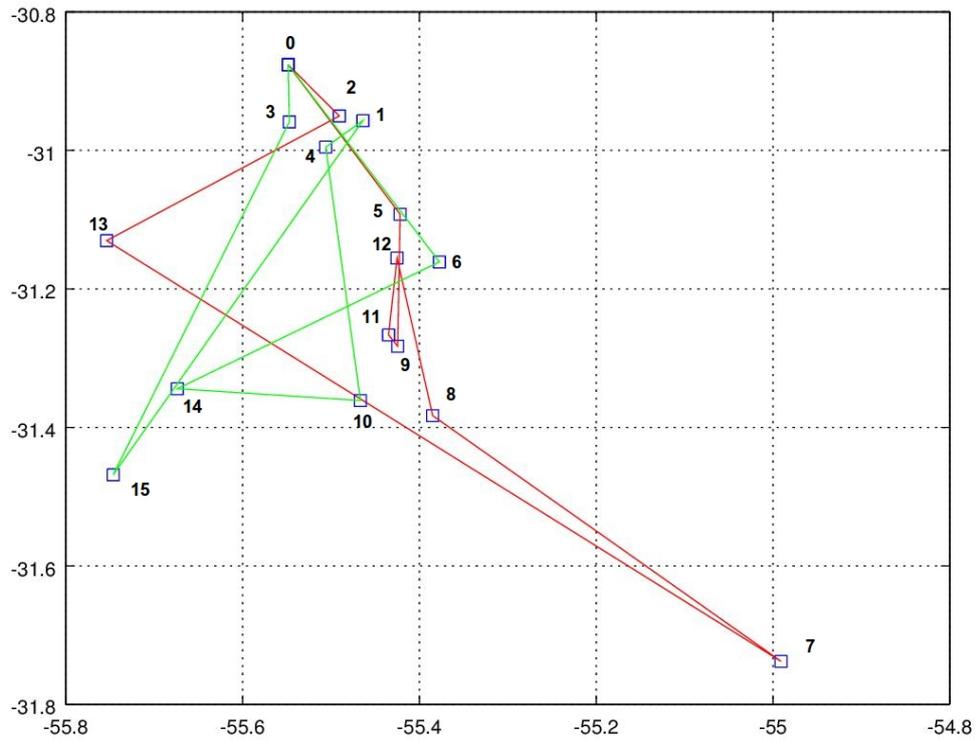


Figura 5.3: Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 2. Los tours para las cosechas son 0-5-9-11-12-8-7-13-2-0 y 0-6-14-10-4-1-15-3-0, de un largo total de 862 *km*.

Los recorridos de los 4 equipos de cosecha se pueden apreciar en la figura 5.4. Mientras que los 4 equipos por separado (los 2 del caso 1 y los 2 del caso 2) habían recorrido 1541 *km* en total, en el caso 3 el largo total del recorrido de esos equipos es de 1307 *km*, o sea 234 *km* menos que la ejecución por separado de los dos casos, lo que representa un 15,2% de ahorro. Se puede ver también que mientras los equipos que parten desde la base de operaciones del caso 1 recorren 312 *km* y 367 *km* respectivamente, en el caso 3 hacen un recorrido de 346 *km* y 296 *km*. Análogamente, los equipos que parten en desde la base de operaciones del caso 2 recorren 478 *km* y 384 *km* respectivamente, en el caso 3 recorren 389 *km* y 276 *km*.

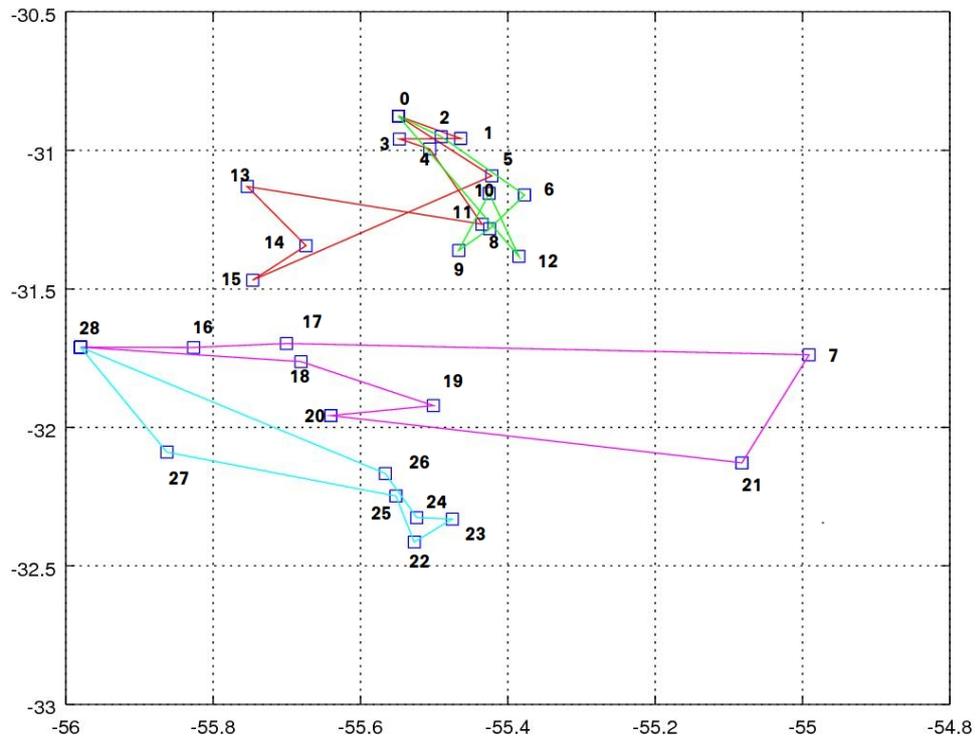


Figura 5.4: Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 1 y caso 2 integrados. Los tours para las cosechas son 0-5-15-14-13-11-4-3-1-0, 0-2-6-9-10-12-8-0, 28-18-19-20-21-7-17-16-28 y 28-26-24-23-22-25-27-28. Largo total recorrido es de 1307 *km*.

5.1.3. Escenario 3

En este escenario, se repite la comparación de los recorridos por separado contra recorridos conjuntos de 2 pares de equipos de cosecha, pero con un tamaño mayor de las instancias, y con datos sorteados diferentes. El objetivo es ver como escala el problema y ver también la sensibilidad a los datos de cada instancia. Un caso se construye con 15 bloques de cosecha en el departamento de Rivera (caso 4), con dos bases de operaciones de un equipo de cosecha cada una; y el otro caso de 19 bloques de cosecha en el departamento de Tacuarembó (caso 5), con dos bases de operaciones de un equipo de cosecha cada una. En los anexos 1.1.4 y 1.1.5 se ven la tablas con los detalles de la ubicaciones de cada bloque de cosecha y base de operaciones, mas el volumen de madera y las ventanas de tiempo para la cosecha para esos casos. Para el caso 4 se tiene $|T| = 8$ y para el caso 5 $|T| = 10$. En el anexo 1.1.6 se puede

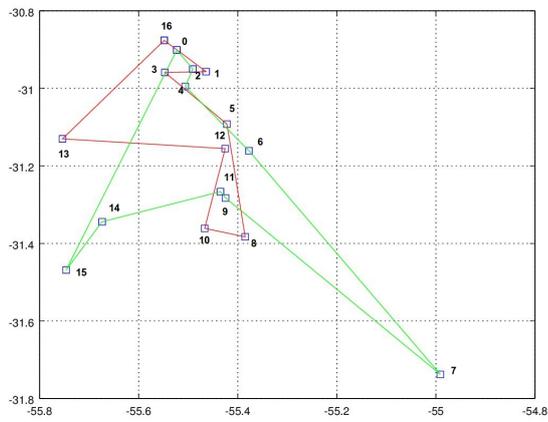
ver los datos para el caso integrado (caso 6) de los casos 4 y 5.

En la figura 5.5 se aprecia en (a) y (b) el recorrido de cada equipo de cosecha para cada caso, con un largo total de 715 *km* para el caso 4 y 1235 *km* para el caso 5. En (c) se dispone de los recorridos ejecutando el modelo con los dos casos a la vez (caso 6), con un largo total de recorrido de 1842 *km*, lo que es 108 *km* menor, que representa un 5,54% de ahorro.

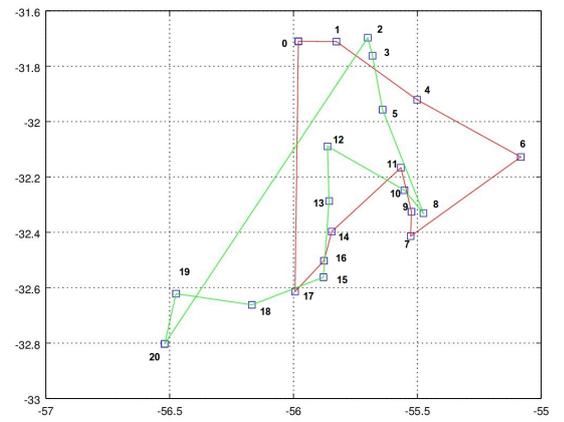
Las dimensiones de los casos descritos anteriormente la podemos ver en la tabla 5.3.

Escenario	Instancia	$ B $	$ F $	m_f	$ T $	V. enteras	V. binarias	z	T. ejecución (s)
1	caso 1	12	1	2	6	230	218	679	0.4
1	caso 2	15	1	2	9	390	375	862	0.8
2	caso 3	27	2	4	8	1809	1782	1373	4.2
3	caso 4	15	2	2	8	645	630	715	5.0
3	caso 5	19	2	2	10	1007	988	1235	7.21
3	caso 6	34	4	4	10	5270	5236	1842	20.0

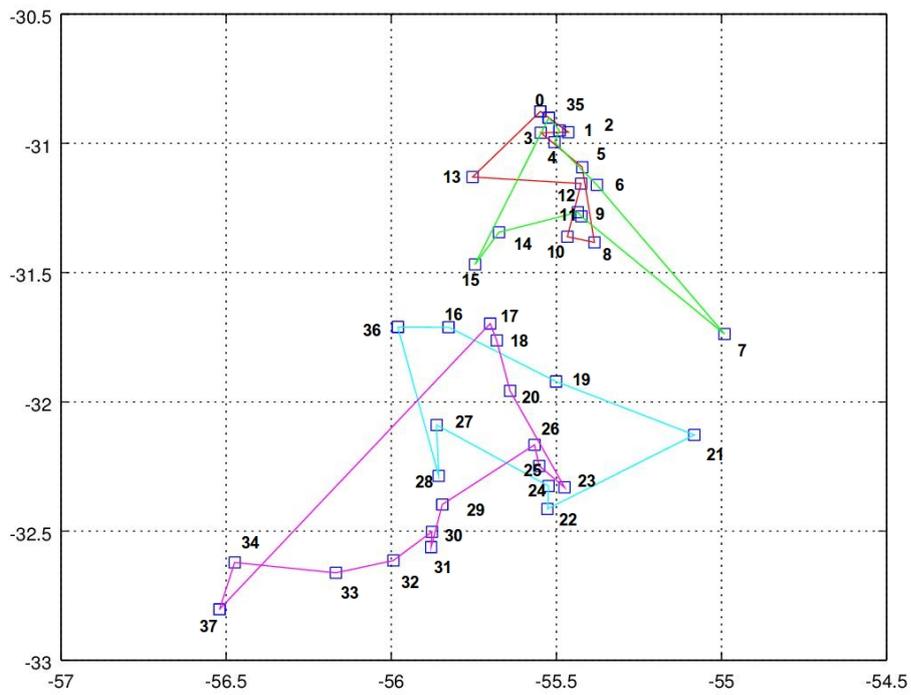
Tabla 5.3: Dimensión de los problemas relativos a los casos del 1 al 6.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.5: En (a) se ve el caso 4, con 15 bloques en Rivera. En (b) se ve el caso 5, con 19 bloques en Tacuarembó. En (c) se ve el caso integrado, caso 6.

5.1.4. Escenario 4

Para este escenario se toma el ejemplo visto en la figura 1.5, que cuenta 11 contratistas, cada uno con su base de operaciones distribuidos por todo el país

y equipos de cosecha disponible. Los 47 bloques de cosecha fueron georeferenciados sorteando con distribución uniforme distintos puntos, de manera similar a los casos vistos. Este escenario es mucho mayor que los anteriores, y corresponde a la planificación de todo un año que una empresa forestal suministró. En términos de número de contratistas y demandas, es un caso interesante porque además muestra la dispersión de la cosecha en muchos contratistas. En la tabla 5.4 se observa para cada contratista y la cantidad de equipos de cosecha de cada uno, así como también la cantidad de kilómetros recorridos por ellos una vez ejecutado el modelo matemático aplicado a cada caso. Para todos los casos $|T| = 12$.

Contratista	Equipos de cosecha	Distancia recorrida (km)
A	3	550
B	1	281
C	1	194
D	3	885
E	2	582
F	2	292
G	1	458
H	1	323
I	1	514
J	1	166
K	2	408

Tabla 5.4: Caso con 11 contratistas con sus respectivas bases de operaciones.

Luego se analiza el modelo aplicado a grupos de contratistas. Primero se hace un análisis agrupando a los contratistas en tres grupos (según la cercanía geográfica entre ellos), y luego se aplica el modelo a todos los contratistas juntos. En la tabla 5.5 se puede ver la comparación de las distancias recorridas para cada grupo de contratistas en relación con el modelo aplicado de manera individual.

Grupo de Contratistas	Distancia recorrida total	
	por separado (km)	de manera integrada (km)
A, B, C, D	1910	1909
E, F, G, H	1655	1588
I, J, K	1088	1088
A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K	4653	4585

Tabla 5.5: Comparativa de aplicar el modelo a cada caso por separado y de manera integrada por grupo.

En todos los escenarios revisados, la aplicación del modelo de manera integrada incurre en ahorros de distancias recorridas que se hiciera de manera individual.

5.1.5. Escenario donde fallan equipos de cosecha

Para probar el algoritmo de replanificación, se generaron instancias aleatoriamente de 10 y 20 bloques de cosecha, con 1 y 2 bases de operaciones en cada caso, y 2 equipos de cosecha. Los elementos de la matriz de distancias entre los bloques han sido sorteados con distribución uniforme en un intervalo [1, 100]. En el anexo 1.1.7 se puede ver la información de la distancia entre cada bloque, el volumen de madera en cada uno y las distancias hacia las bases de operaciones. El paquete de optimización CPLEX 12.8.0.0 se ha utilizado para resolver cada formulación en un servidor CentOS Linux release 7.4.1708 de 64 bit, con 8 procesadores Intel® Core™ i7 y 24 GB de RAM. Se resumen los resultados en la tabla 5.6.

Bloques	Bases	Equipos	Recorrido	Recorrido con replanificación	Falla
10	1	2	422 km	432 km	luego de visitar bloque 8
10	2	2	415 km	457 km	luego de visitar bloque 5
20	1	2	367 km	434 km	luego de visitar bloque 4
20	2	2	291 km	344 km	luego de visitar bloque 4

Tabla 5.6: Resultados de la planificación original, y de la replanificación luego de una falla de equipos.

Se observa que la replanificación permite en varios casos mantener distancias similares a las originales. En un caso hubo un aumento más significativo de costos en que los recorridos aumentaron hasta casi el 18%.

5.1.6. Escenario de indisponibilidad de bloques de cosecha

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación del método algorítmico presentado en la sección 4.4, para un caso de prueba concreto. Tomaremos como base el caso 1 de prueba (Figura 5.2, Tabla 5.1), en el que considerábamos 12 puntos de cosecha y una base de operaciones, todos situados en el departamento de Tacuarembó. Supongamos que el bloque 5 estará inaccesible durante el período 2. La solución inicial del problema de optimización pasa a ser infactible, ya que en la misma se incluía la cosecha del bloque 5 en ese

período. Al aplicar el algoritmo propuesto en la sección actual, se encuentra que es posible reprogramar los recorridos, intercambiando los momentos de cosecha del bloque 5 con los del bloque 12. Al ejecutar el modelo se encuentran dos tours distintos para los equipos de cosecha, que pueden verse en la Figura 5.6. El largo total de los nuevos recorridos es de 773 km, el largo de los recorridos iniciales es de 679 km. El incremento del largo de recorridos frente al largo original (sin restricciones de disponibilidad del bloque de cosecha 5) es de 13.8%, Por tratarse de una algoritmo de reprogramación, es posible que existan soluciones que permiten tener en cuenta la nueva restricción con un sobrecosto de distancia de viaje menor.

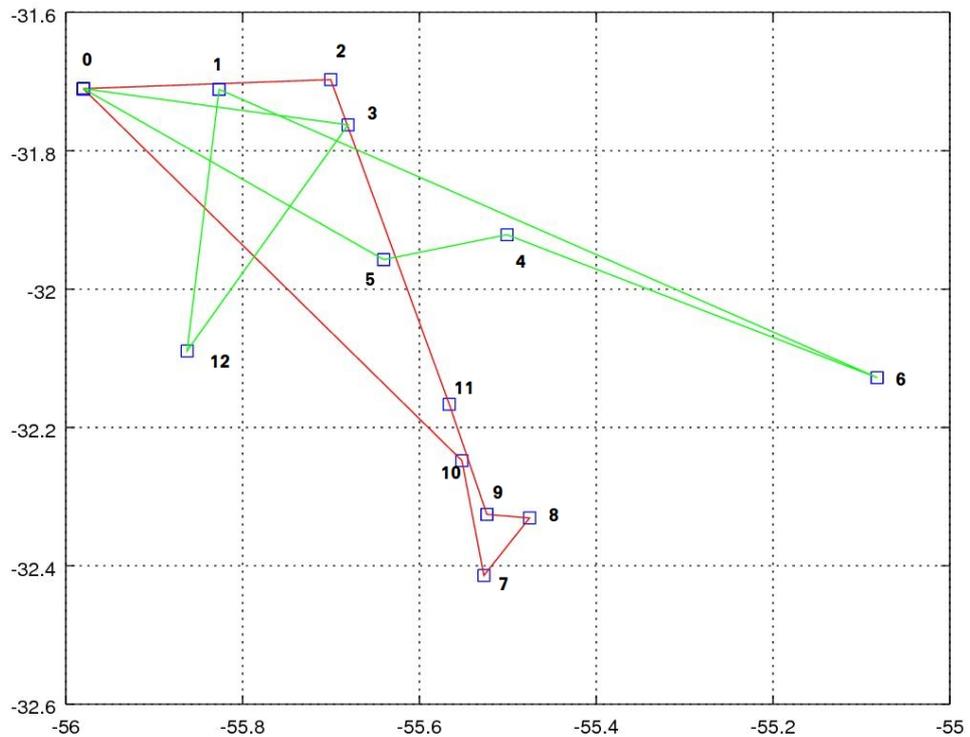


Figura 5.6: Recorridos de los dos equipos de cosecha para el caso 1 con las ventana de tiempo intercambiadas, bloque 5 y 6. Ahora el recorrido total de los dos equipos es de 773 km.

Capítulo 6

Consideraciones finales

En este capítulo se sintetizan las posturas expuestas en los capítulos anteriores. Se retoma la pregunta de investigación y se expresa si los resultados apoyan o no la hipótesis planteada.

6.1. Conclusiones

Esta tesis presenta una metodología para resolver un problema que surge en la planificación forestal, es decir, la secuencia y el ruteo óptimo de los equipos de cosecha.

La revisión bibliográfica arrojó numerosos trabajos sobre planificación de cosecha forestal, ya sea en la asignación de los lugares a cosechar, asignación de la maquinaria a utilizar y el diseño de caminería forestal. En los diferentes trabajos se utilizaron métodos exactos o heurísticas para obtener soluciones óptimas que ayude a la toma de decisiones. En la literatura no se encontraron trabajos que abordaran específicamente el secuenciamiento y ruteo de equipos de cosecha que atienden en un período de varias semanas o meses distintos puntos de cosecha distribuidos geográficamente en el país.

Este problema es particularmente relevante en el contexto uruguayo, ya que las empresas contratistas trabajan en nombre de las industrias de celulosa y deben reducir sus costos operacionales para mejorar su eficiencia al planificar la cosecha de madera de las plantaciones asignadas.

El modelo de programación matemática desarrollado es capaz de representar el problema de planificación establecido y puede implementarse para proporcionar soluciones basadas en datos reales en la práctica. Además, los

experimentos realizados permiten estimar las mejoras que podrían lograrse si diferentes empresas contratistas coordinan su trabajo y planifican conjuntamente sus operaciones. Este modelo se puede utilizar como una herramienta eficiente y práctica para ayudar a desarrollar la programación anual de cosecha de bosques y la asignación de equipos para las empresas contratistas, lo que conduce a planes de mejor calidad y oportunidades de mejora.

Se consideró también escenarios donde se deba tener en cuenta otros aspectos, como interrupciones en los planes debido a fallas inesperadas de los equipos, o dificultades para acceder a algunas plantaciones debido a las fuertes lluvias que hacen que algunos caminos sean imposibles de usar durante parte del año. Para el primer caso, este trabajo propone un algoritmo de replanificación de los tours de cosecha. Si la planificación tiene una granularidad pequeña (el largo de los períodos unitarios de tiempo son días), la indisponibilidad de equipos puede ser relevante en el modelado, si existe una granularidad grande (quincenas o meses), entonces la indisponibilidad por fallas pasa a ser poco relevante para el modelado. Para la pérdida de accesibilidad a un predio de cosecha, muy probable sobre todo por inclemencias climática, se propone un algoritmos de re-planificación, cuya solución tiene un sobre costo respecto a la planificación original, que el método propuesto busca mantener lo más bajo posible.

6.2. Trabajos futuros

Como posibles trabajos futuros se podrían destacar:

- Obtener datos reales de empresas sobre planes de cosecha pasados (definidos manualmente por los contratistas) y compararlos con los resultados de ejecutar el modelo matemático propuesto.
- Implementar una heurística para contemplar el caso de un escenario con dimensiones mayores, como ser centenares de lugares de cosecha, y decenas de contratistas y equipos de cosecha, que exceda la capacidad de los solvers de programación entera existentes para resolverlo de forma exacta. Este escenario podría ser realista en países más grandes que Uruguay.
- Continuar el estudio del problema de la reprogramación por indisponibilidad de bloques de cosecha, desarrollando modelos matemáticos que permitan la reprogramación óptima (ya que el método propuesto en esta

tesis es una heurística no exacta), y también estudiando la posibilidad de aplicar técnicas de programación bajo incertidumbre para tener en cuenta escenarios aleatorios futuros de indisponibilidad desde la planificación inicial.

- Aplicar modelos y metodologías derivados de la teoría de la Logística Colaborativa en el caso de los contratistas que coordinen sus trabajos, para abarcar un área más extensa de operación y repartir de equitativamente los beneficios del ahorro de costos, si se planifica de manera óptima los tours de cosecha. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la colaboración entre contratistas puede reducir los costos totales, pero no son suficientes para proponer cómo se debe distribuir este beneficio entre los distintos participantes, de manera que dicha distribución sea justa, ni las condiciones necesarias para que la misma sea atractiva para los distintos contratistas de manera que todos tengan un incentivo para participar.

Referencias bibliográficas

- [1] H. Tommasino and W. Annunziatto, *Situación de la cadena forestal, con énfasis en la celulosa*. Oficina de Planificación y Política Agropecuaria (OPYPA), Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), 2015.
- [2] Remsoft Inc., “Remsoft video series, operational planning.” Extraído de <http://www.remsoft.com/videos.php>(último acceso 12/09/2017).
- [3] P. J. D. Bredstrom and M. Rönnqvist, “Annual planning of harvesting resources in the forest industry,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 17, pp. 155–177, 2010.
- [4] Dirección General Forestal (DGF), Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP), “Todas las especies de bosques plantados registrados,” Montevideo. Extraído de <http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/multimedia/superficie2bespecies2bprincipales.xlsx>(último acceso 19/06/2017).
- [5] A. Dieste, “Programa de promoción de exportaciones de productos de madera,” tech. rep., Dirección Nacional de Industrias (DNI), Ministerio de Industrias, Energía y Minería (MIEM), Consejo Sectorial Forestal-Madera, Montevideo, 2012. Extraído de http://www.adimau.com.uy/articulos/07_programa_de_promocion_de_exportaciones_de_productos_de_madera_2012.pdf(último acceso 19/06/2017).
- [6] OECD/CEPAL, “Tendencias estructurales y desempeño económico en Uruguay,” in *Estudio Multi-Dimensional de Uruguay Volumen 1*, ch. 2, p. 100, OECD, United Nations Economic, Commission for Latin America and the Caribbean, 2014.

- [7] L. Cáceres and F. Fainasso, “Infraestructura vial del Uruguay: 2015-2030,” tech. rep., Cámara de Industrias del Uruguay, Montevideo, 2013. Extraído de http://www.ciu.com.uy/downloads/2013/dococumento_vialidad.pdf(último acceso 19/06/2017).
- [8] P. Gamio, “El precio de la competitividad,” *Revista Forestal*, pp. 36 – 41, junio 2016.
- [9] M. Benoit, “Ferrocarriles del Uruguay,” 2009. Extraído de <http://lfu1.tripod.com/index-6.html>(último acceso 19/06/2017).
- [10] Administración de Ferrocarriles del Estado(AFE), “Historia.” Extraído de <http://www.afe.com.uy/historia/>(último acceso 19/06/2017).
- [11] J. Paseyro and M. Erramuspe, “Esperar lo inesperado,” *Revista Forestal*, pp. 4 – 15, agosto 2016.
- [12] A. Weintraub and C. Romero, “Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: a review and comparison,” *Interfaces*, vol. 36, pp. 446–457, Setiembre-Octubre 2006.
- [13] G. S. Milanesi, D. Broz, F. Tohmé, and D. Rossit, “Strategic analysis of forest investments using real option: The fuzzy pay-off model (FPOM),” *Fuzzy Economic Review*, vol. 19, pp. 33–44, Mayo 2014.
- [14] D. Broz, G. Durand, D. Rossit, F. Tohmé, and M. Frutos, “Strategic planning in a forest supply chain: a multigoal and multiproduct approach,” *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 47, no. 999, pp. 297–307, 2016.
- [15] D. Broz, P. Mac Donagh, J. Arce, P. Yapura, D. Rossit, D. Rossit, and A. Cavallin, “La investigación operativa, la ingeniería forestal y los problemas sectoriales: ante la necesidad de un cambio de paradigma,” *Yvyrareta*, vol. 24, pp. 64–72, Noviembre 2017.
- [16] V. Viana, H. Cancela, and L. Pradenas, “Optimization in the planning of forest harvest services,” in *Proceedings of the I International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture*, (Montevideo, UY), pp. 231–232, Setiembre 2017.

- [17] V. Viana, H. Cancela, and L. Pradenas, “Optimizing scheduling and routing of forest harvesting equipment,” in *Actas de 50º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, (Rio de Janeiro, BR), Agosto 2018.
- [18] V. Viana, H. Cancela, and L. Pradenas, “Replanificación óptima de tours de cosecha forestal por falla temporal de equipos de cosecha,” in *Proceeding of the XIX CLAIO*, (Lima, PE), Setiembre 2018.
- [19] Uruguay XXI, Programa de Inversiones y Exportaciones, “Informe anual de comercio exterior,” tech. rep., Uruguay XXI, Programa de Inversiones y Exportaciones, 2016. Extraído de <http://www.uruguayxxi.gub.uy/informacion/wp-content/uploads/sites/9/2017/01/Informe-Anual-de-Comercio-Exterior-2016.pdf> (último acceso 19/06/2017).
- [20] G. Daniluk, “Código de cosecha forestal uruguayo,” tech. rep., Facultad de Agronomía. UdelaR, Montevideo, 2002. Extraído de <http://www.fagro.edu.uy/~forestal/cursos/tecmadera/Gustavo/CODIGO%20DE%20COSECHA%20FORESTAL%20URUGUAYO.%20OFICINA.%20V2.pdf> (último acceso 19/06/2017).
- [21] J. Arce, P. MacDonagh, and R. Friedl, “Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais,” *Revista Árvore*, vol. 28, pp. 207–217, 04 2004.
- [22] E. Da Silva, “Modelagem técnica e económica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas,” tese de pos-graduação em engenharia agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- [23] E. Leonello, S. P. Gonçalves, and P. T. Fenner, “Efeito do tempo de experiência de operadores de harvester no rendimento operacional,” *Revista Árvore*, vol. 36, pp. 1129–1134, diciembre 2012.
- [24] S. Machado de Assis, “Metodología para controle de custos na colheita florestal,” Tesis Ingeniería Forestal, Instituto de Florestas. Universidad Federal Rural, 2010.
- [25] R. Pulkki, “Glossary of forest harvesting terminology.” Extraído de http://flash.lakeheadu.ca/~repulkki/REP_terminology.pdf (último acceso 19/06/2017).

- [26] C. Machado, “Colheita florestal,” tech. rep., Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, BR, 2002.
- [27] S. Fuentealba Rivas, “Resolución de un modelo MIP para la planificación táctica entre cosecha forestal y aserraderos, usando patrones dinámicos,” Tesis de Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad de Concepción, 2016.
- [28] I. Ghajar and A. Najafi, “Evaluation of harvesting methods for sustainable forest management (SFM) using the analytical network process (ANP),” *Forest Policy and Economics*, vol. 21, pp. 81–91, 2012.
- [29] D. Carlsson, S. D’Amours and A. Martel and M. Rönnqvist, “Supply chain management in the pulp and paper industry,” tech. rep., CIRRELT, Octubre 2006.
- [30] S. D’Amours, M. Rönnqvist and A. Weintraub, “Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry,” *Information Systems and Operational Research*, vol. 46, no. 4, pp. 265–281, 2009.
- [31] S. D’Amours, M. Carle, and M. Rönnqvist, *Pulp and Paper Supply Chain Management*, vol. 33, pp. 489–516. Springer, 2014.
- [32] R. Pou Ferrari, *Forestación en Uruguay, una apuesta al porvenir*. Montevideo, UY: Plus Ultra Ediciones, 2016.
- [33] J. Solari, “Logística para crear ventajas competitivas,” tech. rep., Academia Nacional de Ingeniería de Uruguay, 2015.
- [34] J. Banhara, L. Rodriguez, F. Seixas, J. Moreira, L. Santos da Silva, S. Nobre, and A. Cogswell, “Optimized harvest scheduling in eucalyptus plantations under operational, spatial and climatic constraints,” *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, vol. 38, pp. 85–95, 03 2010.
- [35] I. Cooper, “What is a mapping study?,” *Journal of the Medical Library Association: JMLA*, vol. 104, no. 1, pp. 76–80, 2016.
- [36] J. Akoka, I. Comyn-Wattiau, and N. Laoufi, “Research on big data – a systematic mapping study,” *Computer Standards and Interfaces*, vol. 54, no. April 2016, pp. 105–115, 2017.

- [37] B. Kitchenham and S. Charters, “Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering version 2.3,” *Engineering*, vol. 45, no. 4, p. 1051, 2007.
- [38] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, and M. Mattsson, “Systematic mapping studies in software engineering,” in *The 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, (Swindon, UK), pp. 68–77, 2008.
- [39] F. Serra, “Evaluación de la calidad de datos en un sistema de data warehousing: Un enfoque basado en contextos,” Tesis de Maestría en Informática, PEDECIBA. Facultad de Ingeniería. UdelaR, 2016.
- [40] S. Albawi, A. Abbas, K. M. Saffer, and S. Q. Fleh, “A systematic mapping study on runtime monitoring of services,” *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*, vol. Special Volume, Diciembre 2016.
- [41] A. K. Abbas, S. Q. Fleh, and H. H. Safi, “Systematic mapping study on managing variability in software product line engineering,” in *Second Engineering Scientific Conference College of Engineering*, vol. 15, pp. 511–520, Diciembre 2015.
- [42] E. F. Spósito Barreiros, “A systematic mapping study on software engineering testbeds,” Dissertações de Mestrado - Ciência da Computação, Universidade Federal de Pernambuco, 2011.
- [43] A. S. Marques, J. F. Audy, S. D’Amours y M. Rönnqvist, *Tactical and Operational Harvest Planning*, pp. 239–267. Springer Netherlands, 2014.
- [44] M. Frisk, P. Flisberg, M. Rönnqvist, and G. Andersson, “Detailed scheduling of harvest teams and robust use of harvest and transportation resources,” *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 31, no. 7, pp. 681–690, 2016.
- [45] R. Linfati-Medina, L. Pradenas-Rojas, and J. Ferland, “Aggregate planning in forest harvest: A mathematical programming model and solution [Planificación agregada en la cosecha forestal: Un modelo de programación matemática y solución],” *Maderas: Ciencia y Tecnología*, vol. 18, no. 4, pp. 555–566, 2016.
- [46] A. Kangas, M. Hartikainen, and K. Miettinen, “Simultaneous optimization of harvest schedule and measurement strategy,” *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 29, pp. 224 – 233, 2014.

- [47] M. Ouhimmou, S. Haddad, and T. Boukherroub, “Decision support system for selection of harvest areas and wood allocation to mills,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 3, pp. 628–633, 2015.
- [48] I. Martins, F. Alvelos, and M. Constantino, “A branch-and-price approach for harvest scheduling subject to maximum area restrictions,” *Computational Optimization and Applications*, vol. 51, pp. 363–385, Enero 2012.
- [49] M. Goycoolea, A. T. Murray, F. Barahona, R. Epstein, and A. Weintraub, “Harvest scheduling subject to maximum area restrictions: Exploring exact approaches,” *Operations Research*, vol. 53, no. 3, pp. 490–500, 2005.
- [50] K. Crowe, J. Nelson, and M. Boyland, “Solving the area-restricted harvest-scheduling model using the branch and bound algorithm,” *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 33, no. 9, pp. 1804–1814, 2003.
- [51] R. St. John and S. F. Tóth, “Spatially explicit forest harvest scheduling with difference equations,” *Annals of Operations Research*, vol. 232, no. 1, pp. 235–257, 2015.
- [52] A. Yoshimoto and M. Konoshima, “Spatially constrained harvest scheduling for multiple harvests by exact formulation with common matrix algebra,” *Journal of Forest Research*, vol. 21, no. 1, pp. 15–22, 2016.
- [53] A. L. D. Augustynczyk, J. E. Arce, and A. C. L. da Silva, “Spatial forest harvest planning considering maximum operational areas,” *Cerne*, vol. 21, no. 4, pp. 649–656, 2015.
- [54] A. L. D. Augustynczyk, J. E. Arce, R. Yousefpour, and A. C. L. Silva, “Promoting harvesting stands connectivity and its economic implications in Brazilian forest plantations applying integer linear programming and simulated annealing,” *Forest Policy and Economics*, vol. 73, pp. 120–129, 2016.
- [55] P. J. M. van Laarhoven and E. H. L. Aarts, *Simulated annealing*, pp. 7–15. Dordrecht, NE: Springer Netherlands, 1987.
- [56] L. Dong, P. Bettinger, Z. Liu, H. Qin, and Y. Zhao, “Evaluating the neighborhood, hybrid and reversion search techniques of a simulated annealing algorithm in solving forest spatial harvest scheduling problems,” *Silva Fennica*, vol. 50, no. 4, 2016.

- [57] P. Bettinger, M. Demirci, and K. Boston, “Search reversion within s-metaheuristics: impacts illustrated with a forest planning problem,” *Silva Fennica*, vol. 49, no. 2, pp. 1–20, 2015.
- [58] T. F. Fonseca, A. Cerveira, and A. Mota, “An integer programming model for a forest harvest problem in pinus pinaster stands,” *Forest Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 272–283, 2012.
- [59] E. C. Marshalek, B. S. Ramage, and M. D. Potts, “Integrating harvest scheduling and reserve design to improve biodiversity conservation,” *Ecological Modelling*, vol. 287, pp. 27–35, 2014.
- [60] J. Kašpar, R. Marušák, and R. Hlavatý, “A forest planning approach with respect to the creation of overmature reserved areas in managed forests,” *Forests*, vol. 6, no. 2, pp. 328–343, 2015.
- [61] J. Kašpar, G. F. E. Perez, A. Cerveira, and R. Marušák, “Spatial considerations of an area restriction model for identifying harvest blocks at commercial forest plantations,” *Central European Forestry Journal*, vol. 62, no. 3, pp. 146 – 151, 2016.
- [62] R. Carvajal, M. Constantino, M. Goycoolea, J. P. Vielma, and A. Weintraub, “Imposing connectivity constraints in forest planning models,” *Operations Research*, vol. 61, no. 4, pp. 824–836, 2013.
- [63] G. Passolt, M. J. Fix, and S. F. Tóth, “A voronoi tessellation based approach to generate hypothetical forest landscapes,” *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 43, no. 1, pp. 78–89, 2013.
- [64] J. Lappi and R. Lempinen, “A linear programming algorithm and software for forest-level planning problems including factories,” *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 29, pp. 178 – 184, 2014.
- [65] P. Vopěnka, J. Kašpar, and R. Marušák, “GIS tool for optimization of forest harvest-scheduling,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 113, pp. 254–259, 2015.
- [66] W. Chung, D. Dykstra, F. Bower, S. O’Brien, M. A. Richard, and J. Sessions, “General Technical Report PNW-GTR,” Tech. Rep. 847, USDA Forest Service, 2012.

- [67] A. Sokolov and V. Syuneyev, “A toolset of decision support systems for wood harvesting and forest bioenergy logistics in Russia,” in *Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Energy and Clean Technologies*, vol. 1, pp. 3–10, Enero 2014.
- [68] A. Augustynczyk, J. Arce, and A. Silva, “Aggregating forest harvesting activities in forest plantations through integer linear programming and goal programming,” *Journal of Forest Economics*, vol. 24, pp. 72–81, 2016.
- [69] M. Schniederjans, “Goal programming,” *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, pp. 658–661, 2013.
- [70] J. Bachmatiuk, J. Garcia-Gonzalo, and J. Borges, “Analysis of the performance of different implementations of a heuristic method to optimize forest harvest scheduling,” *Silva Fennica*, vol. 49, no. 4, 2015.
- [71] J. Kašpar, R. Marušák, and P. Vopěnka, “Comparison of two alternative optimization techniques for spatial harvest planning,” *Scientia Agriculturae Bohemica*, vol. 2013, no. 2, pp. 90–96, 2013.
- [72] T. Smaltschinski, U. Seeling, and G. Becker, “Clustering forest harvest stands on spatial networks for optimised harvest scheduling,” *Annals of Forest Science*, vol. 69, no. 5, pp. 651–657, 2012.
- [73] B. Delaunay, “Sur la sphere vide. a la mémoire de georges voronoi. izvestia akademii nauk sssr, otdelenie matematicheskikh i estestvennykh nauk,” *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, vol. 7, 1934.
- [74] J. M. M. Moreira, L. C. Rodriguez, and J. V. Caixeta-Filho, “An optimization model to integrate forest plantations and connecting corridors,” *Forest Science*, vol. 59, no. 6, pp. 661–669, 2013.
- [75] R. Marušák, J. Kašpar, R. Hlavatý, V. Kotek, K. Kuželka, and P. Vopěnka, “Alternative modelling approach to spatial harvest scheduling with respect to fragmentation of forest ecosystem,” *Environmental Management*, vol. 56, pp. 1134–1147, Noviembre 2015.
- [76] K. L. Ross and S. F. Tóth, “A model for managing edge effects in harvest scheduling using spatial optimization,” *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 31, no. 7, pp. 646–654, 2016.

- [77] N. Könnyű and S. F. Tóth, “A cutting plane method for solving harvest scheduling models with area restrictions,” *European Journal of Operational Research*, vol. 228, no. 1, pp. 236–248, 2013.
- [78] R. E. Gomory, “An algorithm for the mixed integer problem,” *Rand Report RM-25797*, 1960.
- [79] R. Bronson, *Operations Research*. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [80] S. S. Rao, *Optimization Theory and Applications*. New Delhi: Wiley Eastern Limited, second ed., 1984.
- [81] P. H. B. M. da Silva, J. E. Arce, G. V. Loch, H. C. David, and L. D. Fiorentin, “Forest harvest scheduling plan integrated to the road network,” *CERNE*, vol. 22, pp. 69–76, 03 2016.
- [82] R. W. Floyd, “Algorithm 97: Shortest Path,” *Commun. ACM*, vol. 5, pp. 345–, Junio 1962.
- [83] P. J. Manning and M. E. McDill, “Optimal parameter settings for solving harvest scheduling models with adjacency constraints,” *Mathematical and Computational Forestry and Natural-Resource Sciences*, vol. 4, no. 1, pp. 16 – 26, 2012.
- [84] D. G. Fotakis, E. Sidiropoulos, D. Myronidis, and K. Ioannou, “Spatial genetic algorithm for multi-objective forest planning,” *Forest Policy and Economics*, vol. 21, pp. 12–19, 2012.
- [85] L. Bont, “Optimal layout of a forest road network [optimales layout einer walderschliessung],” *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, vol. 167, no. 5, pp. 294–301, 2016.
- [86] A. Najafi and E. W. Richards, “Designing a Forest Road Network Using Mixed Integer Programming,” *Croatian Journal of Forest Engineering*, vol. 34, pp. 17–30, 2013.
- [87] C. D. Palma and J. D. Nelson, “A robust model for protecting road-building and harvest-scheduling decisions from timber estimate errors,” *Forest Science*, vol. 60, no. 1, pp. 137–148, 2014.

- [88] P. Flisberg, M. Frisk, and M. Rönnqvist, “Integrated harvest and logistic planning including road upgrading,” *Scandinavian Journal of Forest Research*, vol. 29, pp. 195 – 209, 2014.
- [89] D. Meignan, J. Frayret, G. Pesant, and M. Blouin, “A heuristic approach to automated forest road location,” *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 42, no. 12, pp. 2130–2141, 2012.
- [90] P. Festa and M. Resende, “Grasp: An annotated bibliography,” in *Essays and Surveys in Metaheuristic*, pp. 325–367, Boston, US: Springer US, 2002.
- [91] D. Meignan, J.-M. Frayret, and G. Pesant, “Interactive planning system for forest road location,” *Journal of Heuristics*, vol. 21, no. 6, pp. 789–817, 2015.
- [92] O. Sanei Bajgiran, M. Kazemi Zanjani, and M. Nourelfath, “Forest harvesting planning under uncertainty: a cardinality-constrained approach,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, pp. 1–16, Julio 2016.
- [93] A. Robinson, M. McLarin, and I. Moss, “A simple way to incorporate uncertainty and risk into forest harvest scheduling,” *Forest Ecology and Management*, vol. 359, pp. 11–18, 2016.
- [94] K. Eyvindson and A. Kangas, “Comment on “a simple way to incorporate uncertainty and risk into forest harvest scheduling”,” *Forest Ecology and Management*, vol. 386, pp. 86–91, 2017.
- [95] F. Veliz, J. Watson, A. Weintraub, R. Wets, and D. Woodruff, “Stochastic optimization models in forest planning: a progressive hedging solution approach,” *Annals of Operations Research*, vol. 232, no. 1, pp. 259–274, 2015. cited By 2.
- [96] J. Garcia-Gonzalo, C. Pais, J. Bachmatiuk, and A. Weintraub, “Accounting for climate change in a forest planning stochastic optimization model,” *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 46, no. 9, pp. 1111–1121, 2016.
- [97] R. Wei and A. T. Murray, “Spatial uncertainty in harvest scheduling,” *Annals of Operations Research*, vol. 232, no. 1, pp. 275–289, 2015.
- [98] I. Kara and T. Bektas, “Integer linear programming formulations of multiple salesman problems and its variations,” *European Journal of Operational Research*, vol. 174, pp. 1449–1458, 2006.

- [99] K. Kardel, N. Javadian, and F. Adbesh, “A new approach to solving the fixed destination multi-depot multiple traveling salesman problem using genetic algorithms,” in *The 7th International Conference on Optimization: Techniques and Applications 2007 (ICOTA7)*, no. 49, (Kobe, JP), pp. 491–492, Diciembre 2007.
- [100] L. Kota and K. Jármai, “Preliminary studies on the fixed destination mm-tsp solved by discrete firefly algorithm,” *Advanced Logistic Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 95–102, 2013.
- [101] M. Assaf and M. Ndiaye, “A transformation for multiple depot multiple traveling salesman problem,” in *The International Conference on Engineering and MIS 2017 (ICEMIS)*, (Monastir, TN), pp. 1–5, mayo 2017.
- [102] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca(MGAP), “Cartografía forestal - 2012.” Extraído de <http://www.mgap.gub.uy/unidad-ejecutora/direccion-general-forestal/informacion-tecnica/cartografia-forestal>(último acceso 12/09/2017).
- [103] Google, “Distance Matrix API.” Extraído de <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/start?hl=es-419>(último acceso 12/09/2017).

ANEXOS

Anexo 1

Datos procesados

1.1. Datos geográficos y de volumen de madera de los casos de prueba

1.1.1. Caso 1

Coordenadas geográficas de la base de operaciones y de los bloques de cosecha del Caso 1. Los bloques marcados con * son base de operaciones.

Bloque	Latitud	Longitud
0*	-31,7102	-55,98029
1	-31,71122	-55,82661
2	-31,69711	-55,70038
3	-31,76251	-55,68071
4	-31,92133	-55,50101
5	-31,9573	-55,64035
6	-32,12788	-55,08224
7	-32,41395	-55,52705
8	-32,33081	-55,47545
9	-32,3256	-55,52366
10	-32,24778	-55,55193
11	-32,16629	-55,56624
12	-32,0893	-55,86283

1.1.2. Caso 2

Coordenadas geográficas de la base de operaciones y de los bloques de cosecha del Caso 2. Los bloques marcados con * son base de operaciones.

Bloque	Latitud	Longitud
0*	-30.87631	-55.54850
1	-30.95696	-55.46397
2	-30.95030	-55.49060
3	-30.95881	-55.54720
4	-30.99525	-55.50596
5	-31.09235	-55.42180
6	-31.16098	-55.37741
7	-31.73770	-54.99101
8	-31.38294	-55.38499
9	-31.28268	-55.42457
10	-31.36111	-55.46674
11	-31.26641	-55.43493
12	-31.15543	-55.42531
13	-31.13027	-55.75381
14	-31.34409	-55.67391
15	-31.46839	-55.74641

1.1.3. Caso 3

Coordenadas geográficas, periodos para la cosecha y volumen estimado de madera de los bloques de cosecha del Caso 3. Los bloques marcados con * son base de operaciones.

Bloque	Latitud	Longitud	T_{min}	T_{max}	Volumen de madera (m^3)
0*	-30.87631	-55.54850	-	-	-
1	-30.95696	-55.46397	5	6	12247
2	-30.95030	-55.49060	8	9	8673
3	-30.95881	-55.54720	8	8	11646
4	-30.99525	-55.50596	4	5	9104
5	-31.09235	-55.42180	1	2	16662
6	-31.16098	-55.37741	1	2	12455
7	-31.73770	-54.99101	6	7	14758
8	-31.38294	-55.38499	5	6	8496
9	-31.28268	-55.42457	2	3	11823
10	-31.36111	-55.46674	3	4	11705
11	-31.26641	-55.43493	3	4	12726
12	-31.15543	-55.42531	4	5	15761
13	-31.13027	-55.75381	7	8	15315
14	-31.34409	-55.67391	2	3	13837
15	-31.46839	-55.74641	6	7	13458
16	-31.71122	-55.82661	2	5	18894
17	-31.69711	-55.70038	1	4	12580
18	-31.76251	-55.68071	1	4	11796
19	-31.92133	-55.50101	2	5	8796
20	-31.9573	-55.64035	2	5	18041
21	-32.12788	-55.08224	3	6	18303
22	-32.41395	-55.52705	3	6	15379
23	-32.33081	-55.47545	1	4	9072
24	-32.3256	-55.52366	1	4	11023
25	-32.24778	-55.55193	3	6	9651
26	-32.16629	-55.56624	1	4	13455
27	-32.0893	-55.86283	3	6	17015
28*	-31.7102	-55.98029	-	-	-

1.1.4. Caso 4

Coordenadas geográficas, periodos para la cosecha y volumen estimado de madera de los bloques de cosecha del Caso 4. Los bloques marcados con * son base de operaciones.

Bloque	Latitud	Longitud	T_{min}	T_{max}	Volumen de madera (m^3)
-1*	-30.87631	-55.54850	-	-	-
-2*	-30.90110	-55.52297	-	-	-
1	-30.95696	-55.46397	1	1	14262
2	-30.95030	-55.49060	1	1	13809
3	-30.95881	-55.54720	2	2	14833
4	-30.99525	-55.50596	2	2	13642
5	-31.09235	-55.42180	3	3	14024
6	-31.16098	-55.37741	3	3	14852
7	-31.73770	-54.99101	4	4	13996
8	-31.38294	-55.38499	4	4	13694
9	-31.28268	-55.42457	5	5	13198
10	-31.36111	-55.46674	5	5	13604
11	-31.26641	-55.43493	6	6	14382
12	-31.15543	-55.42531	6	6	13770
13	-31.13027	-55.75381	7	7	13184
14	-31.34409	-55.67391	7	7	14783
15	-31.46839	-55.74641	8	8	14736

1.1.5. Caso 5

Coordenadas geográficas, periodos para la cosecha y volumen estimado de madera de los bloques de cosecha del Caso 5. Los bloques marcados con * son base de operaciones.

Bloque	Latitud	Longitud	T_{min}	T_{max}	Volumen de madera (m^3)
-1*	-31.71020	-55.98029	-	-	-
-2*	-32.80262	-56.52006	-	-	-
1	-31.71122	-55.82661	1	1	13372
2	-31.69711	-55.70038	1	1	14194
3	-31.76251	-55.68071	2	2	14186
4	-31.92133	-55.50101	2	2	13604
5	-31.95730	-55.64035	3	3	13061
6	-32.12788	-55.08224	3	3	14309
7	-32.41395	-55.52705	4	4	13825
8	-32.33081	-55.47545	4	4	13219
9	-32.32560	-55.52366	5	5	14843
10	-32.24778	-55.55193	5	5	13051
11	-32.16629	-55.56624	6	6	13677
12	-32.08930	-55.86283	6	6	13129
13	-32.28669	-55.85636	7	7	14475
14	-32.39706	-55.84538	7	7	14707
15	-32.56199	-55.87912	7	8	14095
16	-32.50253	-55.87692	8	9	14334
17	-32.61393	-55.99374	9	9	14676
18	-32.66165	-56.16791	9	10	14543
19	-32.62146	-56.47423	10	10	14299

1.1.6. Caso 6

Coordenadas geográficas, periodos para la cosecha y volumen estimado de madera de los bloques de cosecha del Caso 6. Los bloques marcados con * son base de operaciones.

Bloque	Latitud	Longitud	T_{min}	T_{max}	Volumen de madera (m^3)
-1*	-30.87631	-55.54850	-	-	-
-2*	-30.90110	-55.52297	-	-	-
1	-30.95696	-55.46397	1	1	14262
2	-30.95030	-55.49060	1	1	13809
3	-30.95881	-55.54720	2	2	14833
4	-30.99525	-55.50596	2	2	13642
5	-31.09235	-55.42180	3	3	14024
6	-31.16098	-55.37741	3	3	14852
7	-31.73770	-54.99101	4	4	13996
8	-31.38294	-55.38499	4	4	13694
9	-31.28268	-55.42457	5	5	13198
10	-31.36111	-55.46674	5	5	13604
11	-31.26641	-55.43493	6	6	14382
12	-31.15543	-55.42531	6	6	13770
13	-31.13027	-55.75381	7	7	13184
14	-31.34409	-55.67391	7	7	14783
15	-31.46839	-55.74641	8	8	14736
-3*	-31.71020	-55.98029	-	-	-
-4*	-32.80262	-56.52006	-	-	-
16	-31.71122	-55.82661	1	1	13372
17	-31.69711	-55.70038	1	1	14194
18	-31.76251	-55.68071	2	2	14186
19	-31.92133	-55.50101	2	2	13604
20	-31.95730	-55.64035	3	3	13061
21	-32.12788	-55.08224	3	3	14309
22	-32.41395	-55.52705	4	4	13825
23	-32.33081	-55.47545	4	4	13219
24	-32.32560	-55.52366	5	5	14843
25	-32.24778	-55.55193	5	5	13051
26	-32.16629	-55.56624	6	6	13677
27	-32.08930	-55.86283	6	6	13129
28	-32.28669	-55.85636	7	7	14475
29	-32.39706	-55.84538	7	7	14707
30	-32.56199	-55.87912	7	8	14095
31	-32.50253	-55.87692	8	9	14334
32	-32.61393	-55.99374	9	9	14676
33	-32.66165	-56.16791	9	10	14543
34	-32.62146	-56.47423	10	10	14299

1.1.7. Casos de prueba de replanificación en caso de falla de equipos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	22	94	53	37	75	52	59	76	4
2	22	0	30	62	56	83	89	67	28	51
3	94	30	0	76	57	54	22	44	99	59
4	53	62	76	0	43	95	39	62	74	60
5	37	56	57	54	0	46	7	63	21	58
6	75	83	54	95	46	0	29	12	45	74
7	52	89	22	39	7	29	0	59	46	75
8	59	67	44	62	63	12	59	0	48	33
9	76	28	5	5	49	39	33	58	0	33
10	99	54	47	87	32	3	91	74	15	0

Tabla 1.1: Matriz de distancias ficticias entre 10 puntos de cosecha.

Bloque	T_{min}	T_{max}	Volumen(m^3)	Distancia base 1	Distancia base 2
1	1	5	8874	71	50
2	2	4	16336	48	88
3	2	4	8803	32	63
4	3	4	10534	83	71
5	2	5	14831	14	1
6	2	4	11112	60	43
7	2	6	11100	50	21
8	1	6	17051	93	15
9	2	4	13662	42	66
10	1	4	13274	59	35

Tabla 1.2: Ventanas de tiempo para la cosecha, volúmenes de madera y distancias a las bases de operaciones, para 10 bloques de cosecha.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	52	59	76	79	75	65	30	16	35	76	55	78	1	73	67	100	83	24	32
2	52	0	50	62	8	45	50	44	28	19	40	86	64	83	72	41	90	52	22	66
3	59	50	0	15	23	82	58	49	40	7	18	37	26	29	11	24	84	79	98	2
4	76	62	15	0	89	88	54	67	73	99	72	39	2	83	38	44	78	1	79	37
5	79	8	23	89	0	8	73	86	29	30	72	81	29	51	83	58	80	2	84	73
6	75	45	82	88	8	0	30	39	39	71	61	80	79	53	13	60	63	5	97	88
7	65	50	58	54	73	30	0	37	13	51	90	82	43	67	4	99	5	81	18	29
8	30	44	49	67	86	39	37	0	94	32	56	7	89	13	4	18	65	44	58	69
9	16	28	40	73	29	39	13	94	0	32	20	8	17	37	27	53	27	56	38	17
10	35	19	7	99	30	71	51	32	32	0	1	40	76	44	100	99	75	83	11	60
11	76	40	18	72	72	61	90	56	20	1	0	65	4	81	15	69	17	99	28	19
12	55	86	37	39	81	80	82	7	8	40	65	0	98	50	47	11	13	6	40	16
13	78	64	26	2	29	79	43	89	17	76	4	98	0	72	76	6	65	49	69	30
14	1	83	29	83	51	53	67	13	37	44	81	50	72	0	74	45	78	11	82	100
15	73	72	11	38	83	13	4	4	27	100	15	47	76	74	0	69	6	80	66	72
16	67	41	24	44	58	60	99	18	53	99	69	11	6	45	69	0	20	55	91	32
17	100	90	84	78	80	63	5	65	27	75	17	13	65	78	6	20	0	16	77	33
18	83	52	79	1	2	5	81	44	56	83	99	6	49	11	80	55	16	0	51	63
19	24	22	98	79	84	97	18	58	38	11	28	40	69	82	66	91	77	51	0	86
20	32	66	2	37	73	88	29	69	17	60	19	16	30	100	72	32	33	63	86	0

Tabla 1.3: Matriz de distancias ficticias entre 20 puntos de cosecha.

Bloque	T_{min}	T_{max}	Volumen(m^3)	Distancia base 1	Distancia base 2
1	2	7	13612	32	94
2	4	10	10601	87	22
3	2	6	12416	83	70
4	5	8	7946	91	3
5	5	6	7883	69	48
6	3	7	7938	98	31
7	5	8	9931	47	5
8	2	6	11022	44	52
9	5	7	9592	67	69
10	4	7	12715	51	80
11	3	10	14523	70	59
12	5	9	15625	36	71
13	2	9	13092	70	30
14	3	8	16078	63	35
15	3	10	11737	19	73
16	3	9	17217	79	4
17	1	9	14624	17	68
18	3	7	15509	51	62
19	5	9	12425	62	68
20	3	7	9206	27	58

Tabla 1.4: Ventanas de tiempo para la cosecha, volúmenes de madera y distancias a las bases de operaciones, para 20 bloques de cosecha.

Anexo 2

Código en AMPL del Modelo Matemático

```
# F al conjunto de las bases de operaciones de los  
contratistas.  
set F;  
  
# K conjunto de equipos de cosecha pertenecientes a los  
contratistas  
#set K;  
  
# B conjunto de bloques a cosechar  
set B;  
  
# D es el conjunto de demandas de madera en cada periodo de  
tiempo, para la planta industrial  
#set D;  
  
set T;  
  
#=====
```

*PARAMETROS*

```
#=====  
  
param cant_equipos {f in F};
```

```

param L;
param M;

param Tmin {i in B};

param Tmax {i in B};

# Demanda de la planta industrial en cada periodo de tiempo

param demanda {t in T};

# Volumen de madera estimado de cada bloque de cosecha

param volumen {i in B};

# Distancias entre los bloques de cosecha

param C_mud {i in B, j in B};

# Distancia entre cada bloque y las bases de operaciones

param C_viaje {i in B, f in F};

# Variable que indica el traslado de un equipo de un bloque a otro

var x{ i in F union B , j in F union B , f in F }binary;

# Variable que indica en que periodo fue cosechado un bloque

var y{ i in B, t in T}binary;

# Variable para representar la cantidad de bloques visitados por el equipo k en el i-esimo bloque

var u{ i in F union B }integer;

```

```

minimize z: sum {f in F} (sum{j in B} (C_viaje[j,f]*x[f,j,f] +
    C_viaje[j,f]*x[j,f,f])) + sum {f in F} (sum {i in B} (sum{j
    in B} C_mud[i,j]*x[i,j,f]));

```

```

#=====
#           RESTRICCIONES
#=====

```

```

s.t. rest1 {f in F}: sum {j in B} x[f,j,f] = cant_equipos[f];

```

```

s.t. rest2 {j in B}: sum {f in F} x[f,j,f] + sum {f in F} (sum
    {i in B} x[i,j,f]) = 1;

```

```

s.t. rest3 {f in F, j in B}: x[f,j,f] + sum {i in B} x[i,j,f] -
    x[j,f,f] - sum {i in B} x[j,i,f] = 0;

```

```

s.t. rest4 {f in F}: sum {j in B} x[f,j,f] - sum {j in B}
    x[j,f,f] = 0;

```

```

s.t. rest5 {i in B}: u[i] + (L-2)* sum {f in F} x[f,i,f] - sum
    {f in F} x[i,f,f] <= L-1;

```

```

s.t. rest6 {i in B}: u[i] + sum {f in F} x[f,i,f] + (2-M) * sum
    {f in F} x[i,f,f] >= 2;

```

```

s.t. rest7 {i in B}: sum {f in F} x[f,i,f] + sum {f in F}
    x[i,f,f] <=1;

```

```

s.t. rest8 {i in B, j in B: i<>j}: u[i] - u[j] + L * sum {f in
    F} x[i,j,f] + (L-2)*sum {f in F} x[j,i,f] <= L-1;

```

```

s.t. rest9 {i in B}: u[i] >= Tmin[i];

```

```

s.t. rest10 {i in B}: u[i] <= Tmax[i];

```

s.t. rest11 {i in B}: $\sum \{t \text{ in } T: t \geq T_{\min}[i] \text{ and } t \leq T_{\max}[i]\}$
y[i,t] = 1;

s.t. rest12 {i in B}: $u[i] = \sum \{t \text{ in } T\} t * y[i,t]$;

s.t. rest13 {t in T}: $\sum \{i \text{ in } B\} y[i,t] * \text{volumen}[i] \geq$
demanda[t];
