

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN PROBLEMA DE GESTIÓN FORESTAL CON  
REQUERIMIENTOS DE ADYACENCIA EN  
UNIDADES TERRITORIALES

TESIS PRESENTADA POR

CARLOS BELTRÁN PÉREZ

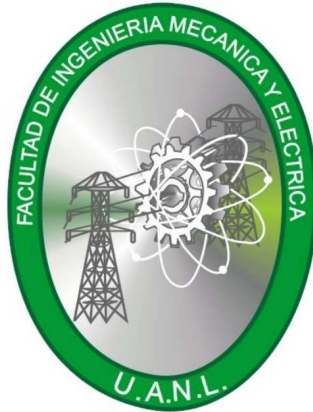
EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



UN PROBLEMA DE GESTIÓN FORESTAL CON  
REQUERIMIENTOS DE ADYACENCIA EN  
UNIDADES TERRITORIALES

TESIS PRESENTADA POR

CARLOS BELTRÁN PÉREZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

JUNIO 2012

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**División de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Un Problema de Gestión Forestal con Requerimientos de Adyacencia en Unidades Territoriales», realizada por el alumno Carlos Beltrán Pérez, con número de matrícula 1541900, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis



---

Dr. Roger Z. Ríos Mercado

Asesor



---

Dra. Sara V. Rodríguez Sánchez

Revisor

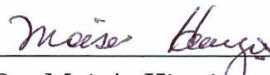


---

Dr. Óscar A. Aguirre Calderón

Revisor

Vo. Bo.



---

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, junio 2012

*A mis muertos.*

*Porque también somos lo que hemos perdido.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>xv</b>
<b>Resumen</b>	<b>xvii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema . . . . .	1
1.2. Motivación y justificación . . . . .	6
1.3. Objetivo . . . . .	10
1.4. Estructura de la Tesis . . . . .	11
<b>2. Antecedentes</b>	<b>12</b>
2.1. Gestión forestal . . . . .	12
2.2. Gestión forestal en México . . . . .	14
2.2.1. Bosque templado-frío . . . . .	17
2.2.2. Métodos de gestión para bosque templado . . . . .	19
2.3. La Investigación de Operaciones en la gestión forestal . . . . .	23
2.3.1. Planificación jerárquica . . . . .	23
2.3.2. Campos de aplicación . . . . .	28

---

2.3.3. Métodos de planificación . . . . .	32
2.3.4. La Investigación de Operaciones en la gestión forestal mexicana	41
2.4. Consideraciones de adyacencia . . . . .	42
2.4.1. Modelo de restricción por unidad . . . . .	47
2.4.2. Modelo de restricción por área . . . . .	51
2.4.3. Barrera de regeneración . . . . .	58
2.4.4. Madurez biológica . . . . .	59
2.4.5. Bosque nativo . . . . .	60
2.4.6. Distancia máxima . . . . .	62
<b>3. Planteamiento del problema</b>	<b>64</b>
3.1. Descripción del problema . . . . .	64
3.2. Supuestos y definición del modelo matemático URM-1 . . . . .	65
3.3. Supuestos y definición del modelo matemático ARM-1 . . . . .	70
3.4. Cálculo de parámetros maderables . . . . .	76
3.4.1. Cálculo de la posibilidad leñosa anual por especie . . . . .	76
<b>4. Metodología de solución</b>	<b>79</b>
4.1. Datos de entrada . . . . .	81
4.2. Preprocesamiento . . . . .	81
4.2.1. Preproceso en Modelo URM-1 . . . . .	82
4.2.2. Preproceso en Modelo ARM-1 . . . . .	84
4.3. Procesamiento . . . . .	87

---

4.4. Postprocesamiento . . . . .	91
<b>5. Estudio computacional</b>	<b>92</b>
5.1. Objetivos . . . . .	92
5.2. Caso de estudio . . . . .	93
5.3. Ambiente de desarrollo experimental . . . . .	95
5.4. Las formulaciones en el caso de estudio . . . . .	95
5.4.1. Tamaño de las formulaciones . . . . .	96
5.4.2. Impacto del parámetro de área máxima . . . . .	97
5.4.3. Implementaciones de preprocesamiento . . . . .	98
5.5. Aplicación de la metodología en el caso de estudio . . . . .	100
5.5.1. Consideraciones logístico-operativas . . . . .	100
5.5.2. Consideraciones ambientales . . . . .	105
5.5.3. Consideraciones mixtas . . . . .	111
<b>6. Conclusiones y consideraciones finales</b>	<b>114</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	115
6.2. Contribuciones . . . . .	117
6.3. Trabajo a futuro . . . . .	118
<b>Bibliografía</b>	<b>119</b>
<b>A. Parámetros maderables</b>	<b>131</b>
A.1. Cálculo de la posibilidad leñosa periódica por subrodal . . . . .	131

---

A.2. Cálculo del beneficio económico por subrodal y por período . . . . .	134
<b>B. Preprocesamiento</b>	<b>136</b>
B.1. Relación de conjuntos factibles por unidad . . . . .	136
B.2. Relación de conjuntos factibles por clique maximal . . . . .	137
<b>C. Tablas de posibilidad leñosa</b>	<b>138</b>
<b>D. Tablas de beneficio económico</b>	<b>142</b>
<b>E. Mapas</b>	<b>146</b>
E.1. Distribución de edades en el espacio . . . . .	146
E.2. Mapas de solución . . . . .	147



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. En negro, cosecha en subrodal 3 (a), genera veda de cosecha en los subrodales 2,4,7,8 y 9 (b). . . . .	3
1.2. División territorial del caso de estudio en 6 rodales y 168 subrodales .	4
2.1. Vegetación primaria en México. [91]. . . . .	15
2.2. Distribución de los bosques templados dentro de la República Mexicana.	17
2.3. Obtención de masas forestales regulares a través de cortas de regeneración. . . . .	18
2.4. Problema de planificación a gran escala en Brasil, en el que no se limita la conectividad de los ecosistemas naturales. . . . .	24
2.5. Bosque con dos clases (a), convertido a una plantación regular con tres clases de edad (b). . . . .	34
2.6. Bosque templado rodalizado con ayuda de SIG (a), es representado por un grafo planar (b). . . . .	36
2.7. Ejemplo de estados y etapas para una red de opciones asociada a un problema de gestión forestal. . . . .	38
2.8. Clasificación de los problemas con restricciones de adyacencia en la planificación forestal. . . . .	43

---

2.9. Bosque (a), rodalizado en función de sus características en el espacio (b). . . . .	44
2.10. Tipos de relaciones de adyacencia . . . . .	45
2.11. Proceso de planificación: Región (a) seguida de su rodalización (b) hasta la obtención de una distribución óptima de cosecha (c). . . . .	47
2.12. Conjuntos de subrodales (a) fusionados manualmente en unidades de cosecha (b) con área máxima de 48 ha. . . . .	48
2.13. Cosecha infactible de 93 ha. violando un área máxima de 48 ha. (a) y cosechas factibles de 48 y 44 ha. (b). . . . .	49
2.14. Mapa de una región con 11 unidades y su área respectiva entre corchetes.	52
2.15. Mapa de una región (a) y el clique maximal $U$ contenido en esta, intersectado por 4 conjuntos factibles (b). . . . .	55
2.16. Mapa de subregiones (a) y el grafo de su topología (b). Los polígonos marcados en negro se han programado para su cosecha. . . . .	58
4.1. Diagrama de flujo de la metodología para el modelo URM-1. . . . .	79
4.2. Diagrama de flujo de la metodología para el Modelo ARM-1. . . . .	80
4.3. Área de estudio desde ArcView GIS 3.2 . . . . .	82
4.4. Partición primaria (a), agrupamiento de subrodales -marcado en colores- (b) y partición final (c). . . . .	83
4.5. Ejemplo de árbol de enumeración binaria para $S \subseteq \{0, 1\}^3$ . . . . .	89
4.6. Árbol de enumeración entera (a) y poda del conjunto $S_1$ (b) para un problema de maximización. . . . .	90
5.1. Ubicación geográfica del área de estudio. . . . .	93

---

5.2. Imagen satelital del caso de estudio. . . . .	94
5.3. Restricciones y no ceros en modelo URM-1 (a) y ARM-1 (b). . . . .	96
5.4. Variables binarias resultantes en modelo URM-1 y ARM-1. . . . .	97
5.5. Impacto del parámetro de área máxima en el número de conjuntos factibles (a) y máxima cardinalidad (b). . . . .	98
5.6. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar períodos de planificación. . . . .	103
5.7. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar parámetros de distancia. . . . .	105
5.8. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar umbral de madurez. . . . .	107
5.9. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar vigencia de regeneración. . . . .	108
5.10. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar área de bosque nativo. . . . .	111
5.11. Variación mixta 1. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar períodos de planificación. . . . .	113
5.12. Variación mixta 2. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar períodos de planificación. . . . .	113
E.1. Distribución de edades en el caso de estudio al inicio del horizonte de planificación. . . . .	147
E.2. Solución de URM-1 para un período y parámetros estándar. . . . .	148
E.3. Solución de ARM-1 para un período y parámetros estándar. . . . .	148
E.4. Solución de URM-1 para tres períodos y parámetros estándar. . . . .	149

---

E.5. Solución de ARM-1 para tres períodos y parámetros estándar. . . . .	149
E.6. Solución de URM-1 para siete períodos y parámetros estándar. . . . .	150
E.7. Solución de ARM-1 para siete períodos y parámetros estándar. . . . .	150

# ÍNDICE DE TABLAS

---

2.1. Producción forestal maderable por estado en 2009. [92] . . . . .	15
2.2. Conjuntos factibles en la región de la fig. 2.14 con área máxima de 32 ha. . . . .	53
5.1. Información de la instancia del problema . . . . .	94
5.2. Tamaño de las formulaciones en el caso de estudio . . . . .	96
5.3. Impacto del área máxima en el caso de estudio . . . . .	97
5.4. Preprocesamiento: tiempos de ejecución (s) . . . . .	99
5.5. Preprocesamiento: elementos localizados . . . . .	99
5.6. Resolución del problema: variación de límites de volumen . . . . .	101
5.7. Límites de volumen: flujo entre períodos ( $m^3/RTA$ ) . . . . .	102
5.8. Resolución del problema: variación de períodos de planificación . . . . .	103
5.9. Resolución del problema: variación de distancias máximas . . . . .	104
5.10. Resolución del problema: variación del umbral de madurez biológica . . . . .	106
5.11. Resolución del problema: variación de períodos de regeneración . . . . .	108
5.12. Áreas correspondientes a porcentajes mínimos de reserva para el caso de estudio . . . . .	109

---

5.13. Resolución del problema: variación del área de bosque nativo . . . . .	110
5.14. Resolución del problema: variaciones mixtas . . . . .	112
C.1. Posibilidad leñosa ( $m^3/RTA$ ), subrodas 1 a 25 . . . . .	138
C.2. Posibilidad leñosa ( $m^3/RTA$ ), subrodas 26 a 75 . . . . .	139
C.3. Posibilidad leñosa ( $m^3/RTA$ ), subrodas 76 a 12 . . . . .	140
C.4. Posibilidad leñosa ( $m^3/RTA$ ), subrodas 126 a 168 . . . . .	141
D.1. Beneficio económico (pesos), subrodas 1 a 25 . . . . .	142
D.2. Beneficio económico (pesos), subrodas 26 a 75 . . . . .	143
D.3. Beneficio económico (pesos), subrodas 76 a 125 . . . . .	144
D.4. Beneficio económico (pesos), subrodas 126 a 168 . . . . .	145

# AGRADECIMIENTOS

---

Gracias a mis padres, Manuel Luis Beltrán Sánchez y Luz María Pérez Rodríguez por su interminable fuerza, enseñanza y amor.

Gracias a mis hermanos, Claudia y Luis Manuel por ser mis grandes compañeros de vida.

Gracias al Doctor Roger Z. Ríos Mercado por quien fui orgullosamente asesorado y a quien considero el mejor apoyo y guía que pude tener en mi paso por el posgrado.

Gracias al Doctor Andrés F. Weintraub, quien me recibió por cerca de cinco meses para realizar una estancia de investigación en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile, profesor de quien además de su conocimiento, me llevé un invaluable ejemplo de humildad y carácter.

Gracias al Doctor Óscar A. Aguirre por tomarse el tiempo en la revisión y quien con paciencia y sencillez compartió conmigo parte de su profundo conocimiento en materia forestal.

Gracias a la Doctora Sara V. Rodríguez por tomarse el tiempo en la revisión, por sus observaciones y por sus palabras de apoyo.

Gracias al Doctor Romeo Sánchez Nigenda por tomarse el tiempo para llevar adelante mi examen de grado.

Gracias al M.C. Edgar Torres Martínez, experto forestal que me proporcionó los datos del caso de estudio.

Gracias a mis amigos. Los de viaje, Rafa, Néstor y Nelly. Los de la banda, Hugo, Rodas, Bety y Quintero. De la Universidad de Chile, Angélica y Maritza.

Gracias al Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería, centro chileno de investigación científica que me apoyó con gastos imprevistos durante mi estancia de investigación.

Gracias a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por haberme apoyado con la beca de colegiatura y gastos de transporte al extranjero, por haberme recibido en sus instalaciones y darme la oportunidad de estudiar un excelente programa de posgrado.

Gracias a toda la comunidad PISIS por haber sido parte de mi proceso de crecimiento personal y profesional.

Gracias al CONACyT, por los apoyos de manutención y para realizar una estancia de investigación en el extranjero bajo la modalidad de beca mixta.



# RESUMEN

---

Carlos Beltrán Pérez.

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

## UN PROBLEMA DE GESTIÓN FORESTAL CON REQUERIMIENTOS DE ADYACENCIA EN UNIDADES TERRITORIALES

Número de páginas: 151.

En este trabajo se presenta una metodología de solución que aborda un problema de planificación forestal con fines maderables que busca contribuir con los sistemas de manejo forestal empleados en México maximizando el beneficio generado al programar cortas de regeneración en compartimentos geográfico-territoriales en bosques templados, reduciendo impactos ecológicos a través de cinco consideraciones ambientales. El problema se plantea como un programa lineal entero con dos versiones para el manejo de restricciones de adyacencia de subrodas. La metodología consiste de una fase de preprocesamiento, donde se genera la información necesaria para la resolución de los modelos, y una fase de procesamiento, donde se resuelven los modelos en cuestión mediante el algoritmo de ramificación y acotamiento.

La metodología propuesta es validada computacionalmente empleando datos reales de un caso de estudio, en el Estado de Nuevo León, México. El proceso de experimentación se enfoca en dimensionar el efecto del caso de estudio en las formulaciones y en probar a las mismas bajo diferentes condiciones logístico-operativas y ambientales para conocer la potencial efectividad de esta metodología para cubrir consideraciones de manejo sostenido y de alta productividad maderable.

En general, las actividades humanas y sus consecuencias sobre el medio ambiente siguen siendo reconocidas como un reto para la sustentabilidad del planeta. El manejo forestal representa una industria que impacta y a la vez depende de los recursos naturales, en particular, de los bosques y su madera en un contexto de múltiples usos. Esta interrelación de dependencia e impacto, casi siempre negativa sobre los bosques y las especies que habitan en él, ha motivado la formulación de modelos matemáticos que *a grosso modo* balancean la óptima extracción de recursos, como puede ser la madera o el carbón, con el resguardo de la fuente generadora de los mismos, como lo son los árboles del bosque, su fauna y las condiciones de la tierra. Por lo anterior, el problema de prescribir de manera óptima tratamientos de manejo sobre la superficie del bosque sin perder atención en las condiciones naturales que prevalecen al paso del tiempo tiene una relevancia significativa.

Dentro del campo de la Investigación de Operaciones (IO), una forma comúnmente encontrada de enfrentar este problema es limitando en el espacio los impactos negativos que producen las cortas de regeneración a matarrasa mediante dos restricciones estructurales: las restricciones de adyacencia y los requerimientos de regeneración, que regulan las actividades de tala en un bosque [46].

Murray [69] unificó criterios y definió dos formulaciones básicas a nivel estratégico que contienen las características más importantes para los problemas de manejo forestal con restricciones espaciales, las cuales hasta la fecha siguen siendo referidas por la comunidad científica especializada. Estos dos modelos, que emplean variables de decisión enteras, manejan requerimientos de adyacencia entre las unidades de manejo y son el modelo de restricción por unidad (URM, por sus siglas

en inglés), y el modelo de restricción por área (ARM, por sus siglas en inglés). De ambos modelos, por su mayor complejidad e interés combinatorio, el ARM ha sido el más estudiado en los últimos años.

Hasta donde fue posible investigar, estas metodologías de solución no son utilizadas en el territorio mexicano en contraste con su aplicación con buenos resultados en países de mayor tradición forestal que el nuestro como Finlandia, Suecia, Canadá, Estados Unidos y Australia [8, 71].

En cuanto a características de manejo, diversos autores han introducido a los modelos referidos medidas estratégicas y comerciales como flujo uniforme de volumen, que evita fuertes variaciones de volumen de madera extraído entre períodos [19] y requerimientos de área mínima de reserva natural o bosque nativo, que resguardan intacta parte del bosque, asegurando la preservación de especies o ecosistemas de alto valor en sectores adecuados para este propósito [22]. Para evitar distanciamientos excesivos entre las unidades de reserva (inconveniente ecosistémico para especies animales que requieren un hábitat con baja fragmentación) se incorporan en este trabajo restricciones de distancia máxima que agrupan en una misma región a las unidades seleccionadas para este fin. De forma similar, se agregan restricciones de distancia entre unidades a cosechar en el mismo período con el objetivo de reducir costos operativos acortando el traslado total de maquinaria y equipo al momento de realizar las cortas y extraer la cosecha.

Para cubrir las consideraciones descritas, el estudio parte de una minuciosa revisión del estado del arte en materia de optimización y manejo forestal para establecer en base a ello las formulaciones de programación entera y posteriormente definir, diseñar e implementar las etapas de preprocesamiento computacional requeridas por los modelos. En la etapa de experimentación, se realiza un seguimiento del desempeño de las dos formulaciones, las cuales son resueltas de forma exacta por el algoritmo de ramificación y acotamiento. En este proceso, los modelos son alimentados con los datos de un bosque mexicano con el fin de observar su desempeño y mejores características para determinar en una etapa de análisis las ventajas

y desventajas del método, buscando generar información relevante para los administradores de bosques sobre las condiciones en las que éste brinda un mejor desempeño.

De esta manera, el objetivo de la tesis es proveer una metodología de solución basada en dos modelos de programación entera que contribuya con los sistemas de gestión forestal utilizados en México, planificando cortas en los compartimentos territoriales del bosque mientras se preserva al mismo tiempo la regeneración de las regiones cosechadas. La metodología de manejo también contempla flujos constantes de volumen extraído entre los períodos de cosecha y baja dispersión en el espacio entre unidades a cortar en un mismo período, además de considerar para bosques públicos la potencial selección de un área de reserva natural para salvaguardar especies vegetales y animales amenazadas o de alto valor ecológico.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dr. Roger Z. Ríos Mercado

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

La Investigación de Operaciones es una ciencia que en la actualidad participa activamente en los métodos de gestión forestal empleados en los países líderes en producción de madera. En el manejo forestal mexicano, esta disciplina ha permitido la aplicación de modelos de programación lineal, los cuales hasta el momento han generado buenos resultados. Sin embargo, este tipo de modelos no cubren consideraciones de tipo discreto, que también forman parte de los problemas de planificación a gran escala. En esta tesis se presenta un estudio cuyo objetivo es definir una metodología de manejo para la producción de madera en bosques de clima templado-frío en México basada en dos modelos de programación entera que a nivel espacial restringen daños por actividades de tala en base a restricciones de adyacencia. El desarrollo del trabajo se enfoca por un lado en establecer una metodología de solución basada en programación entera que cubra aspectos ambientales, económicos y operativos de acuerdo a necesidades de aprovechamiento sostenido, y por otro, en identificar los mejores elementos de la metodología bajo diferentes condiciones para definir una opción efectiva de apoyo a los métodos de manejo forestal del país.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En México y el mundo, los recursos naturales fueron vistos durante mucho tiempo como fuentes inagotables de sustento e ingreso económico. De ahí que su aprovechamiento, en muchos casos, se haya regido exclusivamente por su demanda

en el mercado y las necesidades cotidianas, ignorándose su capacidad natural para recuperarse de estos ritmos de aprovechamiento [40]. La producción sostenida de madera es una actividad que podría formar parte del desarrollo económico de México, que a nivel mundial tiene un lugar privilegiado dentro de los países con mayor extensión de bosques. No obstante, el país no figura como exportador de productos maderables ni llega a abastecer la mitad de su propio consumo, situándose además entre los países con mayor velocidad de deforestación [38].

Si bien las metodologías de gestión forestal representan solo una parte dentro de los múltiples factores que se pueden mejorar para impulsar este tipo de actividad, es importante contar con nuevas metodologías de manejo a gran escala para disminuir parte de la brecha que mantiene rezagada la industria forestal mexicana.

La comunidad científica ha abordado los problemas de administración forestal desde diferentes áreas. La Investigación de Operaciones es una de las de más reciente incorporación al avanzar en paralelo al notable desarrollo computacional de las últimas décadas y, en este contexto, los modelos de optimización para programar la cosecha en los bosques se han caracterizado en tomar decisiones estratégicas, tácticas y operativas sobre terrenos forestales manejados en horizontes de planificación que pueden durar desde décadas hasta siglos, en dependencia del ciclo de rotación de las especies arbóreas.

Un enfoque destacado en este escenario es el de la programación espacial de la cosecha y en particular el problema con requerimientos de adyacencia, basado en que ninguna unidad o combinación de unidades de manejo adyacentes tiene la posibilidad de rebasar un área máxima de tala rasa continua (adoptada por regulación o por lineamientos estratégicos para evitar efectos secundarios como erosión del suelo, desequilibrios microclimáticos y pérdida de mantos acuíferos)[12].

Estas unidades de manejo que componen el bosque son en general más pequeñas que el área máxima señalada, por lo que algunos grupos de unidades básicas pueden ser talados en conjunto, creando muchas combinaciones aceptables de programas de

cosecha. En la Figura 1.1 se ilustra el concepto de las restricciones de adyacencia en su forma más elemental, donde toda unidad de manejo cosechada en un período particular provoca una prohibición de cosecha simultanea en las unidades adyacentes a la misma, imponiéndose la continuidad y la regeneración de la masa forestal.

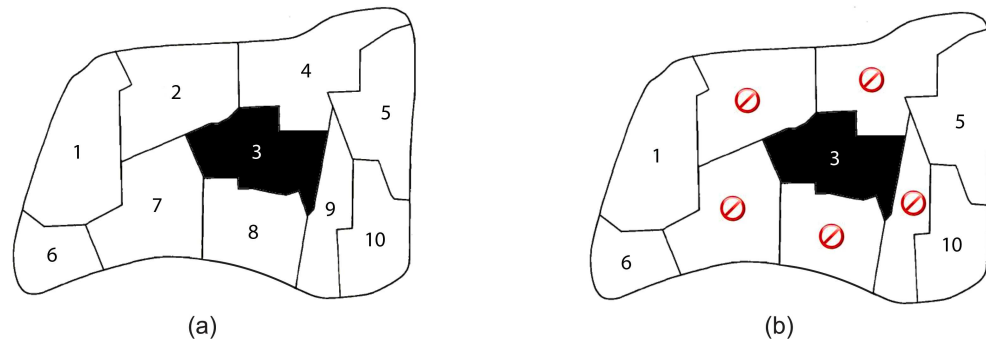


Figura 1.1: En negro, cosecha en subrodal 3 (a), genera veda de cosecha en los subrodales 2,4,7,8 y 9 (b).

Las variables de decisión utilizadas en este problema son de tipo entero (ver Hillier y Lieberman [53]) porque están diseñadas para determinar en qué período específico es conveniente que un subrodal sea cosechado -en codependencia de la situación del resto de los subrodales que integran el área boscosa- para maximizar los beneficios generados por el programa de cosechas bajo condiciones estrictas que hacen sostenible a este tipo de aprovechamiento [98].

En la literatura, los trabajos de Goycoolea et al. [46] y Gunn y Richards [51] se refieren a los problemas con restricciones de adyacencia como no triviales debido a su complejidad NP-dura, y a la fecha hay un número importante de trabajos que han dedicado sus esfuerzos al diseño de algoritmos que aporten tiempos computacionales razonables para instancias cada vez mayores.

Una de las formulaciones iniciales para este problema, conocida como Modelo de Restricción por Unidad (URM)[69], simplifica el problema agrupando *a priori* unidades básicas dentro de bloques de tala mayores. Para hacer posible este proce-

dimiento es necesario hacer primero una rodalización, que significa dividir al bosque en unidades de manejo con condiciones de vegetación y suelo similares (ver Figura 1.2) con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica, SIG (e.g., cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI). Una vez terminada la rodalización, las nuevas unidades de corta son construidas antes del procesamiento computacional fusionando subrodas adyacentes hasta que el área combinada se acerca a un máximo permitido. Como resultado de este agrupamiento *a priori*, cada vez que se cosecha un bloque, se inhabilita a los bloques vecinos de ser cosechados en el mismo período.

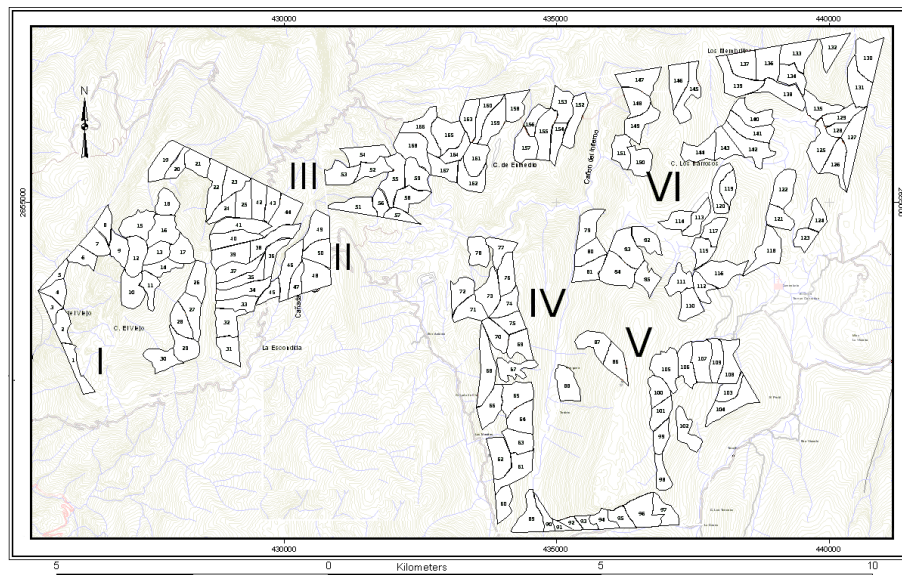


Figura 1.2: División territorial del caso de estudio en 6 rodales y 168 subrodas

Un modelo que incorpora al proceso de decisión la construcción de bloques de corta es conocido como Modelo de Restricción por Área (ARM)[69], que aunque es computacionalmente más difícil de resolver que el URM, entrega mejores soluciones gracias a su alta flexibilidad [72].

Para realizar la extensiones al modelo entero URM se ha considerado como base el planteamiento original de Murray [69] ya que su estructura básica no ha dado lugar



a modificaciones de fondo. En ella los conjuntos no adyacentes se definen por medio de pares de bloques contiguos. Sin embargo, para definir la formulación basada en el modelo entero ARM, se ha tomado como base el trabajo de Goycoolea et al. [45], en el que se define un planteamiento mucho mas fortalecido que los trabajos hasta entonces presentados. En esta nueva versión para resolver el ARM se utiliza una formulación análoga al problema de agrupamiento de conjuntos por cliques (CCPP, por sus siglas en inglés) donde se seleccionan los conjuntos no adyacentes a través de cliques o subgrafos completos no contenidos en ningún otro clique, llamados cliques maximales (ver Diestel [34]).

En suma, la metodología de manejo que se propone en este trabajo toma a las dos formulaciones enteras como base estructural e incorpora consideraciones que amplían la ventaja de los planteamientos iniciales con la meta de incluir en una sola metodología la posibilidad de obtener un aprovechamiento forestal sostenido con las siguientes características:

- Obtención de un programa óptimo de cosechas para manejar un bosque o establecer una plantación forestal.
- Maximización del beneficio económico del área boscosa.
- Regeneración de los bloques de manejo cosechados al término del ciclo de rotación.
- Protección bloques en etapa de regeneración ubicando masas maduras adyacentes a éstos.
- Óptima distribución de las masas forestales maduras.
- Obtención al término de la planificación de un bosque con unidades básicas coetáneas, ideal para el desarrollo de especies de clima templado.
- Selección de áreas de reserva natural.

- Imposición de distancia máxima entre áreas de reserva natural para favorecer especies protegidas.
- Reducción de costos operativos imponiendo un distanciamiento máximo entre bloques a cosechar en un mismo período.

No obstante, el contexto mexicano impone las siguientes limitaciones en cuanto a probabilidades de implementación:

- Las cortas rasas o de regeneración son comúnmente confundidas con desmontes.
- Hasta donde fue posible investigar, para la gestión de bosques en México no se utilizan modelos de programación entera.
- Ante la falta de antecedentes, existe resistencia hacia nuevos métodos de aprovechamiento.
- En el país no existen leyes que impongan de forma explícita un área máxima de cosecha forestal.
- Se requiere de mayor colaboración entre comunidades científicas de diferentes disciplinas.

## 1.2 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Una tarea importante de la ciencia denominada *gestión forestal*, es desarrollar herramientas prácticas para utilizar la experiencia acumulada en un paisaje científico muy fragmentado. Por esta razón es esencial que la investigación no se restrinja a resolver problemas específicos, sino que incluya también nuevos métodos para evaluar opciones de manejo y nuevas técnicas para el análisis y evaluación periódica de las prácticas forestales [99].

La necesidad de desarrollar esta ciencia también se basa en la creciente demanda de productos forestales y en la urgencia de prevenir las consecuencias de la deforestación masiva. La erosión del suelo, la escasez de agua, los derrumbes de tierra y las inundaciones son consecuencias de la tala inmoderada del bosque. Se estima que en México la destrucción anual de los bosques es de alrededor de 260 mil hectáreas [40]. Las principales causas son la quema no controlada y la deforestación para obtener terrenos agrícolas con el fin de incrementar la producción de alimentos. Sin embargo, la fertilidad de estos suelos se mantiene solo gracias a una recirculación rápida de nutrientes, y con la tala de estos bosques se rompe este sistema y se pierden la materia orgánica y los minerales. Por consecuencia, extensas áreas han sido abandonadas después de cultivarse por algunos años. Estos mismos suelos bajo régimen forestal sostenido podrían haber producido valiosos productos forestales, además de proporcionar otros servicios [48].

El Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible A.C. reporta que México ocupa el décimo cuarto lugar a nivel mundial por la extensión de su territorio boscoso, y sin embargo, el sector forestal mexicano no destaca como uno de los agentes más dinámicos de la economía mexicana ni ha logrado la inserción masiva de sus productos en los mercados externos, situándose entre los países con mayor velocidad de deforestación en el mundo [26]. En el mismo reporte se destaca que Finlandia, con la misma cantidad de bosques, produce más de seis veces madera de lo que produce México. En el último anuario forestal disponible de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT, en el año 2009 la razón de importaciones-exportaciones de productos forestales fue de 4.1, lo que significa que por cada dólar exportado se importan 4.1 dólares.

En nuestro país existen diferentes métodos de gestión forestal que se adaptan a condiciones diferenciales como edad, composición, estructura, ubicación y pendiente entre las principales variables, y están enfocados a cubrir ciertos objetivos que demandan dichas variables en conjunto con las demandas de los propietarios, por lo que son un claro ejemplo de la integración de intereses. La Norma Oficial Me-

xicana NOM-152-SEMARNAT-2006 reconoce formalmente los siguientes métodos o sistemas de planificación de gestión forestal:

- a) Método de Desarrollo Silvícola (MDS);
- b) Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM);
- c) Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI);
- d) Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI);
- e) Sistema de Cortas Sucesivas de Protección (SICOSUP);
- f) Sistema Integral de Manejo de Bosques y Aplicaciones Terrestres (SIMBAT);
- g) Sistema Silvícola de Selección (SISISE);

Mientras que en años recientes, autores como Ordoñez Díaz [77] y Mas Porras [66] consideran también:

- h) Sistema silvícola de cortas a matarrasa (SISCOMA);

Estos métodos y sistemas permiten controlar cuidadosamente la calidad y cantidad de la fibra de madera, permitiendo la continuidad del aprovechamiento de los recursos forestales en el futuro [47].

Sin embargo, para problemas de planificación con otro tipo de complejidad, y en un contexto de economía abierta en la que los factores productivos están en constante cambio y las actividades se tornan cada vez más competitivas y menos rentables, no se ha prestado en el país suficiente atención a técnicas intensivas de producción forestal, y en especial, a formulaciones de optimización avanzadas para este fin, mas allá de la programación lineal, que aunque cubre una gran cantidad de métodos de manejo, exige que todas las relaciones de funcionalidad de los modelos sean representadas de manera lineal, perdiéndose consideraciones de tipo discreto

que ajustan mejor en gran variedad de problemas de gestión forestal a gran escala, como el que cubre el presente trabajo de tesis.

Como ejemplo de potenciales aplicaciones, tenemos que dentro del estado de Michoacán están inventariados cerca de 437,000 hectáreas de bosques de encino y pino con estructura irregular, existencias volumétricas menores a los 80 metros cúbicos de rollo total árbol por hectárea,  $\text{m}^3/\text{RTA}$ , y baja proporción de pino mal conformado e inapropiado para fomentar su regeneración [66]. En el ejido El Niño y San Antonio, del estado de Nuevo León, región de más de 3,200 hectáreas, de la que se obtuvieron los datos para validar este estudio, la existencia volumétrica promedio actual alcanza sólo  $47.3 \text{ m}^3/\text{RTA}$ . Este tipo de bosques, de acuerdo a su calidad de sitio, que es el potencial productivo del suelo [77], podrían regresar a ser dominados por arbolado de pino y alcanzar existencias de  $300 \text{ m}^3/\text{RTA}$  o mayores de aplicarse el método de regeneración de cortas a matarrasa, contemplado en sistemas de manejo forestal como el MDS, SICODESI Y SISCOMA, explicados con mayor detalle en la Sección 2.2.2.

De acuerdo con la metodología propuesta, estos sistemas de manejo pueden ser optimizados si se considera al bosque como un sistema de compartimentos de superficie, permitiendo la planificación a nivel espacial de los tratamientos silvícolas y asegurando la regeneración de los bloques cosechados o en proceso de maduración, entre otras consideraciones de manejo sostenido.

Tal metodología se presenta como una técnica alternativa o complementaria de gestión forestal basada en dos renombrados modelos de programación entera [69] con la cual se puedan establecer plantaciones forestales, o mejorar y manejar los bosques existentes con base en el requerimiento de un área máxima de tala rasa continua. Su experimentación con datos de un bosque del sur del estado de Nuevo León valida los resultados obtenidos y ayuda a comprender la naturaleza de la metodología propuesta.

### 1.3 OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es aportar y validar una metodología eficiente a nivel estratégico para la gestión forestal mexicana a través de una metodología basada en dos modelos de programación entera que permita una producción forestal continua y sostenida que enfrente la carencia de metodologías intensivas de aprovechamiento sostenido de los recursos forestales en México. Para ello, se consideran los siguientes objetivos:

- Revisión del estado del arte en trabajos de optimización en la gestión forestal.
- Presentación en México de una metodología de manejo forestal basada en programación entera para un aprovechamiento sostenido e intensivo de bosques templados.
- Conducir a la masa arbórea hacia estructuras de alta productividad mediante la obtención de una masa forestal regular compuesta de unidades básicas coetáneas por medio de restricciones de adyacencia.
- Asegurar la persistencia de los recursos forestales mediante el uso de dos grupos de restricciones de regeneración que garanticen en el tiempo y espacio el desarrollo de las masas forestales hasta su establecimiento definitivo.
- Restringir cortas en bloques de manejo en los que sus árboles no hayan alcanzado la madurez económico-biológica correspondiente a su especie.
- Reservar en el área boscosa un porcentaje mínimo de reserva de bosque nativo que resguarde árboles antiguos y especies animales de alto valor.
- Mantener dentro de un alejamiento máximo a los bloques de reserva natural para favorecer la reproducción de especies animales.

- Balancear la distribución de clases de edad del bosque equilibrando la extracción de madera entre los períodos por medio de restricciones de umbral de volumen.
- Reducción de costos operativos por período, mediante el establecimiento de distancia máxima entre unidades de manejo seleccionadas para corta en un mismo período.
- Desarrollo e implementación de algoritmos computacionales de preprocesamiento requeridos por las formulaciones enteras.
- Desarrollo de un diseño experimental que valide el desempeño de la metodología propuesta en una instancia real.
- Evaluar experimentalmente el desempeño de la metodología bajo diversas condiciones ambientales y operativas.

## 1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación está estructurado de la siguiente forma: En el Capítulo 2 se hace una revisión de los trabajos más sobresalientes en el área de programación espacial para el aprovechamiento forestal y su relación con este estudio. En el Capítulo 3 se plantean los modelos matemáticos, junto con suposiciones, notaciones particulares y complejidad del problema, además de las fórmulas de estimación de la posibilidad leñosa. En el Capítulo 4 se describe la metodología de solución para los modelos enteros derivados del URM y ARM y su aplicación como alternativa de gestión forestal. El Capítulo 5 presenta el caso de estudio y la experimentación con los modelos. El Capítulo 6 presenta las conclusiones y consideraciones futuras.

## CAPÍTULO 2

# ANTECEDENTES

---

El presente capítulo se centra en la revisión de los antecedentes científicos del problema de la programación de la cosecha forestal con restricciones de adyacencia. En principio se trata de forma general el concepto de gestión forestal y las metodologías de este tipo aplicadas en México. Posteriormente se estudia la intervención de la Investigación de Operaciones en la gestión de los bosques desde tres puntos de vista de clasificación: por el sistema jerárquico, por campos de aplicación y por métodos de planificación. Al final de la misma sección, se presenta la participación de esta disciplina en la gestión forestal mexicana. La tercera parte ofrece un panorama de los modelos básicos de cosecha forestal y su evolución desde los modelos lineales hasta las formulaciones de programación entera para requerimientos espaciales. En la última parte de este capítulo se explora el problema con requerimientos de adyacencia y las características estructurales de sus dos formulaciones básicas.

## 2.1 GESTIÓN FORESTAL

El área total de bosques existentes en el mundo asciende a 4000 millones de hectáreas, que corresponden al 31 por ciento de la superficie total de tierra del planeta y proveen recursos naturales que benefician a los individuos, sociedades y gobiernos, conteniendo gran parte de la biodiversidad, que es esencial para la integridad de la biósfera terrestre [39]. Su manejo por el ser humano ha evolucionado desde una simple toma de decisiones para cosechar parcelas en un ciclo de rotación para obtener la



mayor cantidad de madera, hasta la adopción de modelos de agricultura industrial para producir madera en bosques con extensas unidades de manejo mientras se cubren compromisos opuestos relacionados con el cuidado de los recursos, por lo que no es sorprendente que el manejo forestal siga siendo una rica fuente de problemas para la Investigación de Operaciones [64].

La gestión de los recursos forestales puede definirse como el arte y la ciencia de tomar decisiones considerando la organización, el uso, y la conservación de los bosques y sus recursos asociados [19]. De acuerdo con la norma oficial mexicana para la gestión forestal NOM-152-SEMARNAT-2006, un método o sistema de planificación de manejo forestal es el conjunto de actividades que se debe realizar en el corto, mediano y largo plazo, para obtener durante un turno el rendimiento sostenido anual ó periódico.

Al manejar un bosque público o privado se pueden administrar activamente recursos como la madera, el agua, la fauna y la recreación, incluyendo la alternativa de retirar la intervención humana y permitir que la naturaleza tome su propio curso, lo que en muchos casos puede ser la mejor opción. Sin embargo, las decisiones del hombre sobre los bosques pueden hacer una gran diferencia cuando se desean alcanzar objetivos encontrados o cuando se trata de manejar sistemas forestales complejos donde quedan comprometidos una gran cantidad de inversiones y recursos.

La industria forestal es una consecuencia del manejo de los bosques y es de importancia primaria al suministrar madera para la producción de bienes imprescindibles para el ser humano como papel, carbón, chapa, triplay, muebles y escuadría, brindando al mismo tiempo, servicios recreativos que elevan la calidad de vida de las comunidades cercanas. Los problemas de planificación en la gestión forestal han cubierto cada aspecto de la cadena de valor tomando especial atención en las cuestiones ambientales así como en metas y restricciones específicas de las compañías [88]. Pese a no existir una definición comúnmente aceptada de *industria forestal sostenida*, las tendencias actuales señalan que las firmas de esta rama deben introducir mejoras en eficiencia energética, procesos de producción con reducción de residuos y conser-

vación de recursos, utilización de materiales inocuos y ecológicamente compatibles, condiciones laborales seguras y capacidad en recursos humanos [39].

México, en comparación con países de mayor desarrollo forestal como Alemania, Canadá, Estados Unidos y las naciones escandinavas, tiene una cultura incipiente de manejo e industrialización de las áreas forestales, ya que fue hasta la aparición de la primera Ley Forestal de 1926 cuando se establecieron formalmente los primeros lineamientos para el manejo, conservación y aprovechamiento de los bosques, con énfasis principal en los bosques templados [17]. A continuación se hace una revisión de la gestión forestal en México y los métodos de manejo para bosques templados, que están relacionados con el método de solución presentado en esta tesis.

## 2.2 GESTIÓN FORESTAL EN MÉXICO

México dispone de una superficie aproximada de 138 millones de hectáreas de prácticamente todos los tipos de vegetación natural terrestre. Los ecosistemas que cubren la mayor parte de la superficie son los matorrales xerófilos (41.2%), los bosques templados (bosque de coníferas, bosque de encino y bosque mesófilo de montaña; 24.2%), las selvas (selva caducifolia, selva perennifolia, selva espinosa y selva subcaducifolia; 22.8%) y los pastizales junto con otros tipos de vegetación (11.8%) [43] (ver Figura 2.1). Los estados de Chihuahua y Durango aportan casi la mitad de los bosques del país, los cuales también encabezan la participación de la producción de este tipo de recursos (ver Tabla 2.1). Estos bosques son de gran importancia para el país desde el punto de vista ambiental, económico y social.

A pesar de la disponibilidad de estos recursos, los productores forestales enfrentan en el país contradicciones en cuanto a la empobrecida constitución de muchos bosques y la demandante competitividad económica de los últimos años, lo que pone de relieve los malos manejos del pasado y las limitantes de las normatividades

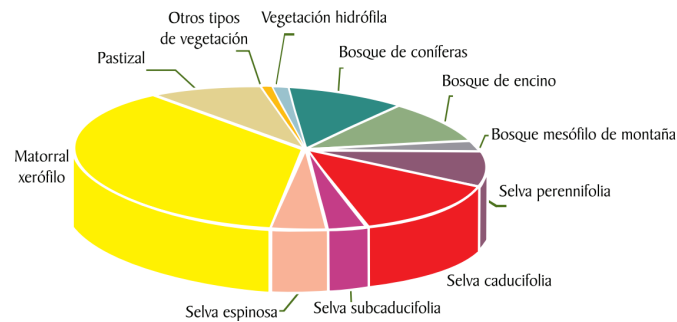


Figura 2.1: Vegetación primaria en México. [91].

forestales que en ocasiones han dejado a la gestión forestal reducida a un calendario silvícola que con dificultad cumple con las restricciones vigentes [47, 80]. Esta tendencia puede verse reflejada en datos de producción forestal maderable del último anuario forestal de la SEMARNAT, en donde se destaca que en esta rama de la producción, México tuvo una disminución anual casi constante del año 2000 al año 2009 [92].

Tabla 2.1: Producción forestal maderable por estado en 2009. [92]

Entidad federativa	Producción maderable (m <sup>3</sup> /RTA)	Participación (%)
Durango	1,741,212	30.0
Chihuahua	1,033,181	17.8
Michoacán	619,422	10.7
Oaxaca	415,049	7.1
Jalisco	322,913	5.6
Otros	1,677,179	28.9
Total	5,808,956	100

Aunado a este problema, es conocido que la competitividad de mercado internacional está dominada por novedosos métodos de gestión especializados, como plantaciones forestales, bosques de usos múltiples, restauración, silvicultura comunitaria, agrosilvicultura, arboricultura urbana, servicios ambientales y recreación, que no pueden ser resueltos sin el apoyo de técnicas de modelación, planificación

y optimización [59]. Ejemplos de estas técnicas son los esquemas de programación matemática a gran escala basados en IO, y los *sistemas de información*, como los denominados SIG [47, 15].

Conforme a lo dispuesto en la legislación vigente (Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable y NOM-152-SEMARNAT-2006), los planes de gestión forestal deben ser autorizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través de sus delegaciones en los estados. Conforme a esta normatividad, un programa de manejo debe contener la siguiente información:

1. Objetivos generales y vigencia.
2. Ubicación y características biofísicas.
3. Inventario forestal.
4. Técnicas que se utilizarán en el aprovechamiento.
5. Medidas para conservar y proteger el hábitat y especies de flora y fauna silvestre amenazadas.
6. Prevención, control y combate de incendios, plagas y enfermedades.
7. Compromisos de forestación y reforestación.

El método de apoyo a la toma de decisiones propuesto en este trabajo está diseñado bajo el esquema de programación entera para hacer posible la calendarización de cortas totales de regeneración dentro de las unidades básicas de bosques de clima templado, pobladas por especies intolerantes a la sombra, para potencialmente optimizar los puntos 4, 5 y 7 en planes de manejo para bosques con estas condiciones. A continuación, se presentan las características de este tipo de bosques y el porqué son aptos para recibir el tratamiento silvícola en el que se basan las variables de decisión de la herramienta presentada en esta tesis.

### 2.2.1 BOSQUE TEMPLADO-FRÍO

La definición del tipo de productos a obtener, así como la caracterización de las condiciones biofísicas del lugar resultan de suma importancia al definir el sistema de manejo a implementar, el cual a su vez definirá el tipo de prácticas silvícolas a aplicar y la forma de implementarlas, como por ejemplo, la forma de cortar o aprovechar las masas forestales. Los bosques de clima templado-frío constituyen el pilar de la industria forestal mexicana, ya que más del 60 % de las especies de pino tienen importancia comercial y el 80 % de los productos forestales del país se obtienen de bosques mixtos de pino-encino [89].

Este tipo de ecosistema se encuentra poblado por especies intolerantes y representa el 24 % de la vegetación del país, constituyendo la vegetación de las principales cordilleras de México (Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y Sierra Madre del Sur) (Figura 2.2) [91]. En el territorio mexicano, los bosques más comunes de este tipo son: bosque de encino, bosque mixto de pino-encino, y bosque de pino.

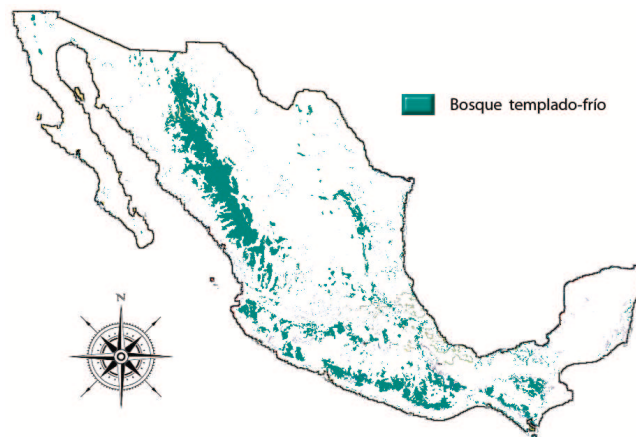


Figura 2.2: Distribución de los bosques templados dentro de la República Mexicana.

Las especies intolerantes como el oyamel (*Abies religiosa*), el encino (*Quercus*), el abeto rojo (*Tsuga*), y la mayoría de especies de pino (del género *Pinus sp.*), no pueden desarrollarse cuando existe sombra producida por una densa acumulación de individuos de su propia especie o de otras, y son especialmente favorecidas cuando

se les aplica el método de regeneración por corta total, ya que tras este tratamiento, los nuevos árboles resultan coetáneos, y por la misma razón sus alturas resultan homogéneas permitiendo que los rayos solares lleguen a toda la población (ver Figura 2.3), que también queda libre de competencia de la masa vieja [47, 48].



Figura 2.3: Obtención de masas forestales regulares a través de cortas de regeneración.

Gracias a estas condiciones biológicas, los bosques templados-fríos son candidatos ser manejados por la herramienta de apoyo a las decisiones propuesta en este trabajo, que emplea el tratamiento silvícola de corta total por unidad básica de manejo, modelado matemáticamente por variables de decisión entera binaria del tipo:

$$X_{ft} = \begin{cases} 1 & \text{si el subrodal } f \text{ recibe en su totalidad corta de regeneración en el período } t \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Este método de corta de regeneración es especialmente indicado para especies intolerantes, pero es importante señalar que solo es pertinente aplicarlo bajo condiciones que implican establecer una extensión máxima para todas las cortas [66], que cada subrodal sea cosechado a lo más una ocasión durante toda la planificación [69], y permitir que la madurez económica-biológica promedio del arbolado de un subrodal

(unidad básica de manejo) sea alcanzada para poder ser cosechado [3, 47], que son requerimientos también incorporados en la herramienta de optimización presentada en este trabajo, detallada en los Capítulos 3 y 4.

### 2.2.2 MÉTODOS DE GESTIÓN PARA BOSQUE TEMPLADO

De los ocho métodos de gestión forestal nombrados en el primer capítulo, tres están diseñados para su aplicación en bosques de clima templado-frío y contemplan el método de corta de regeneración por corta total por unidad básica, que es el tratamiento silvícola de interés en este estudio, por las consideraciones biológicas y de modelación matemática expuestas en la Sección 2.2.1. A continuación se presentan estos métodos o sistemas de planificación de manejo.

#### MÉTODO DE DESARROLLO SILVÍCOLA

El Método de Desarrollo Silvícola, también conocido como MDS, surge en 1974 como una alternativa de manejo para los bosques de clima templado. Este método logra el establecimiento de un bosque regular, el cual debe estar formado por un conjunto de poblaciones o unidades básicas coetáneas, es decir, de conjuntos de árboles con edades uniformes, preferentemente de un mismo género. Sus objetivos son captar al máximo el potencial productivo del suelo (conocido también como calidad de sitio, ver [77]) con el uso de técnicas silvícolas apropiadas a las condiciones del bosque, y lograr un rendimiento sostenido en cada intervención programada, esto es, obtener igual volumen y distribución de productos al conseguir un bosque regular. Sus principales características son:

- Es un método de producción forestal intensivo.
- Manejo de recursos por unidad de área.
- Menores costos al concentrar operaciones en áreas pequeñas.
- Es un método para la producción de madera.

- Es un método de regulación por área y volumen.
- Se aplica a diversas masas forestales y busca establecer masas regulares.
- Se aplica a especies intolerantes.
- Según edad promedio, densidad y estratos presentes por unidad básica, se puede prescribir uno de los siguientes tratamientos:
  - *Preaclareo*. Corta en etapas tempranas para uniformizar y mejorar espaciamientos
  - *De un primer hasta un cuarto aclareo*. Corta de árboles débiles y mal conformados que representan competencia.
  - *Corta principal*. Corta total dejando en pie árboles padre.
  - *Corta de liberación*. Corta de árboles padre.
- Requiere inventario forestal a nivel de subrodal.
- Regeneración por árboles padre, que constituye la corta principal o de liberación.
- Se hace un balance de áreas, estableciendo áreas iguales para cada uno de los tratamientos indicados.
- La posibilidad anual se calcula sumando los volúmenes que se van a cortar en cada unidad básica, de acuerdo al tratamiento que le haya correspondido.

Este método de manejo surgió como una respuesta a la necesidad de incrementar la producción forestal para satisfacer una demanda nacional creciente de madera, así como una alternativa de manejo del bosque que realmente atiende su cultivo y buscando hacer participar en el proceso de producción al poseedor o habitante del bosque que anteriormente asumía un papel pasivo.



---

## SISTEMA DE CONSERVACIÓN Y DESARROLLO SILVÍCOLA

El Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI) fue desarrollado en 1990 en el marco de una cooperación entre Finlandia y México, orientado a la producción de madera en bosques de coníferas bajo las premisas de mitigar los impactos ambientales y considerando a las comunidades como potenciales titulares de los servicios técnicos forestales. Sus características más importantes son:

- Es un método de producción forestal intensivo.
- Es un método para la producción de madera.
- Es un método de regulación por área y volumen.
- Trata de establecer masas regulares.
- Se aplica a especies intolerantes.
- Regeneración libre, pudiendo ser:
  - *Corta total.*
  - *Corta total dejando en pie árboles padre.*
  - *Cortas sucesivas.*
- Requiere de la realización de inventarios a nivel de subrodal.

Desde los últimos años cuenta con un programa de computadora que permite la exploración de políticas de manejo de los recursos considerando supuestos de cálculo técnico-forestales, ambientales, socioeconómicos y de métodos de trabajo. Una de sus mayores limitantes es la crisis económica del país, que induce a los usuarios a inclinarse por sistemas forestales de planificación más económicos por unidad de área como el MMOM, el MDS o el SISCOMA, presentado a continuación.

## SISTEMA SILVÍCOLA DE CORTAS A MATARRASA

Este método, conocido también como SISCOA, se comenzó a aplicar en el estado de Jalisco en el año 1999, estableciendo plantaciones de pino inmediatamente después de la corta total. Consiste en la remoción, en una sola corta, de aquellas masas que van llegando a su madurez o final de turno, por lo que la regeneración natural se logrará a partir de semillas dejadas en el suelo y de los árboles en pie adyacentes al área de corta. También se puede hacer la regeneración artificial por medio de siembras o plantaciones. Sus principales características son:

- Es un método de producción forestal intensivo.
- Se aplica a especies intolerantes.
- Manejo de recursos por unidad de área.
- Aplica método de regeneración por corta total.
- Menores costos al concentrar operaciones en áreas reducidas.
- Permite al nuevo cultivo desarrollarse a plena luz y libre de competencia de la masa inicial.
- Permite y facilita el cambio de especies o el control en la composición de la masa.
- Riesgo de erosión del suelo cuando no se regula la extensión de las cortas.

Con la aplicación del Sistema Silvícola de Cortas a Matarrasa se tiene previsto establecer un bosque regular a través de la remoción del bosque en forma gradual, induciendo la regeneración natural o haciendo plantaciones para llegar a formar un bosque regular.

En la siguiente sección se hace una revisión de cómo el campo de la Investigación de Operaciones ha participado en la ciencia de la gestión forestal desde dos

enfoques de clasificación. Adicionalmente, se explora la intervención de la Investigación de Operaciones en el escenario forestal mexicano.

## 2.3 LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN LA GESTIÓN FORESTAL

Los modelos de optimización para la gestión forestal se han utilizado amplia y exitosamente para apoyar a las decisiones de esta rama desde hace más de 40 años [15]. Durante este tiempo, la naturaleza de estos problemas ha evolucionado y la diversidad y el tamaño de los problemas de decisión se ha incrementado considerablemente, originando que los modelos contengan cada vez más información y que su estructura sea cada vez más compleja. Este proceso inició con el uso de sencillos modelos de programación lineal para la planificación de bosques con pocas unidades de manejo. En poco tiempo estos modelos incrementaron su tamaño y número de consideraciones hasta cubrir problemas de grandes dimensiones [19] (ver Figura 2.4). Posteriormente, las tareas espaciales tomaron mayor peso, incorporando el uso de variables discretas para cubrir requerimientos biológicos y estéticos. Los modelos multiobjetivo y aquellos que describen procesos probabilísticos también formaron parte de este proceso. A pesar de la diferencia entre las áreas de aplicación y el tipo de planteamiento, en cada curso de desarrollo ha aumentado el énfasis en la salud ambiental, el manejo de los ecosistemas y la intervención pública en la planificación [64].

### 2.3.1 PLANIFICACIÓN JERÁRQUICA

Desde la perspectiva de la programación matemática, el número y el tipo de decisiones a tomar en el manejo de un bosque varía sensiblemente cuando el nivel de detalle de las decisiones a tomar tienen diferente duración y resolución en el espacio. Esto generalmente provoca que las personas encargadas de las estrategias en el largo



Figura 2.4: Problema de planificación a gran escala en Brasil, en el que no se limita la conectividad de los ecosistemas naturales.

plazo y a gran escala nos sean las mismas que tratan tácticas y operaciones de menor escala en el corto plazo, ya que cada tipo de decisión requiere diferente campo de conocimiento, como plantear una producción alta y sostenida o definir los patrones de corta que se seguirán al cosechar la madera. Bajo este marco, nos encontramos con un problema de manejo con diferentes niveles de toma de decisiones que no resulta práctico enfrentar desde una sola perspectiva.

Una aproximación propuesta desde 1991 [100] para programar las actividades de gestión de los bosques involucra dividir en tres órdenes jerárquicos al conjunto de decisiones, que son el nivel estratégico, el táctico y el operativo. Esta forma de planificación vertical involucra el desarrollo de modelos desde diferente nivel para un mismo caso, como si se tratara de un enfoque multiobjetivo [24]. Bajo esta perspectiva, las soluciones encontradas en cada nivel para un problema de planificación se deben integrar verticalmente con las de los otros niveles. A continuación se aborda la contribución de la Investigación de Operaciones en la planificación forestal desde la perspectiva del sistema de planificación jerárquico.

## NIVEL ESTRATÉGICO

Dentro de la planificación jerárquica para la gestión forestal, el término *estratégico* sugiere una gestión a largo plazo apoyada típicamente en modelos de programación lineal y de simulación formulados para establecer, por separado o en coordinación, metas regionales consistentes en el tiempo en beneficio principalmente de corporaciones y agencias gubernamentales que manejan propiedades forestales. Los modelos utilizados en la planificación estratégica se caracterizan por representar cada estrategia como un grupo de restricciones, dando la oportunidad a los administradores de examinar el balance de los resultados al imponer cada estrategia.

Los planes estratégicos están diseñados para conducir prácticas de manejo estables en el tiempo mediante decisiones diseñadas para mantener la capacidad de la producción en el largo plazo (generalmente, de 20 años en adelante). La alimentación de datos de estos planes se basa en sistemas de información de la producción y de información geográfica, basados respectivamente en pronósticos del inventario forestal y de la capacidad de la producción, así como en el análisis de capas terrestres con características similares como edad, composición de especies, índice de sitio, y densidad.

En este orden de planificación, los modelos de programación lineal se han utilizado principalmente para asignar tierra y recursos a varias prescripciones a gran escala que conciernen a los dueños de los bosques. Los modelos de planificación FORPLAN y SPECTRUM (ver Sección 2.4.1) son ejemplos de herramientas computacionales que pueden desempeñar el análisis requerido para completar el esfuerzo de planificación estratégico. La simulación ha sido utilizada sobre todo como una forma de evaluar la productividad a largo plazo de los bosques, con un enfoque en la dinámica del crecimiento del bosque [14]. Para ampliar esta información se pueden consultar los trabajos de Bjørndal et al. [15], Gunn [49], y Bettinger et al. [14]

## NIVEL TÁCTICO

Aunque un modelo estratégico puede apoyar al manejo a gran escala y en el largo plazo, las soluciones pueden resultar infactibles en términos operativos. De igual forma, implementar planes forestales sin considerar la proximidad espacial de las actividades de manejo con otros recursos u otras actividades puede resultar en problemas imprácticos en el campo y sin la posibilidad de evaluar muchas de sus consecuencias potenciales.

La modelación a nivel táctico ayuda a traducir las soluciones encontradas en el nivel estratégico dentro del nivel operativo mediante el uso de información detallada que ayuda a caracterizar la distribución espacial y temporal de las actividades de gestión propuestas, cubriendo simultáneamente nuevas y más detalladas restricciones, usualmente en períodos de uno a 20 años [14, 24].

Esta conversión a niveles más finos de definición territorial se hace a través de un prorrateo o repartición de actividades, asignando dentro de divisiones territoriales las prescripciones entregadas por el plan estratégico con ayuda de variables de decisión que asignan en las unidades básicas los tratamientos silvícolas que se desean implementar. Estas variables de decisión pueden ser de tipo continuo cuando solo se desea establecer una proporción lineal de tratamiento que recibirá cada unidad básica (e.g. regularización de un bosque), o de tipo entero si se busca un solo tratamiento por unidad básica o subrodal (e.g. consideraciones de adyacencia). Como referencia de este nivel de planificación forestal pueden consultarse los trabajos de Church, Murray y Barber [24], Church [23], Bettinger et al. [14] y Bjorndal et al. [15].

## NIVEL OPERATIVO

Las decisiones en el nivel operativo se pueden entender como una ejecución a nivel de terreno de los cursos específicos de acción y localización de recursos que se necesitan cubrir en los niveles superiores (estratégico y táctico) del sistema jerárquico

[14]. En este nivel, los horizontes de planificación pueden trazarse desde un día hasta varios meses, en los que es necesario conocer a través del tiempo las dimensiones de la producción y de la demanda. Las decisiones más importantes en este orden son los patrones de corta para la cosecha, la localización de la maquinaria y cómo programar las unidades de transporte [15]. A continuación se aborda con mayor profundidad cada una de estas actividades.

- *Patrones de corte.* Este proceso operativo cubre principalmente las instrucciones en el corto plazo a los trabajadores de montes sobre cómo dimensionar a los troncos derribados o fustes para obtener productos por longitud y diámetro bajo demanda. Un patrón de tala se define por la longitud de la pieza y un diámetro mínimo en el extremo más estrecho. Un patrón típico puede consistir de dos piezas grandes, dos piezas medianas, y una última pieza delgada para pulpa, en donde cada troza tiene tolerancias dimensionales. El objetivo del problema es obtener el mayor valor agregado posible de acuerdo a los valores de mercado existentes, en los que la tendencia es dar mayor valor a los troncos con mayor diámetro y longitud. Para este problema se pueden consultar exitosas contribuciones de la IO en los trabajos de García [42], Epstein et al. [36, 35] y Marshall [62].
- *Localización de maquinaria y caminos.* Particularmente en los bosques montañosos, la localización de la maquinaria de cosecha no es trivial. Para transportar la madera a las zonas de carga, en terrenos planos se utilizan tractores de arrastre, mientras que en terrenos accidentados se colocan grúas o sistemas de cables. Para que los camiones tengan acceso a las zonas de carga, también deben trazarse caminos secundarios que dañen al mínimo la vegetación, cuidando también el balance entre los costos de construcción y productividad para horizontes de planificación bien definidos. En la actualidad se utiliza para este problema la asistencia proporcionada por sistemas de información geográfica, combinando el problema de localización de plantas con el de flujo de costo fijo

para múltiples instalaciones. En la literatura se pueden consultar los trabajos de Epstein et al. [37], Gunn y Richards [50], Vera et al. [97] y Díaz et al. [31].

- *Transporte.* El transporte de la madera y la planificación de la cosecha y están fuertemente relacionadas. Trasladar la madera en las faenas de cosecha representa el 40 por ciento de los costos totales de operación. Una gran variedad de formas en que puede ser realizada esta actividad han sido asistidas por la Investigación de Operaciones. El método más común es transportar los troncos en camiones de carga de diferente tamaño desde diferentes estaciones en los alrededores del bosque a destinos como plantas de procesamiento o puertos de embarque. Estas operaciones han sido exitosamente coordinadas por sistemas que programan flotas de hasta varios cientos de camiones reduciendo significativamente los costos y las filas vehiculares. En otros trabajos se han planificado en tiempo real los envíos de las cargas, o bien, se han programado los recorridos de recolección a diferentes bosques antes de llegar a su destino final. Contribuciones en materia de transporte se pueden consultar en los trabajos de Weintraub et al. [101], Karlsson, Rönnqvist y Bergström [55] y Palmgren, Rönnqvist y Värbrand [79].

### 2.3.2 CAMPOS DE APLICACIÓN

Es conocido que los bosques son sistemas naturales de elevada complejidad, por lo que administrar sus recursos implica aspectos muy diversos que se pueden clasificar de acuerdo a su campo de aplicación. En esta sección se revisan las contribuciones de la Investigación de Operaciones en la gestión forestal desde esta perspectiva.

#### COSECHA FORESTAL

Planificar la futura secuencia de cosechas en un bosque es solo una de las numerosas tareas que realiza un administrador de recursos forestales, sin embargo, es una de las labores esenciales para la industria forestal y para los bosques de usos múlti-



ples [19]. La gestión forestal con fines maderables está basada en la programación de la cosecha sujeta a mantener un suministro continuado de madera en el futuro, sin dejar de lado el balance entre la maximización del aprovechamiento y la protección de los ecosistemas naturales. Debido a las altas demandas de madera junto con sus subproductos y a los impactos ambientales que ocasionan las operaciones de cosecha, se ha incrementado la atención en fortalecer el análisis y la modelación detallada del manejo de estos recursos [70]. Las consideraciones en este sentido cambian en función de la tolerancia a la sombra de las especies (ver Sección 2.2), y en consecuencia, de la uniformidad de edad requerida dentro de las unidades de manejo. A continuación se presentan estas dos perspectivas.

- *Especies intolerantes.* Los bosques de especies intolerantes se encuentran en zonas templadas y frías. Como se ha mencionado, uno de los objetivos más importantes en el manejo de estos bosques es la obtención de masas forestales *regulares* [48]. En un *bosque regular*, los árboles en pie tienen la misma clase de edad, ya sea de manera inducida, o de forma natural. Además, todos los árboles de estas unidades tienen una fecha a partir de la cual pueden ser cosechados en su totalidad por un método que es llamado *corta total* o *matarrasa* [19]. Una vez que es realizada una cosecha, la unidad de manejo debe regenerarse natural o artificialmente.

En esta categoría de gestión están clasificados la gran mayoría de los modelos espaciales de manejo de programación lineal y entera, incluidos los problemas de regularización de bosques (ver subsecciones de Programación lineal y Programación entera) y los problemas con restricciones de adyacencia, abordados en la Sección 2.4. Trabajos de optimización relacionados al manejo estos bosques son los de Barret y Gilless [8], Bettinger y Sessions [12], Gunn y Richards [51, 50], Loucks [61], Mas Porras [66] y Murray [69], entre otros.

- *Especies tolerantes a la sombra.* Cuando un bosque está poblado por especies capaces de desarrollarse sin recibir directamente la luz solar, su manejo no tiene como objetivo primario obtener masas forestales regulares, ya que cuando un

árbol tolerante es *dominado* por árboles de mayor tamaño, su supervivencia y desarrollo no está en riesgo, a diferencia de las especies intolerantes. Este tipo de gestión es menos frecuente y está directamente asociada a bosques en los que árboles de edad y tamaño diferente pueden coexistir en pequeñas porciones de terreno, denominados en la ciencia forestal como *bosques irregulares* [48]. En contraste con lo que ocurre en los *bosques regulares*, en estos bosques no es posible distinguir áreas con clases de edad homogéneas, y en los casos en que así sucede, el área es demasiado pequeña para ser manejada de la misma forma que en un *bosque regular*.

En este tipo de gestión nunca se aplica *corta total* o *matarrasa* en grandes divisiones continuas de terreno, en cambio, se seleccionan árboles individualmente o en pequeños grupos al momento de realizar una cosecha, lo que implica un mayor costo operativo y una indefinición en cuanto al momento en el que una unidad básica puede ser cosechada. Otra característica de este enfoque es que aún después de aplicarse una corta, siempre queda un remanente de árboles en pie, por lo que el manejo de bosques irregulares también es conocido como *gestión forestal de cobertura continua* [19]. La optimización ha contribuido con estos métodos de planificación, por un lado, a través de modelos que maximizan el rendimiento de las unidades básicas irregulares, y por otro, mediante modelos de crecimiento para bosques manejados y no manejados. Ejemplos de tales aplicaciones son los trabajos de Pukkala, Lähde y Laiho [84], Buongiorno et al. [20], Schulte, Buongiorno y Skog [90], Adams y Ek [2] y Lohmander y Mohammadi [60].

## CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Las consideraciones ambientales están ligadas a casi todos los problemas de gestión forestal cubriendo varios aspectos interconectados como la preservación de la fauna y la belleza escénica, así como la prevención de la erosión y la contaminación del agua, por lo que una meta superior en el manejo de los recursos naturales ha

sido desde hace mucho tiempo balancear las actividades de aprovechamiento con sus efectos sobre las tierras que proveen los recursos. De la mano estas preocupaciones está el concepto de sustentabilidad, que busca que los productos y servicios de un bosque beneficien tanto a las generaciones presentes como a las futuras [14]. El grupo más destacado de estas formulaciones en los últimos años han sido las consideraciones espaciales con variables enteras, representadas principalmente por los problemas con restricciones de adyacencia, que prescriben cortas totales dentro de divisiones espaciales bajo ciertas limitaciones ambientales. Otras consideraciones importantes son las de regeneración, que establecen una barrera de protección alrededor de las unidades básicas recién cortadas, y las de bosque nativo, que seleccionan en el bosque áreas de reserva natural pobladas con especies de árboles nativos. Trabajos destacados en esta área son los de Murray [69], McDill, Rebain y Braze [67] y Caro et al. [21].

#### CADENA DE SUMINISTRO FORESTAL

Generalmente la maquinaria de tala, los escuadrones de cosecha, las flotas de transporte, las plantas de procesamiento y las áreas boscosas tienen diferentes dimensiones y características. Debido a estas condiciones, resulta difícil encontrar las mejores asignaciones a lo largo de las temporadas de producción. La cadena de suministro forestal se extiende desde los árboles en pie dentro del bosque a plantas de transformación primaria y secundaria y a mercados en forma de productos procesados como papel y escuadría para la construcción. La Investigación de Operaciones ha colaborado en la toma de estas decisiones al diseñar planes de cosecha sostenidos y coordinados de largo alcance, definir capacidades de planta y de transporte como función de las demandas de mercado, así como coordinar las ventas con la capacidad de la producción, la cosecha y la flota de transporte. Para este problema se pueden consultar los trabajos de D'Amours, Rönnqvist y Weintraub [30], Bredstrom, Jönsson y Rönnqvist [18] y Forsburg, Frisk y Rönnqvist [41].

## COMBATE A INCENDIOS

Aunque los incendios son un proceso natural que tienen impactos benéficos en ciertos procesos naturales de los bosques, también implican amenazas a la seguridad pública, las propiedades, y otros valores. Los especialistas en incendios forestales han desarrollado programas de manejo diseñados para alcanzar un balance adecuado entre los daños potenciales de los incendios y el costo de los programas para combatirlos. Los enfoques de la Investigación de Operaciones para resolver este problema parten de la necesidad de modelar los procesos básicos de ocurrencia de los incendios. Tras esto, el problema puede abordarse desde la detección y la prevención de incendios, el despliegue de recursos de ataque inicial, el manejo de incendios mayores, y el manejo del bosque visto como vegetación inflamable. Como referencias de estas formulaciones problema se pueden consultar en la literatura los trabajos de Acuna et al. [1], Martell [63], Palma et al. [78] y Díaz Romero [33].

### 2.3.3 MÉTODOS DE PLANIFICACIÓN

Otra forma de clasificar a las formulaciones de la IO dentro de la gestión forestal es por el método que se emplea para resolver un problema de manejo. La IO ha contribuido en la ciencia de la gestión forestal con diversas herramientas de programación matemática como la programación lineal, la programación entera, y la programación dinámica [52]. Para problemas de elevada complejidad computacional ha sido necesario el empleo de métodos heurísticos que a pesar de entregar en muchas ocasiones soluciones sub-óptimas, pueden resultar de alta calidad y con reducidos tiempos de ejecución. En otra clase de problemas en los que se requiere evaluar múltiples conflictos para la toma de decisiones de manejo, se ha recurrido al análisis de decisiones multicriterio. A continuación se presenta la forma en que estas familias de modelos han participado en la administración de bosques.

## PROGRAMACIÓN LINEAL

La Programación Lineal (PL) es un procedimiento matemático ampliamente utilizado en diferentes ámbitos como el militar, industrial, financiero, de marketing, agrícola y forestal, mediante el cual se resuelven problemas en los que se optimiza una función objetivo, expresada de forma lineal, de modo que las variables de dicha función queden sujetas a restricciones que se expresan por medio de un sistema de ecuaciones o inecuaciones lineales.

La PL dentro de la gestión de los bosques ha estado típicamente orientada a localizar estratégicamente actividades y recursos, es decir, a prescribir tratamientos de manejo a través de extensas áreas boscosas y en marcos de planificación a largo plazo, permitiendo al mismo tiempo entender las ventajas y las desventajas entre diferentes objetivos y restricciones de manejo gracias a la disponibilidad de elementos de análisis, como los precios sombra, que permiten conocer el beneficio marginal al relajar un conjunto de restricciones (ver Hillier y Lieberman [53]).

Una de las aplicaciones más tempranas para optimizar la gestión forestal fue propuesta por Curtis en 1962 ([28], citado por [19]), a través de un modelo para regularizar un bosque compuesto por dos unidades básicas pobladas de árboles de baja calidad con diferente clase de edad, con el objetivo de obtener una plantación de tres clases uniformes, es decir, que pudiera ser cosechada en tres períodos con beneficios equivalentes (ver Figura 2.5).

Loucks ([61], citado por [19]), propone en 1964 otro modelo lineal muy similar al de Curtis, pero con un objetivo de regularización en el que solo parte del bosque puede ser cosechado durante el plan de manejo y restricciones que aseguran que el monto de madera removido no afecte el aprovechamiento sostenido del bosque.

En 1971, Navon diseñó el primer modelo de PL extensamente utilizado, denominado TIMBERAM, o Método de Localización de Recursos [73], que generó pro-

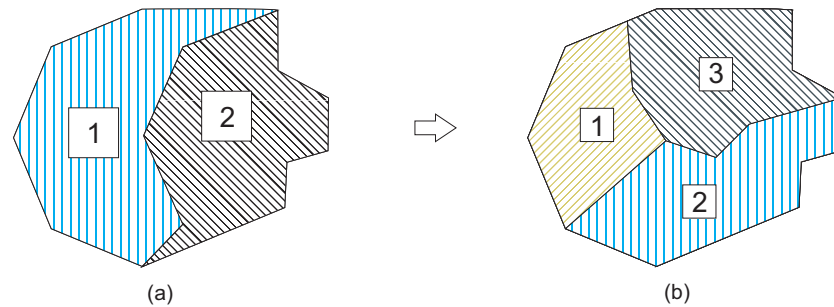


Figura 2.5: Bosque con dos clases (a), convertido a una plantación regular con tres clases de edad (b).

gramas de cortas y reforestación para predios comerciales de bosques bajo un marco de planificación de hasta 35 décadas en el futuro con la flexibilidad de maximizar ganancias, volumen de producción, o minimizar gastos. TIMBERAM requería el uso de código de programación lineal ILONA que era procesado en una computadora UNIVAC 1108.

En 1976, los modelos a gran escala o estratégicos fueron promovidos primordialmente por agencias gubernamentales, como el Servicio Forestal de los Estados Unidos a través de dos renombrados sistemas para modelar la gestión forestal: FORPLAN, que con el tiempo evolucionó en SPECTRUM [49]. FORPLAN surgió como un sistema de programación matemática a gran escala para desarrollar planes estratégicos. SPECTRUM es esencialmente FORPLAN, pero con extensiones del modelo y mejoras en la interfaz de usuario [24].

Las soluciones generadas por FORPLAN y SPECTRUM especifican prescripciones de manejo a través de variables de decisión que representan actividades y opciones de planificación para grandes zonas de capa biológica, diseñadas para asegurar factibilidad computacional. Cuando este tipo de soluciones están definidas para grandes áreas agrupadas, como lo es un conjunto de rodales, las soluciones no pueden representar con claridad las prácticas de manejo en subdivisiones espaciales más pequeñas como un subrodal [24].

Desde 1977 se ha agrupado en tres modelos clásicos a la mayoría de las formulaciones lineales de gestión forestal. Inicialmente, se definió un grupo de formulaciones en las que solo se considera el manejo del crecimiento del bosque. Posteriormente se identificó otra clase de modelos que toman en cuenta la sustentabilidad de la producción forestal a través de nuevas variables de decisión para controlar el proceso de regeneración. Finalmente se distinguió un tercer grupo de modelos que representan a las masas forestales como función de requerimientos de hábitat para ciertas especies. Estas formulaciones son conocidas respectivamente como los Modelos I, II y III (ver Buongiorno y Gilles [19] y Bettinger et al. [14]). Los modelos I y II siguen siendo hasta la fecha ampliamente utilizados en problemas de planificación y gestión de recursos naturales en todo el mundo, como el sistema de manejo JLP utilizado en India [57], líder mundial de producción forestal. El llamado Modelo III es poco conocido, pero sigue siendo la base de una herramienta de gestión forestal aún vigente en Nueva Zelanda (ver García [42]). Para mayor detalle sobre este tema se pueden consultar las revisiones de Gunn [49], Bettinger et al. [14] y Buongiorno y Gilles [19].

## PROGRAMACIÓN ENTERA

En la representación de muchos problemas relevantes de manejo, las variables de decisión requieren ser modeladas por valores enteros, como sucede en problemas de planificación donde se consideran asignaciones de elementos indivisibles (e.g. personal, maquinaria, unidades de transporte, o bien, por valores enteros binarios para decidir si a un elemento o a una ubicación se le asigna una actividad al 100 % o al 0 % ). Este tipo de problemas deben ser resueltos mediante algoritmos avanzados especialmente diseñados para resolver problemas de programación entera (PE), como el método de ramificación y acotamiento (ver Hillier y Lieberman [53]) o el de planos cortantes (ver Balas, Fischetti y Zanette [7]).

Los problemas de nivel operativo de localización de maquinaria y construcción de caminos, así como el de transporte, presentados en la Sección 2.3 son importantes

casos en que se ha recurrido a la PE para representar debidamente las condiciones que los caracterizan.

Otros problemas importantes de esta categoría se presentan cuando es necesario modelar decisiones sobre los recursos que se encuentran sobre la superficie del bosque. En la literatura, estas consideraciones son conocidas como restricciones espaciales, para cuya planificación están comprendidas una amplia escala de relaciones funcionales complejas relacionadas al crecimiento y cosecha de los árboles y otros recursos naturales, muchas de las cuales son no lineales o contienen relaciones condicionales [14]. Por esta razón, muchos problemas de manejo resultan demasiado complejos para ser resueltos con técnicas clásicas de optimización como la PL. Los ejemplos más importantes de restricciones espaciales con estas características son las reglas de adyacencia (del inglés *adjacency constraints*) y de regeneración (del inglés *green-up constraints*), que se han aplicado en Estados Unidos, Australia y Europa. Al representar estas restricciones, es conveniente encapsular a las variables de decisión de cosecha y a las restricciones espaciales dentro de un grafo de nodos (que representan unidades básicas de manejo) y aristas (que representan las adyacencias entre dichas unidades) (ver Figura 2.6).

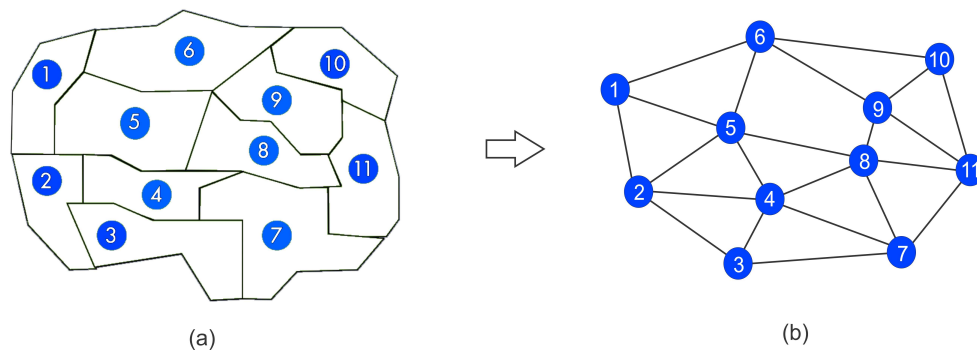


Figura 2.6: Bosque templado rodalizado con ayuda de SIG (a), es representado por un grafo planar (b).



Note que las consideraciones espaciales de adyacencia y regeneración se abordan con mayor profundidad en la Sección 2.4. Trabajos en la literatura destacados que cubren problemas espaciales enteros y enteros mixtos son los de Murray [69, 70], Murray, Goycoolea y Weintraub [71], Goycoolea et al. [45, 46] y Murray y Weintraub [72].

## PROGRAMACIÓN DINÁMICA

La programación dinámica es una técnica para la determinación sistemática de combinaciones óptimas de decisiones que puede tratar con relaciones no lineales y variables enteras a través del fraccionamiento de un problema en una secuencia de subproblemas o etapas [19]. En la gestión forestal se ha utilizado frecuentemente para maximizar el potencial biológico, referido como incremento anual, y el beneficio económico asociado a un solo rodal, expresado como el valor esperado de las ventas [14]. Dado que tanto el manejo de los bosques como sus respuestas de crecimiento son secuencias de acciones que pueden seguir rutas similares en varios puntos en el tiempo, elegir de entre un grupo de alternativas para seleccionar el curso óptimo de acción puede requerir múltiples recorridos sobre los mismos datos. En la red de la Figura 2.7 se ilustra un ejemplo con 5 *etapas*, que contienen columnas verticales de nodos, o condiciones del problema llamadas *estados*, que en este caso representan las posibles condiciones estructurales del rodal al elegirse cierto curso de acción. En el ejemplo, el número de etapas refleja la cantidad de tratamientos que debe incluir una solución.

Una de las desventajas de esta técnica es que, a diferencia de la programación lineal y la programación entera, no tiene definida una forma estándar, por lo que para aprender a formular y resolver problemas de recursos forestales con programación dinámica es necesario estudiar varios casos. Ejemplos de estas aplicaciones son los trabajos de Ritters, Brodie y Hann [87] y Kennedy [56].

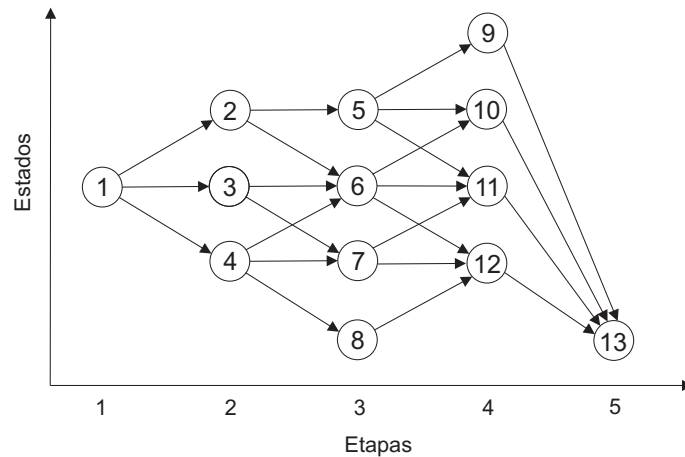


Figura 2.7: Ejemplo de estados y etapas para una red de opciones asociada a un problema de gestión forestal.

## MÉTODOS HEURÍSTICOS

Los métodos heurísticos en un proceso de planificación se emplean principalmente cuando se desean incorporar relaciones cuantitativas que no se describen fácilmente por ecuaciones lineales, cuando en problemas complejos el tamaño de la instancia no permite alcanzar soluciones rápidamente, y en los casos en que las relaciones cuantitativas no quedan bien representadas por ningún tipo de ecuación, como las que involucran ciclos lógicos y disyuntivas múltiples de decisión [14]. No obstante, con los métodos heurísticos no hay garantía de encontrar una solución óptima, y para evaluarlos, generalmente se requiere compararlos con los resultados de problemas lineales, enteros, o enteros-mixtos. A nivel de manejo por unidad básica, los métodos heurísticos se han desarrollado a partir de modelos de Programación Dinámica. A nivel de gestión de bosque, estos métodos se han desarrollado en base a modelos de programación entera y entera-mixta para problemas con restricciones espaciales. Los algoritmos heurísticos utilizados con mayor éxito en la planificación forestal son descritos a continuación:

- *Simulación de Monte Carlo.* El método de Monte Carlo incluye un gran número de técnicas de muestreo basadas en muestras aleatorias de una población para

desarrollar planes de manejo de recursos naturales. En el manejo de bosques es necesario definir una función objetivo, como maximizar el volumen de madera, y después desarrollar el conjunto de opciones a elegir para crear un plan de acción, como por ejemplo, un conjunto de regímenes de manejo (excluyentes entre sí), como cosechar o permitir el crecimiento, aplicables por unidad básica. Cuando se han definido los regímenes potenciales por unidad, la heurística selecciona opciones aleatoriamente y prueba que la solución sea factible en función de las restricciones del problema. Este proceso es repetido un número predefinido de ocasiones, de entre las cuales se selecciona la mejor solución generada. Clemens et al. [25] y Nelson y Brodie [74] están entre los autores que han utilizado el método Monte Carlo en la planificación y la gestión forestal.

- *Recocido simulado.* El recocido es una técnica que consiste en calentar y dejar enfriar un material lentamente para que recristalice en configuraciones óptimas o de menor energía que en un principio. Este proceso es la base del proceso de búsqueda llamado Recocido Simulado, que en la gestión de recursos forestales comienza con un plan factible inicial, generado por un método determinista o aleatorio, y con una temperatura inicial preestablecida que enfría con cada cambio en la solución, que puede ser ocasionado, por ejemplo, por cambiar al azar la prescripción de manejo en un subrodal elegido también aleatoriamente [14]. Si el cambio en el plan de manejo es favorable, el cambio siempre es aceptado, sin embargo, si el cambio no produce mejora, la probabilidad de que sea aceptado decrece a medida que se reduce la temperatura. La cuota de enfriamiento con cada cambio debe ser también preestablecida, así como la temperatura final y el número de iteraciones por cada temperatura [83]. En los trabajos de Bettinger et al. [10] y Ohman y Eriksson [75] se puede consultar que esta heurística ha generado muy buenas soluciones a problemas complejos de planificación forestal.
- *Búsqueda Tabú.* La Búsqueda Tabú es un algoritmo determinista de búsqueda local que se puede utilizar para resolver problemas combinatorios de optimiza-

ción en el que se hacen sistemáticamente modificaciones una solución potencial previamente desarrollada, con la intención de encontrar una solución mejorada. En el contexto forestal el término *tabú* implica que durante el desarrollo de un plan algunas soluciones quedan fuera de cierto límite. Los métodos estándar de Búsqueda Tabú han demostrado ser una heurística efectiva para problemas complejos de planificación, sin embargo en el contexto forestal no ha igualado el desempeño del Recocido Simulado [14]. Para una descripción mas detallada de este método en el manejo de bosques se pueden consultar los trabajos de Bettinger et al. [10], Caro et al. [21] y Richards y Gunn [86].

En los trabajos de Sessions, Bettinger y Murphy [93], Pukkala y Kurttila [83] y Bettinger et al. [14] se hacen amplias revisiones sobre la utilización de métodos heurísticos en la planificación forestal.

#### PERSPECTIVA MULTICRITERIO

La gestión forestal puede llegar a ser un proceso complejo que requiere de decisiones que involucren criterios económicos ambientales y sociales, como la mayoría de los problemas de manejo forestal para bosques públicos, en donde los modelos necesitan ser formulados bajo una serie de criterios de diferente naturaleza. La perspectiva de la optimización multicriterio abarca simultáneamente estos aspectos a través de modelos que mitigan estas necesidades. Una aproximación importante en esta área es la programación por metas, llamada también proceso jerárquico analítico, que compara matricialmente las preferencias del tomador de decisiones entre criterios y alternativas mediante una escala lingüística con una estructura jerárquica. Otro enfoque destacado es la teoría de utilidad multiatributo, que define una función principal de utilidad que abarca todos los criterios relevantes en el problema de decisión analizado. Estos enfoques han conciliado, entre otros problemas, requerimientos de flujo constante de volumen con retorno económico y diámetro de áreas de cosecha, y compromisos entre retorno económico con políticas de volumen e inventario final del bosque. Los lectores interesados en este tipo de trabajos pueden consultar los artícu-

los de Diaz-Balteiro y Romero [32], Laukkanen, Palander y Kangas [58], Buongiorno et al. [20] y Puha y Minowa [81].

En los trabajos de Bjørndal et al. [15], Weintraub [102] y Ronnqvist [88] se pueden encontrar amplias revisiones de los trabajos de la Investigación de Operaciones en materia de gestión forestal junto con sus aplicaciones.

### 2.3.4 LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES EN LA GESTIÓN FORESTAL MEXICANA

Si bien la IO es una ciencia ampliamente utilizada en diferentes campos de la ingeniería, la economía y el manejo de los recursos naturales, así como universalmente empleada en la planificación forestal, no es frecuente su aplicación en problemas de este tipo de manejo en nuestro país.

Hasta donde fue posible investigar, incluyendo la revisión completa de los números de dos importantes revistas especializadas del país (Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente y Revista Madera y Bosques, Instituto de Ecología A.C.), la forma en que la optimización ha intervenido en la gestión forestal mexicano es a través de dos renombrados modelos de programación lineal para el manejo forestal [14, 19] (el Modelo I, con una variable de decisión por cada unidad de manejo y el Modelo II, con una variable de decisión por cada clase de manejo -agrupando varias unidades-, como clase de edad) y a través de programas de simulación para predecir el crecimiento de la vegetación.

Con la misma reserva en cuanto a lo limitado de las referencias disponibles, cabe señalar que en esta investigación no se encontraron en México propuestas de modelos de programación entera para manejar bosques con fines maderables. En lo referente a los modelos lineales, su frecuente utilización puede ser explicada por la relativa facilidad de modelar a través de ellos una amplia variedad de regímenes de silvicultura, referidos comúnmente como prescripciones, como lo es cualquier método particular de regularizar el bosque, los aclareos precomerciales y comerciales, y las

diferentes cortas de regeneración y sus tratamientos subsecuentes [49]. Además de esta ventaja, la programación lineal permite comparar un amplio rango de soluciones alternativas y analizar sus consecuencias, requiriendo para ello poco tiempo gerencial [52].

Ejemplos de estas aplicaciones son los trabajos de Hernández Díaz [52], donde se propone la regularización de un bosque de la región de El Salto, Durango, para obtener tras un régimen de cortas, 6 períodos producción uniforme de 10 años cada uno, mientras se programa obtener el máximo volumen posible. Álvarez Gallego [5] propone un sistema de manejo para una región de la Sierra de Juárez, Oaxaca, que maximiza el beneficio a la comunidad como función del volumen de madera generado por la alternativa de manejo. Talavera Romero [94] desarrolló un modelo de regulación forestal para el manejo de ecosistemas forestales en bosques de *pinus pseudostrabus Lindl.* en la Sierra Madre Oriental del estado de Nuevo León. Arreola Vázquez [6] contribuye con una estrategia de manejo para la regularización de cortas en una fracción del predio forestal Ejido La Purísima, en el estado de Nuevo León.

Como ejemplo de aplicación de modelos de simulación se tiene el trabajo de Vargas Larreta et al. [96] en el que se incorporan modelos de crecimiento de árbol individual para bosques mixtos e irregulares del noroeste de México.

## 2.4 CONSIDERACIONES DE ADYACENCIA

Los problemas con restricciones de adyacencia para la planificación forestal son quizá la metodología de manejo espacial más ampliamente utilizada en la actualidad [14]. Su clasificación dentro del sistema jerárquico de planificación abarca los niveles estratégico y táctico, al cubrir lapsos de planificación de 30 a 100 años (nivel estratégico) y definir decisiones a nivel de unidad o de una parte específica del bosque (nivel táctico) que permiten la implementación posterior de las actividades operativas [68]. Gracias a un reciente fortalecimiento en las formulaciones [46, 45] un método de planificación habitual para estos problemas es el de programación entera

al involucrar variables de decisión discretas [69], y métodos heurísticos en los casos en que las instancias son a gran escala [21]. Las áreas de aplicación en las que estos modelos han influido en la administración de bosques son las de cosecha forestal y consideraciones ambientales (ver Figura 2.8).

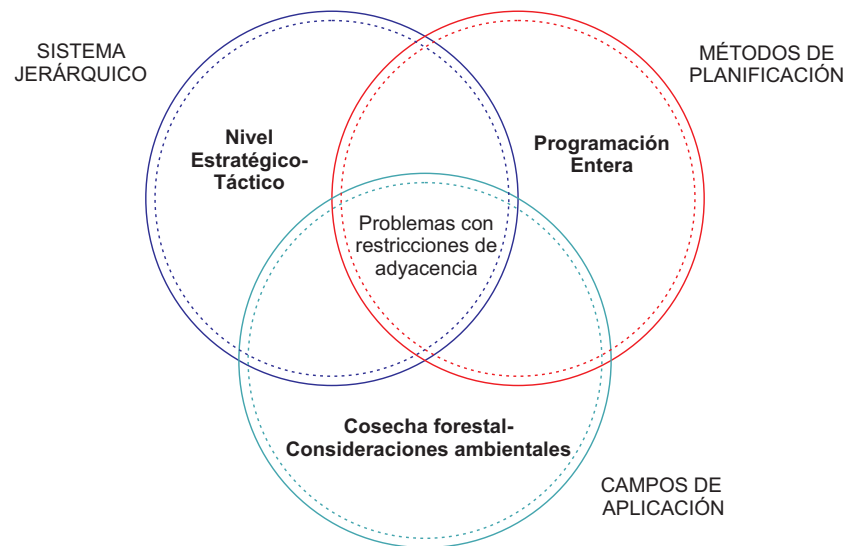


Figura 2.8: Clasificación de los problemas con restricciones de adyacencia en la planificación forestal.

Para explicar las restricciones de adyacencia se debe tener en cuenta que la composición, la calidad y la continuidad de un bosque dependen de su regeneración. El método de corta de regeneración por corta total (a elegir entre renovación natural por árboles semilleros o artificial por siembra directa) es un procedimiento aplicado en especies intolerantes, variedad vegetal base de la industria forestal mexicana, dentro de superficies de 5 a 48 hectáreas aproximadamente [48, 46]. Restringir la extensión de estas cortas imponiendo un límite en el área máxima de las zonas en que se aplica, es la forma en que las sociedades forestales de algunos países desarrollados han encarado el reto de adaptar metodologías para planificar las cosechas y al mismo tiempo cubrir consideraciones ambientales para proteger a las especies y su hábitat natural. Esta medida de restricción espacial puede estar incluida en normas

regionales [12], o establecerse en colaboración con personal administrativo de la vida silvestre [95].

Para modelar esta disposición, los administradores forestales han confiado en representaciones explícitas del bosque y de los planes de cosecha, referidas en la literatura como restricciones de adyacencia, que en la práctica se traducen en una situación en la que ningún par de unidades de manejo adyacentes que rebasen en suma el área máxima de corta total permitida pueden recibir prescripción de cosecha en el mismo período, controlándose de esta forma la extensión de todas las cortas en favor del cuidado y la regeneración del bosque y sus especies.

La aplicación de esta metodología requiere dividir al bosque con el apoyo de SIG en subregiones con características comunes (denominadas en la literatura divisiones dasocráticas [44]) típicamente de 5 a 25 hectáreas con el objetivo de que las decisiones sean tomadas a ese nivel espacial, en el que por su tamaño es más fácil y económico ejecutar las prescripciones de un plan de manejo (ver Figura 2.9).

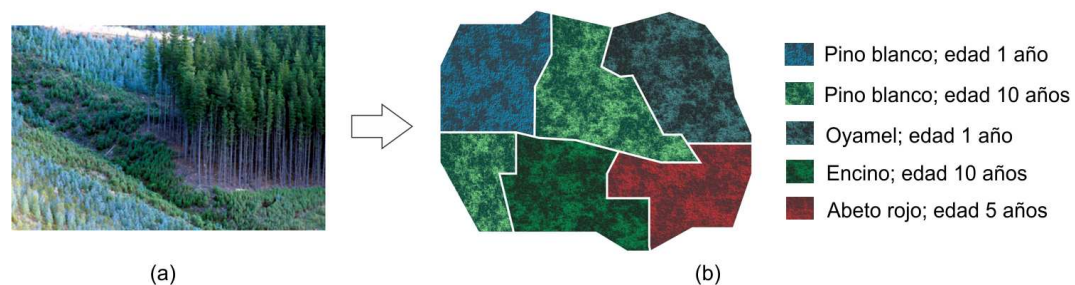


Figura 2.9: Bosque (a), rodalizado en función de sus características en el espacio (b).

Cuando la partición del bosque ha sido establecida, es necesario definir cuándo se considera que existe una adyacencia entre dos unidades. El supuesto del tipo de adyacencia puede incluir a) *adyacencias fuertes*: unidades con un borde (un número infinito de puntos) en común, b) *adyacencias débiles*: unidades con una esquina (un punto) en común, c) *adyacencias de distancia*: unidades que están dentro de cierta distancia. El método de solución de este trabajo considera solo adyacencias



fuertes para formar conjuntos factibles (por razones operativas se desean unidades de cosecha compactas), y adyacencias débiles y fuertes para restringir del todo la unión de cualquier par de unidades seleccionadas para su cosecha en el mismo período con el objetivo de favorecer la conectividad de las zonas pobladas de vegetación. En la Figura 2.10 se describen los tres tipos de adyacencia encontrados en la literatura:

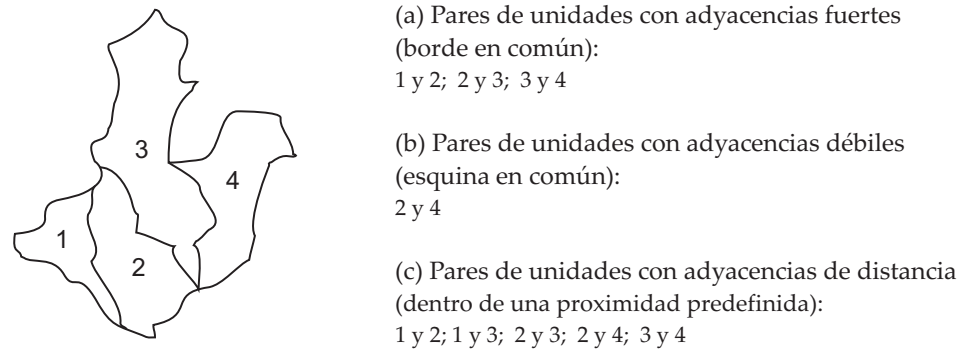


Figura 2.10: Tipos de relaciones de adyacencia

Una vez definido el tipo de adyacencia a tomar en cuenta entre las unidades, es necesario determinar el área máxima de corta total permisible, en dependencia de la que se definen posteriormente las unidades de manejo, que en extensión no deben rebasar dicha área. Los trabajos relacionados establecen 48 hectáreas (equivalentes a 120 acres) como un límite de área adecuado [46, 71, 72], aunque este umbral puede variar en relación con el caso de estudio.

Como consecuencia del concepto de área máxima permitida, la distribución de las cortas sigue un arreglo sistemático dentro de las particiones del bosque de acuerdo a la inhabilitación de cosechar unidades de manejo colindantes en el mismo período y a la duración del horizonte de planificación o turno. En trabajos de manejo forestal para bosques templados-fríos de México es común la elección de turnos de 50 a 60 años, con períodos de corta de 10 años cada uno [76, 94].

Un conjunto de datos necesario en esta metodología es la denominada *posibilidad maderable* o *posibilidad leñosa* de cada unidad de manejo. Esta medida es el

pronóstico de la existencia futura de madera y es calculada a partir de inventarios forestales realizados por expertos en dasimetría (rama de la dasonomía -estudio de la conservación, cultivo y aprovechamiento de los bosques- que se encarga de la medición de los árboles). Las mediciones dasométricas generalmente deben cubrir altura, diámetro normal (diámetro del árbol a 1.30 metros por encima del nivel del suelo), área basal (igual a 0.7854 multiplicado por el *dap*), la edad, y el volumen medio de los árboles en pie (llamado también *existencia real*) de la unidad de manejo [48]. En este trabajo la posibilidad leñosa es estimada a partir del *incremento medio anual* del volumen por la unidad de manejo, que es función de la existencia real y de la edad media en años de los árboles. La determinación del beneficio económico al cosechar cada unidad a través de los períodos es una función de la posibilidad maderable y del precio por metro cúbico del tipo de madera que se desea comercializar.

Desde esta perspectiva, el diseño de un programa de cosechas puede concebirse como un problema de optimización combinatoria con variables de decisión binarias, y por lo tanto enteras, que corresponden a cosechas potenciales en las unidades de cosecha en un período de tiempo, en donde el objetivo puede ser maximizar los beneficios económicos sujetos a restricciones ambientales y operativas. En la Figura 2.11, puede verse la transición de un rodal (a) dividido en subregiones llamadas subrodales (b), de las que se puede obtener una configuración de cosechas en unidades no adyacentes marcados en negro, en este ejemplo, para un solo período de tiempo (c).

La implementación de los problemas con restricciones de adyacencia no es sencilla, ni tampoco lo es comprender los efectos económicos y de otro tipo que estas implican [14]. En esta línea, se ha recurrido comúnmente a dos modelos de optimización para llevar a la práctica la administración espacial de los bosques, que son el Modelo de restricción por unidad y el Modelo de restricción por área, descritos a continuación.

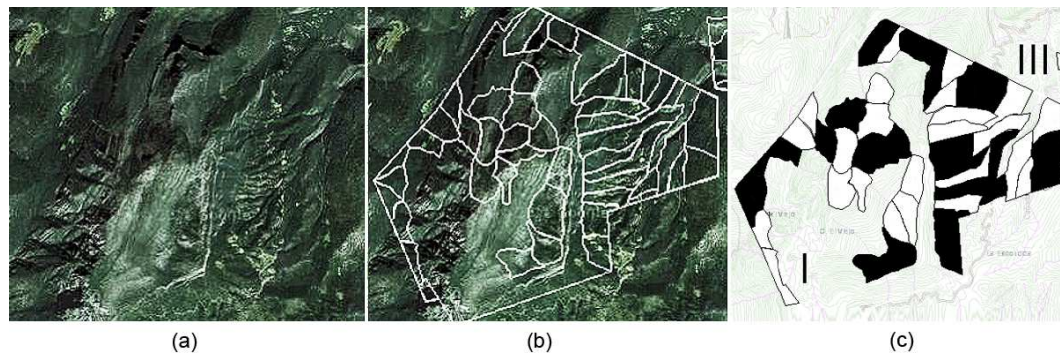


Figura 2.11: Proceso de planificación: Región (a) seguida de su rodalización (b) hasta la obtención de una distribución óptima de cosecha (c).

### 2.4.1 MODELO DE RESTRICCIÓN POR UNIDAD

El modelo de restricción por unidad (URM, por sus siglas en inglés) es una formulación entera para resolver el problema de gestión forestal con restricciones de adyacencia, identificada por Murray [69]. En este enfoque, el problema espacial de área máxima de cosecha se simplifica anexando *manualmente*, previo al procesamiento computacional, subregiones contiguas hasta que su área combinada se acerque (pero no rebase) el área máxima permitida.

Esta fusión *a priori* de unidades básicas en unidades de manejo mayores (potencialmente elegibles para ser cosechados en una sola corta dentro de un período de tiempo particular, llamados en la literatura *conjuntos factibles*) es elaborada por los administradores forestales con asistencia de SIG, de modo que el área de cada nueva unidad oscile entre el 51 % y el 100 % del área máxima, originando que al momento de programar las cosechas la selección de cualquier par de conjuntos factibles adyacentes sea inviable al exceder en suma el 100 % del estándar de apertura máxima. En la Figura 2.12 se ejemplifica una de las posibles configuraciones de anexión (considerando para ello solo adyacencias fuertes) de 11 unidades básicas de manejo (a) dentro de 4 nuevas unidades de cosecha, que para este ejemplo no sobrepasan un área máxima de 48 hectáreas (b).

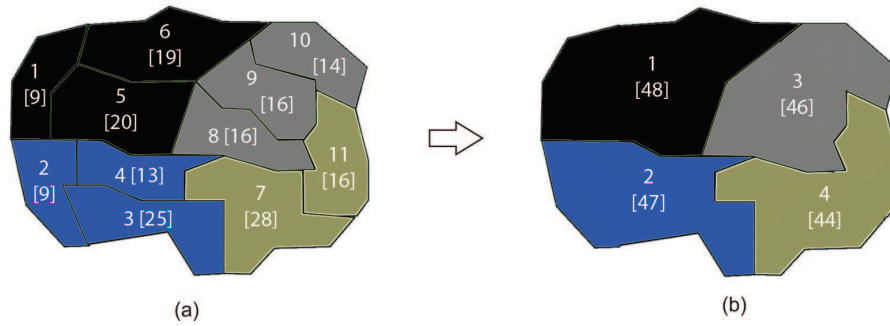


Figura 2.12: Conjuntos de subrodales (a) fusionados manualmente en unidades de cosecha (b) con área máxima de 48 ha.

Gracias a estos agrupamientos anticipados, las restricciones que evitan violar el área máxima de corta, conocidas como restricciones de adyacencia, pueden ser expresadas por parejas de unidades adyacentes, de modo que es preciso definir una restricción por adyacencia entre las nuevas unidades de manejo.

Partiendo de las cuatro unidades definidas *a priori* (b) de la Figura 2.12, se torna válido definir restricciones de adyacencia entre los pares de unidades 1 y 2, 1 y 3, 2 y 3, 2 y 4, y 3 y 4, que matemáticamente toman la siguiente forma para un primer período de cosecha.

$$X_{11} + X_{21} \leq 1$$

$$X_{11} + X_{31} \leq 1$$

$$X_{21} + X_{31} \leq 1$$

$$X_{21} + X_{41} \leq 1$$

$$X_{31} + X_{41} \leq 1$$

Aquí  $X_{it}$  representa una variable de decisión entera binaria que describe la cosecha potencial de la unidad  $i$  al final del período  $t$ .

Tomando tales agrupamientos, en la Figura 2.13 se muestra en (a) una configuración de cosecha infactible (cosechas marcadas en negro) en la que se corta en un

mismo período a las unidades 2 y 3, que siendo adyacentes violan automáticamente su restricción por pares (con 93 hectáreas en un solo sector de corta, rebasando un área máxima preestablecida de 48 hectáreas). En el lado derecho de la misma figura se muestra una configuración factible (b) en la que se cosechan en el mismo período las unidades 1 y 4, cumpliendo en cada zona cosechada con el requerimiento de área máxima al respetar las restricciones por pares del URM.

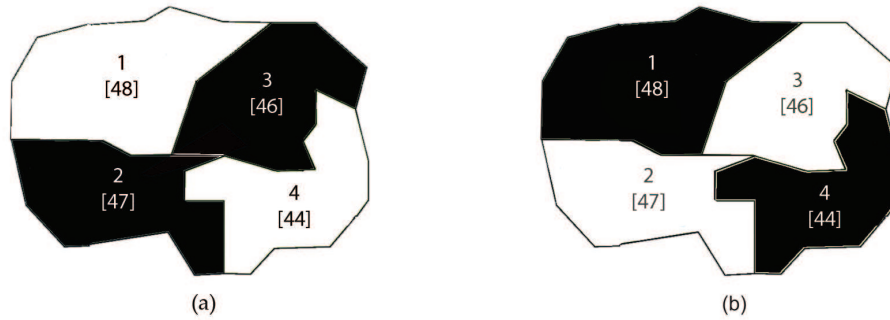


Figura 2.13: Cosecha infactible de 93 ha. violando un área máxima de 48 ha. (a) y cosechas factibles de 48 y 44 ha. (b).

El modelo básico del URM se basa en estos supuestos y se expresa matemáticamente de la siguiente forma.

#### *Conjuntos, índices y parámetros*

$I$  =conjunto de unidades de manejo existentes en el bosque;  $i \in I$ ,

$T$  =conjunto de períodos de tiempo dentro del horizonte de planificación;  $t \in T$ ,

$N_i$  =conjunto de unidades de cosecha  $j$  adyacentes a la unidad  $i$ ;  $i \in I$ ,  $j \in N_i$ ,

$v_{it}$  =volumen en metros cúbicos de madera generados al cosechar la unidad  $i$  en el período  $t$ ;  $i \in I$ ,  $t \in T$ ,

$\beta_{it}$  =beneficio económico por cosechar la unidad  $i$  en el período  $t$ ;  $i \in I$ ,  $t \in T$ ,

$L_t$  =límite inferior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

$U_t$  =límite superior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

*Variables de decisión*

$$X_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si la unidad } i \text{ es cosechada en el período } t; i \in I, t \in T \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

De este modo, el URM tiene la formulación siguiente.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \beta_{it} X_{it} \quad (2.1)$$

sujeto a

$$X_{it} + X_{jt} \leq 1 \quad t \in T, i \in I, j \in N_i, \quad (2.2)$$

$$\sum_{t \in T} X_{it} \leq 1 \quad i \in I, \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in I} v_{it} X_{it} \geq L_t \quad t \in T, \quad (2.4)$$

$$\sum_{i \in I} v_{it} X_{it} \leq U_t \quad t \in T, \quad (2.5)$$

$$X_{it} \in \{0, 1\} \quad i \in I, t \in T \quad (2.6)$$

El objetivo (2.1) es maximizar el beneficio económico asociado al volumen cosechado. Las restricciones (2.2) evitan que todo par de unidades adyacentes sean cosechadas en el mismo período. Las restricciones (2.3) garantizan que cualquier unidad de manejo sea cosechada a lo más una vez durante toda la planificación. Las

restricciones (2.4) y (2.5) mantienen los volúmenes de cosecha dentro de un límite inferior y superior en cada período. Finalmente en (2.6) se refleja la integralidad de las variables de decisión. El problema que se establece en el URM es NP-duro [46, 51], pudiendo ser resuelto en tiempos de ejecución razonables por el algoritmo de ramificación y acotamiento para instancias de hasta 2,500 bloques y más de tres períodos de tiempo [27]. Los trabajos más destacados que han tratado este modelo son los de Murray [69, 70], Murray y Weintraub [72], Murray et al. [71], Baskent y Keles [9], y Bettinger et al. [14].

Pese a que las restricciones por pares (2.2) que caracterizan al modelo URM son las más sencillas entre las restricciones de adyacencia, no son las más eficientes computacionalmente hablando [14]. De igual forma, las decisiones de fusión *a priori* dentro de unidades de cosecha mayores que también caracterizan el enfoque del URM son definitivas en la calidad de la solución final al conducir a distribuciones de cosecha en parte determinadas por la habilidad del administrador forestal. Por esta razón, es posible que dichas características no permitan que los procesos computacionales de optimización proporcionen las mejores soluciones al solo contemplar distribuciones de cosecha compatibles con los conjuntos factibles preestablecidos *a criterio*.

#### 2.4.2 MODELO DE RESTRICCIÓN POR ÁREA

La segunda aproximación para resolver el problema de gestión forestal con restricciones de adyacencia es a través del modelo de programación entera denominado en la literatura Modelo de restricción por área (ARM, por sus siglas en inglés), también identificado por Murray [69]. En este enfoque, significativamente más complejo que el URM [45], cada unidad básica de manejo ya no es definida *a priori* por los administradores forestales. En cambio, el proceso de seleccionar en el tiempo conjuntos no adyacentes de subregiones de cosecha es incorporado al proceso de optimización.

En este enfoque también es necesario definir el área máxima de corta continua en dependencia de la cual se enumera una serie de conjuntos factibles integrada de

todas las posibles combinaciones (a lo largo de toda la superficie del bosque) de subregiones vecinas que no superen el tope de área establecido.

Los conjuntos factibles solo poseen el grado de candidatos a unidades de cosecha, por lo que un subrodal o subregión puede estar contenido en varios conjuntos factibles simultáneamente, a diferencia del modelo URM en el que toda subregión está asociada a una sola unidad de cosecha antes del inicio del proceso computacional de optimización.

Para ilustrar el concepto de conjuntos factibles, en la Figura 2.14 se muestra una región de bosque particionada en 11 subrodales o unidades (junto con su área total entre corchetes), de los cuales se derivan 23 conjuntos factibles si se considera un área máxima de 32 hectáreas y adyacencias fuertes para formar conjuntos (ver Tabla 2.2).

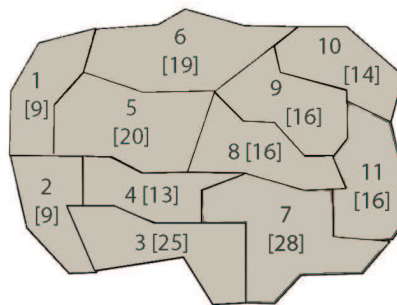


Figura 2.14: Mapa de una región con 11 unidades y su área respectiva entre corchetes.



Tabla 2.2: Conjuntos factibles en la región de la fig. 2.14 con área máxima de 32 ha.

Un subrodal	Área	Dos subrodales	Área	Tres subrodales	Área
{1}	9	{1,2}	18	{1,2,4}	31
{2}	9	{1,5}	29		
{3}	25	{1,6}	28		
{4}	13	{2,4}	22		
{5}	20	{2,5}	29		
{6}	19	{4,8}	29		
{7}	28	{8,9}	32		
{8}	16	{8,11}	32		
{9}	16	{9,10}	30		
{10}	14	{9,11}	32		
{11}	16	{10,11}	30		

Los conjuntos factibles pueden ser tan pequeños como un subrodal o tan grandes como lo permita el área máxima de corta (en el ejemplo anterior, la unidad de mayor cardinalidad es  $\{1,2,4\}$ ). Debido a que cada uno de los 23 conjuntos cuenta con el mismo o menor número de hectáreas del requerimiento de área máxima, todos los conjuntos factibles enumerados son potencialmente elegibles para ser cosechados.

Aunque en muchos casos reales el ARM es un problema particularmente difícil de estructurar y resolver utilizando programación entera [71], un destacado algoritmo basado en la factibilidad de conjuntos en el que se resuelve este problema entero de forma exacta es propuesto por Goycoolea et al. [46, 45], el cual ha permitido enumerar exitosamente soluciones de cosecha a través del algoritmo de agrupamiento de conjuntos por cliques.

#### FORMULACIÓN DE AGRUPAMIENTO DE CONJUNTOS POR CLIQUES

El Problema de agrupamiento de conjuntos por cliques (CCPP, por sus siglas en inglés) para resolver el ARM es un método basado en el agrupamiento de conjuntos factibles asociados a cliques (subgrafos completos) de subrodales, en el que se asigna una variable de decisión de tipo entero binario a cada conjunto factible, tomando

el valor de 1 si se selecciona para su cosecha, y 0 en otro caso. En este enfoque se define una restricción por clique maximal (de forma análoga a las restricciones de adyacencia por pares) que asegura la separación de conjuntos factibles seleccionados para cosecha en el mismo período.

La primera versión de esta formulación, propuesta por McDill [67] restringía la selección de conjuntos factibles vecinos a través de restricciones por pares, de modo que de existir dos conjuntos factibles superpuestos o adjuntos, se define una restricción del tipo:

$$X_{Ct} + X_{Dt} \leq 1$$

En donde los conjuntos factibles  $C$  y  $D$  son *incompatibles*, lo que significa que se intersectan o son adyacentes. Posteriormente, esta consideración es fortalecida en los trabajos de Martins, Constantino y Borges [65] y Goycoolea et al. [46, 45], mediante la incorporación de cliques maximales como elementos cohesionantes en lugar de paridades de conjuntos incompatibles.

Para explicar el concepto de cliques maximales se requiere la representación del bosque en términos de teoría de grafos (ver Diestel [34]). Los datos del bosque son generalmente obtenidos a través de SIG y codificados en un grafo no dirigido  $G = (V, E)$  con un conjunto de nodos  $V$  asociado a los subrodales o subregiones de manejo y un conjunto de aristas  $E$  representando las uniones (adyacencias) entre las subregiones.

En estos términos, un clique es un subconjunto de  $V$  en el que todos sus elementos están interconectados por aristas, siendo en otras palabras un subgrafo completo. Un clique maximal es un subconjunto de  $V$  en el que todos sus elementos están interconectados por aristas, pero que no está contenido dentro de ningún otro clique. Este concepto se traduce en la definición de las restricciones básicas del agrupamiento de conjuntos por cliques para el ARM, en la que por cada clique

maximal dentro de la representación de un bosque se define una desigualdad con las siguientes características:

$$\sum_{F \in \Omega^F: F \cap K \neq \emptyset} X_{Ft} \leq 1 \quad K \in \Omega^K, t \in T$$

En donde  $F$  representa un conjunto factible,  $K$  simboliza un clique maximal,  $\Omega^K$  es la colección de cliques maximales dentro del grafo  $G = (V, E)$  y  $t$  es un período de tiempo, de modo que al cosechar en un período particular cualquier conjunto factible de un clique maximal, la restricción imposibilita la cosecha del resto de los subrodales del clique, evitándose así la selección simultánea de todo par de conjuntos factibles incompatibles. En la Figura 2.15 se muestra cómo el clique maximal  $U$ , compuesto de los subrodales  $\{4,5,8\}$  es interceptado por los conjuntos factibles  $S, T, W$  y  $Z$ , de los que solo podrá seleccionarse uno para fines de cosecha.

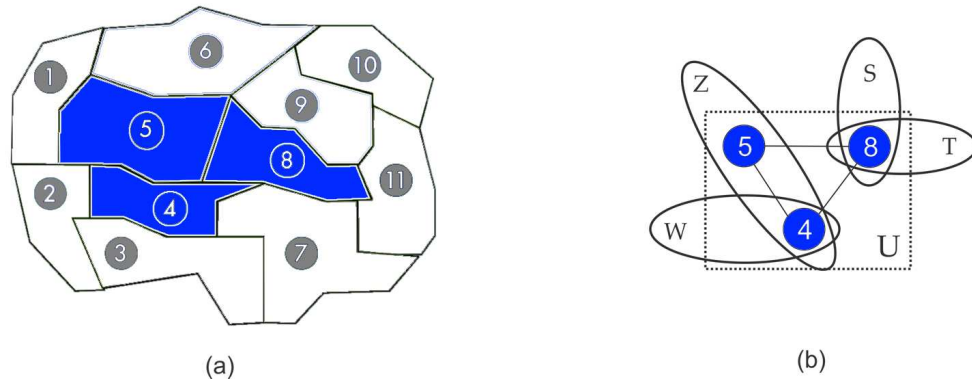


Figura 2.15: Mapa de una región (a) y el clique maximal  $U$  contenido en esta, interceptado por 4 conjuntos factibles (b).

El modelo matemático de agrupamiento de conjuntos por cliques para el ARM (CCPP-ARM) es el siguiente:

*Conjuntos, índices y parámetros*

$\Omega^K$  =conjunto de cliques maximales en  $G = (V, E)$ ;  $K \in \Omega^K$ ,

$\Omega^F$  =colección de conjuntos factibles en  $G = (V, E)$ ;  $F \in \Omega^F$ ,

$\Omega^i$  =conjunto unidades de manejo en  $G = (V, E)$ ,  $i \in \Omega^i$ ,

$T$  =conjunto de períodos de tiempo dentro del horizonte de planificación;  $t \in T$ ,

$F$  =conjunto factible;  $F \in \Omega^F$ ,

$K$  =clique maximal;  $K \in \Omega^K$ ,

$v_{Ft}$  =volumen en metros cúbicos de madera generados al cosechar el conjunto  $F$  en el período  $t$ ;  $F \in \Omega^F$ ,  $t \in T$ ,

$\beta_{Ft}$  =beneficio económico por cosechar el conjunto  $F$  en el período  $t$ ;  $F \in \Omega^F$ ,  $t \in T$ ,

$L_t$  =límite inferior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

$U_t$  =límite superior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

*Variables de decisión*

$$X_{Ft} = \begin{cases} 1 & \text{si el conjunto factible } F \text{ es cosechado en el período } t; F \in \Omega^F, t \in T \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Con lo cual, el Modelo CCPP-ARM tiene la formulación siguiente.

$$\text{Maximizar } \sum_{F \in \Omega^F} \sum_{t \in T} \beta_{Ft} X_{Ft} \quad (2.7)$$

sujeto a

$$\sum_{F \in \Omega^F: F \cap K \neq \emptyset} X_{Ft} \leq 1 \quad K \in \Omega^K, t \in T, \quad (2.8)$$

$$\sum_{F \in \Omega^F: F \cap i \neq \emptyset} \sum_t X_{Ft} \leq 1 \quad i \in \Omega^i, \quad (2.9)$$

$$\sum_{F \in \Omega^F} v_{Ft} X_{Ft} \geq L_t \quad t \in T, \quad (2.10)$$

$$\sum_{F \in \Omega^F} v_{Ft} X_{Ft} \leq U_t \quad t \in T, \quad (2.11)$$

$$X_{Ft} \in \{0, 1\} \quad F \in \Omega^F, t \in T \quad (2.12)$$

El objetivo (2.7) es maximizar el beneficio económico asociado al volumen cosechado. Las restricciones (2.8) imponen que se coseche a lo más un conjunto factible por clique maximal en un mismo período. Las restricciones (2.9) garantizan que cualquier subregión de manejo sea cosechada a lo más una vez durante toda la planificación. Las restricciones (2.10) y (2.11) mantienen los volúmenes de cosecha dentro de un límite inferior y superior en cada período. Finalmente en (2.12) se refleja la integralidad de las variables de decisión.

Para ejemplificar una solución del CCPP-ARM, en la Figura 2.16 se muestra una región del bosque en la que se han seleccionado dos conjuntos factibles no adyacentes, y por lo tanto compatibles, como una solución factible.

El ARM es un problema NP-duro [71, 46, 51], el cual puede ser resuelto por la metodología CCPP-ARM en tiempos de ejecución razonables por el algoritmo de ramificación y acotamiento para instancias de hasta 5,881 bloques y cinco períodos de tiempo [45]. Los trabajos más destacados que han tratado este modelo son los de Murray [69, 70], Goycoolea et al. [46, 45], Martins et al. [65], Vielma et al. [98], Murray y Weintraub [72], Murray, Goycoolea y Weintraub [71], Baskent y Keles [9], y Bettinger et al. [14].

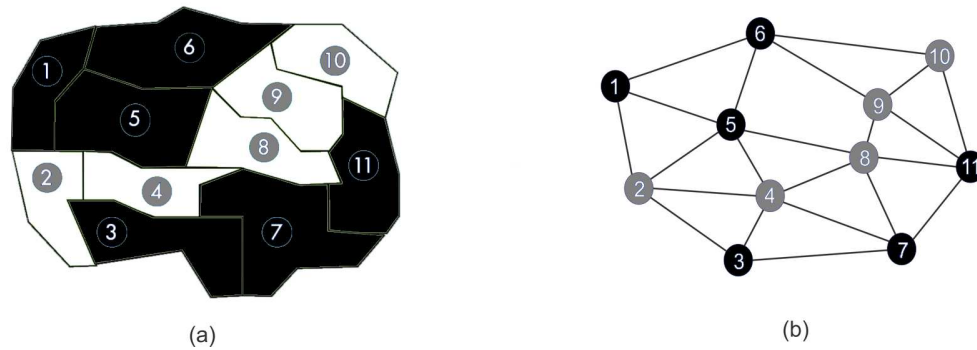


Figura 2.16: Mapa de subregiones (a) y el grafo de su topología (b). Los polígonos marcados en negro se han programado para su cosecha.

### 2.4.3 BARRERA DE REGENERACIÓN

La regeneración en el manejo forestal puede entenderse como el tiempo en años o períodos en que se estima que el establecimiento de los árboles esté garantizado después haberse cosechado una división del bosque. Cuando determinada superficie del bosque ha cubierto este requerimiento, es considerada capaz de proveer un adecuado nivel hidrológico, visual, de vida silvestre y de protección a los sectores cercanos.

En los problemas forestales de adyacencia, las restricciones de regeneración se han formulado de diversas maneras, generalmente forzando a toda unidad adyacente a una unidad recién cosechada a permanecer en pie por una serie de períodos consecutivos hasta que ésta última logre restablecer su vegetación, formando de este modo una barrera de protección. Este tipo de medida promueve una mejor distribución de las cortas mediante la continuidad de arbolado maduro y en edad de semillación en las áreas adyacentes a las masas que se van cortando [66].

Murray [70] define de manera sencilla este requerimiento basándose en las adyacencias por pares del URM, ampliando la vigencia de la prohibición de cortas adyacentes de un solo período específico  $t$  a una serie de períodos adjuntos a  $t$ , denominada  $t'$ .

$$\sum_{t'=t-r}^{t+r} (X_{it'} + X_{jt'}) \leq 1 \quad \text{para todo } i \in I, j \in N_i, t \in T, i, i'$$

En donde  $i$  es una unidad básica,  $i'$  es una unidad básica adyacente a la unidad  $i$ ,  $t$  es un período de tiempo y  $r$  es el período estimado de regeneración. La extensión de este requerimiento en el modelo ARM es expresada en la sección 3.3. Las restricciones de regeneración, al igual que las restricciones de adyacencia, se han formulado a partir de leyes, regulaciones voluntarias, políticas internas y lineamientos organizacionales [14].

#### 2.4.4 MADUREZ BIOLÓGICA

La distribución de edades en el bosque es uno de los aspectos ambientales más importantes de las soluciones de los modelos espaciales de cosecha. Lograr una estructura de edades bien distribuida a nivel de paisaje garantiza el rendimiento sostenido de productos forestales y proporciona un hábitat diverso para la fauna silvestre [3]. Una de las formas de lograrlo es mantener y proteger el arbolado de una unidad en curso de alcanzar su edad de maduración.

Esta edad, conocida como *madurez biológica*, puede ser manejada como un umbral a partir del cual es factible cosechar una unidad básica de cosecha. Hasta donde fue posible investigar, en los trabajos de optimización de manejo forestal este umbral se ha empleado principalmente en métodos heurísticos para planificar la cosecha, referido por los autores como *edad de cosecha mínima* [13, 11, 16], a partir de la cual se penaliza toda desviación en cualquier solución alcanzada por el método de búsqueda. Una forma que en este trabajo se propone el requerimiento de madurez biológica al cosechar unidades de manejo es la siguiente.

$$m_i X_{it} \leq e_{it} \quad \text{para todo } t \in T, i \in I$$

En donde  $m_i$  es la edad de maduración de los árboles de la unidad de manejo  $i$  y  $e_{it}$  representa la edad de los árboles de la unidad  $i$  en el período  $t$ . La extensión de este requerimiento en el modelo ARM es expresada en la Sección 3.3. Con esta consideración se busca resguardar el crecimiento de la masa forestal y preservar a las especies asociadas a la misma.

### 2.4.5 BOSQUE NATIVO

La protección de la vida silvestre ha sido resguardada por el hombre en gran medida a través de la asignación de reservas naturales de bosque, llamadas en la literatura *bosque nativo* o *bosque primario*, zonas en las que pueden habitar viejos árboles de gran valor (típicamente de más de 100 años) y especies animales en peligro imposibilitadas de desarrollarse en otros entornos [22]. La obtención de recursos del bosque paralela a la existencia de reservas es una tarea reconocida como medida de protección de la fauna y la biodiversidad [4].

En el trabajo de Carvajal et al. [22] se reúnen importantes consideraciones para integrar la asignación de reservas de bosque nativo a los modelos espaciales de cosecha. De este modo, para asignar a las unidades de manejo la posibilidad de formar parte de una reserva natural o bosque nativo, se definen las siguientes variables de decisión.

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{si la unidad } i \text{ es seleccionada como bosque nativo; } i \in I \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Al establecer estas variables resulta incompatible que una misma unidad de manejo reciba tratamiento de cosecha en cualquier período y sea seleccionado para integrar una reserva de bosque, por lo que es necesario definir las siguientes restricciones.



$$Z_i + \sum_{t \in T} X_{it} \leq 1 \quad \text{para todo } i \in I$$

Dentro de las consideraciones mencionadas, es indispensable establecer una cota mínima de área de bosque nativo que deben sumar las unidades de manejo asignadas para este fin, que generalmente debe superar el 10% del área total del bosque.

$$\sum_{i \in I} a_i Z_i \geq A_{\text{mín}}$$

En la que  $a_i$  indica el área de la unidad básica  $i$  y  $A_{\text{mín}}$  es el mínimo de área total de bosque nativo a reservar.

Finalmente, es necesario asegurar la no asignación de bosque nativo en las zonas de bosque cuyos árboles no cumplan con la edad mínima necesaria para este requerimiento en el último año del horizonte de planificación.

$$Z_i = 0 \quad \text{para todo } i \text{ tal que } \epsilon_i + \delta_{HP} < BN_{\text{edad}}$$

Donde  $\epsilon_i$  es la edad de los árboles de la unidad  $i$  al inicio de la planificación,  $\delta_{HP}$  representa la duración del horizonte de planificación (por ejemplo, 60 años),  $BN_{\text{edad}}$  es el umbral de edad (típicamente de 100 a 120 años) a partir del cual los árboles de una unidad son candidatos a formar parte de la reserva de bosque nativo (tomando como supuesto que  $BN_{\text{edad}} > \delta_{HP}$ ). La extensión de este requerimiento en el modelo ARM es expresada en la sección 3.3. En la literatura, trabajos destacados de requerimiento de bosque nativo en modelos espaciales de cosecha son los de Carvajal et al. [22], Rebain y McDill [85] y Caro et al. [21].

### 2.4.6 DISTANCIA MÁXIMA

Los requerimientos de distancia máxima en el manejo forestal se han utilizado en mayor medida para establecer regiones de bosque nativo dentro de un rango máximo de alejamiento que contribuya a que determinadas especies animales como martas y venados que habitan en éstas áreas puedan desarrollarse, asumiendo que al excederse el umbral, el hábitat útil para tales especies es disminuido [54]. En este trabajo se proponen requerimientos de distancia máxima para este fin y para establecer un tope máximo de dispersión entre las unidades que serán cosechados en un mismo período para reducir los costos de transportación, que representan cerca del 40 % de los costos operativos [15].

Las restricciones por pares para fijar una distancia máxima entre unidades de cosecha se proponen de la siguiente forma.

$$\begin{aligned}\varphi_{ik}X_{it} - M(1 - X_{kt}) &\leq \Lambda_{\text{máx}} && \text{para todo } i, k \in I, t \in T \\ \varphi_{ik}X_{kt} - M(1 - X_{it}) &\leq \Lambda_{\text{máx}} && \text{para todo } k, i \in I, t \in T\end{aligned}$$

En donde  $k$  e  $i$  son dos unidades de manejo distintas (adyacentes o no),  $\varphi_{ik}$  es la distancia entre los centroides de las unidades  $k$  e  $i$ ,  $\Lambda_{\text{max}}$  representa la distancia máxima permitida entre toda unidad de manejo  $k$  e  $i$  a cosechar en el mismo período, y  $M$  es un número convenientemente grande. Similarmente, las restricciones por pares para fijar una distancia máxima entre unidades de bosque nativo se han estructurado en este trabajo como sigue.

$$\begin{aligned}\varphi_{ik}Z_i - M(1 - Z_k) &\leq \Gamma_{\text{máx}} && \text{para todo } i, k \in I \\ \varphi_{ik}Z_k - M(1 - Z_i) &\leq \Gamma_{\text{máx}} && \text{para todo } k, i \in I\end{aligned}$$

En donde  $k$  e  $i$  son dos unidades de manejo distintas,  $\varphi_{ik}$  es la distancia entre los centroides de las unidades  $k$  e  $i$ ,  $\Gamma_{\text{max}}$  representa la distancia máxima permitida

---

entre toda unidad de manejo  $k$  e  $i$  a formar parte de bosque nativo, y  $M$  es un número convenientemente grande. Las extensiones de estos requerimientos en el modelo ARM son expresadas en la Sección 3.3.

## CAPÍTULO 3

# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

---

En el presente capítulo describe a detalle el problema abordado en el trabajo de tesis. Para el modelo derivado del modelo URM, nombrado URM-1, en principio se hace una descripción del problema y sus supuestos. Posteriormente se expone la formulación de programación entera basada en el modelo URM en la que se adhieren los criterios de planificación presentados en la sección 2.4. Después se describe una segunda formulación de programación entera basada en el modelo ARM, llamada ARM-1, en la que de forma similar se anexan los requerimientos de la sección 2.4. Finalmente se detallan las fórmulas para determinar el volumen leñoso presente y futuro de las unidades de manejo requerido por los modelos.

### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En las Secciones 1.1 y 2.4 se han descrito las particularidades del problema de optimización de manejo forestal con restricciones de adyacencia para fines maderables. En esta sección se hace un compendio de estas características. Fundamentalmente se busca extraer la madera de un predio forestal por el método de cortas a matarrasa sujetas a la imposibilidad de sobrepasar cierta área máxima de corta continua de modo que en ningún momento se pueda cosechar un área superior a la cota máxima. Esto se logra dividiendo al bosque en unidades de menor tamaño al área máxima y prohibiendo la cosecha de las combinaciones de unidades que superen

el umbral mencionado. Los modelos matemáticos propuestos en el trabajo de tesis bajo este marco se detallan a continuación.

## 3.2 SUPUESTOS Y DEFINICIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO URM-1

### *Supuestos del modelo*

- El bosque bajo manejo debe contener especies de árboles intolerantes.
- El método de manejo debe respetar un área máxima de corta total continua, establecida por regulación voluntaria o por ley.
- El método de cosecha considerado es el de cortas a matarrasa o corta total por unidad de manejo.
- Cada bloque de cosecha en el bosque se denomina unidad de manejo, con una superficie entre el 51 y el 100 % del área máxima de corta.
- Para que las restricciones de adyacencia por pares tomen sentido, la cosecha simultánea de todo par de unidades de manejo adyacentes debe exceder el área máxima de corta.
- Las unidades de cosecha son construidas *a mano* por el personal de manejo, fusionando unidades menores llamadas subrodas.
- El ritmo de crecimiento del volumen de madera en el bosque es lineal y depende del incremento medio anual de los árboles en pié.
- La duración preestablecida de la barrera de regeneración debe permitir la recuperación de la mayor parte de la masa forestal de una unidad tras su cosecha.
- El beneficio económico al cosechar una unidad en un período es una función de la posibilidad leñosa y de los costos de producción y precio de venta por metro cúbico de la madera de las especies en la unidad.

- Los costos de producción y el precio de venta por metro cúbico de madera asociado a las especies del bosque se consideran estáticos en todo el horizonte de planificación.
- Para evitar cosechas de unidades adyacentes, se consideran adyacencias débiles y fuertes (ver Sección 2.4) de modo que las unidades cosechadas en el mismo período no tengan punto de contacto con el objetivo de aumentar la continuidad de la masa forestal.
- En las restricciones de bosque nativo, el umbral de edad para que los árboles sean candidatos a formar parte de la reserva debe ser mayor a la duración del horizonte de planificación ( $BN_{edad} > \delta_{HP}$ ).
- El problema es determinista, lo que implica que todo parámetro es conocido con exactitud.

En el modelo matemático URM-1 se toma como base el planteamiento del modelo de programación entera URM, expresado en la Sección 2.4.1. A éste se adhieren las consideraciones ambientales y operativas establecidas en las últimas 4 secciones del capítulo 2. De esta forma, el modelo referido se expresa matemáticamente como sigue.

*Conjuntos, índices y parámetros*

$I$  =conjunto de unidades básicas existentes en el bosque;  $i, j, k \in I$ ,

$N_i$  =conjunto de unidades básicas vecinas a la unidad  $i$ ;  $j \in N_i$ ,

$T$  =conjunto de períodos de tiempo dentro del horizonte de planificación;  $t \in T$ ,

$v_{it}$  =volumen total ( $m^3$ ) de madera generado al cosechar la unidad  $i$  en el período  $t$ ;  $i \in I, t \in T$ ,

$\beta_{it}$  =beneficio económico por cosechar la unidad  $i$  en el período  $t$ ;  $i \in I, t \in T$ ,

$L_t$  =límite inferior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

$U_t$  =límite superior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

$r$  =duración de barrera de regeneración estimada en años,

$t'$  =períodos de vigencia de la barrera de regeneración;  $t' \in T - r$

$m_i$  =edad de maduración en años de los árboles de la unidad  $i$ ;  $i \in I$ ,

$e_{it}$  =edad en años de los árboles de la unidad  $i$  en el período  $t$ ;  $i \in I, t \in T$ ,

$a_i$  =superficie en hectáreas de la unidad básica  $i$ ;  $i \in I$

$A_{\min}$  =mínimo de superficie en hectáreas de bosque nativo a reservar,

$e_i$  =edad de la unidad  $i$  al inicio del horizonte de planificación,

$\delta_{HP}$  =duración en años del horizonte de planificación,

$BN_{edad}$  =umbral de edad en años a partir del cual los árboles de una unidad pueden considerarse candidatos a reserva bosque nativo,

$\varphi_{ik}$  =distancia euclidiana entre los centroides de las unidades  $i$  y  $k$ ;  $i, k \in I$

$\Lambda_{\max}$  =distancia euclidiana máxima entre los centroides de todo par de unidades cosechadas en el mismo período,

$\Gamma_{\max}$  =distancia euclidiana máxima entre los centroides de todo par de unidades seleccionadas para bosque nativo,

$M$  =número convenientemente grande.

*Variables de decisión*

$$X_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si la unidad básica } i \text{ es cosechada en el período } t; i \in I, t \in T \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{si la unidad básica } i \text{ se asigna como reserva de bosque nativo; } i \in I \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

El modelo matemático URM-1 tiene la formulación siguiente.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \beta_{it} X_{it} \quad (3.1)$$

sujeto a

$$\sum_{t'=t}^{t+r} (X_{it'} + X_{jt'}) \leq 1 \quad t \in T = \{t, \dots, T-r\}, i \in I, j \in Ni, \quad (3.2)$$

$$\sum_{t \in T} X_{it} \leq 1 \quad i \in I, \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in I} v_{it} X_{it} \geq L_t \quad t \in T, \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in I} v_{it} X_{it} \leq U_t \quad t \in T, \quad (3.5)$$

$$m_i X_{it} \leq e_{it} \quad t \in T, i \in I, \quad (3.6)$$

$$Z_i + \sum_{t \in T} X_{it} \leq 1 \quad i \in I, \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in I} a_i Z_i \geq A_{\text{mín}}, \quad (3.8)$$

$$Z_i = 0 \quad i \text{ tal que } \epsilon_i + \delta_{HP} < BN_{edad}, \quad (3.9)$$

$$\varphi_{ik} X_{it} - M(1 - X_{kt}) \leq \Lambda_{\text{máx}} \quad i, k \in I, t \in T, \quad (3.10)$$

$$\varphi_{ik} X_{kt} - M(1 - X_{it}) \leq \Lambda_{\text{máx}} \quad k, i \in I, t \in T, \quad (3.11)$$

$$\varphi_{ik} Z_i - M(1 - Z_k) \leq \Gamma_{\text{máx}} \quad i, k \in I, \quad (3.12)$$

$$\varphi_{ik} Z_k - M(1 - Z_i) \leq \Gamma_{\text{máx}} \quad k, i \in I, \quad (3.13)$$

$$X_{it} \in \{0, 1\} \quad i \in I, t \in T, \quad (3.14)$$



$$Z_i \in \{0, 1\} \quad i \in I \quad (3.15)$$

El objetivo (3.1) es maximizar el beneficio económico generado por el volumen de madera extraído. Las restricciones (3.2) unen los conceptos de adyacencia y regeneración, forzando a toda unidad adyacente a una unidad recién cosechada a permanecer en pie durante una serie de períodos consecutivos hasta que ésta última logre restablecer su vegetación. Las restricciones (3.3) evitan más de una cosecha en cualquier unidad de manejo durante todo el horizonte de planificación. Los grupos de restricciones (3.4) y (3.5) mantienen los volúmenes de cosecha dentro de límites inferiores y superiores en cada período.

Las restricciones ambientales (3.6) previenen la cosecha en unidades de manejo en las que sus árboles no han alcanzado la madurez biológica. Las restricciones (3.7) permiten a lo más una prescripción por unidad de manejo en toda la planificación, pudiendo ser cosechada en algún período, asignada como reserva de bosque nativo, o no recibir intervención. Las restricciones (3.8) obligan a seleccionar suficientes unidades de cosecha para reservar un mínimo de área total de bosque nativo en el bosque. Las restricciones (3.9) eliminan como candidatos a reserva de bosque nativo a las unidades cuyos árboles más jóvenes no alcancen al final del horizonte de planificación la edad mínima requerida para este fin.

Las restricciones operativas (3.10) y (3.11) fijan por cada par de unidades un máximo de distancia si éstas son cosechadas en el mismo período. Las restricciones de la misma naturaleza (3.12) y (3.13) fijan un distanciamiento máximo entre toda unidad básica seleccionada como reserva de bosque nativo. Las restricciones (3.14) y (3.15) indican la naturaleza entera binaria de las variables de decisión.

El modelo URM-1 está planteado a partir del modelo URM, que es NP-duro [46, 51], al que se incorporan consideraciones adicionales. Debido a la similitud en estructura de los modelos, se conjetura que el URM-1 es NP-duro. La demostración de esta conjetura se trata como parte del trabajo futuro, detallado en la Sección 6.3.

La mejora constante de los métodos computacionales de optimización (e.g. CPLEX, LINDO) han permitido resolver este problema entero de forma exacta (donde se encuentra la mejor de las posibles soluciones de un problema combinatorio) a través del algoritmo de ramificación y acotamiento para instancias cada vez mayores.

### 3.3 SUPUESTOS Y DEFINICIÓN DEL MODELO

#### MATEMÁTICO ARM-1

##### *Supuestos del modelo*

- El bosque bajo manejo debe contener especies de árboles intolerantes.
- El método de manejo debe respetar un área máxima de corta total continua, establecida por regulación voluntaria o por ley.
- El método de cosecha considerado es el de cortas a matarrasa o corta total por conjunto factible.
- El modelo permite cosechar dos o más unidades adyacentes siempre que no excedan de forma combinada el área máxima.
- Cada bloque de cosecha en el bosque se denomina conjunto factible, formado a partir de unidades de manejo menores (también llamadas subrodas) con un área promedio inferior al 50 % del área máxima de corta.
- El ritmo de crecimiento del volumen de madera en el bosque es lineal y depende del incremento corriente anual de los árboles en pié.
- El tiempo de regeneración preestablecido debe permitir la recuperación de la mayor parte de la masa forestal del conjunto factible tras su cosecha.
- El beneficio económico al cosechar un conjunto factible en un período es una función de la posibilidad leñosa (ver Sección 3.4) y de los costos de producción y precio de venta por metro cúbico de la madera de las especies en el conjunto.

- Los costos de producción y el precio de venta por metro cúbico de madera asociado a las especies del bosque se consideran estáticos en todo el horizonte de planificación.
- En la búsqueda de conjuntos factibles solo se consideran adyacencias fuertes entre unidades (ver Sección 2.4).
- Para evitar cosechas simultáneas de conjuntos factibles incompatibles, se consideran cliques maximales de adyacencias tanto débiles como fuertes (ver sección 2.4) de modo que las unidades cosechadas en el mismo período no tengan punto de contacto con el objetivo de aumentar la continuidad de la masa forestal.
- En las restricciones de madurez biológica, la referencia de edad de un conjunto factible debe ser la de los árboles más jóvenes del conjunto, de modo que no se talen árboles en proceso de maduración.
- En las restricciones de bosque nativo, el umbral de edad para que los árboles sean candidatos a formar parte de la reserva debe ser mayor a la duración del horizonte de planificación ( $BN_{edad} > \delta_{HP}$ ).
- El problema es determinista, lo que implica que todo parámetro es conocido con exactitud.

El modelo matemático ARM-1 está basado en la formulación de agrupamiento de conjuntos por cliques para el modelo entero ARM (CCPP-ARM -ver Sección 2.4.2-), y agrega las consideraciones ambientales y operativas de las secciones 2.4.3 a la 2.4.6. Su formulación es la siguiente.

*Conjuntos, índices y parámetros*

$\Omega^K$  =conjunto de cliques maximales en  $G = (V, E)$ ;  $K \in \Omega^K$ ,

$\Omega^F$  =colección de conjuntos factibles en  $G = (V, E)$ ;  $F \in \Omega^F$ ,

$\Omega^i$  =conjunto de unidades de manejo en  $G = (V, E)$ ;  $i \in \Omega$ ,

$\Omega^{FK}$  =colección de conjuntos factibles  $F$  intersectando al clique maximal  $K$ ;  $\Omega^{FK} :$   
 $F \cap K \neq 0$ ,

$\Omega^{Fi}$  =colección de conjuntos factibles  $F$  intersectando a la unidad de manejo  $i$ ;  
 $\Omega^{Fi} : F \cap i \neq 0$ ,

$T$  =conjunto de períodos dentro del horizonte de planificación;  $t \in T$ ,

$v_{Ft}$  =volumen total ( $m^3$ ) de madera generado al cosechar el conjunto factible  $F$  en el período  $t$ ;  $F \in \Omega^F, t \in T$ ,

$\beta_{Ft}$  =beneficio económico por cosechar el conjunto factible  $F$  en el período  $t$ ;  $F \in \Omega^F, t \in T$ ,

$L_t$  =límite inferior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

$U_t$  =límite superior de volumen a obtener en el período  $t$ ;  $t \in T$ ,

$r$  =tiempo de regeneración de la masa forestal después de una cosecha estimado en años,

$m_F$  =edad de maduración en años de los árboles del conjunto factible  $F$ ;  $F \in \Omega^F$ ,

$e_{Ft}$  =edad de los árboles más jóvenes del conjunto factible  $F$  en el período  $t$ ;  $F \in \Omega^F, t \in T$ ,

$a_F$  =superficie en hectáreas del conjunto factible  $F$ ;  $F \in \Omega^F$ ,

$A_{\min}$  =mínimo de superficie total en hectáreas de bosque nativo a reservar,

$\epsilon_F$  =edad del subrodal más joven del conjunto factible  $F$  al inicio del horizonte de planificación;  $F \in \Omega^F$ ,

$\delta_{HP}$  =duración en años del horizonte de planificación,

$BN_{edad}$  =umbral de edad en años a partir del cual los árboles de un conjunto factible pueden considerarse candidatos a reserva de bosque nativo,

$\varphi_{F,F'}$  =distancia euclidiana entre los centroides de los conjuntos factibles  $F$  y  $F'$ ;  $F, F' \in \Omega^F$ ,

$\Lambda_{m\acute{a}x}$  =distancia euclidiana máxima entre los centroides de todo par de conjuntos factibles cosechados en el mismo período,

$\Gamma_{m\acute{a}x}$  =distancia euclidiana máxima entre los centroides de todo par de conjuntos factibles seleccionados para bosque nativo,

$M$  =número convenientemente grande.

*Variables de decisión*

$$X_{Ft} = \begin{cases} 1 & \text{si el conjunto factible } F \text{ es cosechado en el período } t; F \in \Omega^F, t \in T \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$Z_F = \begin{cases} 1 & \text{si el conjunto factible } F \text{ se asigna como reserva de bosque nativo; } F \in \Omega^F \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

El modelo matemático ARM-1 tiene la formulación siguiente.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in \Omega} \sum_{t \in T} \beta_{Ft} X_{Ft} \quad (3.16)$$

sujeto a

$$\sum_{F \in \Omega^{FK}} \sum_{t'=t}^{t+r} X_{Ft'} \leq 1 \quad K \in \Omega^K, t \in T = \{1, \dots, T-r\}, \quad (3.17)$$

$$\sum_{F \in \Omega^{Fi}} \sum_{t \in T} X_{Ft} \leq 1 \quad i \in \Omega, \quad (3.18)$$

$$\sum_{F \in \Omega^F} v_{Ft} X_{Ft} \geq L_t \quad t \in T, \quad (3.19)$$

$$\sum_{F \in \Omega^F} v_{Ft} X_{Ft} \leq U_t \quad t \in T, \quad (3.20)$$

$$m_F X_{Ft} \leq e_{Ft} \quad t \in T, F \in \Omega^F, \quad (3.21)$$

$$\sum_{F \in \Omega^{Fi}} Z_F + \sum_{F \in \Omega^{Fi}} \sum_{t \in T} X_{Ft} \leq 1 \quad i \in \Omega, \quad (3.22)$$

$$\sum_{F \in \Omega^F} a_F Z_F \geq A_{\text{mín}}, \quad (3.23)$$

$$Z_F = 0 \quad F \text{ tal que } \epsilon_F + \delta_{HP} < BN_{edad}, \quad (3.24)$$

$$\varphi_{F,F'} X_{Ft} - M(1 - X_{F't}) \leq \Lambda_{\text{máx}} \quad F, F' \in \Omega^F, t \in T, \quad (3.25)$$

$$\varphi_{F,F'} X_{F't} - M(1 - X_{Ft}) \leq \Lambda_{\text{máx}} \quad F', F \in \Omega^F, t \in T, \quad (3.26)$$

$$\varphi_{F,F'} Z_F - M(1 - Z_{F'}) \leq \Gamma_{\text{máx}} \quad F, F' \in \Omega^F, \quad (3.27)$$

$$\varphi_{F,F'} Z_{F'} - M(1 - Z_F) \leq \Gamma_{\text{máx}} \quad F', F \in \Omega^F, \quad (3.28)$$

$$X_{Ft} \in \{0, 1\} \quad F \in \Omega^F, t \in T, \quad (3.29)$$

$$Z_F \in \{0, 1\} \quad F \in \Omega^F \quad (3.30)$$

El objetivo (3.16) es maximizar el beneficio económico asociado al volumen cosechado. Las restricciones (3.17) imponen la posibilidad de cosechar a lo más un conjunto factible por clique maximal, forzando por una serie de períodos consecutivos al resto de los conjuntos factibles intersectados por el clique a permanecer en pie hasta que el conjunto factible cosechado logre restablecer su vegetación. Las restricciones (3.18) garantizan que cualquier unidad de manejo sea cosechada a lo más

una vez durante toda la planificación. Las restricciones (3.19) y (3.20) mantienen los volúmenes de cosecha dentro de un límite inferior y superior en cada período.

Las restricciones de tipo ambiental (3.21) previenen la cosecha en todo conjunto factible hasta que los árboles del subrodal más joven del conjunto hayan alcanzado la madurez biológica. Las restricciones (3.22) permiten a lo más una prescripción por conjunto factible en toda la planificación, pudiendo ser cosecha en algún período, asignación como bosque nativo, o la no intervención. Las restricciones (3.23) obligan a seleccionar suficientes conjuntos factibles como para reservar un mínimo de área total de reserva de bosque nativo. Las restricciones (3.24) eliminan como candidatos a bosque nativo a los conjuntos factibles cuyos subrodales más jóvenes no alcancen al final del horizonte de planificación la edad mínima requerida para este tipo de reserva.

Las restricciones operativas (3.25) y (3.26) fijan por cada par de conjuntos factibles un máximo de distancia si éstos son cosechados en el mismo período. Las también restricciones operativas (3.27) y (3.28) fijan un distanciamiento máximo entre todo conjunto factible seleccionado como reserva de bosque nativo. Las restricciones (3.29) y (3.30) indican la naturaleza entera binaria de las variables de decisión.

El modelo matemático ARM-1 está planteado a partir del modelo ARM, que es NP-duro [71, 46, 51], al que se incorporan consideraciones adicionales. Debido a la similitud en estructura de los modelos, se conjetura que el ARM-1 es también NP-duro. La demostración de esta conjetura se plantea como parte del trabajo futuro (Sección 6.3).

Gracias a aportes como la metodología CCPP-ARM [65, 46, 45] empleada en este trabajo, en pocos años se ha revertido el pronóstico hecho por el descubridor del ARM, Murray [69], quien afirma en el mismo artículo: “*es improbable que alguna vez se desarrollen métodos exactos para identificar soluciones óptimas para el ARM a causa de su inherente dificultad*”.

### 3.4 CÁLCULO DE PARÁMETROS MADERABLES

Como se ha expresado en las Secciones 3.2 y 3.3, en el modelo URM-1 la parcela de manejo es llamada unidad básica, formada por unidades de menor tamaño (también llamadas subrodales) que son obtenidas desde SIG y agrupadas a mano por el administrador de bosques. En el modelo ARM-1 la parcela de manejo se denomina conjunto factible, integrada también por unidades menores (subrodales) en donde la selección de conjuntos factibles a cosechar es realizada en el proceso computacional de resolución.

De esta forma, los modelos matemáticos URM-1 y ARM-1 requieren indirectamente los datos de volumen de madera en pie y beneficio económico por subrodal en el presente y futuro para que en una segunda etapa de cálculos sean estimados los datos que corresponden a sus respectivas parcelas de manejo (ver Apéndice A). Las fórmulas, índices y parámetros que se detallan para procesar los datos de campo están basados en los trabajos de Grijpma [48] y Prodan et al. [82].

#### 3.4.1 CÁLCULO DE LA POSIBILIDAD LEÑOSA ANUAL POR ESPECIE

La primera serie de fórmulas parten de los datos de campo de existencia leñosa o maderable anual por especie dentro de cada subrodal de acuerdo a la división del bosque determinada desde SIG.

Los índices, parámetros y fórmulas para estimar la posibilidad leñosa de una especie de forma anual son los siguientes.

*Conjuntos, índices y parámetros*

$\Omega^s$  =conjunto de subrodales dentro del bosque a manejar;  $s \in \Omega^s$ ,

$\Omega^e$  =conjunto de especies de árbol dentro del bosque a manejar;  $e \in \Omega^e$ ,

$\alpha$  =tiempo futuro en años,



$A_{es}$  =superficie en hectáreas del subrodal  $s$  en el que habita la especie  $e$ ;  $s \in \Omega^s, e \in \Omega^e$ ,

$ER_{es}$  =existencia real ( $m^3/RTA$ , donde RTA significa rollo total árbol) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ , que es la existencia presente de volumen en rollo total árbol de una especie de árbol por hectárea dentro de un subrodal;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$ERA_{es}$  =existencia real actual ( $m^3/RTA$ ) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ , que representa la existencia presente de volumen en rollo total de una especie de árbol dentro de una unidad;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$ERF_{es\alpha}$  =existencia real futura ( $m^3/RTA$ ) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$  en un número de años  $\alpha$ ;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$ICA_{es}$  =incremento corriente anual ( $m^3/RTA$ ) de la especie  $e$  dentro del subrodal  $s$ , que es el crecimiento anual de volumen de una especie por hectárea dentro de un subrodal;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$TP_{es}$  =tiempo de paso (en años) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ , que representa el lapso requerido para que un árbol de una especie dentro de un subrodal supere una clase diamétrica o intervalo que agrupa árboles de diámetros similares;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$LC$  =longitud de clase diamétrica (en centímetros) empleada en el estudio, que es la longitud de diámetro necesaria para que el árbol promedio supere una clase diamétrica,

$DN_{es}$  =diámetro normal (en centímetros) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ , también conocido como diámetro a la altura del pecho, que es el diámetro de fuste promedio a 1.3 m de altura;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$AB_{es}$  =área basal ( $m^2/RTA$  por hectárea) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ , que representa la densidad de la masa forestal de una especie en un subrodal estimada a partir de las secciones de fuste a 1.3 metros de altura;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$Hmed_{es}$  = altura de árbol promedio (en metros) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ ;  
 $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$CM_{es}$  = coeficiente mórfo (adimensional) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ , que es un factor determinado por la forma de los árboles del subrodal que varía con la especie y la región de crecimiento;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

Las expresiones que componen el cálculo de la posibilidad leñosa anual por especie se indican a continuación.

$$ERF_{es\alpha} = ERA_{es} + A_{es} \cdot ICA_{es} \cdot \alpha, \quad (3.31)$$

$$ERA_{es} = A_{es} \cdot ER_{es}, \quad (3.32)$$

$$ICA_{es} = \frac{ER_{es} \cdot LC}{TP_{es} \cdot DN_{es}}, \quad (3.33)$$

$$ER_{es} = AB_{es} \cdot Hmed_{es} \cdot CM_{es} \quad (3.34)$$

Las ecuaciones (3.31) pronostican la existencia real futura de una especie dentro de un subrodal para un año  $\alpha$ . Para este pronóstico se debe tener en cuenta que una vez que los árboles de una especie han alcanzado su edad tope de incremento de volumen (por ejemplo, 60 años), el volumen en años posteriores se mantiene constante. Las expresiones (3.32) representan la existencia real presente de volumen maderable de una especie de árbol dentro de un subrodal. Las ecuaciones (3.33) representan el incremento corriente de volumen anual por hectárea de una especie en un subrodal determinado. Las ecuaciones (3.34) permiten conocer la existencia real del volumen leñoso por hectárea de una especie dentro de un subrodal.

Las fórmulas complementarias para obtener de forma periódica el volumen y el beneficio económico por conjunto factible para el modelo ARM-1 y por unidad de manejo para el modelo URM-1 son detalladas en el Apéndice A.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

---

En este capítulo se desarrolla la metodología de solución propuesta para resolver el problema de planificación de la cosecha con restricciones de adyacencia, representado a través de los modelos URM-1 y ARM-1, expuestos en el Capítulo 3. Cada uno de los modelos es resuelto en tres etapas denominadas preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento.

Para resolver el modelo URM-1, la partición espacial del bosque es procesada inicialmente uniendo bajo reglas específicas grupos de subrodas colindantes dentro grupos mayores llamados unidades básicas, tras lo cual son estimados los parámetros maderables por unidad y las distancias entre todo par de éstas.

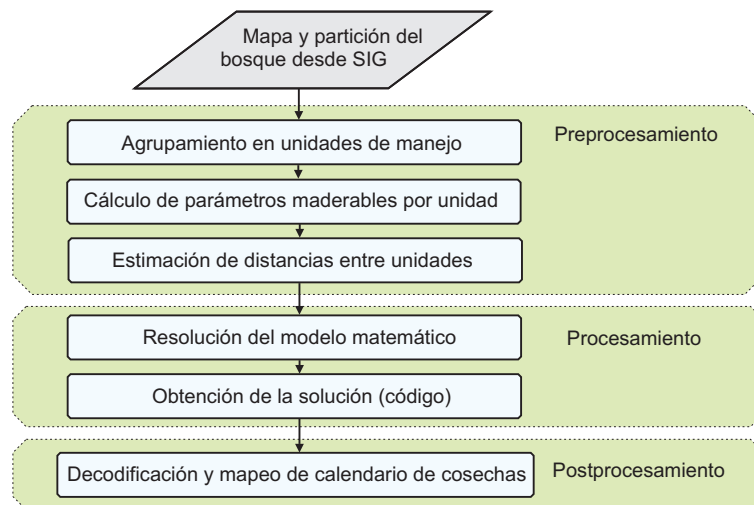


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la metodología para el modelo URM-1.

Posteriormente, la instancia resultante es codificada en términos del modelo matemático dentro del sistema de modelación algebraica GAMS, que envía los datos al software de optimización CPLEX para encontrar la solución del problema entero mediante el algoritmo de ramificación y acotamiento. Con la solución definida, el paso final es decodificar los datos de solución dentro del mapa del bosque para indicar los lugares y momentos de las cosechas. Los pasos de la metodología propuesta para resolver el modelo URM-1 están ilustrados en la Figura 4.1.

En el caso del modelo ARM-1, es necesario realizar un preprocesamiento de seis fases que incluye la localización de conjuntos factibles (CF), la estimación de parámetros maderables por CF y la obtención de distancias euclidianas entre todo par de éstos, la enumeración de los empalmes entre CF y unidades, la localización de cliques maximales y la relación de los empalmes entre cliques maximales y conjuntos factibles.

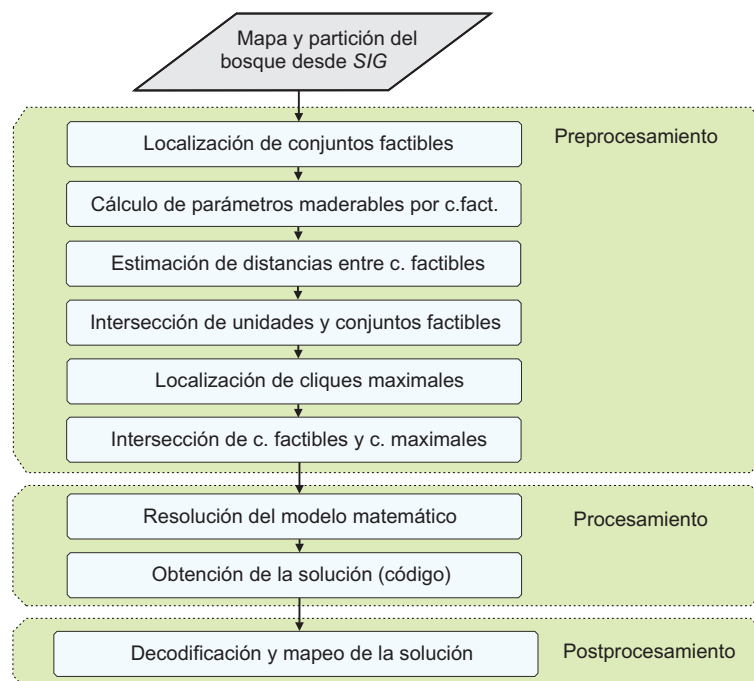


Figura 4.2: Diagrama de flujo de la metodología para el Modelo ARM-1.

En la segunda etapa, la instancia es codificada en términos del modelo matemático dentro del sistema de modelación GAMS, el cual envía los datos al software de optimización CPLEX para encontrar la solución del problema entero mediante el algoritmo de ramificación y acotamiento. Con la solución definida, la última etapa consiste en decodificar los datos de solución dentro del mapa del bosque para indicar los lugares y momentos de las cosechas. Los pasos de la metodología propuesta para resolver el modelo ARM-1 quedan ilustrados en la Figura 4.2.

## 4.1 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada espaciales de la metodología propuesta provienen de los renombrados sistemas de información geográfica. La aplicación computacional de SIG utilizada por el equipo de trabajo del experto forestal que suministró los datos del caso de estudio (ver Sección 5.2), fue la herramienta ArcView GIS 3.2 -software comercial multiplataforma desarrollado por la compañía ESRI-, con la que se definieron los rodales y los subrodales sobre la superficie del bosque (ver Figura 4.3). Los datos de mensura forestal necesarios para estimar los parámetros maderables son detallados en la Sección 3.4. Para el estudio, estas cifras dasométricas fueron también proporcionadas por el experto referido.

## 4.2 PREPROCESAMIENTO

El preprocesamiento o preproceso en una metodología de solución trata en general del esfuerzo dirigido a preparar los datos requeridos por los modelos matemáticos en la siguiente etapa, llamada procesamiento. A continuación se puntualiza el preproceso para los modelos presentados en el trabajo de tesis.



Figura 4.3: Área de estudio desde ArcView GIS 3.2

### 4.2.1 PREPROCESO EN MODELO URM-1

El preproceso en el modelo URM-1 se caracteriza por involucrar decisiones humanas. Estas y otras consideraciones se explican a continuación:

#### AGRUPAMIENTO EN UNIDADES

Debido a que las restricciones por pares de unidades del modelo URM pueden ser consideradas *miopes* al prohibir la cosecha simultánea de todo par de unidades adyacentes en el bosque sin importar el tamaño de una u otra unidad involucrada en la restricción, es necesario reagrupar la partición inicial de modo que las restricciones de adyacencia logren el cometido de evitar cortas continuas mayores al área máxima establecida. Esto se logra formando unidades espaciales con las siguientes características:

- Cada unidad está formada de subrodales adyacentes o conexos, lo que implica que cada par de subrodales en la unidad debe estar comunicado por contigüidad o por otros subrodales de la misma unidad.

- El área de las unidades debe fluctuar entre el 51 % y el 100 % del área máxima.
- Los subrodales a fusionar deben contener características de pendiente y composición de árboles similar en edad y especie.

En la Figura 4.4 se muestra parte del agrupamiento *a priori* realizado en este trabajo, dentro de un rodal del caso de estudio.

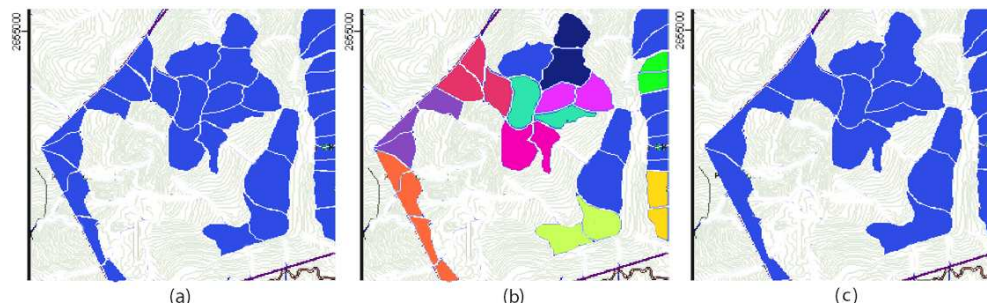


Figura 4.4: Partición primaria (a), agrupamiento de subrodales -marcado en colores- (b) y partición final (c).

#### ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MADERABLES POR UNIDAD

Tras la definición de las unidades de cosecha, debe estimarse la capacidad de madera en volumen para las restricciones (3.4) y (3.5) y el beneficio económico de cada unidad para la función objetivo (3.1), de acuerdo con las fórmulas de parámetros maderables establecidos en la Sección 3.4.

#### CÁLCULO DE DISTANCIAS ENTRE UNIDADES

Las restricciones de distancia máxima (3.10) a (3.13) hacen necesario el cálculo de la distancia euclidiana entre los centroides de todo par de unidades básicas. Para estos cálculos es necesario implementar computacionalmente una doble función que defina en principio el centroide de cada unidad y posteriormente encuentre la distancia entre todos los pares existentes.

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{s \in i} x_s}{|i|} \quad (4.1)$$

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{s \in i} y_s}{|i|} \quad (4.2)$$

$$\varphi_{ik} = \sqrt{(\bar{x}_i - \bar{x}_k)^2 + (\bar{y}_i - \bar{y}_k)^2} \quad (4.3)$$

Las ecuaciones (4.1) y (4.2) permiten hallar respectivamente la componente en  $x$  y en  $y$  del centroide de toda unidad  $i$  a partir de las componentes de posición de los subrodales contenidos en éste. En la ecuación (4.3) se toman las componentes ya obtenidas de las centroides de las unidades  $k$  e  $i$  para determinar su distancia, siendo  $k$  una unidad diferente a  $i$ , adyacente o no a esta última.

#### 4.2.2 PREPROCESO EN MODELO ARM-1

El preproceso en el modelo ARM-1 se caracteriza por involucrar varios algoritmos computacionales. Estas y otras consideraciones se explican a continuación.

##### LOCALIZACIÓN DE CONJUNTOS FACTIBLES

En el modelo ARM-1, los bloques de cosecha son llamados conjuntos factibles (ver secciones 2.4.2 y 3.3), los cuales se encuentran distribuidos en toda la superficie del bosque bajo el concepto básico de agrupar unidades anexas que no superen en superficie combinada el área máxima de corta. La tarea de búsqueda y enumeración de estos conjuntos dentro de la multitud de combinaciones potenciales en el bosque debe ser exhaustiva, por lo que es preciso el diseño y la utilización de un algoritmo computacional para este fin. El Pseudocódigo 1 para localizar conjuntos factibles presentado en esta sección está basado en el Algoritmo 1 propuesto en el trabajo de Goycoolea et al. [45].



---

**Pseudocódigo 1** Localización de conjuntos factibles (ARM-1)

---

**Entrada:**  $A_{max}$ : Área máxima de corta

$A(i)$ : Arreglo de dimensión  $m$  que contiene el área de cada unidad básica  $i$

$ADY(i, j)$ : Arreglo de adyacencias entre las unidades básicas  $(i, j)$

**Salida:**  $F[c]$ : Arreglo de conjuntos factibles de cardinalidad  $c = 1$  hasta  $q$ , siendo  $q$  la mayor cardinalidad encontrada

```
1: para todo  $i = 1$  hasta  $m$  hacer
2:    $F[1] := F[1] \cup \{i\}$ 
3: fin para
4: para todo  $k = 1$  hasta  $\infty$  hacer
5:   si ( $F[k]$  es vacío) entonces
6:      $q = k - 1$ 
7:     ir a paso 18
8:   fin si
9:   para todo conjunto  $C \in F[k]$  hacer
10:    para todo  $i \in N(C)$ ,  $N(C) :=$ conjunto de  $i$ 's adyacentes a  $C$  hacer
11:      $D := C \cup \{i\}$ 
12:     si ( $A(D) \leq A_{max}$ ) y ( $D \notin F[k + 1]$ ) entonces
13:        $F[k + 1] := F[k + 1] \cup \{D\}$ 
14:     fin si
15:   fin para
16: fin para
17: fin para
18: devolver  $F[c]$ ,  $c = 1$  hasta  $q$ 
```

---

## ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MADERABLES POR CONJUNTO FACTIBLE

Tras la definición de los conjuntos factibles, debe estimarse la capacidad de madera en volumen para cubrir las restricciones (3.19) y (3.20) y el beneficio económico por conjunto factible requerido en la función objetivo (3.16), de acuerdo con las fórmulas de parámetros maderables establecidos en la Sección 3.4.

## CÁLCULO DE DISTANCIAS ENTRE CONJUNTOS FACTIBLES

Las restricciones de distancia máxima (3.25) a (3.28) requieren el cálculo de la distancia entre todo par de conjuntos factibles. El algoritmo computacional implementado para este propósito se basa en las siguientes fórmulas.

$$\bar{x}_F = \frac{\sum_{s \in F} x_s}{|F|} \quad (4.4)$$

$$\bar{y}_F = \frac{\sum_{s \in F} y_s}{|F|} \quad (4.5)$$

$$\varphi_{F,F'} = \sqrt{(\bar{x}_F - \bar{x}_{F'})^2 + (\bar{y}_F - \bar{y}_{F'})^2} \quad (4.6)$$

Las ecuaciones (4.4) y (4.5) permiten hallar respectivamente la componente en  $x$  y en  $y$  del centroide de todo conjunto factible  $F$  a partir de las componentes de posición de los subrodales contenidos en éste. En la ecuación (4.6) se toman las componentes ya obtenidas de los centroides del par de conjuntos factibles  $F$  y  $F'$  para determinar su distancia, siendo  $F'$  un conjunto factible diferente de  $F$ .

## INTERSECCIÓN DE UNIDADES Y CONJUNTOS FACTIBLES

La tarea de determinar conjuntos factibles permite la enumeración por unidad de todos aquellos CF's que lo contienen, de acuerdo con las restricciones (3.18). El Pseudocódigo 3 del Apéndice B reproduce el algoritmo diseñado en el trabajo para este fin.

#### LOCALIZACIÓN DE CLIQUES MAXIMALES

La enumeración de los llamados cliques maximales (ver secciones 2.4.2 y 3.3) permite la aplicación de las restricciones (3.17) en el modelo ARM-1, las cuales se encargan de imponer las consideraciones de adyacencia entre los conjuntos factibles seleccionados. El Pseudocódigo 2 de esta sección, basado en la segunda parte del Algoritmo 1 propuesto en el trabajo de Goycoolea et al. [45], puntualiza los pasos del código implementado para encontrar esta serie de datos.

#### INTERSECCIÓN DE CONJUNTOS FACTIBLES Y CLIQUES MAXIMALES

Las restricciones (3.17) no pueden aplicarse sin la relación precisa entre conjuntos factibles y cliques maximales. El algoritmo diseñado en el trabajo para lograr este objetivo se detalla en el Pseudocódigo 4 del Apéndice B.

### 4.3 PROCESAMIENTO

#### RESOLUCIÓN DEL MODELO

Cuando la preparación de datos ha sido completada, la etapa de procesamiento computacional precisa la codificación de las instancias bajo la estructura de los modelos de programación entera que describen el problema descrito en los Capítulos 2 y 3. El ambiente de desarrollo empleado en este trabajo para la inscripción de datos fue el sistema de modelación general algebraica GAMS. Tras esta fase, el sistema de datos codificado en GAMS permite el procesamiento computacional del problema a través de un *solver* (software de optimización) apto para resolver problemas enteros (PE) como el URM-1 y ARM-1 y problemas enteros mixtos (PEM).

Un destacado y eficiente método, con varias décadas de mejoras algorítmicas empleado por los paquetes de optimización para lograr la resolución de PE es el

**Pseudocódigo 2** Localización de cliques maximales (ARM-1)**Entrada:**  $ADY(i, j)$ : Arreglo de adyacencias entre las unidades  $j$  e  $i$ **Salida:**  $K[c]$ : Arreglo de cliques maximales de cardinalidad  $c = 1$  hasta  $r$ , siendo  $r$  la mayor cardinalidad encontrada

```

1: para todo  $i = 1$  hasta  $m$  hacer
2:    $K[1] := K[1] \cup \{i\}$ 
3: fin para
4: para todo  $c = 1$  hasta  $\infty$  hacer
5:   si ( $K[c]$  es vacío) entonces
6:      $r = c - 1$ 
7:     ir a paso 21
8:   fin si
9:   para todo conjunto  $S \in K[c]$  hacer
10:    para todo  $i \in N(S)$ ,  $N(S) :=$ conjunto de  $i$ 's adyacentes a  $S$  hacer
11:      $D := S \cup \{i\}$ 
12:     si  $D$  es un clique entonces
13:       marcar a  $S$  como "no maximal"
14:       si ( $D \notin K[c + 1]$ ) entonces
15:          $K[c + 1] := K[c + 1] \cup \{D\}$ 
16:       fin si
17:     fin si
18:   fin para
19: fin para
20: fin para
21: devolver  $K[c]$ ,  $c = 1$  hasta  $r$ 

```

método de ramificación y acotamiento (MRA) propuesto originalmente por Dakin [29], el cual ha proporcionado el enfoque estándar de la PE [53].

El MRA es un esquema que utiliza el principio de *divide y vencerás*, en el que el problema es relajado linealmente y resuelto por el algoritmo *símples* (ver Hillier y Lieberman [53]) para observar si su óptimo cumple también con las condiciones del problema entero. Si la solución de la relajación no cumple estas condiciones, el problema relajado es fragmentado en subproblemas cada vez menores pero sencillos de resolver, de los cuales se determina o acota tan rápido e inteligentemente como sea posible el valor de la mejor solución de los subconjuntos como solución del problema principal [103].

Lo anterior se logra por medio de un *árbol de enumeración implícita* en el que la *raíz* o problema principal es dividido en *ramificaciones* que corresponden a los diferentes cursos de solución que se podrían examinar si se hiciera una enumeración exhaustiva de las potenciales soluciones enteras (ver Figura 4.5).

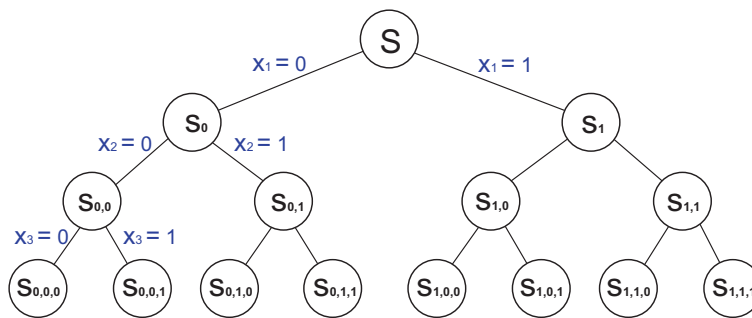


Figura 4.5: Ejemplo de árbol de enumeración binaria para  $S \subseteq \{0, 1\}^3$ .

Para evitar una enumeración exhaustiva, inviable en la mayoría de los problemas de PE y PEM cuando el número de variables o nodos de un grafo exceden 20 o 30 elementos [103], el MRA elimina o *poda* las ramificaciones cuyas cotas indican no contener la solución óptima.

En la Figura 4.6 se muestra un ejemplo de ramificación y acotamiento en el que el conjunto  $S$  es descompuesto en los conjuntos  $S_1$  y  $S_2$ , indicándose del lado derecho de cada conjunto las cotas superiores e inferiores correspondientes. En el ejemplo es posible observar que tras una nueva obtención de cotas, el valor óptimo del problema principal o conjunto  $S$  no puede ser menor a veintiuno y que la cota superior del conjunto  $S_1$  es igual a veinte, lo que permite podar esta ramificación al ser imposible que contenga la solución óptima.

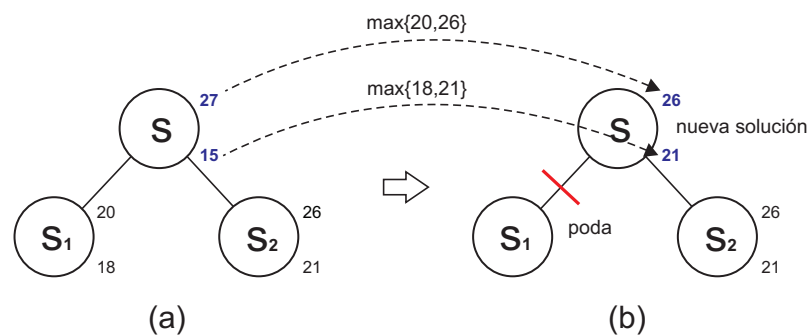


Figura 4.6: Árbol de enumeración entera (a) y poda del conjunto  $S_1$  (b) para un problema de maximización.

Los sistemas comerciales más recientes de MRA para PE y PEM (como CPLEX v11.2, empleado en este trabajo para resolver los modelos URM-1 y ARM-1) ofrecen características avanzadas como heurísticas primales, opciones de pivoteo y puntos interiores para apoyar al método símplex en la solución de los subproblemas lineales, además de un poderoso preproceso automático que simplifica el modelo reduciendo el número de restricciones y variables.

No obstante estas ventajas, los algoritmos de MRA pueden fallar continuamente a causa de que las cotas obtenidas de las relajaciones lineales llegan a resultar demasiado débiles [103], lo que implica que en estos casos es crucial *estrechar* la formulación del problema entero, principalmente a través de nuevas restricciones o *cortes* que mejoren la formulación original, tal como la formulación CCPP-ARM

[46], empleada en este trabajo, mejora la representación matemática inicial del ARM [69].

#### SOLUCIÓN CODIFICADA

Una vez resuelto el modelo URM-1 o ARM-1 por el MRA a través de CPLEX, los datos de la solución quedan disponibles en un código (de regreso en un formato correspondiente a GAMS) que entrega el valor objetivo de ésta junto con el tiempo computacional y la relación de cada variable con su valor final, entre otros datos.

## 4.4 POSTPROCESAMIENTO

#### DECODIFICACIÓN Y MAPEO DE LA SOLUCIÓN

La solución en el caso de los modelos URM-1 y ARM-1 corresponde a un calendario espacial de cosechas que debe ser interpretado sin dificultad por personal forestal y de montes. Por esta razón es necesario que el equipo de optimización traslade los datos en código de la solución dentro de un sistema de información que indique de forma clara los detalles de una solución.

El formato más eficiente encontrado en la literatura para decodificar los datos de solución es la aplicación de un código de color en el mapa del bosque, en el que cada color simboliza un período de cosecha, de modo que al imprimir sobre una unidad del mapa determinada coloración, se está indicando la ejecución de cosecha dentro de la unidad en el período asociado a la tonalidad. Como ejemplo, en el Apéndice E se muestran seis calendarios de cosecha en el formato referido.

## CAPÍTULO 5

# ESTUDIO COMPUTACIONAL

---

En el presente capítulo se reporta la evaluación computacional de la metodología propuesta aplicada en un caso de estudio ubicado en el Estado de Nuevo León. Al inicio se presentan los objetivos y el caso de estudio. Después se describe el ambiente de desarrollo e información derivada de las formulaciones bajo los parámetros del caso de estudio. Finalmente se exponen las pruebas computacionales y sus resultados.

### 5.1 OBJETIVOS

- Describir las características del caso de estudio.
- Observar el desempeño de las implementaciones computacionales de preprocesamiento.
- Observar el desempeño de las formulaciones enteras con pruebas conducidas sobre una región forestal real.
- Observar el desempeño de los modelos al modificar parámetros de interés para los administradores forestales.



## 5.2 CASO DE ESTUDIO

El predio forestal presentado como caso de aplicación del estudio se localiza dentro del territorio ejidal El Niño y San Antonio, ubicado al noreste del municipio General Zaragoza del Estado de Nuevo León, México, cerca del límite con el Estado de Tamaulipas (ver Figura 5.1). La localidad se encuentra en la región fisiográfica denominada Sierra Madre Oriental, a una altitud media de 2080 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas geográficas latitud  $24^{\circ}00'$  al norte, y longitud  $99^{\circ}41'$  al oeste.



Figura 5.1: Ubicación geográfica del área de estudio.

La superficie del caso de estudio comprende 3,219 hectáreas de bosque templado-frío. Las especies maderables que contiene corresponden a pino blanco (*Pinus pseudostrobus* Lindl.) en un 82.4%, encino (*Quercus spp.*) en 13.4% y oyamel (*Abies religiosa*) con 4.2%, que totalizan una existencia real actual de 174,235 m<sup>3</sup> de madera en rollo total árbol. La actividad económica de la zona está basada en la producción maderera, encontrándose en algunas áreas efectos de aprovechamientos forestales desordenados. La imagen satelital de la región (virtualmente rodalizada) puede apreciarse en la Figura 5.2



Figura 5.2: Imagen satelital del caso de estudio.

En la Tabla 5.1 se resumen características espaciales de la instancia y de sus particiones territoriales.

Tabla 5.1: Información de la instancia del problema

Ejido El Niño y San Antonio (EESA)						
	Área (ha)	A máx. (ha)	Núm. de Bloques	U. básica mín. (ha)	U. básica máx. (ha)	U. básica med. (ha)
URM-1	3,219	48	91	18.0	47.0	35.4
ARM-1	3,219	48	168	7.0	32.0	19.1

La información de campo y de sistemas de información geográfica de la propiedad ejidal El Niño y San Antonio fue obtenida a través del Ingeniero forestal y M.C. Edgar Torres Martínez, prestador de servicios técnicos forestales en la región de estudio, contactado a través del subdirector de posgrado de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, el Doctor Óscar A. Aguirre Calderón.

### 5.3 AMBIENTE DE DESARROLLO EXPERIMENTAL

La experimentación en el presente estudio es de naturaleza computacional al tratar una metodología que incluye elementos de programación y software de optimización especializado.

Es relevante mencionar que un valioso componente de generación de datos, previo a la metodología de este trabajo, es el programa de procesamiento digital de imágenes satelitales ArcView GIS 3.2 (desarrollado por Environmental Systems Research Institute, Inc., ESRI), disponible para el sistema operativo Windows, GNU/Linux y Mac OS X. Esta aplicación permite a los ingenieros forestales trabajar ordenamientos territoriales y analizar características y patrones de distribución de datos por medio de la representación de imágenes y datos referidos geográficamente, posibilitando la generación de informes con los resultados de los análisis.

En lo que se refiere a los elementos de preprocesamiento implementadas en el estudio, todas fueron desarrolladas en el lenguaje de programación C++ y ejecutadas en un ordenador con procesador Intel Core i5 a 2.3 GHz y con 6 GB de RAM. Para resolver los problemas de programación entera se utilizó el método de ramificación y acotamiento a través del software de optimización IBM ILOG CPLEX 11.2.0, ejecutado desde un servidor Sun-Fire-V440 con cuatro procesadores UltraSPARC-IIIi a 1.593 Ghz. Los criterios de parada de las ejecuciones fueron 10,000 segundos y un intervalo de optimalidad relativa de  $1 \times 10^{-4}$ .

### 5.4 LAS FORMULACIONES EN EL CASO DE ESTUDIO

Con el propósito explorar el efecto de los datos del caso de estudio en las formulaciones, se realizaron pruebas para observar del tamaño de la formulación, el impacto de área máxima y resultados de preprocesamiento, las cuales se puntualizan a continuación.

## 5.4.1 TAMAÑO DE LAS FORMULACIONES

Para dimensionar las dos formulaciones en diferentes horizontes de planificación, se observó el número de restricciones, variables y elementos diferentes de cero (no ceros) resultantes de la instancia forestal real. En la Tabla 5.2 se muestran los resultados correspondientes a los elementos generados en las formulaciones según el número de períodos contenidos en el horizonte de planificación.

Tabla 5.2: Tamaño de las formulaciones en el caso de estudio

	EESA - 91 UNIDADES			EESA - 168 UNIDADES		
	URM-1			ARM-1		
	Restr.	Var. bin.	No ceros	Restr.	Var. bin.	No ceros
T=1	33,499	182	50,423	299,638	774	602,597
T=2	50,163	273	76,469	449,394	1,161	907,711
T=3	66,899	364	101,563	599,287	1,548	1,209,399
T=4	83,669	455	128,209	749,186	1,935	1,517,279
T=5	100,422	546	154,079	899,082	2,322	1,822,063
T=6	117,142	637	178,569	1,048,975	2,709	2,121,429
T=7	133,892	728	205,691	1,198,874	3,096	2,431,631

En la Figuras 5.3 y 5.4 se muestran los gráficos del tamaño de las formulaciones, en los que se aprecia en ambos modelos un incremento de tipo lineal en la cantidad de datos con respecto al número de períodos de la planificación.

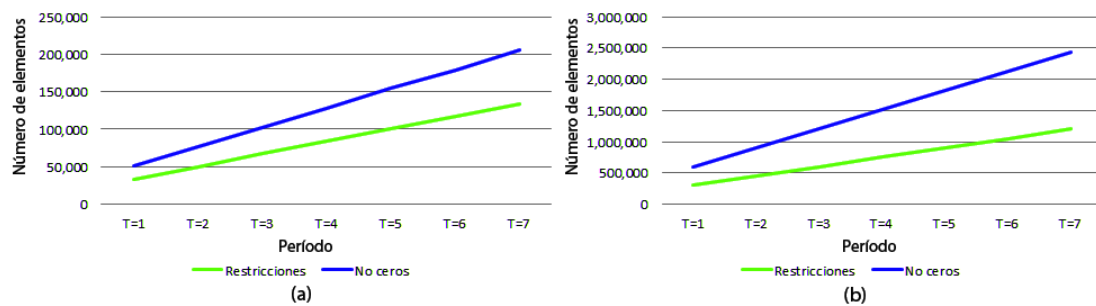


Figura 5.3: Restricciones y no ceros en modelo URM-1 (a) y ARM-1 (b).

Las pendientes en ambos gráficos revelan que la formulación ARM-1 muestra un incremento más pronunciado en el número de variables binarias respecto al número de restricciones y no ceros. En el modelo URM-1 el crecimiento de variables binarias refleja un incremento menor que el del número de restricciones y no ceros al aumentar el número de períodos.

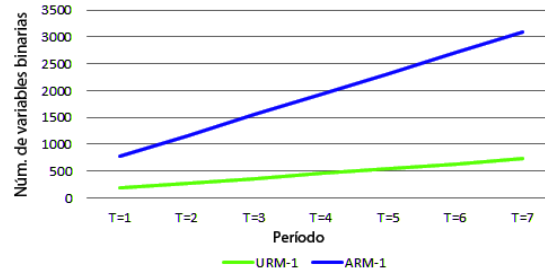


Figura 5.4: Variables binarias resultantes en modelo URM-1 y ARM-1.

#### 5.4.2 IMPACTO DEL PARÁMETRO DE ÁREA MÁXIMA

El área máxima de cosecha es uno de los fundamentos clave de las formulaciones presentadas. Para cumplir con esta restricción, el modelo ARM-1 requiere la localización de conjuntos de unidades cuya superficie no rebase esta área, denominados conjuntos factibles. En la Tabla 5.3 se muestran los efectos de este requerimiento sobre el número de conjuntos factibles (CF) y en el mayor número de unidades encontradas en un conjunto factible (máxima cardinalidad).

Tabla 5.3: Impacto del área máxima en el caso de estudio

EESA - 168 UNIDADES		
Area máxima (ha)	CF	Máx.Card.
18	81	2
28	186	3
38	273	4
48	387	5
58	528	7

En la Figura 5.5 se aprecia que el tamaño de la formulación del ARM-1 (dependiente del número de conjuntos factibles [45]) está relacionado de forma directa al aumento del área máxima de cosecha. Esto se debe a que el umbral de área delimita el número de combinaciones de unidades que pueden formar conjuntos factibles, efecto que también se refleja en la máxima cardinalidad, que aumenta 40% en el número de elementos en el último incremento de área. El número de cliques maximales no forma parte de la comparativa al depender únicamente de las relaciones de adyacencia entre las unidades básicas.

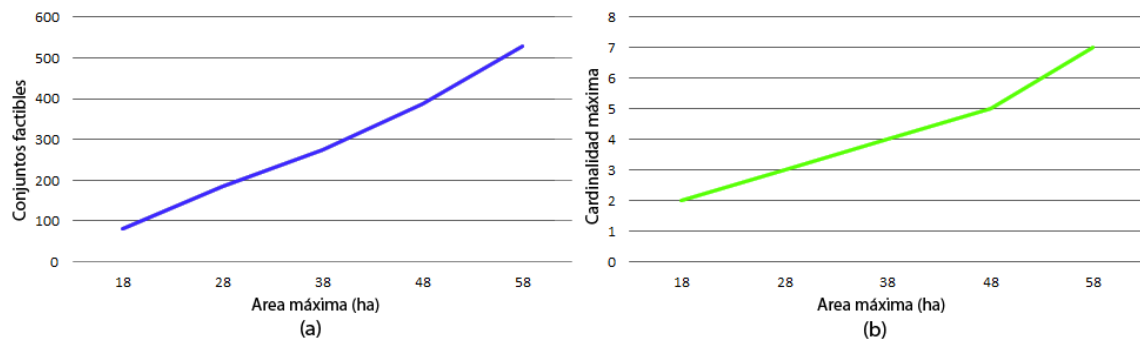


Figura 5.5: Impacto del parámetro de área máxima en el número de conjuntos factibles (a) y máxima cardinalidad (b).

### 5.4.3 IMPLEMENTACIONES DE PREPROCESAMIENTO

Dimensionar el tiempo de cómputo y la cantidad de elementos resultantes de las implementaciones de preproceso para el caso de estudio tiene por objetivo mostrar, mas allá de su precisión, la ventaja que ofrecen las mismas en tiempo y esfuerzo, especialmente en casos de instancias de gran tamaño.

De acuerdo al caso de estudio, en la Tabla 5.4 se muestran los tiempos de ejecución en segundos para cada etapa. Para dar un ejemplo, en la columna CM (cliques maximales) de la tabla se encuentra un valor de 14,805, que es el número de segundos que requirió la implementación que localiza cliques maximales para terminar su búsqueda. Las tablas de esta sección tienen la simbología siguiente: CF =conjuntos factibles,  $CF \cap i$  =intersección de conjuntos factibles con unidades

básicas,  $CF \cap CM$  =intersección de conjuntos factibles con cliques maximales,  $\text{dist } F-F'$  =distancias entre conjuntos factibles, y  $\text{dist } i-i'$  =distancias entre unidades básicas.

Tabla 5.4: Preprocesamiento: tiempos de ejecución (s)

EESA - 168 UNIDADES						
CF	$CF \cap i$	CM	$CF \cap CM$	$\text{dist } F-F'$	$\text{dist } i-i'$	Total
59	227	14,805	316	27	8	15,442

En la Tabla 5.5 se expone la cantidad de elementos hallados por cada implementación. Como ejemplo, en la columna  $\text{dist } F-F'$  (distancias entre centroides de conjuntos factibles) se ubica el número 74,691, correspondiente a la cantidad de datos encontrados en esa etapa.

Tabla 5.5: Preprocesamiento: elementos localizados

EESA - 168 UNIDADES						
CF	$CF \cap i$	CM	$CF \cap CM$	$\text{dist } F-F'$	$\text{dist } i-i'$	Total
387	684	143	1,218	74,691	4,095	81,218

De las aplicaciones de preprocesamiento, destaca que el diseño que localiza cliques maximales consume mucho más tiempo que el resto al realizar un proceso de eliminación de subgrafos completos contenidos en subgrafos completos mayores, incrementando el tiempo total de preproceso a 4 horas con 17 minutos (15,442 segundos).

## 5.5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EN EL CASO DE ESTUDIO

Los objetivos de esta etapa de experimentación son:

- Observar los valores objetivo, tiempos de ejecución y calidad de las soluciones ante la variación de parámetros logístico-operativos y ambientales de una instancia forestal real.
- Observar el desempeño de las dos formulaciones al ser resueltas bajo las mismas condiciones.

### 5.5.1 CONSIDERACIONES LOGÍSTICO-OPERATIVAS

#### LÍMITES DE VOLUMEN

La primera serie de pruebas se enfoca en la solución de los modelos en el caso de estudio modificando la holgura en los umbrales superiores e inferiores de extracción de madera por período, establecidos en las restricciones de los modelos. Esta consideración (restricciones 3.4, 3.5, 3.19 y 3.20) permite al administrador forestal mantener volúmenes de extracción casi constantes de período a período, si la demanda del producto lo exigiese así. Sin embargo, trabajos como el de Vielma et al. [98] hacen esperar que al estrechar el margen entre los límites superior e inferior se encuentren valores objetivo menores o no se encuentre solución alguna.

Para fijar los márgenes de volumen respecto a una referencia de volumen medio, se promedió el volumen potencial extraíble de madera entre el número de períodos de cada instancia, fijando en los porcentajes indicados desviaciones superiores e inferiores de volumen respecto al referente medio. La Tabla 5.6 muestra los resultados experimentales, donde  $obj$  =valor objetivo,  $tiempo$  =tiempo de ejecución,  $C$  =área total cosechada,  $RN$  =área total asignada de bosque nativo (de un mínimo por



defecto de 322 ha, equivalente al 10 % del área total del caso de estudio), S/A =área total sin asignación. Esta misma simbología es utilizada en el resto del capítulo.

Tabla 5.6: Resolución del problema: variación de límites de volumen

EESA - 91 UNIDADES, T=6						EESA - 168 UNIDADES, T=6				
URM-1						ARM-1				
	obj	tiempo	C	BN	S/A	obj	tiempo	C	BN	S/A
	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)
V±1 %	70,701,965	2.233	2,864	323	32	71,517,786	19.798	2,865	322	32
V±2 %	70,701,965	2.250	2,864	323	32	71,517,786	19.812	2,865	322	32
V±5 %	70,701,965	2.215	2,864	323	32	71,517,786	19.819	2,865	322	32
V±10 %	70,701,965	2.216	2,864	323	32	71,517,786	19.718	2,865	322	32
V±15 %	70,701,965	2.192	2,864	323	32	71,517,786	19.890	2,865	322	32

Pese a que en la tabla anterior puede verificarse que en todos los casos de cada formulación el valor objetivo y el número de hectáreas asignadas resulta idéntico, cada solución es diferente (ver datos de volumen en Tabla 5.7). La coincidencia de resultados se debe a que en el caso de estudio los árboles de muchas unidades básicas inician el horizonte de planificación con una edad superior o cercana al fin de su período de crecimiento, lo que permite que tales unidades aporten el mismo volumen durante varios períodos, dando lugar a diferentes soluciones de cosecha con valores objetivo equivalentes.

En la Tabla 5.7 se detalla el total de volumen a extraer por período de planificación de acuerdo a las soluciones de los cinco casos estudiados de límite de volumen.

Tabla 5.7: Límites de volumen: flujo entre períodos ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ )

	EESA - URM-1					EESA - ARM-1				
	V $\pm$ 1 %	V $\pm$ 2 %	V $\pm$ 5 %	V $\pm$ 10 %	V $\pm$ 15 %	V $\pm$ 1 %	V $\pm$ 2 %	V $\pm$ 5 %	V $\pm$ 10 %	V $\pm$ 15 %
$P_1$	31,623	30,941	32,714	32,993	34,402	31,873	32,079	31,752	31,455	29,939
$P_2$	31,431	31,678	30,521	30,904	29,194	31,983	31,832	32,163	31,437	28,222
$P_3$	31,542	31,004	31,866	33,002	29,339	31,814	31,532	31,367	30,758	33,382
$P_4$	31,285	31,724	30,589	28,307	32,376	31,612	32,295	31,307	33,830	32,728
$P_5$	31,464	31,874	30,956	29,548	28,220	32,101	31,689	31,833	29,787	36,137
$P_6$	31,324	31,448	32,023	33,915	35,138	32,200	32,159	33,160	34,318	31,173

El hecho de que en el caso de estudio no se refleje una diferencia significativa en las soluciones al variar los márgenes de volumen no debe hacer pasar por alto la ventaja que pueden generar márgenes de volumen moderados o pocos estrictos, en especial cuando no es necesario entregar a los clientes volúmenes constantes y al mismo tiempo se deseen incorporar a la metodología consideraciones ambientales u operativas adicionales que dificulten la resolución de los modelos.

#### PERÍODOS DE PLANIFICACIÓN

La longitud del horizonte de planificación es un importante parámetro ligado al ciclo de vida de las especies de un bosque (incluido su nacimiento, desarrollo y maduración hasta su establecimiento definitivo) al considerarse en las formulaciones una restricción de corta única por unidad básica en toda la planificación (restricciones 3.3 y 3.18), conduciendo a subaprovechamientos cuando no se toma una decisión adecuada en este sentido.

Para medir el valor objetivo de los modelos (columnas “obj”) y observar el nivel de subaprovechamiento -número de hectáreas sin asignación- (columnas “S/A”) para siete diferentes horizontes de planificación se estableció una serie de pruebas en las que se varía el número de períodos. Los resultados se presentan en la Tabla 5.8.

Al considerarse instancias representativas del proceso experimental (sin eliminación de restricciones y parámetros por defecto de volumen, distancias máximas,

madurez biológica, regeneración y bosque nativo), los mapas de solución para los casos  $T=1$ ,  $T=3$  y  $T=7$  de ambos modelos se pueden consultar en el Apéndice E.

Tabla 5.8: Resolución del problema: variación de períodos de planificación

	EESA - 91 UNIDADES, V=10%					EESA - 168 UNIDADES, V=10%				
	URM-1					ARM-1				
	obj (pesos)	tiempo (s)	C (ha)	BN (ha)	S/A (ha)	obj (pesos)	tiempo (s)	C (ha)	BN (ha)	S/A (ha)
T=1	29,576,310 <sup>a</sup>	0.601	1,185	331	1,703	31,525,040 <sup>a</sup>	5.592	1,315	329	1,575
T=2	39,666,292 <sup>a</sup>	0.937	1,552	335	1,332	41,867,513 <sup>a</sup>	9.871	1,701	334	1,184
T=3	53,200,244 <sup>a</sup>	1.252	2,153	342	724	57,757,188 <sup>a</sup>	11.275	2,408	332	479
T=4	62,449,816	1.585	2,476	323	420	66,336,597	16.508	2,594	323	302
T=5	68,462,511	1.829	2,784	324	111	70,338,855	19.675	2,827	322	70
T=6	70,701,965	2.216	2,864	323	32	71,517,786	19.718	2,865	322	32
T=7	71,229,614	2.499	2,896	323	0	72,030,906	22.787	2,897	322	0

<sup>a</sup>valor óptimo

En la Figura 5.6 se observa que el valor objetivo en ambos modelos aumenta en fuerte medida con el aumento en el número de períodos hasta  $T=5$ . En cuanto al nivel de subaprovechamiento es sobresaliente que en  $T=7$  ningún modelo dejó hectáreas sin asignación.

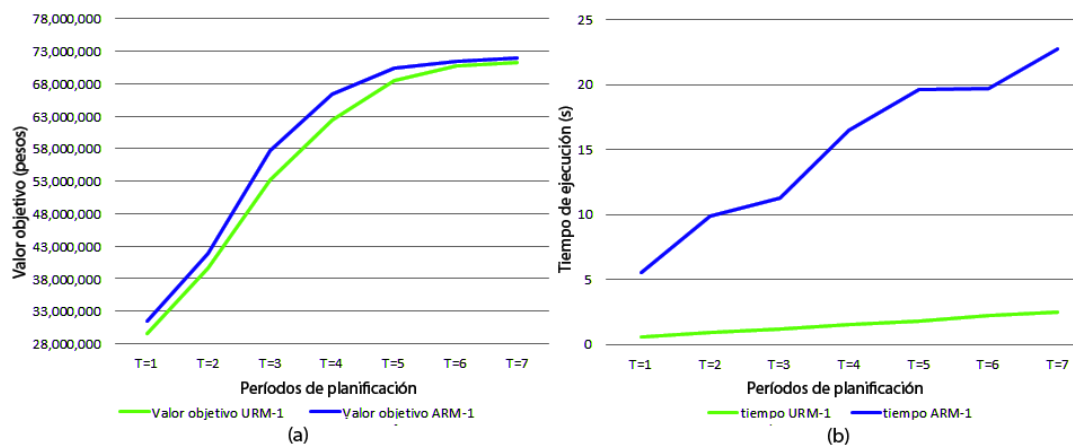


Figura 5.6: Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar períodos de planificación.

## DISTANCIAS MÁXIMAS

Los costos de transporte son un factor de peso al representar alrededor del 40 % de los costos operativos [15]. Las consideraciones de distancia máxima (restricciones 3.10 a 3.14 y 3.25 a 3.28) buscan por un lado reducir este factor acortando la distancia entre las cosechas a realizar en un mismo período y por otro evitar la separación entre bloques destinados a ser reserva natural para favorecer el desarrollo de especies animales.

Al reducir el espacio de soluciones potenciales, es de esperar que esta medida impacte negativamente en el valor de la función objetivo, por lo que el administrador de bosques debe decidir si el ahorro que conlleva su aplicación compensa la disminución señalada. Los resultados se muestran en la Tabla 5.9, donde  $D_1 = 5$  km entre cosechas y 2.5 km entre reservas,  $D_2 = 7$  km entre cosechas y 3 km entre reservas,  $D_3 = 9$  km entre cosechas y 3.5 km entre reservas, y S/RD = sin aplicación de restricciones de distancias máximas.

Tabla 5.9: Resolución del problema: variación de distancias máximas

EESA - 91 UNIDADES, T=6, V=10 %						EESA - 168 UNIDADES, T=6, V=10 %				
URM-1						ARM-1				
	obj	tiempo	C	BN	S/A	obj	tiempo	C	BN	S/A
	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)
$D_1$	70,701,965	2.216	2,864	323	32	71,517,786	19.718	2,865	322	32
$D_2$	71,076,597 <sup>a</sup>	2.199	2,860	327	32	71,913,371	19.723	2,865	322	32
$D_3$	71,383,686	2.189	2,861	326	32	72,114,696	19.703	2,865	322	32
S/RD	71,383,686	0.160	2861	326	32	72,161,506	0.110	2,865	322	32

<sup>a</sup>valor óptimo

Los resultados permiten estimar que la relajación del parámetro de distancia máxima desde  $D_1$  hasta  $D_3$  provoca un incremento medio en el valor objetivo de 0.23 % por kilómetro adicional entre cosechas en el URM-1 y un 0.21 % en el ARM-1. Si se toma en cuenta que los costos de transporte son mucho mayores a estos

porcentajes, el beneficio obtenido al permitir un alejamiento entre los bloques de cosecha no justifica desde el punto de vista económico llevar a cabo esta medida.

En la gráfica 5.7 se observa que los tiempos de ejecución se reducen en gran proporción cuando se suprimen las restricciones de distancia, aunque por la reducida escala de tiempo no es posible concluir sobre algún efecto en los tiempos de cómputo al realizar esta modificación.

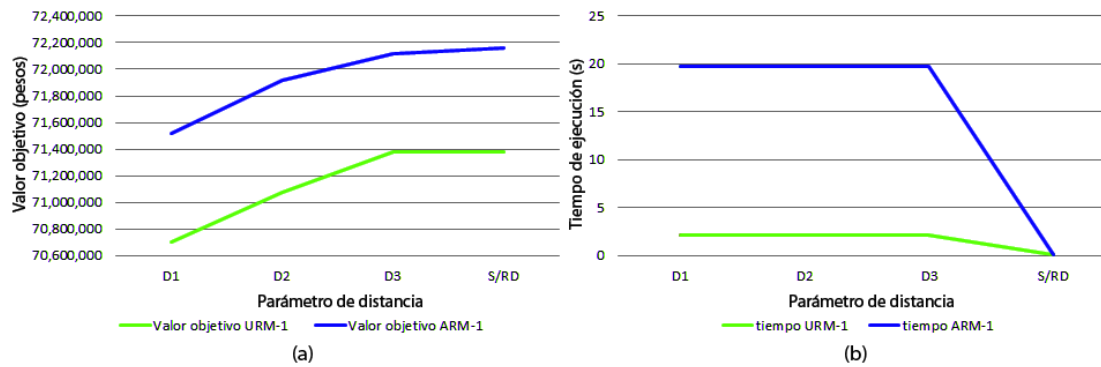


Figura 5.7: Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar parámetros de distancia.

Por otro lado, el decremento en el valor objetivo que implica la aplicación de distancias máximas (en el caso por defecto,  $D_1$ ) en relación a su no aplicación, es de 0.96 % en el modelo URM-1 y de 0.88 % en el ARM-1. Si esta relación es comparada con un ahorro en los costos de transportación (que como se ha referido, se estiman en un 40 % del costo de producción), se estaría hablando de una relación de beneficio potencialmente muy favorable.

## 5.5.2 CONSIDERACIONES AMBIENTALES

### UMBRAL DE MADUREZ BIOLÓGICA

En general, en las pruebas de tipo ambiental se busca observar su impacto en el valor objetivo y en la factibilidad de resolución al variar las condiciones. En el caso

del umbral de madurez biológica (restricciones 3.6 y 3.21), el objetivo es mostrar el desempeño de los modelos ante una virtual modificación de las especies del bosque, lo que a su vez modificaría el umbral de madurez biológica o edad mínima que deben tener los árboles de un bloque para permitir su cosecha. Los resultados se exponen en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Resolución del problema: variación del umbral de madurez biológica

EESA - 91 UNIDADES, T=6, V=10 %						EESA - 168 UNIDADES, T=6, V=10 %				
URM-1						ARM-1				
	obj	tiempo	C	BN	S/A	obj	tiempo	C	BN	S/A
	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)
S/RM	71,159,151	2.166	2,896	323	0	71,974,972	19.659	2,897	322	0
UM=10	71,159,151	2.222	2,896	323	0	71,974,972	19.648	2,897	322	0
UM=20	71,159,151	2.195	2,896	323	0	71,974,972	19.715	2,897	322	0
UM=30	71,159,151 <sup>a</sup>	2.219	2,896	323	0	71,974,972	19.575	2,897	322	0
UM=40	71,159,151	2.200	2,896	323	0	71,974,972	19.695	2,897	322	0
UM=50	71,159,151	2.239	2,896	323	0	71,974,972	19.723	2,897	322	0
UM=60	70,701,965	2.216	2,864	323	32	71,517,786	19.718	2,865	322	32

<sup>a</sup>valor óptimo

En la Figura 5.8 es posible observar que cada modelo alcanza un valor objetivo idéntico sin umbral de madurez y con umbrales desde 10 hasta 50 años. Al incrementarse el umbral a 60 años los modelos URM-1 y ARM-1 registraron un ligero decremento en el valor objetivo de 0.64 % y del 0.36 %. respectivamente.

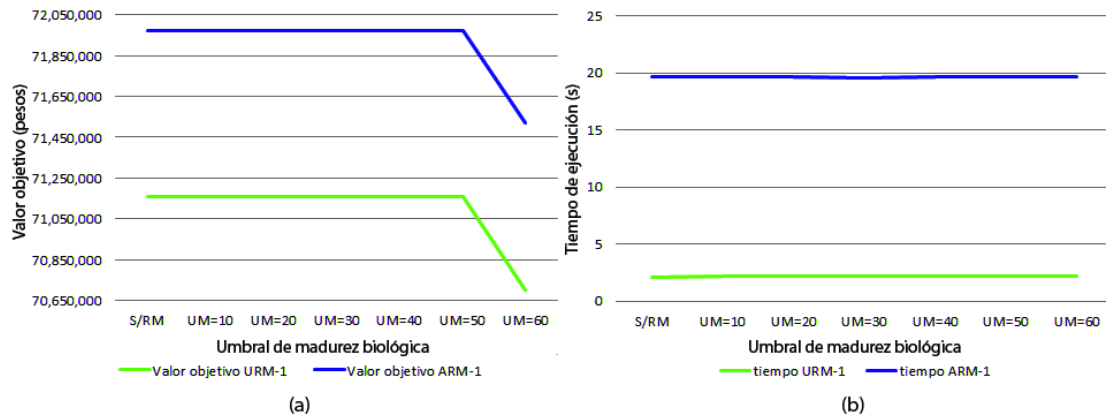


Figura 5.8: Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar umbral de madurez.

La ligera disminución originada hasta el umbral de 60 años puede deberse a que la población de árboles del caso de estudio tiene una edad media de 71 años con desviación estándar de 16 al inicio del horizonte de planificación (ver Figura E.1, Apéndice E), lo que implica que el umbral de madurez prácticamente no tiene efecto en las unidades básicas con árboles envejecidos.

#### BARRERA DE REGENERACIÓN

Una modificación en los de años de regeneración (consideración incluida en las restricciones 3.2 y 3.17) puede originarse cuando una especie de árbol determinada requiere por más de un período de planificación una barrera de protección de árboles maduros a su alrededor para volver a desarrollarse y establecerse tras su corta en dependencia de su capacidad de crecimiento y recuperación.

En el caso de éste parámetro, no incluir restricciones de regeneración (S/RR) equivale a una barrera de regeneración igual a un período ( $R=1$ , correspondiente a 10 años en el estudio) debido a que las restricciones de adyacencia -base de las formulaciones presentadas- trabajan por defecto para un solo período. La inclusión de consideraciones de regeneración extienden la barrera protectora a más de un período, tal como  $R=2$  (regeneración igual a dos períodos o veinte años) y  $R=3$

(regeneración igual a tres períodos o treinta años). Los resultados experimentales se muestran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Resolución del problema: variación de períodos de regeneración

	EESA - 91 UNIDADES, T=6, V=10 %					EESA - 168 UNIDADES, T=6, V=10 %				
	URM-1					ARM-1, T=6, V=10 %				
	obj	tiempo	C	BN	S/A	obj	tiempo	C	BN	S/A
	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)
S/RR	71,026,885	2.176	2,897	322	0	71,924,633 <sup>a</sup>	19.817	2,897	322	0
R=2	70,701,965	2.216	2,864	323	32	71,517,786	19.718	2,865	322	32
R=3	65,070,249	2.241	2,626	323	270	68,747,022	19.822	2,718	324	177

<sup>a</sup>valor óptimo

Al graficar los resultados experimentales (Figura 5.9) es evidente que el aumento de la barrera de regeneración de 2 a 3 períodos disminuye significativamente el valor objetivo en los modelos (8.65 % en el URM-1 y 4.03 % en el ARM-1). Por otro lado, y contrario a lo esperado, la regeneración de 2 períodos comparada con la supresión de la restricción (equivalente a la regeneración de 1 período), no reduce el valor objetivo más que un 0.45 % en el URM-1 y un 0.57 % en el ARM-1.

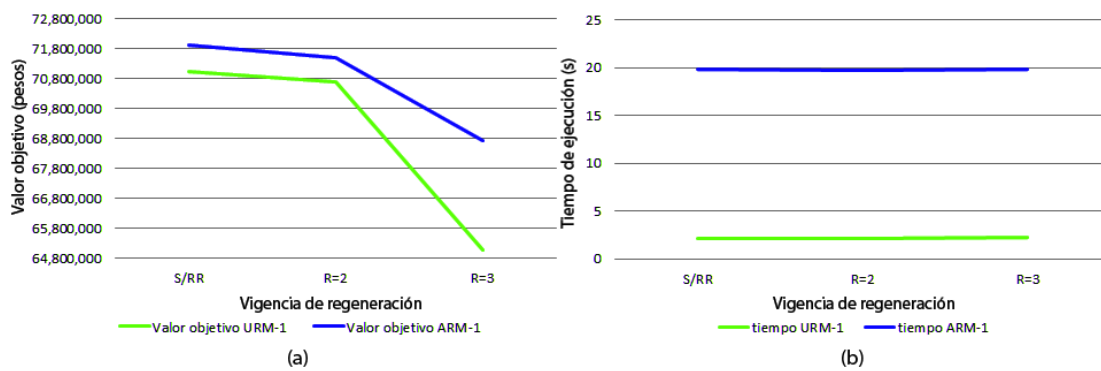


Figura 5.9: Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar vigencia de regeneración.



### ÁREA MÍNIMA DE BOSQUE NATIVO

La modificación en el límite inferior del requerimiento de superficie para esta consideración ambiental (restricciones 3.7 a 3.9 y 3.22 a 3.24) es significativa al no existir siempre una necesidad de reservar áreas de bosque nativo en un proceso de planificación forestal, o bien al existir una política de reserva ecológica estricta (por ejemplo, la reserva de un área mínima de 10 % de la superficie total del bosque [22]), como pueden ser predios forestales públicos, o ubicados en las inmediaciones de zonas turísticas o urbanas.

En la tabla 5.12 se especifica el área mínima de reserva de bosque nativo (ABN) asociada a los porcentajes de área mínima utilizados en la experimentación, donde el área total del caso de estudio es igual a 3,219 hectáreas. Los resultados de las pruebas computacionales son detalladas en la Tabla 5.13.

Tabla 5.12: Áreas correspondientes a porcentajes mínimos de reserva para el caso de estudio

Porcentaje de ABN	Área (ha)
ABN=5 %	161
ABN=10 %	322
ABN=15 %	483
ABN=20 %	644
ABN=25 %	805
ABN=30 %	966

Tabla 5.13: Resolución del problema: variación del área de bosque nativo

	EESA - 91 UNIDADES, T=6, V=10 %					EESA - 168 UNIDADES, T=6, V=10 %				
	URM-1					ARM-1				
	obj	tiempo	C	BN	S/A	obj	tiempo	C	BN	S/A
	(óptimo)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)	(óptimo)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)
S/ABN	73,604,417 <sup>a</sup>	1.932	3,151	-	68	74,508,455 <sup>a</sup>	17.058	3,187	-	32
ABN=5 %	72,568,066	2.230	3,020	167	32	73,531,942	19.817	3,026	161	32
ABN=10 %	70,701,965	2.216	2,864	323	32	71,517,786	19.718	2,865	322	32
ABN=15 %	67,962,059	2.201	2,704	483	32	69,038,885	19.828	2,702	484	32
ABN=20 %	64,082,676 <sup>a</sup>	2.183	2,536	651	32	65,053,944	19.692	2,532	655	32
ABN=25 %	58,089,293 <sup>a</sup>	2.350	2,380	807	32	59,604,250 <sup>a</sup>	19.679	2,381	805	32
ABN=30 %	infactible	-	-	-	-	infactible	-	-	-	-

<sup>a</sup>valor óptimo

Al analizar los resultados se observa que en el caso de área mínima de reserva del 10 % (caso por defecto), la disminución del valor objetivo con respecto a la solución sin reserva de bosque nativo disminuye solo 3.5 % en el modelo URM-1 y 4.02 % en el ARM-1. No obstante, para el caso de reserva del 25 % (caso de mayor área de reserva con solución factible encontrada), la reducción del valor objetivo respecto a su no aplicación es de 26.7 % en el URM-1 y de 25 % en el ARM-1, lo que indica que al aumentar el área mínima de reserva se reduce la ventaja proporcional que brinda el método de optimización.

La observación anterior se puede confirmar en la gráfica de resultados (Figura 5.10), donde se advierte que los modelos registran un decremento cada vez más significativo conforme se establece mayor proporción de reserva de bosque nativo. Para el área de reserva de 30 % en ningún modelo se encontró solución factible, por lo que se conjetura que la imposición de una distancia máxima entre bloques de bosque nativo (restricciones 3.12, 3.13, 3.27 y 3.28) obstaculiza este tipo de asignación mas allá de un perímetro determinado.

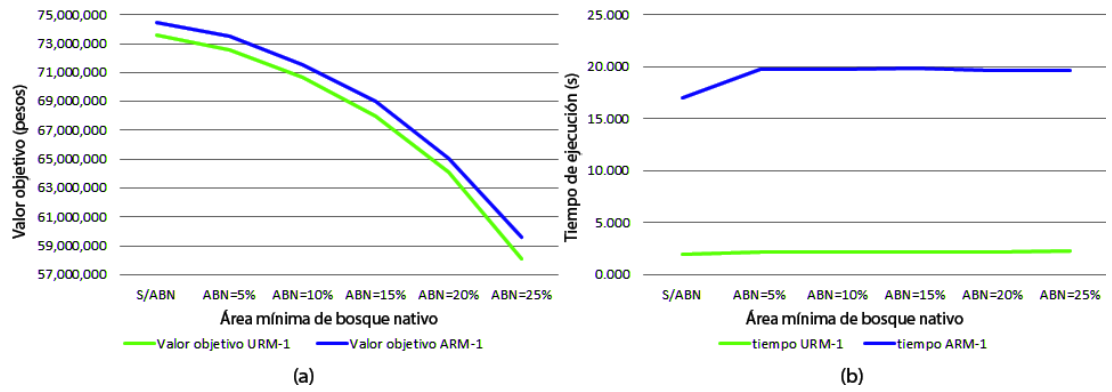


Figura 5.10: Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar área de bosque nativo.

### 5.5.3 CONSIDERACIONES MIXTAS

En esta serie de pruebas se exploran modificaciones de parámetros ambientales y operativos con el objetivo de profundizar sobre el desempeño de los modelos estudiados.

En la variación experimental mixta 1 ( $V_1$ ) quedan suprimidas dos restricciones de fuerte impacto esperado en el valor objetivo: las consideraciones operativas de distancia (restricciones 3.10 a 3.14 y 3.25 a 3.28) y los requerimientos ambientales de reserva de bosque nativo (restricciones 3.7 a 3.9 y 3.22 a 3.24), para horizontes de planificación de 1 a 7 períodos.

En la variación experimental mixta 2 ( $V_2$ ) se anulan las consideraciones ambientales de regeneración (restricciones 3.2 y 3.17), de reserva de bosque nativo (restricciones 3.7 a 3.9 y 3.22 a 3.24) y de umbral de madurez biológica (restricciones 3.6 y 3.21) para los horizontes de planificación previamente mencionados. Los resultados de ambas variaciones se despliegan en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Resolución del problema: variaciones mixtas

EESA - 91 UNIDADES						EESA - 168 UNIDADES				
URM-1						ARM-1				
	obj	tiempo	C	BN	S/A	obj	tiempo	C	BN	S/A
	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)	(pesos)	(s)	(ha)	(ha)	(ha)
T=1, V <sub>1</sub>	34,524,425 <sup>a</sup>	0.030	1,512	-	1,707	37,566,433 <sup>a</sup>	0.126	1,694	-	1,525
T=2, V <sub>1</sub>	41,672,819 <sup>a</sup>	0.051	1,583	-	1,636	43,664,346 <sup>a</sup>	0.163	1,715	-	1,504
T=3, V <sub>1</sub>	56,974,647 <sup>a</sup>	0.075	2,304	-	915	60,729,058	0.251	2,552	-	667
T=4, V <sub>1</sub>	63,592,588 <sup>a</sup>	0.100	2,563	-	656	68,375,339 <sup>a</sup>	0.370	2,825	-	394
T=5, V <sub>1</sub>	73,054,256 <sup>a</sup>	0.123	3,140	-	79	74,288,148 <sup>a</sup>	0.456	3,182	-	37
T=6, V <sub>1</sub>	73,641,654 <sup>a</sup>	0.143	3,151	-	68	74,545,650 <sup>a</sup>	0.498	3,187	-	32
T=7, V <sub>1</sub>	74,501,807 <sup>a</sup>	0.167	3,219	-	0	75,058,555 <sup>a</sup>	0.585	3,219	-	0
T=1, V <sub>2</sub>	31,049,412 <sup>a</sup>	0.309	1,312	-	1,907	32,326,470 <sup>a</sup>	3.290	1,370	-	1,849
T=2, V <sub>2</sub>	53,925,033 <sup>a</sup>	0.609	2,110	-	1,109	55,420,478 <sup>a</sup>	6.604	2,249	-	970
T=3, V <sub>2</sub>	65,353,150 <sup>a</sup>	0.918	2,641	-	578	66,973,606 <sup>a</sup>	9.891	2,818	-	401
T=4, V <sub>2</sub>	71,124,661 <sup>a</sup>	1.223	3,060	-	159	72,434,784	13.257	3,099	-	120
T=5, V <sub>2</sub>	73,151,982 <sup>a</sup>	1.510	3,141	-	78	74,835,549 <sup>a</sup>	16.556	3,172	-	47
T=6, V <sub>2</sub>	74,408,887 <sup>a</sup>	1.835	3,219	-	0	74,965,694	19.884	3,219	-	0
T=7, V <sub>2</sub>	74,464,888 <sup>a</sup>	2.156	3,219	-	0	75,021,638 <sup>a</sup>	23.214	3,219	-	0

<sup>a</sup>valor óptimo

Para ilustrar el comportamiento de los resultados correspondientes a la eliminación de reserva de bosque nativo y de distancias máximas ( $V_1$ ), se presenta el gráfico de la Figura 5.11. En ésta, se observa que el valor objetivo en ambas formulaciones se incrementa de forma cada vez menos significativa al incrementarse el número de períodos debido que el tamaño del bosque posee un límite para albergar la asignación de todas las unidades de cosecha. En este experimento los valores objetivo resultaron en promedio 3.6 % más altos que en el resto de las pruebas computacionales (a excepción de la prueba para  $V_2$ ), lo que permite estimar que la modificación  $V_1$  posee una relación de beneficio poco significativa.

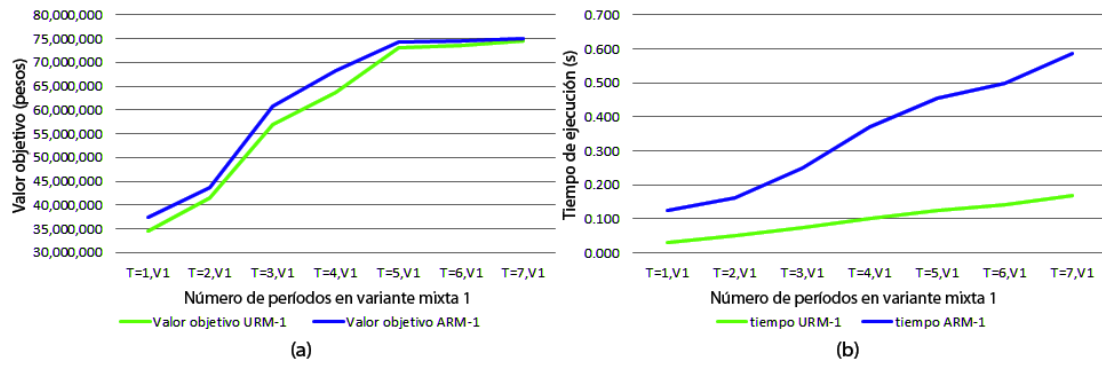


Figura 5.11: Variación mixta 1. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar períodos de planificación.

En la figura 5.12 se observa que la configuración  $V_2$  obtuvo una tendencia de no asignación de bloques menor que ninguna otra prueba. Asimismo, los valores objetivo fueron los mas elevados respecto a las otras pruebas, resultando en promedio 4.5 % mayores. No obstante éste incremento económico, los antecedentes del manejo forestal demuestran que el descuido de las consideraciones ambientales al extraer los recursos del bosque tiene como desenlace la destrucción de este importante recurso natural.

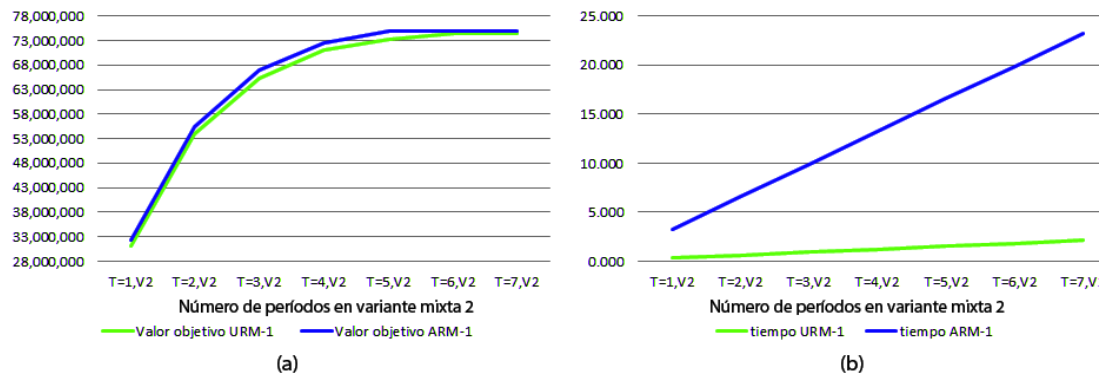


Figura 5.12: Variación mixta 2. Evaluación de los modelos en base a valores objetivo (a) y tiempos de ejecución (b) al modificar períodos de planificación.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES

## FINALES

---

En esta tesis se ha presentado una metodología de solución para abordar un problema de manejo forestal con restricciones de adyacencia, cuya finalidad es encontrar un calendario de cosechas a lo largo de divisiones espaciales obtenidas a través de sistemas de información geográfica, imponiendo restricciones ambientales que reducen los daños en el medio ocasionados por las actividades de tala. De esta forma, el presente esfuerzo se dirige a la presentación de una alternativa de manejo forestal de alto rendimiento para su aplicación en México, que actualmente vive una crisis en la producción forestal y en donde hasta ha sido posible investigar, no se conoce de aplicaciones previas de este tipo de metodología. La realización de este trabajo abarca desde el estudio de la problemática forestal y la revisión de literatura de especializada, hasta la presentación de un método de apoyo a la toma de decisiones a la gestión de bosques templados fríos con fines maderables.

Los dos enfoques matemáticos propuestos que conforman la metodología del estudio se basaron en modelos planteados previamente en la literatura, a los que se incorporaron restricciones formuladas en este y otros trabajos. Previa a la etapa de resolución fue necesario diseñar cinco implementaciones computacionales de preprocesamiento. Para resolver los problemas de programación entera se utilizó el algoritmo de ramificación y acotamiento. La metodología propuesta se validó computacionalmente empleando datos reales de un caso de estudio, ubicado en el Estado

de Nuevo León, México. El proceso de experimentación se enfocó en dimensionar el efecto del caso de estudio en las formulaciones, y en probar a éstas bajo diferentes condiciones logístico-operativas y ambientales para observar el desempeño de los dos modelos matemáticos propuestos. En el presente capítulo se establecen las conclusiones finales y aportaciones del estudio.

## 6.1 CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo permiten considerar cubierto el objetivo de presentar una metodología de manejo forestal mediante el planteamiento de un esquema basado en programación entera que garantiza la renovación de recursos a través de las consideraciones ambientales de adyacencia, barrera de regeneración, madurez biológica, reserva de bosque nativo y cosecha única por bloque en toda la planificación.

Los resultados experimentales revelan que el modelo ARM-1 mostró alta flexibilidad al disminuir en reducidos porcentajes los valores objetivo de sus soluciones ante cambios en las condiciones de tiempo y en las restricciones ambientales y operativas. Opuesto a lo esperado, la mayoría de las soluciones del modelo dejaron hectáreas sin asignación alguna, provocado (de acuerdo a los resultados obtenidos) por las restricciones ambientales de distancia y umbral de madurez biológica. Los tiempos de cómputo resultaron mínimos y su cambio ante modificaciones no fueron significativos.

En cuanto al modelo URM-1, su flexibilidad ante modificaciones en las condiciones de manejo provocó decrementos bajos y moderados en la función objetivo. En general, la cantidad de hectáreas sin asignación fue reducida y los tiempos de cómputo fueron altamente razonables. Aunque esta formulación ha recibido menos atención que otros modelos en los últimos años, el agrupamiento *a priori* de las unidades le da la ventaja de asignar cosechas poco fragmentadas (o más compactas), lo que puede generar interesantes ahorros operativos. En casos de instancias de gran

tamaño, considerar al modelo URM-1 promete ser una opción importante ante su tendencia de encontrar soluciones de buena calidad en tiempos de cómputo razonables. Cabe mencionar que sólo en el caso experimental de área de bosque nativo igual a 30 % ningún modelo aportó soluciones factibles.

Al probar horizontes de planificación con diferentes períodos de tiempo, se encontró que en el caso de estudio a partir de 5 períodos la mayoría de los bloques alcanzan asignación, ocasionando que a partir de ese umbral el valor objetivo no mejore o mejore en menor medida al incrementarse el número de períodos.

En cuanto a las condiciones de ambientales, destaca que el umbral de madurez biológica, que evita cosechas en regiones de árboles inmaduros, afecta a la función objetivo solo cuando el umbral de maduración es elevado. En este sentido, la edad inicial del arbolado es un factor de peso en esta consideración, debido a que si los árboles promedian una edad por debajo del límite de maduración, la restricción tendrá una importante repercusión en los valores objetivo.

La selección de áreas de reserva natural o bosque nativo reducen el valor objetivo en una proporción de menos de la mitad de la proporción de área asignada. En la experimentación se probó que una barrera de regeneración de dos períodos es ideal y no merma significativamente el valor objetivo, comparado con el resultado de su no implementación.

Adicionalmente la restricciones operativas de distancia prometen, de acuerdo a los resultados experimentales, generar ahorros importantes en los costos operativos de extracción al no provocar disminuciones importantes en los valores objetivo. A pesar de estas ventajas, se prevé que en instancias mayores estas restricciones pueden llevar a la intratabilidad del problema.

A pesar de que los resultados de las variaciones mixtas de la Sección 5.5 (basados en la eliminación de restricciones ambientales y operativas) entregaron los mas altos valores objetivo respecto a otras pruebas, el impacto económico favorable no rebasa el 5 % de ventaja respecto a la no eliminación restricciones, las cuales prome-



ten ser significativas cuando se busque una extracción de recursos a menor costo en la que se cuide la renovación de los recursos.

Cabe resaltar que en el diseño de preproceso, más allá de la relativa facilidad y rapidez con la que encuentra los elementos necesarios para la resolución de los modelos, su mayor aporte es la exactitud de los datos generados, sin la cual no sería posible encontrar soluciones de calidad. A pesar de que el tiempo total de preproceso y resolución acumula cerca de cinco horas, su resultado permite a un administrador forestal encontrar para un problema de 168 unidades básicas planes de manejo óptimos para varias décadas.

## 6.2 CONTRIBUCIONES

- Presentación en México de un método alternativo de manejo forestal con fines maderables basado en programación entera para su aplicación en bosques templados-fríos.
- Conjunción de las que se consideraron las mejores características encontradas en la literatura para conducir a la masa arbórea hacia estructuras de alta productividad manteniendo condiciones aptas para la regeneración del bosque y la reproducción de las especies animales.
- Evaluación de dos formulaciones que manejan desde diferentes perspectivas los objetivos de alta producción y manejo sostenido para el aprovechamiento de los bosques.
- Formulación del requerimiento de edad de madurez biológica en la que la edad del conjunto factible o unidad de manejo se considera como la del bloque con árboles más jóvenes.
- Formulación del requerimiento de distancias máximas entre bloques de cosecha.

- Diseño de un esquema de preproceso computacional que integra cinco componentes que complementan toda la información necesaria en la etapa de procesamiento.
- Hasta donde fue posible investigar, primera incorporación a un modelo de agrupamiento de conjuntos por cliques (CCPP) de consideraciones ambientales de reserva de bosque nativo y edad de madurez biológica.
- Entrega de una metodología con dos alternativas de agrupamiento de unidades de manejo enmarcada en los modelos URM-1 y ARM-1.

### 6.3 TRABAJO A FUTURO

Aunque la metodología de solución presentada en este trabajo puede ser una alternativa viable en muchos casos de manejo forestal, durante su desarrollo se presentaron áreas de oportunidad que no pudieron ser cubiertas por diversas razones. Entre éstas destaca la imposición de restricciones de conectividad en las regiones de bosque nativo para mejorar las condiciones de preservación de especies animales y vegetales valiosas.

Por otro lado, al asignar regiones de cosecha es posible encontrar en cada período la ruta más corta de recolección para reducir los gastos totales de transporte. Adicionalmente, se busca incorporar a los modelos de cosecha la construcción de caminos de recolección y la asignación de flotas de transporte para los casos de planificación forestal a gran escala.

Trabajo futuro importante es el demostrar las conjeturas sobre la calidad NP-duro de los modelos matemáticos URM-1 y ARM-1 establecidas en las Secciones 3.2 y 3.3. Finalmente, se desea integrar en una sola herramienta computacional todas las etapas de la metodología presentada para que el administrador forestal aproveche con facilidad y eficiencia las ventajas del método de solución presentado en el trabajo de tesis.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] M. Acuna, C. Palma, W. Cui, D. Martell y A. Weintraub. Integrated spatial fire and forest management planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 40(12):2370–2383, 2010.
- [2] D.M. Adams y A.R. Ek. Optimizing the management of uneven-aged forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 4(3):274–287, 1974.
- [3] O.A. Aguirre Calderón. Hacia el manejo de ecosistemas forestales. *Madera y Bosques*, 3(2):3–11, 1997.
- [4] M. Aldrich, A. Belokurov, J. Bowling, N. Dudley, C. Elliott, L. Higgins-Zogib, J. Hurd, L. Lacerda, S. Mansourian, T. McShane, D. Pollard, J. Sayer y K. Schuyt. Integrating forest protection, management and restoration at a landscape scale. Reporte técnico, WWF International, Gland, Suiza, Abril 2004.
- [5] S. Álvarez Gallego. Optimización de la planificación forestal considerando la captura de carbono en bosque de pino-encino de la Sierra Juárez, Oaxaca (México). Proyecto de fin de carrera, Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.I. Montes, Madrid, España, 2009.
- [6] M. C. Arreola Vázquez. Desarrollo de un modelo de regulación forestal en un bosque de clima templado empleando programación lineal. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, México, 1998.

- 
- [7] E. Balas, M. Fischetti y A. Zanette. On the enumerative nature de Gomory's dual cutting plane method. *Mathematical Programming*, 125(2):325–351, 2010.
- [8] T.M. Barrett y J.K. Gilles. Even-aged restrictions with sub-graph adjacency. *Annals of Operations Research*, 95(1):159–175, 2000.
- [9] E.Z. Baskent y S. Keles. Spatial forest planning: A review. *Ecological Modelling*, 188(2):145–173, 2005.
- [10] P. Bettinger, D. Graetz, K. Boston, J. Sessions y W. Chung. Eight heuristic planning techniques applied to three increasingly difficult wildlife planning problems. *Silva Fennica*, 36(2):561–584, 2002.
- [11] P. Bettinger, D.L. Johnson y K.N. Johnson. Spatial forest plan development with ecological and economic goals. *Ecological Modelling*, 169(2):215–236, 2003.
- [12] P. Bettinger y J. Sessions. Spatial forest planning: To adopt, or not to adopt? *Journal of Forestry*, 101(2):24–29, 2003.
- [13] P. Bettinger, J. Sessions y K. Boston. Using tabu search to schedule timber harvests subject to spatial wildlife goals for big game. *Ecological Modelling*, 94(2):111–123, 1997.
- [14] P. Bettinger, J. Siry, K. Boston y D.L. Grebner. *Forest Management and Planning*. Academic Press, San Diego, EUA, 2009.
- [15] T. Bjørndal, I. Herrero, A. Newman, C. Romero y A. Weintraub. Operations research in the natural resource industry. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2):39–62, 2012.
- [16] K. Boston y P. Bettinger. The economic impact of green-up constraints in the southeastern United States. *Forest Ecology and Management*, 145(3):191–202, 2001.

- 
- [17] C.R. Boyer y L. Orensanz. Revolución y paternalismo ecológico: Miguel Angel de Quevedo y la política forestal en México, 1926-1940. *Historia Mexicana*, 57(1):91–138, 2007.
- [18] D. Bredström, P. Jönsson y M. Rönnqvist. Annual planning of harvesting resources in the forest industry. *International Transactions in Operational Research*, 17(2):155–177, 2010.
- [19] J. Buongiorno y J.K. Gilles. *Decision Methods for Forest Resource Management*. Academic Press, San Diego, EUA, 2003.
- [20] J. Buongiorno, J.L. Peyron, F. Houllier y M. Bruciamacchie. Growth and management of mixed-species, uneven-aged forests in the French Jura: implications for economic returns and tree diversity. *Forest Science*, 41(3):397–429, 1995.
- [21] F. Caro, M. Constantino, I. Martins y A. Weintraub. A 2-opt tabu search procedure for the multiperiod forest harvesting problem with adjacency, greenup, old growth and even flow constraints. *Forest Science*, 49(5):738–751, 2003.
- [22] R. Carvajal, M. Constantino, M. Goycoolea, J.P. Vielma y A. Weintraub. Imposing connectivity constraints in forest planning models. Reporte técnico, Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile, Octubre 2011.
- [23] R. Church. Tactical-level forest management models. En A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores, *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pp. 343–363. Springer, New York, EUA, 2007.
- [24] R.L. Church, A.T. Murray y K.H. Barber. Forest planning at the tactical level. *Annals of Operations Research*, 95(1):3–18, 2000.
- [25] S.E. Clements, P.L. Dallain y M.S. Jamnick. An operational, spatially constrained harvest scheduling model. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(9):1438–1447, 1990.

- 
- [26] Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible, A.C. Nota informativa número 25. Red de monitoreo de políticas públicas, Septiembre 2009.
- [27] K. Crowe, J. Nelson y M. Boyland. Solving the area-restricted harvest-scheduling model using the branch and bound algorithm. *Canadian Journal of Forest Research*, 33(9):1804–1814, 2003.
- [28] F.H. Curtis. Linear programming the management of a forest property. *Journal of Forestry*, 60(9):611–616, 1962.
- [29] R.J. Dakin. A tree-search algorithm for mixed integer programming problems. *The Computer Journal*, 8(3):250–255, 1965.
- [30] S. D’Amours, M. Rönnqvist y A. Weintraub. Using operational research for supply chain planning in the forest products industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 46(4):265–281, 2008.
- [31] A. Diaz, J.A. Ferland, C.C. Ribeiro, J.R. Vera y A. Weintraub. A tabu search approach for solving a difficult forest harvesting machine location problem. *European Journal of Operational Research*, 179(3):788–805, 2007.
- [32] L. Diaz-Balteiro y C. Romero. Sustainability of forest management plans: A discrete goal programming approach. *Journal of Environmental Management*, 71(4):351–359, 2004.
- [33] M. A. Díaz Romero. Un marco integrado para el control y gestión de incendios forestales. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México, 2011.
- [34] R. Diestel. *Graph Theory*. Springer-Verlag, New York, EUA, 2000.
- [35] R. Epstein, J. Karlsson, M. Rönnqvist y A. Weintraub. Harvest operational models in forestry. En A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores, *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99

- de *International Series in Operations Research & Management Science*, pp. 365–377. Springer, New York, EUA, 2007.
- [36] R. Epstein, E. Nieto, A. Weintraub, P. Chevalier y J. Gabarro. A system for the design of short term harvesting strategy. *European Journal of Forest Research*, 119(2):427–439, 1999.
- [37] R. Epstein, A. Weintraub, P. Sapunar, E. Nieto, J.B. Sessions, J. Sessions, F. Bustamante y H. Musante. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. *Operations Research*, 54(6):1017–1027, 2006.
- [38] T. Feakin y D. Depledge. Climate-related impacts on national security in Mexico and Central America. Reporte técnico, Royal United Services Institute, London, Inglaterra, 2010.
- [39] L. Flejzor. Situación de los bosques del mundo 2011. Reporte técnico, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma, Italia, 2011.
- [40] A. Flores Martínez. Informe de la situación del medio ambiente en México. Informe técnico, SEMARNAT, México, D.F., 2008.
- [41] M. Forsburg, M. Frisk y M. Rönnqvist. FlowOpt – A decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry. *International Journal of Forest Engineering*, 16(2):101–114, 2005.
- [42] O. Garcia. Linear programming and related approaches in forest planning. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 20(3):307–331, 1990.
- [43] Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos. Plan nacional de desarrollo 2007-2012, 2007.
- [44] R. González Murguía, E. J. Treviño Garza, O. A. Aguirre Calderón, J. Jiménez Pérez, I. Cantú Silva y R. F. Pournavab. Rodalización mediante sis-

- temas de información geográfica y sensores remotos. *Investigaciones Geográficas*, 53:39–57, 2004.
- [45] M. Goycoolea, A. Murray, J.P. Vielma y A. Weintraub. Evaluating approaches for solving the area restriction model in harvest scheduling. *Forest Science*, 55(2):149–165, 2009.
- [46] M. Goycoolea, A.T. Murray, F. Barahona, R. Epstein y A. Weintraub. Harvest scheduling subject to maximum area restrictions: Exploring exact approaches. *Operations Research*, 53(3):490–500, 2005.
- [47] D. Granados Sánchez, G.F. López Ríos y M.A. Hernández García. Ecología y silvicultura en bosques templados. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13(1):67–83, 2007.
- [48] P. Grijpma. *Producción forestal. Manuales de educación agropecuaria*. Trillas, México, D.F., 1982.
- [49] E. Gunn. Models for strategic forest management. En A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores, *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pp. 317–341. Springer, New York, EUA, 2007.
- [50] E.A. Gunn y E.W. Richards. Optimizing stand level forest harvesting using a tradeoff objective function. En J. Freid, J.M. Vasievich y L. Leefers, editores, *Proceedings of the 7th Symposium on Systems Analysis in Forest Resources*, pp. 28–31, Bellaire, EUA, 1997.
- [51] E.A. Gunn y E.W. Richards. Solving the adjacency problem with stand-centred constraints. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(4):832–842, 2005.
- [52] J.C. Hernández Díaz. *La programación lineal y ejemplos de su aplicación en el manejo de bosques*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D.F., 1985.



- 
- [53] F.S. Hillier y G.J. Lieberman. *Investigación de operaciones*. McGraw-Hill Interamericana, México, D.F., 2002.
- [54] J.G. Hof y L.A. Joyce. Spatial optimization for wildlife and timber in managed forest ecosystems. *Forest Science*, 38(3):489–508, 1992.
- [55] J. Karlsson, M. Rönnqvist y J. Bergström. An optimization model for annual harvest planning. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(8):1747–1754, 2004.
- [56] J. Kennedy. Applications of dynamic programming to agriculture, forestry and fisheries: Review and prognosis. *Review of Marketing and Agricultural Economics*, 49(3):141–173, 1981.
- [57] J. Lappi. *JLP: A Linear Programming Package for Management Planning*. Finnish Forest Research Institute, Suonenjoki, Finlandia, 1992.
- [58] S. Laukkanen, T. Palander y J. Kangas. Applying voting theory in participatory decision support for sustainable timber harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(7):1511–1524, 2004.
- [59] G. Lledó. Evaluación del trozado para rodales de pino insigne en canchas de forestal Bío-Bío S.A. Reporte técnico, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2004.
- [60] P. Lohmander y S. Mohammadi. Optimal continuous cover forest management in an uneven-aged forest in the north de Iran. *Journal of Applied Sciences*, 8(11):1995–2007, 2008.
- [61] D.P. Loucks. The development of an optimal program for sustained-yield management. *Journal of Forestry*, 62(7):485–490, 1964.
- [62] H. Marshall. Log merchandizing model used in mechanical harvesting. En A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores, *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pp. 379–389. Springer, New York, EUA, 2007.

- 
- [63] D.L. Martell. Forest fire management. En A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores, *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pp. 489–509. Springer, New York, EUA, 2007.
- [64] D.L. Martell, E.A. Gunn y A. Weintraub. Forest management challenges for operational researchers. *European Journal of Operational Research*, 104(1):1–17, 1998.
- [65] I. Martins, M. Constantino y J.G. Borges. A column generation approach for solving a non-temporal forest harvest model with spatial structure constraints. *European Journal of Operational Research*, 161(2):478–498, 2005.
- [66] J. Mas Porrás. El sistema silvícola de cortas a matarrasa (SISCOMA), una posible alternativa para renovar ordenadamente bosques improductivos en el Estado de Michoacán. Reporte técnico, Comisión Forestal del Estado de Michoacán, Morelia, Michoacán, 2009.
- [67] M.E. McDill, S.A. Rebaín y J. Braze. Harvest scheduling with area-based adjacency constraints. *Forest Science*, 48(4):631–642, 2002.
- [68] A.J. McNaughton, M. Rönnqvist y D.M. Ryan. The scheduling of forest harvesting with adjacency constraints. En *Proceedings of the 33rd Annual Conference, Operational Research Society of New Zealand*, pp. 28–33, Auckland, New Zealand, 1998.
- [69] A.T. Murray. Spatial restrictions in harvest scheduling. *Forest Science*, 45(1):45–52, 1999.
- [70] A.T. Murray. Spatial environmental concerns. En A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores, *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pp. 419–429. Springer, New York, EUA, 2007.

- 
- [71] A.T. Murray, M. Goycoolea y A. Weintraub. Incorporating average and maximum area restrictions in harvest scheduling models. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(2):456–464, 2004.
- [72] A.T. Murray y A. Weintraub. Scale and unit specification influences in harvest scheduling with maximum area restrictions. *Forest Science*, 48(4):779–789, 2002.
- [73] D.I. Navon. Timber ram: A long-range planning method for commercial timber lands under multiple-use management. Research paper PSW–RP–70, US Department of Agriculture, Berkeley, EUA, 1971.
- [74] J. Nelson y J.D. Brodie. Comparison of a random search algorithm and mixed integer programming for solving area-based forest plans. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(7):934–942, 1990.
- [75] K. Öhman y L.O. Eriksson. Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. *Forest Ecology and Management*, 161(1-3):221–230, 2002.
- [76] J.A. Ordóñez, B.H.J. de Jong y O. Masera. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques*, 7(2):27–47, 2001.
- [77] J.A.B. Ordóñez Díaz. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias*, 90:37–42, 2008.
- [78] C.D. Palma, W. Cui, D.L. Martell, D. Robak y A. Weintraub. Assessing the impact of stand-level harvests on the flammability of forest landscapes. *International Journal of Wildland Fire*, 16(5):584–592, 2007.
- [79] M. Palmgren, M. Rönnqvist y P. Värbrand. A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound. *International Transactions in Operational Research*, 10(5):433–447, 2003.

- 
- [80] G. Pérez-Verdín, J.C. Hernández-Díaz, M.A. Márquez-Linares y A. Tecle. Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango, México. *Madera y Bosques*, 15(1):27–46, 2009.
- [81] M.H. Phua y M. Minowa. A GIS-based multi-criteria decision making approach to forest conservation planning at a landscape scale: A case study in the Kinabalu area, Sabah, Malaysia. *Landscape and Urban Planning*, 71(2–4):207–222, 2005.
- [82] M. Prodan, R. Peters, F. Cox y P. Real. *Mensura forestal*. Editorial Agroamérica, San José, Costa Rica, 1997.
- [83] T. Pukkala y M. Kurttila. Examining the performance of six heuristic optimisation techniques in different forest planning problems. *Silva Fennica*, 39(1):67–80, 2005.
- [84] T. Pukkala, E. Lähde y O. Laiho. Using optimization for fitting individual-tree growth models for uneven-aged stands. *European Journal of Forest Research*, 130(5):829–839, 2011.
- [85] S. Rebain y M.E. McDill. Can mature patch constraints mitigate the fragmenting effects of harvest opening size restrictions? *International Transactions in Operational Research*, 10(5):499–513, 2003.
- [86] W. Richards y A. Gunn. A model and tabu search method to optimize stand harvest and road construction schedules. *Forest Science*, 46(2):188–203, 2000.
- [87] K. Riitters, J.D. Brodie y D.W. Hann. Dynamic programming for optimization of timber production and grazing in ponderosa pine. *Forest Science*, 28(3):517–526, 1982.
- [88] M. Rönnqvist. Optimization in forestry. *Mathematical Programming*, 97(1):267–284, 2003.
- [89] L. C. Ruelas Monjardín y R. Dávalos Sotelo. La industria forestal del estado de Chihuahua. *Madera y Bosques*, 5(2):79–91, 1999.

- [90] B.J. Schulte, J. Buongiorno y K. Skog. Optimizing uneven-aged management of loblolly pine stands. En *Proceedings of the Society of American Foresters 1998 National Convention*, pp. 306–318, Traverse City, EUA, 1998.
- [91] SEMARNAT. Atlas geográfico del medio ambiente y recursos naturales. Reporte técnico, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F., 2006.
- [92] SEMARNAT. Anuario estadístico de la producción forestal 2009. Reporte técnico, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F., 2011.
- [93] J. Sessions, P. Bettinger y G. Murphy. Heuristics in forest planning. En A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores, *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99 de *International Series in Operations Research & Management Science*, pp. 431–448. Springer, New York, EUA, 2007.
- [94] S. Talavera Romero. Desarrollo de un modelo de programación lineal para el manejo de ecosistemas forestales. Tesis de maestría, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, México, 2002.
- [95] E.F. Thompson, B.G. Halterman, T.J. Lyon y R.L. Miller. Integrating timber and wildlife management planning. *The Forestry Chronicle*, 49(6):247–250, 1973.
- [96] B. Vargas-Larreta, J. Corral-Rivas, O. Aguirre-Calderón y J. Nagel. Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del simulador BWINPro7. *Madera y Bosques*, 16(4):81–104, 2010.
- [97] J.R. Vera, A. Weintraub, M. Koenig, G. Bravo, M. Guignard y F. Barahona. A lagrangian relaxation approach for a machinery location problem in forest harvesting. *Pesquisa Operacional*, 23(1):111–128, 2003.

- 
- [98] J.P. Vielma, A.T. Murray, D.M. Ryan y A. Weintraub. Improving computational capabilities for addressing volume constraints in forest harvest scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 176(2):1246–1264, 2007.
- [99] K. von Gadow, S. Sánchez Orois y O.A. Aguirre Calderón. Manejo forestal con bases científicas. *Madera y Bosques*, 10(2):3–16, 2004.
- [100] A. Weintraub y A. Cholaký. A hierarchical approach to forest planning. *Forest Science*, 37(2):439–460, 1991.
- [101] A. Weintraub, R. Epstein, R. Morales, J. Seron y P. Traverso. A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries. *Interfaces*, 26(4):1–12, 1996.
- [102] A. Weintraub, C. Romero, T. Bjørndal y R. Epstein, editores. *Handbook of Operations Research in Natural Resources*, volumen 99 de *International Series in Operations Research & Management Science*. Springer, New York, EUA, 2007.
- [103] L.A. Wolsey. *Integer Programming*. Wiley, New York, EUA, 1998.

## APÉNDICE A

# PARÁMETROS MADERABLES

---

En la Sección 3.4 fueron enumeradas las fórmulas para estimar la existencia real presente y futura de volumen anual por especie dentro de un subrodal. En este anexo se detallan las fórmulas complementarias para obtener por período de cosecha el volumen y el beneficio económico por conjunto factible para el modelo ARM-1 y por unidad de manejo para el modelo URM-1.

### A.1 CÁLCULO DE LA POSIBILIDAD LEÑOSA PERIÓDICA POR SUBRODAL

A continuación se definen las fórmulas, conjuntos, índices y parámetros para calcular la existencia real presente y futura por subrodal (sumando el volumen que aportan todas las especies) y por período de cosecha (lapsos de  $p$  años) tal y como lo requieren los modelos.

*Conjuntos, índices y parámetros*

$\Omega^s$  =conjunto de subrodales en el bosque;  $s \in \Omega^s$ ,

$\Omega^e$  =conjunto de especies de árbol en el bosque;  $e \in \Omega^e$ ,

$\Omega^{es}$  =conjunto de especies de árbol  $e$  existentes en el subrodal  $s$ ;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$T$  =conjunto de períodos de cosecha;  $t \in T$ ,

$p$  =duración (en años) de un período de cosecha,

$\alpha$  =tiempo futuro (en años) a pronosticar el volumen de existencia leñosa,

$v_{e,s,t=1}$  =volumen de existencia leñosa ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ) de la especie de árbol  $e$  dentro del subrodal  $s$  en el período de cosecha  $t = 1$ ;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s, t \in T$ ,

$v_{e,s,t>1}$  =volumen de existencia leñosa ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ) de la especie de árbol  $e$  dentro del subrodal  $s$  en un período de cosecha  $t > 1$ ;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s, t \in T$ ,

$v_{st}$  =volumen total de existencia leñosa ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ) de la especie de árbol  $e$  dentro del subrodal  $s$  en el período de cosecha  $t$ ;  $s \in \Omega^s, t \in T$

$ERA_{es}$  =existencia real actual ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$ , que representa la existencia presente de volumen en rollo total de una especie de árbol dentro de una unidad;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$ERF_{es\alpha}$  =existencia real futura ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ) de la especie  $e$  en el subrodal  $s$  en un número de años  $\alpha$ ;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$

Las expresiones para calcular la posibilidad leñosa periódica por subrodal son detalladas a continuación.

$$v_{e,s,t=1} = ERA_{es}, \quad (\text{A.1})$$

$$v_{e,s,t>1} = ERF_{es\alpha} \quad \alpha \text{ tal que } \alpha = p \cdot t - 1, \quad (\text{A.2})$$

$$v_{st} = \sum_{e \in \Omega^{es}} v_{e,s,t}, \quad (\text{A.3})$$

Las ecuaciones (A.1) transfieren el valor entregado por las ecuaciones de existencia real actual (3.32) en el volumen de la especie  $e$  en el subrodal  $s$  del período de cosecha  $t=1$ , equivalente en este trabajo al presente o tiempo en el que han sido tomados los datos de campo. Las ecuaciones (A.2) transfieren el valor de las ecuaciones de existencia real futura (3.31) en el volumen de la especie  $e$  dentro del subrodal  $s$  en un período de cosecha  $t > 1$ . Las ecuaciones (A.3) permiten obtener el volumen



total de madera en el subrodal  $s$  en el período  $t$  en base al volumen acumulado de las especies  $e$  presentes en el subrodal.

Complementariamente, se requiere sumar el volumen de los subrodales que forman los bloques de cosecha en cada modelo.

*Conjuntos, índices y parámetros*

$\Omega^s$  =conjunto de subrodales existentes en el bosque;  $s \in \Omega^s$ ,

$I$  =conjunto de unidades básicas (propias del modelo URM-1) existentes en el bosque;  $i \in I$ ,

$\Omega^F$  =colección de conjuntos factibles (propios del modelo ARM-1) en  $G = (V, E)$ ;  $F \in \Omega^F$ ,

$\Omega^{si}$  =conjunto de subrodales  $s$  contenidos en la unidad básica  $i$ ;  $s \in \Omega^s, i \in I$ ,

$v_{it}$  =volumen de existencia leñosa ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ) dentro de la unidad de manejo  $i$  en el período de cosecha  $t$ ;  $i \in I, t \in T$

$v_{Ft}$  =volumen de existencia leñosa ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ) dentro del conjunto factible  $F$  en el período de cosecha  $t$ ;  $F \in \Omega^F, t \in T$

Las fórmulas de volumen por bloque de cosecha son las siguientes.

$$v_{it} = \sum_{s \in \Omega^{si}} v_{st}, \quad (\text{A.4})$$

$$v_{Ft} = \sum_{s \in F} v_{st} \quad (\text{A.5})$$

Las ecuaciones (A.4) suman el volumen de los subrodales que forman una unidad de manejo en el modelo URM-1. Las ecuaciones (A.5) suman el volumen de los subrodales que forman un conjunto factible en el modelo ARM-1.

## A.2 CÁLCULO DEL BENEFICIO ECONÓMICO POR SUBRODAL Y POR PERÍODO

En dependencia de la posibilidad leñosa es posible predecir el beneficio económico que un bloque de manejo puede generar al ser cosechado en un período específico. Sin embargo, no es posible determinar de forma directa el beneficio económico de un subrodal a partir del volumen de madera existente cuando éste se encuentra poblado por más de una especie de árbol. Cuando esto sucede es necesario definir las siguientes consideraciones.

*Conjuntos, índices y parámetros*

$I$  =conjunto de unidades básicas (propias del modelo URM-1) existentes en el bosque;  $i \in I$ ,

$\Omega^F$  =colección de conjuntos factibles (propios del modelo ARM-1) en  $G = (V, E)$ ;  $F \in \Omega^F$ ,

$\Omega^e$  =conjunto de especies de árbol dentro del bosque a manejar;  $e \in \Omega^e$ ,

$\Omega^{es}$  =conjunto de especies de árbol  $e$  existentes en el subrodal  $s$ ;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s$ ,

$\Omega^{si}$  =conjunto de subrodales  $s$  contenidos en la unidad básica  $i$ ;  $s \in \Omega^s, i \in I$ ,

$c_e$  =costo de producción en pesos (fijo en el tiempo) de la madera de la especie  $e$  en rollo por metro cúbico;  $e \in \Omega^e$ ,

$p_e$  =precio de venta en aserradero en pesos (fijo en el tiempo) de la madera de la especie  $e$  en rollo por metro cúbico;  $e \in \Omega^e$ ,

$u_e$  =utilidad por metro cúbico (fija en el tiempo) de la madera de la especie  $e$ ;  $e \in \Omega^e$ ,

$\beta_{est}$  =beneficio económico en pesos generado por la cosecha de la especie  $e$  presente en el subrodal  $s$  en el período  $t$ ;  $e \in \Omega^e, s \in \Omega^s, t \in T$ ,

$\beta_{st}$  =beneficio económico en pesos al cosechar el subrodal  $s$  en el período  $t$ ;  $s \in \Omega^s, t \in T$ ,

$\beta_{it}$  =beneficio económico en pesos al cosechar la unidad básica  $i$  en el período  $t$ ;  $i \in I, t \in T$ ,

$\beta_{Ft}$  =beneficio económico en pesos al cosechar el conjunto factible  $F$  en el período  $t$ ;  $F \in \Omega^F, t \in T$ ,

Las expresiones para calcular el beneficio económico por subrodal, unidad básica y conjunto factible se indican a continuación.

$$u_e = p_e - c_e, \quad (\text{A.6})$$

$$\beta_{est} = v_{est} \cdot u_e, \quad (\text{A.7})$$

$$\beta_{st} = \sum_{e \in \Omega^{es}} \beta_{est}, \quad (\text{A.8})$$

$$\beta_{it} = \sum_{s \in \Omega^{si}} \beta_{st}, \quad (\text{A.9})$$

$$\beta_{Ft} = \sum_{s \in F} \beta_{st} \quad (\text{A.10})$$

Las ecuaciones (A.6) determinan la utilidad que genera determinada especie arbórea. Las ecuaciones (A.7) permiten conocer el beneficio económico generado al cosechar la especie  $e$  existente en el subrodal  $s$  en el período  $t$ . Las ecuaciones (A.8) representan el beneficio al cosechar el subrodal  $s$  dentro del período  $t$ . Las ecuaciones (A.9) permiten conocer el beneficio obtenido al cosechar la unidad básica del modelo URM-1,  $i$ , en el período  $t$ . Las ecuaciones (A.10) proporcionan el beneficio económico obtenido al cosechar el conjunto factible del modelo ARM-1,  $F$ , en el período  $t$ .

## APÉNDICE B

# PREPROCESAMIENTO

---

## B.1 RELACIÓN DE CONJUNTOS FACTIBLES POR UNIDAD

Una de las aplicaciones diseñadas para estimar los datos de configuración espacial de una instancia dentro del modelo ARM-1 es la enumeración por unidad básica -subrodal- de los conjuntos factibles que lo contienen (ver Sección 4.1.2). El pseudocódigo 3 detalla la lógica de esta implementación computacional.

---

**Pseudocódigo 3** Relación de conjuntos factibles por unidad básica (ARM-1)

---

**Entrada:**  $R[F]$ : Arreglo de dimensión  $n$  que contiene a los conjuntos factibles  $F$ ;

$R[i]$ : Arreglo de dimensión  $m$  que contiene a las unidades básicas  $i$ ;

**Salida:**  $F[i]$ : Arreglo de conjuntos factibles  $F$  conteniendo a la unidad  $i$

**para todo**  $i = 1$  hasta  $m$  **hacer**

**para todo**  $F = 1$  hasta  $n$  **hacer**

**si**  $(i \in F)$  **entonces**

$F[i] := F[i] \cup \{F\}$

**fin si**

**fin para**

**fin para**

**devolver**  $F[i]$

---

## B.2 RELACIÓN DE CONJUNTOS FACTIBLES POR CLIQUE MAXIMAL

Como se explica en la sección 4.1.2, la obtención de conjuntos factibles y de cliques maximales en dos diferentes algoritmos se debe complementar obteniendo su interrelación en un tercer algoritmo, el cual se describe en el pseudocódigo 4.

---

**Pseudocódigo 4** Relación de conjuntos factibles por clique maximal (ARM-1)

---

**Entrada:**  $R[F]$ : Arreglo de dimensión  $m$  que contiene a los conjuntos factibles  $F$

$R[K]$ : Arreglo de dimensión  $n$  que contiene a los cliques maximales  $K$

**Salida:**  $F[K]$ : Arreglo de intersecciones entre conjuntos factibles  $F$  y cliques maximales  $K$

```
para todo  $K = 1$  hasta  $n$  hacer
  para todo  $F = 1$  hasta  $m$  hacer
    si  $(F \cap K)$  entonces
       $F[K] := F[K] \cup \{F\}$ 
    fin si
  fin para
fin para
devolver  $F[K]$ 
```

---

## APÉNDICE C

# TABLAS DE POSIBILIDAD LEÑOSA

---

Los siguientes datos representan las existencias de volumen actuales y futuras para siete períodos de cosecha en los 168 subrodales del predio ejidal El Niño y San Antonio, de acuerdo con las fórmulas descritas en la sección 3.4 y en el Apéndice A.

Tabla C.1: Posibilidad leñosa ( $m^3/RTA$ ), subrodales 1 a 25

SUB- RODAL	V ACTUAL	V 10 AÑOS	V 20 AÑOS	V 30 AÑOS	V 40 AÑOS	V 50 AÑOS	V 60 AÑOS
1	397	478	559	613	651	651	651
2	242	293	343	389	389	389	389
3	337	405	473	541	554	554	554
4	596	1,833	1,833	1,833	1,833	1,833	1,833
5	457	966	966	966	966	966	966
6	1,025	1,244	1,244	1,244	1,244	1,244	1,244
7	751	875	1,000	1,124	1,162	1,162	1,162
8	231	273	315	357	382	382	382
9	543	644	644	644	644	644	644
10	834	834	834	834	834	834	834
11	345	345	345	345	345	345	345
12	869	869	869	869	869	869	869
13	720	720	720	720	720	720	720
14	503	503	503	503	503	503	503
15	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175	1,175
16	876	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226	1,226
17	624	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665	1,665
18	843	2,792	2,792	2,792	2,792	2,792	2,792
19	762	667	667	667	667	667	667
20	326	1,539	1,539	1,539	1,539	1,539	1,539
21	770	896	1,022	1,122	1,122	1,122	1,122
22	728	881	1,033	1,186	1,323	1,323	1,323
23	763	923	1,083	1,242	1,386	1,386	1,386
24	376	447	518	589	660	661	661
25	376	447	518	589	660	661	661

Tabla C.2: Posibilidad leñosa ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ), subrodiales 26 a 75

SUB- RODAL	V ACTUAL	V 10 AÑOS	V 20 AÑOS	V 30 AÑOS	V 40 AÑOS	V 50 AÑOS	V 60 AÑOS
26	615	615	615	615	615	615	615
27	592	592	592	592	592	592	592
28	625	625	625	625	625	625	625
29	939	939	939	939	939	939	939
30	701	701	701	701	701	701	701
31	738	738	738	738	738	738	738
32	1,556	1,556	1,556	1,556	1,556	1,556	1,556
33	873	873	873	873	873	873	873
34	1,461	1,461	1,461	1,461	1,461	1,461	1,461
35	1,530	1,530	1,530	1,530	1,530	1,530	1,530
36	1,530	1,530	1,530	1,530	1,530	1,530	1,530
37	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085	1,085
38	1,752	1,752	1,752	1,752	1,752	1,752	1,752
39	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920
40	1,309	1,309	1,309	1,309	1,309	1,309	1,309
41	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069
42	2,142	2,142	2,142	2,142	2,142	2,142	2,142
43	2,083	2,083	2,083	2,083	2,083	2,083	2,083
44	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050	4,050
45	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024
46	1,487	1,487	1,487	1,487	1,487	1,487	1,487
47	1,923	1,923	1,923	1,923	1,923	1,923	1,923
48	1,526	1,526	1,526	1,526	1,526	1,526	1,527
49	572	572	572	572	572	572	572
50	601	601	601	601	601	601	601
51	1,386	2,771	2,771	2,771	2,771	2,771	2,771
52	1,361	1,361	1,361	1,361	1,361	1,361	1,361
53	1,437	1,437	1,437	1,437	1,437	1,437	1,437
54	1,442	4,175	4,175	4,175	4,175	4,175	4,175
55	1,800	5,197	5,197	5,197	5,197	5,197	5,197
56	605	1,875	1,875	1,875	1,875	1,875	1,875
57	470	2,456	2,456	2,456	2,456	2,456	2,456
58	949	422	422	422	422	422	422
59	1,128	1,128	1,128	1,128	1,128	1,128	1,128
60	705	705	705	705	705	705	705
61	1,623	1,623	1,623	1,623	1,623	1,623	1,623
62	642	642	642	642	642	642	642
63	505	505	505	505	505	505	505
64	630	630	630	630	630	630	630
65	657	657	657	657	657	657	657
66	421	421	421	421	421	421	421
67	524	524	524	524	524	524	524
68	799	799	799	799	799	799	799
69	429	429	429	429	429	429	429
70	429	429	429	429	429	429	429
71	496	496	496	496	496	496	496
72	560	560	560	560	560	560	560
73	740	740	740	740	740	740	740
74	431	431	431	431	431	431	431
75	431	431	431	431	431	431	431

Tabla C.3: Posibilidad leñosa ( $\text{m}^3/\text{RTA}$ ), subrodales 76 a 12

SUB- RODAL	V ACTUAL	V 10 AÑOS	V 20 AÑOS	V 30 AÑOS	V 40 AÑOS	V 50 AÑOS	V 60 AÑOS
76	565	565	565	565	565	565	565
77	595	595	595	595	595	595	595
78	507	507	507	507	507	507	507
79	1,883	1,883	1,883	1,883	1,883	1,883	1,883
80	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250	2,250
81	2,383	2,383	2,383	2,383	2,383	2,383	2,383
82	1,214	1,214	1,214	1,214	1,214	1,214	1,214
83	948	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080	1,080
84	982	1,119	1,119	1,119	1,119	1,119	1,119
85	1,290	1,290	1,290	1,290	1,290	1,290	1,290
86	859	859	859	859	859	859	859
87	818	818	818	818	818	818	818
88	822	822	822	822	822	822	822
89	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982	1,982
90	942	942	942	942	942	942	942
91	487	487	487	487	487	487	487
92	484	484	484	484	484	484	484
93	578	578	578	578	578	578	578
94	833	833	833	833	833	833	833
95	404	404	404	404	404	404	404
96	596	596	596	596	596	596	596
97	1,401	1,401	1,401	1,401	1,401	1,401	1,401
98	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779	1,779
99	1,652	1,652	1,652	1,652	1,652	1,652	1,652
100	843	843	843	843	843	843	843
101	791	791	791	791	791	791	791
102	2,104	2,104	2,104	2,104	2,104	2,104	2,104
103	1,661	1,661	1,661	1,661	1,661	1,661	1,661
104	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768	2,768
105	2,151	2,151	2,151	2,151	2,151	2,151	2,151
106	1,896	1,896	1,896	1,896	1,896	1,896	1,896
107	2,207	2,207	2,207	2,207	2,207	2,207	2,207
108	1,771	1,771	1,771	1,771	1,771	1,771	1,771
109	1,062	1,062	1,062	1,062	1,062	1,062	1,062
110	966	966	966	966	966	966	966
111	2,064	2,064	2,064	2,064	2,064	2,064	2,064
112	82	82	82	82	82	82	82
113	94	94	94	94	94	94	94
114	94	94	94	94	94	94	94
115	1,304	3,912	3,912	3,912	3,912	3,912	3,912
116	2,445	2,183	2,183	2,183	2,183	2,183	2,183
117	651	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069	1,069
118	2,053	1,320	1,320	1,320	1,320	1,320	1,320
119	376	447	518	589	660	661	661
120	376	447	518	589	660	661	661
121	47	47	47	47	47	47	47
122	64	64	64	64	64	64	64
123	406	463	2,199	2,199	2,199	2,199	2,199
124	637	637	637	637	637	637	637
125	774	774	774	774	774	774	774





## APÉNDICE D

# TABLAS DE BENEFICIO ECONÓMICO

---

En este apéndice se presenta el beneficio económico para los 168 subrodales del ejido El Niño y San Antonio dentro de siete períodos de cosecha, de acuerdo con las fórmulas descritas en la sección 3.4 y en el Apéndice A.

Tabla D.1: Beneficio económico (pesos), subrodales 1 a 25

SUB- RODAL	V ACTUAL	V 10 AÑOS	V 20 AÑOS	V 30 AÑOS	V 40 AÑOS	V 50 AÑOS	V 60 AÑOS
1	147,726	179,055	210,384	231,355	246,167	246,156	246,156
2	93,841	113,517	133,193	150,901	150,932	150,932	150,932
3	130,806	157,115	183,423	209,731	214,993	214,952	214,952
4	231,135	711,184	711,184	711,184	711,184	711,184	711,184
5	177,465	374,648	374,648	374,648	374,648	374,648	374,648
6	397,653	482,864	482,864	482,864	482,864	482,864	482,864
7	291,296	339,590	387,883	436,177	450,665	450,856	450,856
8	89,659	105,925	122,190	138,456	148,215	148,216	148,216
9	210,493	249,961	249,961	249,961	249,961	249,961	249,961
10	323,677	323,677	323,677	323,677	323,677	323,677	323,677
11	133,984	133,984	133,984	133,984	133,984	133,984	133,984
12	337,190	337,190	337,190	337,190	337,190	337,190	337,190
13	279,314	279,314	279,314	279,314	279,314	279,314	279,314
14	195,298	195,298	195,298	195,298	195,298	195,298	195,298
15	455,855	455,855	455,855	455,855	455,855	455,855	455,855
16	339,828	475,759	475,759	475,759	475,759	475,759	475,759
17	242,282	646,084	646,084	646,084	646,084	646,084	646,084
18	327,010	1,083,220	1,083,220	1,083,220	1,083,220	1,083,220	1,083,220
19	295,832	258,853	258,853	258,853	258,853	258,853	258,853
20	126,313	597,117	597,117	597,117	597,117	597,117	597,117
21	298,795	347,581	396,367	435,396	435,336	435,336	435,336
22	282,617	341,756	400,896	460,036	513,261	513,248	513,248
23	296,160	358,134	420,107	482,081	537,857	537,844	537,844
24	145,794	173,394	200,993	228,593	256,192	256,274	256,274
25	145,794	173,394	200,993	228,593	256,192	256,274	256,274







## APÉNDICE E

# MAPAS

---

Para apoyar visualmente la información presentada en el trabajo relacionada con el plano del bosque, en este apartado se ilustran a través de mapas las características de distribución espacial de edad del predio forestal presentado como caso de estudio y las soluciones en forma de calendario de cosechas para seis casos o variantes experimentales considerados como representativos de las pruebas computacionales hechas el Capítulo 5.

### E.1 DISTRIBUCIÓN DE EDADES EN EL ESPACIO

La antigüedad de los árboles del bosque puede ser un factor decisivo cuando se maneja un bosque bajo consideraciones ligadas a la conservación de recursos, ya que éstos pueden ser controlados en el tiempo por medio de restricciones de edad. En la Figura E.1 se detalla la distribución de edad los árboles del caso de estudio, parámetro del que dependen la decisiones relacionadas con el umbral de madurez biológica, que evitan la cosecha de árboles menores a 60 años (restricciones 3.6 y 3.21), y con la asignación de áreas de bosque nativo, las cuales deben cumplir el requisito de alcanzar 100 años al final del horizonte de planificación (restricciones 3.9 y 3.24).

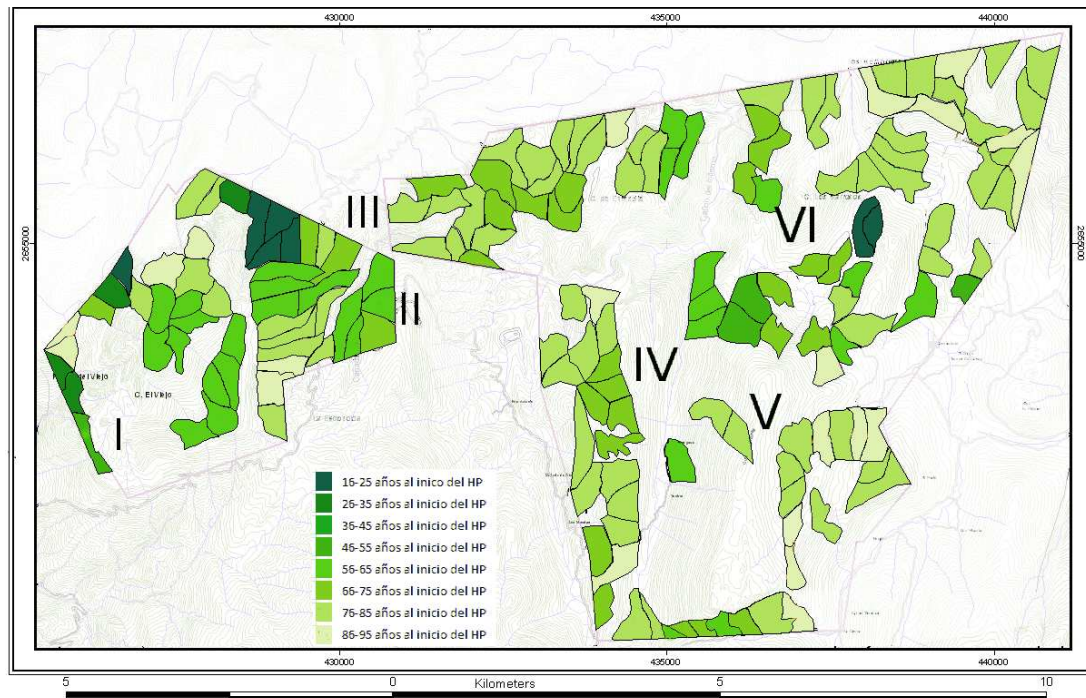


Figura E.1: Distribución de edades en el caso de estudio al inicio del horizonte de planificación.

## E.2 MAPAS DE SOLUCIÓN

En esta sección se detallan a nivel de mapa seis calendarios de cosecha para el caso de estudio (Figuras E.2 a E.7) con el objetivo de extender la descripción de resultados de las pruebas computacionales expuestas en el Capítulo 5. Las soluciones presentadas se consideran representativas al trabajar con todas las restricciones de los modelos y manejar las consideraciones por defecto de volumen ( $\pm 10\%$ ), distancias máximas ( $D_1$ ), barrera de regeneración (2 períodos), umbral de madurez (60 años) y área mínima de bosque nativo (10% del área total) empleadas durante el estudio. Los valores objetivo, tiempos de ejecución y hectáreas asignadas para estas instancias se pueden consultar en la Tabla 5.8 de la Sección 5.5.

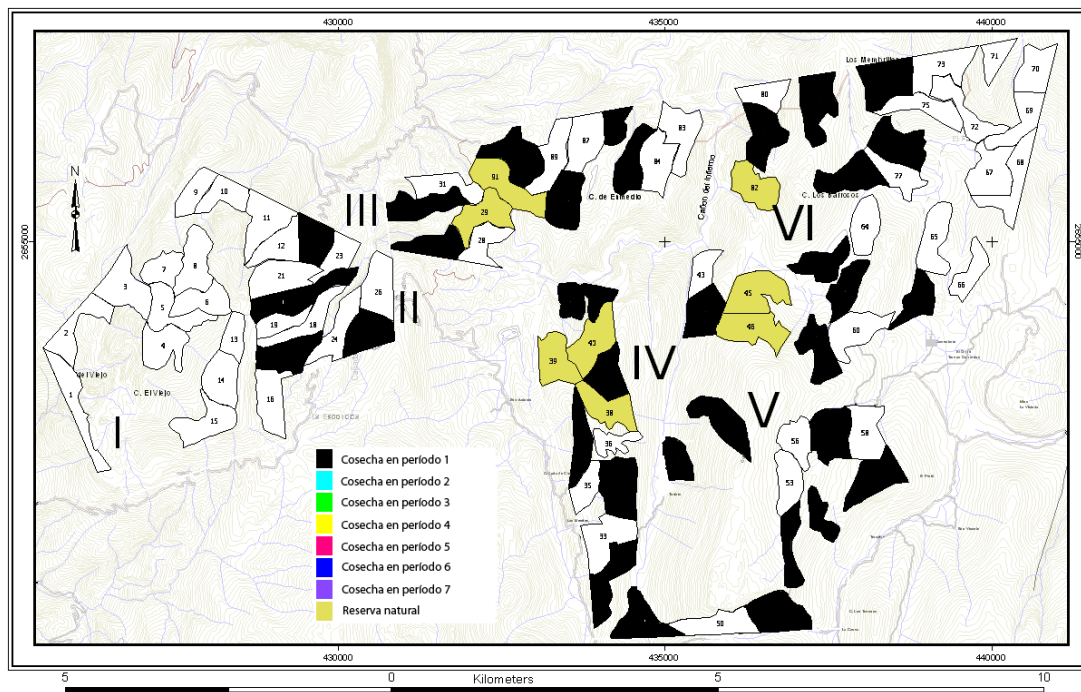


Figura E.2: Solución de URM-1 para un período y parámetros estándar.

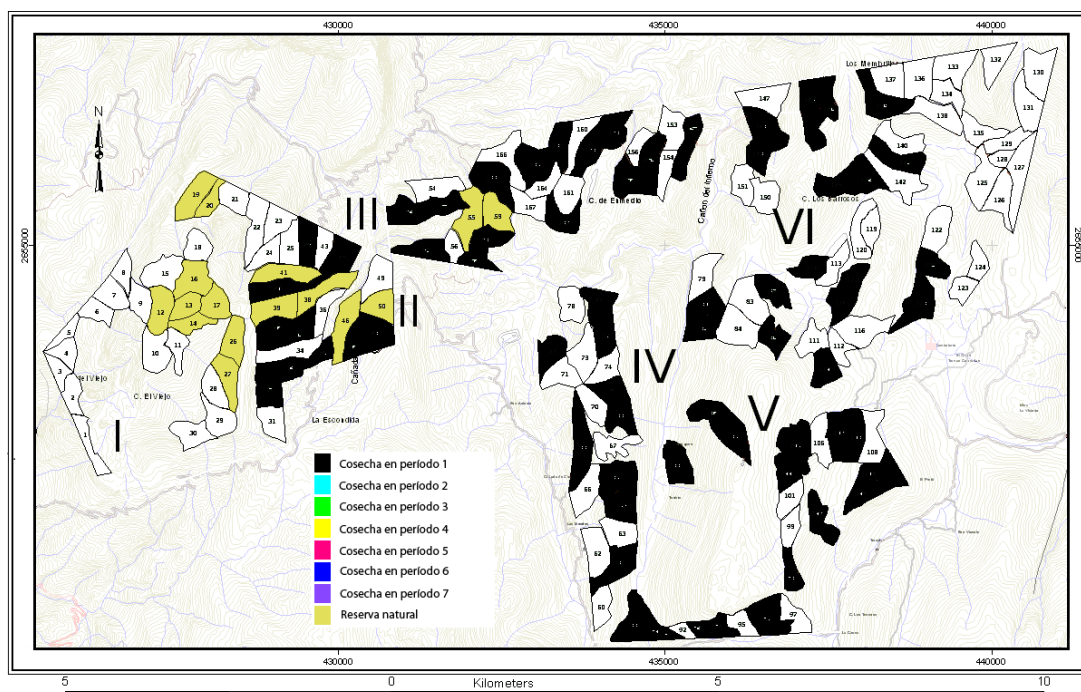


Figura E.3: Solución de ARM-1 para un período y parámetros estándar.



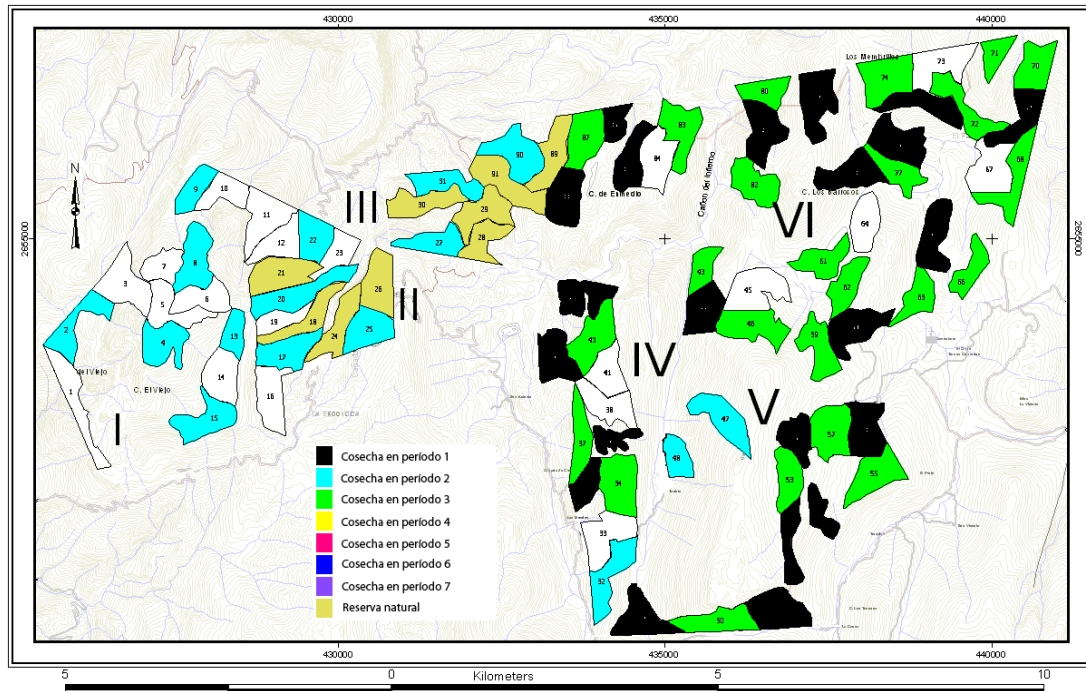


Figura E.4: Solución de URM-1 para tres períodos y parámetros estándar.

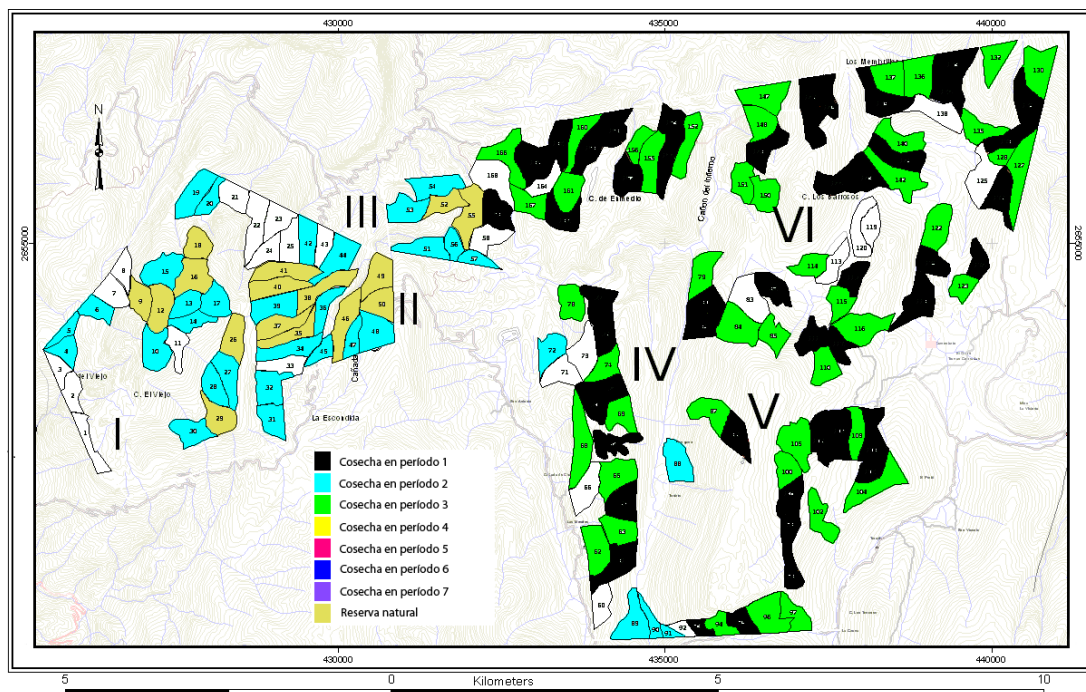


Figura E.5: Solución de ARM-1 para tres períodos y parámetros estándar.

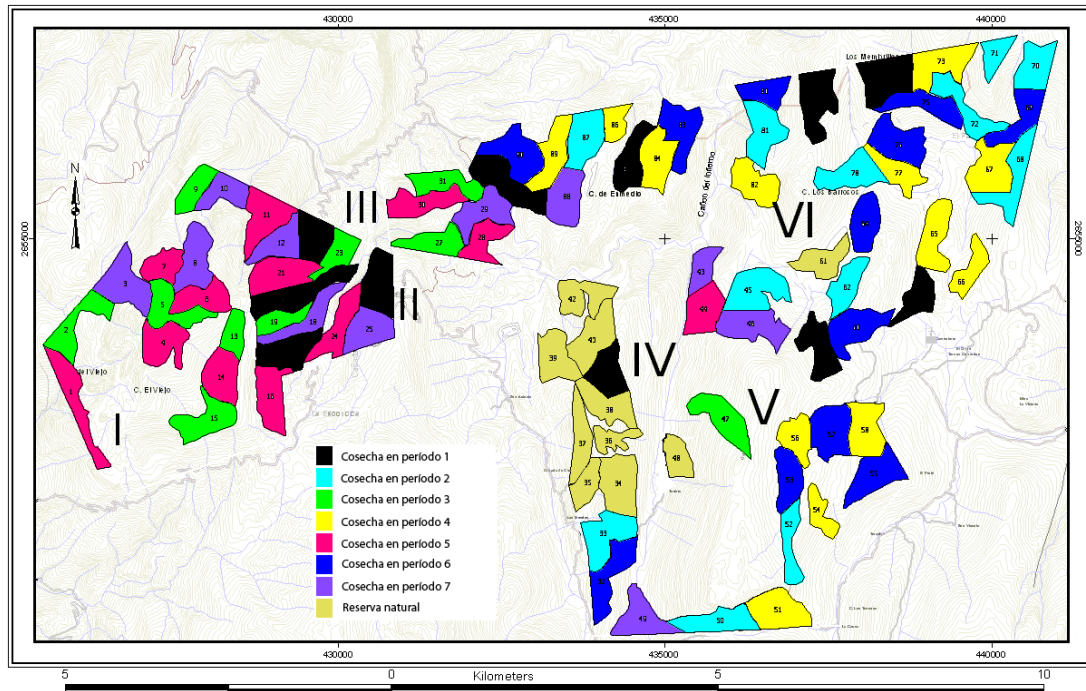


Figura E.6: Solución de URM-1 para siete períodos y parámetros estándar.

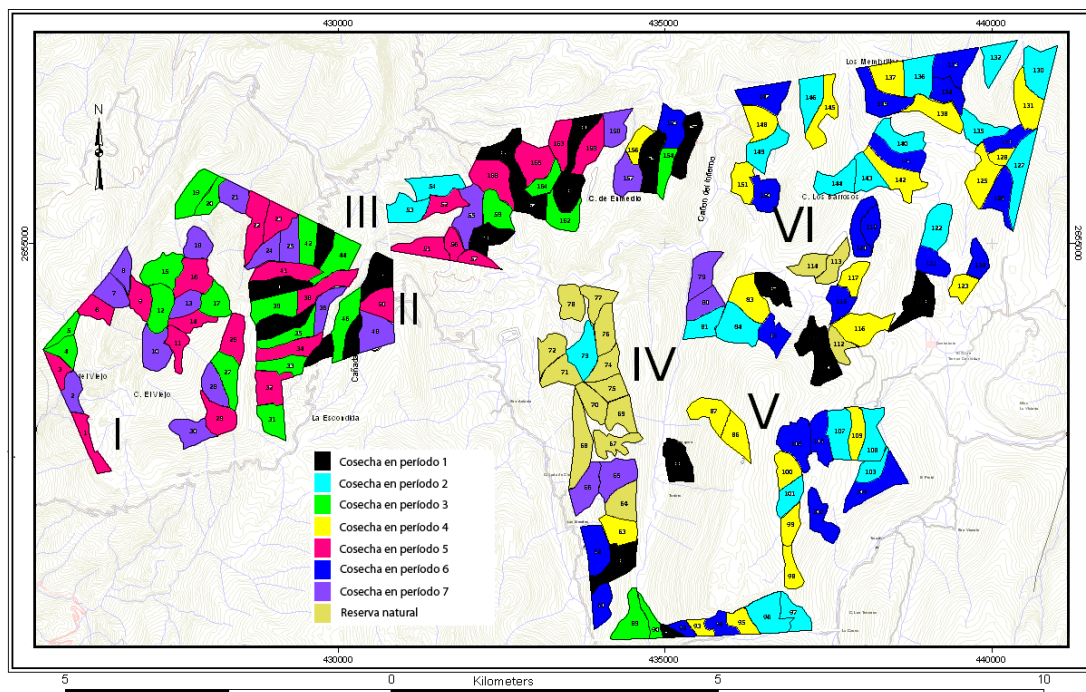


Figura E.7: Solución de ARM-1 para siete períodos y parámetros estándar.

# FICHA AUTOBIOGRÁFICA

---

Carlos Beltrán Pérez

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

## UN PROBLEMA DE GESTIÓN FORESTAL CON REQUERIMIENTOS DE ADYACENCIA EN UNIDADES TERRITORIALES

Nací en México, Distrito Federal el 24 de mayo de 1976. Soy el tercer hijo del Sr. Manuel Luis Beltrán Sánchez y de la Sra. Luz María Pérez Rodríguez. Me gradué de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco en el año 2008 como Ingeniero Industrial con especialidad en Tecnologías para la Manufactura. Colaboré como consultor de seguridad e higiene industrial y proyectista de distribución de planta entre 2007 y 2009 con la empresa mexiquense de productos metálicos PROMAC S.A. de C.V. Inicié mis estudios de Maestría en Ciencias en el Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas de la UANL, donde se realizó este trabajo de tesis con la asesoría del Dr. Roger Z. Ríos Mercado. En el marco de este trabajo, realicé una estancia de investigación en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Chile, en la Ciudad de Santiago, de septiembre de 2011 a enero de 2012 bajo la supervisión del Dr. Andrés F. Weintraub Pohorille.